



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
*République Algérienne Démocratique
et Populaire*



*Ministère de L'Enseignement
Supérieur et de la Recherche Scientifique*

Université Abbas Laghrou Khanchela
Faculté de Sciences et de technologie
Département de Génie Industriel

Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du Diplôme de **Master "LMD"**
Spécialité : **Automatique et informatique industrielle**
Thème :

***Gestion et contrôle du transfert d'énergie dans un
système pile à combustible - supercondensateur***

Présenté par :

- HOGGAS Ahmed
- MARIR Amel

Soutenu le 18 / 06 /2023

Jury de Soutenance :

- Dr. Beddiaf Abdelaziz
- Dr. REZZAK Daoud
- Dr. Djamai Djemoui

**Président
Encadreur
Examineur**

Promotion 2022/2023

Remerciements

*Nous remercions Dieu Tout-Puissant qui nous a permis de mener à bien mémoire et qui l'a inspiré avec santé, bien-être et détermination
Dieu merci, merci beaucoup*

Ce n'est pas parce que la tradition exige que cette page se trouve dans ce travail, mais par ce que les gens à qui s'adressent nos remerciements les méritent vraiment.

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à M. REZZAK Daoud pour ses directives et ses orientations concernant notre projet de fin d'études.

Nous exprimons notre gratitude envers les membres du jury qui ont eu l'honneur de participer à l'évaluation de ce travail. Nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont contribué au succès de ce projet de fin d'études :

- ♥ *A tous les enseignants de département automatique qui ont contribué à notre formation.*
- ♥ *A nos parents.*
- ♥ *A nos frères et sœurs.*
- ♥ *A tous nos amis.*

Avec mes plus sincères remerciements

DÉDICACES

A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études

- ✓ **A mes chères sœurs pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral,**
- ✓ **A mes chers frères pour leur appui et leur encouragement,**
- ✓ **A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire,**

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infallible,

Merci d'être toujours là pour moi.

M.Amel

Dédicaces

À travers ce mémoire, j'aimerais exprimer ma gratitude

À mes très chers parents

À ... / ... / ...

À mes très chers frères,

À mes professeurs et enseignants de l'université,

À mes amis et mes collègues de travail,

Ainsi qu'à toutes les personnes qui m'ont donné Leur soutien, Leur encouragement, Et leurs conseils pour l'aboutissement De ce travail.

H.A.H MED

Sommaire

Abréviations.....	i
Liste des Figures	ii
Liste des tableaux	iv
Introduction générale	1
Chapitre I: Modélisation du convertisseur DC-DC associé au système pile à combustible (PEMFC)	
I.1. Introduction	3
I.2 Types de piles à combustible	4
I.3 Le principe de fonctionnement d'une pile à combustible PEMFC.....	5
I.4 Structure d'une pile à combustible type PEMFC.....	6
I.5 Les piles à combustible dans l'industrie automobile	8
I.6 Description du système de PÀC.....	9
I.6.1 Modèle de la tension du pack à pile à combustible	11
I.7 Convertisseur statique lié à la pile à combustible	17
I.7.1 Modélisme et contrôle du convertisseur.....	17
I.7.2. Calcul de l'inductance de lissage du convertisseur parallèle	19
I.8 Les résultats de simulation de l'hybridation de la PÀC.....	21
I.9 Conclusion.....	23
Chapitre II: Modélisation du convertisseur DC-DC associé au supercondensateur	
II.1. Introduction.....	25
II.2. Principe de fonctionnement des super condensateurs.....	25
II.2.1. Principe fondamental	25
II.2.2. Différents types de SCs	27
II.2.3. La modélisation et l'étude des propriétés des super condensateurs.....	28
II.3. Modélisation du convertisseur statique bidirectionnel associé aux SCs.....	35
I.7.3. Modélisation et commande du convertisseur	35
II.3.2. Calcul de l'inductance de lissage du convertisseur bidirectionnel.....	37

II.3.3. Calcul du condensateur de filtrage du bus " C_{Bus} "	38
II.4. Les résultats de simulation de l'hybridation de SC	40
II.5. Conclusion	42
Chapitre III: Gestion d'énergie pour l'hybridation de la pile à combustible – super condensateur	
III.1. Introduction	44
III.2. Architecture du système électrique hybride à PÀC	45
III.3. Système de gestion de l'énergie pour les sources hybrides (PÀC /SCs)	46
III.3.1. La commande en courant du convertisseur lié au pack à PÀC.....	47
III.3.2. Contrôle du courant dans le convertisseur lié aux SCs.....	48
III.3.3. La boucle de contrôle de la tension aux bornes des SCs.	49
III.3.4. La boucle de régulation de la tension appliquée au bus continu.....	50
III.4. Les résultats de simulation de l'hybridation de la PÀC – SC.	52
III.5. Conclusion	57
Conclusion générale	58
Bibliographie	59
Abstract	64

Abréviations

<i>DMFC</i>	: Direct Methanol Fuel Cell
<i>DC-DC</i>	: Direct Current - Direct Current
<i>EME</i>	: Electrode - Membrane - Electrode
<i>IGBT</i>	: Insulated-Gate Bipolar junction Transistor
<i>MLI</i>	: Modulation a Largeur d'Impulsion
<i>PEMFC</i>	: Proton Exchange Membrane Fuel Cell
<i>PAFC</i>	: Phosphoric Acid Fuel Cell
<i>PÀC</i>	: Pile à Combustible
<i>PÀCs</i>	: Piles à Combustible
<i>SOFC</i>	: Solid Oxide Fuel Cell
<i>SA</i>	: Source Auxiliaire
<i>SC</i>	: Supercondensateur
<i>SCs</i>	: Supercondensateurs

Liste des Figures

Figure I. 1: Génération d'électricité dans une PÀC	6
Figure I. 2: Vue globale d'une cellule de PÀC	7
Figure I. 3: Pack de PÀC	7
Figure I. 4: Toyota Mirai est une voiture hybride à PÀC.	8
Figure I. 5: Système à PÀC	9
Figure I. 6: Tension d'une cellule à PÀC en fonction de la densité de courant à température constante (80°C) et pour différentes valeurs de la pression cathodique (entre 1 et 3 bars)	14
Figure I. 7: Tension du pack en fonction du courant à température constante (80°C) et pour différentes valeurs de la pression cathodique (entre 1 et 3 bars)	15
Figure I. 8: Puissance du pack en fonction du courant à température constante (80°C) et pour différentes pressions cathodiques (entre 1 et 3 bars)	15
Figure I. 9: Tension du pack en fonction du courant à pression cathodique constante (2.5 bar) et pour différentes températures (entre 0°C et 100°C)	16
Figure I. 10: Tension du pack pour une pression cathodique de 2.5 bars pour deux valeurs de la teneur en eau de la membrane	16
Figure I. 11: Convertisseur statique unidirectionnel associé au pack à PÀC.	17
Figure I. 12: Ondulation du courant de l'inductance LFC	19
Figure I. 13: Les performances opérationnelles de la PÀC pour un rapport cyclique égale à 0,3.	21
Figure I. 14: Les performances opérationnelles de la PÀC pour un rapport cyclique égale à 0,5.	22
Figure I. 15: Les performances opérationnelles de la PÀC pour un rapport cyclique égale à 0,6.	23
<hr/>	
Figure II. 1: Structure interne d'un super condensateur	26
Figure II. 2: Circuit équivalent simplifié d'un SC	27
Figure II. 3: Modèle constructeur d'un SC	30
Figure II. 4: Charge et décharge du super condensateur "PC 7223" avec un courant de 100A	31
Figure II. 5: Charge et décharge du super condensateur "PC 7223" avec un courant de 400A	32
Figure II. 6: Système d'équilibrage résistif	32
Figure II. 7: Système d'équilibrage avec diodes zener	33
Figure II. 8: Equilibrage de 4 cellules à base de convertisseurs buck-boost	35
Figure II. 9: Convertisseur statique bidirectionnel associe au SCs	36
Figure II. 10: Ondulation du courant	37
Figure II. 11: Ondulation de tension	39
Figure II. 12: Les performances opérationnelles du supercondensateur pour un rapport cyclique égale à 0,4.	41
Figure II. 13: Les performances opérationnelles du supercondensateur pour un rapport cyclique égale à 0,6.	41

Figure III. 1: Architecture du système électrique à PÀC – SC	45
Figure III. 2: Le schéma général du système de gestion d'énergie des sources hybrides	47
Figure III. 3: Contrôle de courant du convertisseur lié à la PÀC	48
Figure III. 4: Mécanisme de contrôle du convertisseur lié aux SCs.	49
Figure III. 5: Boucle de régulation de la tension des SCs	50
Figure III. 6: Boucle de régulation de la tension du Bus continu	51
Figure III. 7: Fonction de limitation du courant des SCs	52
Figure III. 8: Systèmes de contrôles pour le système hybride électrique à PÀC	53
Figure III. 9: Performances de fonctionnement du système à PÀC (Boost).	54
Figure III. 10: Performances de fonctionnement du SC (Buck-Boost).	55
Figure III. 11: Performances de fonctionnement de Bus continu	56
Figure III. 12: Puissances du système hybride.	56

Liste des tableaux

Tableau I. 1: Différents types de PÀC _____	4
Tableau I. 2: Caractéristiques des convertisseurs de puissance _____	20
Tableau II. 1: Caractéristiques des convertisseurs de puissance _____	38
Tableau II. 2: Caractéristiques des convertisseurs de puissance _____	40

Introduction générale

Introduction générale

La demande croissante en énergie propre et durable a suscité un intérêt considérable pour le développement de nouvelles technologies de stockage et de conversion d'énergie. Parmi ces technologies, les systèmes hybrides électriques, qui associent une pile à combustible et un supercondensateur, ont émergé comme des solutions prometteuses pour répondre aux exigences énergétiques contemporaines. Ces systèmes présentent une combinaison unique de performances élevées, d'efficacité énergétique et de réactivité, les positionnant ainsi comme des candidats idéaux pour une gamme variée d'applications, allant des véhicules électriques aux sources d'énergie renouvelable [1-3]. Ce mémoire se concentre sur l'étude des systèmes électriques hybrides basés sur l'utilisation conjointe de supercondensateurs et de piles à combustible [4-14]. L'objectif principal est d'explorer les avantages de l'intégration de ces deux technologies complémentaires afin de développer des systèmes hybrides performants et efficaces sur le plan énergétique. L'utilisation combinée de supercondensateurs et de piles à combustible permet de tirer parti des avantages de chaque technologie, en optimisant les performances dynamiques, la stabilité du système, la gestion de l'énergie et l'autonomie.

La gestion et le contrôle efficaces du transfert d'énergie entre la pile à combustible et le supercondensateur sont essentiels pour optimiser les performances et garantir un fonctionnement fiable de ces systèmes hybrides. Ce mémoire se concentre sur l'étude approfondie de la gestion et du contrôle du transfert d'énergie dans un système pile à combustible - supercondensateur, en mettant l'accent sur le développement d'une stratégie de gestion avancées et de techniques de contrôle pour améliorer l'efficacité énergétique et la stabilité du système.

Ce travail est composé de trois chapitres bien délimités :

Le chapitre initial, intitulé "*Modélisation du convertisseur DC-DC associé au système pile à combustible (PEMFC)*", explore les concepts fondamentaux liés aux piles à combustible, en mettant un accent particulier sur le type PEMFC sélectionné pour notre application spécifique. Par la suite, une modélisation approfondie du convertisseur DC-DC unidirectionnel associé à la pile à combustible est entreprise, suivie de simulations visant à valider cette modélisation. Ces étapes cruciales sont réalisées dans la section finale de ce chapitre.

Le second chapitre intitulé " *Modélisation du convertisseur DC-DC associé au supercondensateur* " se concentre sur les différents aspects liés aux supercondensateurs, leur modélisation spécifique et la modélisation du convertisseur DC-DC bidirectionnel associé. Au cours de cette partie, nous explorons les concepts fondamentaux des supercondensateurs et nous développons un modèle spécifique pour ces dispositifs. De plus, nous procédons à la modélisation et au dimensionnement précis du convertisseur DC-DC bidirectionnel qui accompagne le supercondensateur. Enfin, ce chapitre se conclut avec la présentation des résultats de simulation obtenus à partir de cette modélisation, fournissant ainsi une évaluation concrète de la performance du système étudié.

Le dernier chapitre, intitulé "*Gestion d'énergie pour l'hybridation de la pile à combustible – super condensateur* ", propose une approche de commande visant à optimiser la gestion de l'énergie électrique échangée entre les sources hybrides (pile à combustible - supercondensateur) et la charge. Cette approche prend en compte les contraintes spécifiques imposées par les différents éléments du système, tout en cherchant à réduire le stress exercé sur la pile à combustible en déviant la demande électrique fortement variable vers le supercondensateur. Les résultats issus des simulations réalisées sont présentés et discutés dans cette section.

Enfin, nous achevons notre étude en fournissant une conclusion générale suivie de perspectives.

Chapitre I:

Modélisation du convertisseur DC-DC associé au système pile à combustible (PEMFC)

I.1. Introduction :

La modélisation du convertisseur DC-DC (boost) associé au système de pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) joue un rôle crucial dans la conception et l'optimisation des systèmes de propulsion électrique et des sources d'énergie renouvelable. Les convertisseurs DC-DC sont des composants essentiels pour le transfert d'énergie entre la pile à combustible et le reste du système électrique, assurant une conversion efficace de la tension et du courant.

Le système de pile à combustible PEMFC est une technologie émergente prometteuse pour la production d'électricité à partir d'hydrogène et d'oxygène, offrant une alternative propre et durable aux combustibles fossiles. Les PEMFCs sont largement utilisées dans les applications de véhicules électriques, de génération d'énergie stationnaire et d'équipements portables en raison de leur efficacité élevée, de leur faible impact environnemental et de leur réactivité rapide.

Le chapitre amorcé commence par présenter les diverses catégories de piles à combustible, suivi d'une exploration détaillée du principe de fonctionnement, de la structure et des applications spécifiques de la pile à combustible PEMFC. Nous exposons ensuite un modèle détaillé incluant les phénomènes dynamiques de transport des charges et de la matière dans les couches de la pile à combustible, ainsi que le comportement non linéaire de la tension-courant, modélisé par des équations empiriques. Des auxiliaires essentiels (compresseur, conduite, refroidisseur, humidificateur, électrovanne) garantissent le bon fonctionnement de la pile à combustible et seront décrits et modélisés.

A la fin de ce chapitre, nous avons procédé à la présentation d'une simulation réalisée à l'aide du logiciel Matlab Simulink. L'objectif essentiel de cette simulation est d'offrir une compréhension approfondie du comportement du convertisseur DC-DC boost associé au système PEMFC, ce qui permet d'optimiser de manière précise ses paramètres de conception. Cette approche joue un rôle déterminant dans l'amélioration de l'efficacité énergétique, de la fiabilité et des performances globales des systèmes de propulsion électrique et des sources d'énergie renouvelable.

I.2 Types de piles à combustible :

Les PÀCs sont des générateurs d'électricité qui transforment l'énergie chimique libérée par un gaz ou un liquide combustible en énergie électrique en présence de chaleur. L'hydrogène est généralement utilisé comme combustible. Les PÀCs sont classées en fonction des choix d'électrolyte et de combustible, qui déterminent les réactions électrochimiques et les types d'ions traversant l'électrolyte. Cela affecte également la température de fonctionnement de la pile. Le Tableau II.1 énumère les différents types de PÀC disponibles. [1, 3,6]

Tableau I. 1: Différents types de PÀC.

	Nom	Electrolyte	Plage de puissance	Température de fonctionnement	Domaines d'applications
PÀC à basses températures	DMFC (Direct methanol fuel cell)	Membrane polymère	1mW à 100KW	60-90°C	Portable
	PEMFC (Proton exchange membrane fuel cell)	Membrane polymère	100W à 500KW	60-90°C	Transport Portable Stationnaire
	AFC (Alcaline fuel cell)	Solution alcaline aqueuse	10KW à 100KW	50-250°C	Transport Spatial
	PAFC (Phosphoric acid fuel cell)	Acide phosphorique	Jusqu'à 10MW	160-220°C	Stationnaire
PÀC à hautes températures	MCFC (Molten carbonate fuel cell)	Carbonate fondu	Jusqu'à 100MW	650°C	Stationnaire

	SOFC (Solid oxide fuel cell)	Oxyde solide	Jusqu'à 100MW	750-1050°C	Stationnaire
--	---------------------------------------	-----------------	------------------	------------	--------------

Chaque type de PÀC a un domaine d'application privilégié. Parmi les divers types de piles, c'est la pile PEMFC (*Proton Exchange Membrane Fuel Cell*) qui se développe le plus vite [41]. Elle se présente comme le choix le plus adéquat pour des applications dans le domaine du transport et ceci, pour trois raisons essentielles [1] :

- Température de fonctionnement: la pile fonctionne à basse température, (entre 60°C et 90°C), ce qui est adapté à un usage automobile. A haute température, la dégradation des matériaux est assez élevée.
- Structure solide: sa membrane en polymère solide garantit une certaine résistance mécanique vis à vis des contraintes liées à l'environnement automobile; elle empêche notamment les fuites dues aux vibrations.
- Densité de puissance : la propulsion d'un véhicule requiert une puissance de quelques kilowatts à une centaine de kilowatts. En outre, le groupe motopropulseur doit avoir une masse et un encombrement acceptable. La PÀC de type PEMFC répond le mieux à ces contraintes avec une densité de puissance comprise entre 1kg/kW et 3kg/kW.

I.3 Le principe de fonctionnement d'une pile à combustible PEMFC :

La PÀC de type PEMFC génère de l'électricité par l'intermédiaire de l'oxydation d'un réducteur sur l'électrode négative, couplée à la réduction d'un oxydant sur l'autre électrode, avec une cathode et une anode séparées par un électrolyte pour permettre le transfert ionique des charges électriques. Comme toute pile (représentée dans la figure I.1), la PEMFC consomme son réducteur, l'hydrogène (H₂), et son oxydant, l'oxygène (O₂), pour produire de l'électricité en continu, produisant de l'eau, des électrons et de la chaleur lors de chaque réaction[2,6].

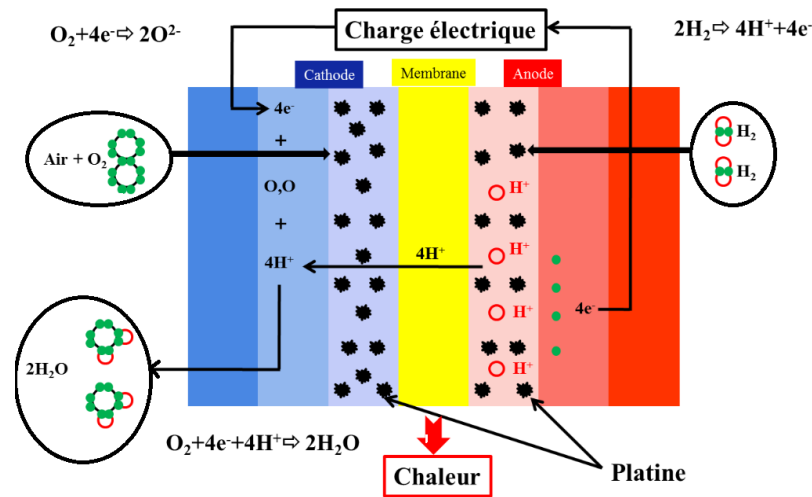
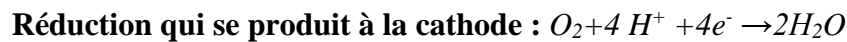
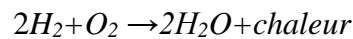


Figure I. 1: Génération d'électricité dans une PÀC.

L'hydrogène est très réactif électrochimiquement par rapport aux autres carburants tels que les hydrocarbures ou les alcools, ce qui explique son efficacité. De plus, l'oxygène est l'oxydant le plus courant en raison de sa présence dans l'air. Les réactions d'oxydoréduction sont décrites par les équations suivantes [3]:



La réaction globale est obtenue en combinant les deux équations de réaction :



La production d'électricité dans une pile à combustible est due à l'oxydation de la molécule d'hydrogène à l'anode, qui libère deux électrons. Ces électrons sont ensuite transportés vers la cathode via un circuit externe, créant ainsi un courant électrique. Pendant ce temps, les protons d'hydrogène H⁺ traversent la membrane ionique qui sépare l'anode et la cathode, et se recombinent avec les électrons et les atomes d'oxygène à la cathode. Cette réaction globale produit de l'eau et de la chaleur en tant que seuls sous-produits [4].

I.4 Structure d'une pile à combustible type PEMFC :

La structure d'une cellule élémentaire pour la réaction électrochimique est basée sur un assemblage EME, pressé entre deux plaques bipolaires. Ce processus est illustré dans la figure II.2 [2].

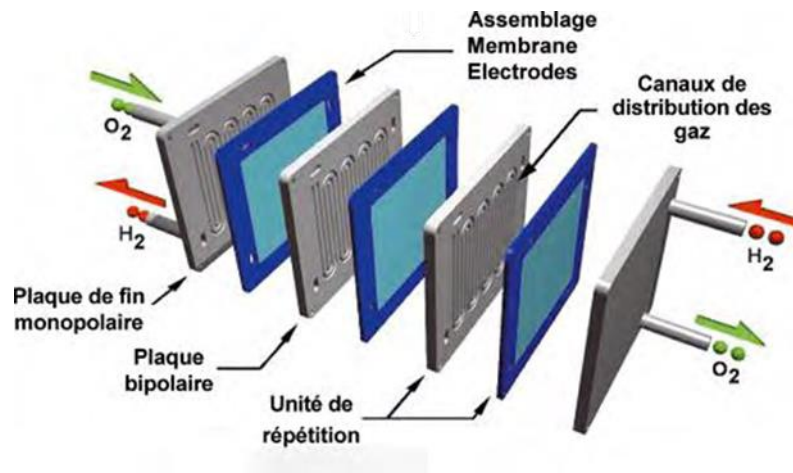
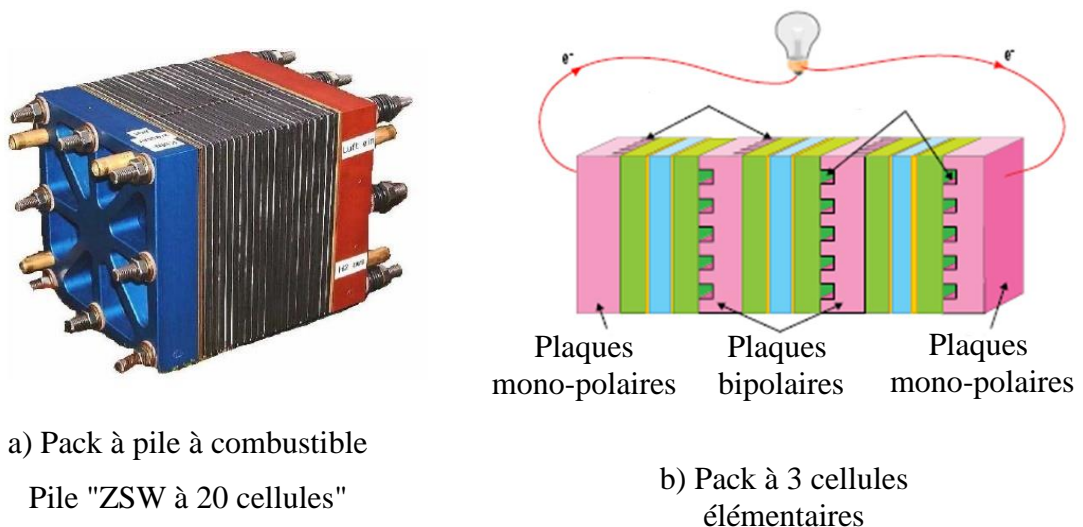


Figure I. 2: Vue globale d'une cellule de PÀC.

Le composant central d'une cellule élémentaire dans une pile à combustible est la membrane, qui agit en tant qu'électrolyte perméable aux protons H^+ de l'hydrogène et imperméable aux gaz. Un assemblage de membrane d'échange de protons (EME) se compose de cette membrane, ainsi que de deux électrodes, l'anode et la cathode, qui sont exposées à un flux de gaz contenant de l'hydrogène et de l'oxygène, respectivement, pour fournir le réducteur et l'oxydant. Cependant, la tension produite par une seule cellule est inférieure à 1 volt, ce qui n'est pas suffisant pour la plupart des applications. Pour obtenir une source de tension plus élevée, plusieurs cellules sont reliées en série pour former un pack de pile à combustible (voir figure I.3).



a) Pack à pile à combustible
Pile "ZSW à 20 cellules"
ZSW : (Zentrum für Sonnenenergie-
und Wasserstoff-Forschung)

b) Pack à 3 cellules
élémentaires

Figure I. 3: Pack de PÀC

I.5 Les piles à combustible dans l'industrie automobile :

L'industrie automobile est l'un des domaines où les PÀCs sont les plus étudiées et les plus prometteuses, car elles offrent la possibilité de produire une énergie propre pour les véhicules.

L'histoire des PÀCs remonte au début du XIXe siècle, lorsque le scientifique britannique Sir William Grove a découvert le principe de la pile à combustible. Toutefois, la première application pratique des piles à combustible a été développée dans les années 1960 pour les missions spatiales de la NASA. Depuis lors, les PÀCs ont fait l'objet de nombreuses recherches et sont devenues une technologie en constante évolution.

L'industrie automobile a commencé à expérimenter les PÀCs dans les années 1990, et plusieurs constructeurs automobiles ont développé des véhicules à hydrogène à des fins de recherche et de démonstration. À ce jour, Toyota, Honda, Hyundai, General Motors, BMW et d'autres fabricants ont développé des véhicules à pile à combustible qui sont vendus à un nombre limité de clients.

Le programme de General Motors a commencé en 1990 et la société a dévoilé ses premiers modèles expérimentaux en 1998. En 2002 et 2005, General Motors a présenté deux projets appelés Hy-Wire et Sequel, respectivement (figure I.4) [5].



Figure I. 4: Toyota Mirai est une voiture hybride à PÀC.

I.6 Description du système de PÀC :

La conception des systèmes de PÀC peut varier considérablement en fonction du type de PÀC et de son application, mais de nombreux systèmes ont plusieurs composants essentiels et pour avoir un système de PÀC complet, il est nécessaire de combiner l'ensemble de pile à combustible avec plusieurs composants auxiliaires [1]:

- Le système d'alimentation en hydrogène.
- Le système d'alimentation en air.
- Le système de refroidissement.
- Le système d'humidification.

La figure I.5 illustre l'approvisionnement en hydrogène à partir d'un réservoir à haute pression, régulé par une vanne de débit. L'utilisation d'un stockage haute pression permet une régulation rapide du débit d'hydrogène. L'air est quant à lui fourni par un compresseur, visant à augmenter la densité de puissance de l'ensemble du système. En outre, un système d'humidification externe est représenté pour les gaz anodiques et cathodiques. [7,8].

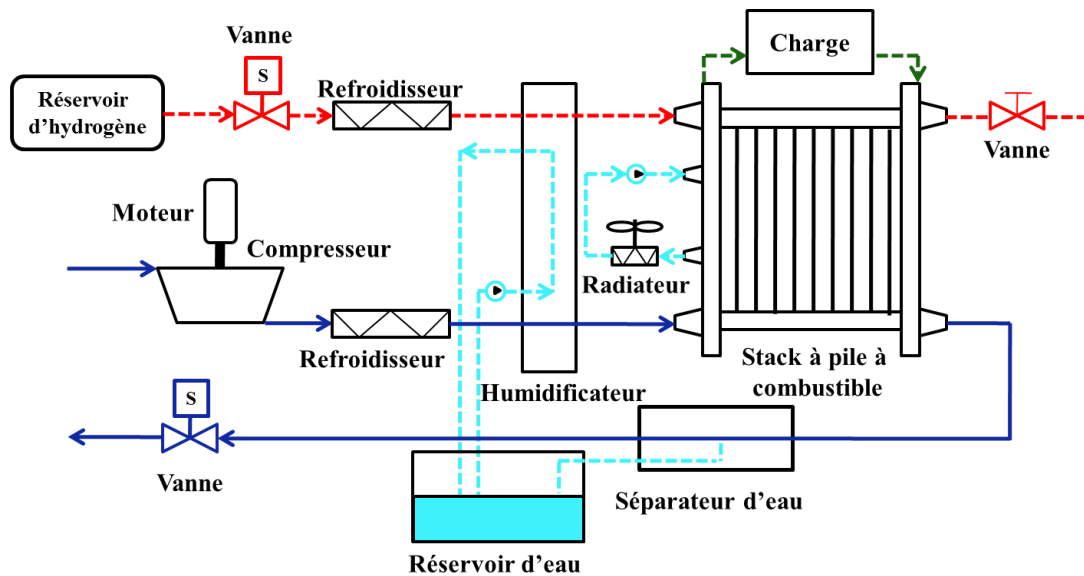


Figure I. 5: Système à PÀC

L'énergie produite par le pack à PÀC est calculée en multipliant la tension obtenue par le courant qui traverse le pack. La tension d'une cellule dépend du courant du pack, des pressions partielles des réactifs spécifiques à chaque cellule, de la température de la cellule et de l'humidité de la membrane.

Dans cette étude, il est postulé que les cellules à PÀC sont conçues de manière homogène, permettant ainsi de les analyser et de les regrouper sous forme d'un pack composé de plusieurs cellules. En conséquence, toutes les cellules sont supposées avoir des températures identiques, maintenues constantes dans l'ensemble du pack à PÀC. De plus, en cas de déshydratation de la membrane, celle-ci survient simultanément dans toutes les cellules, ce qui induit une représentation commune par des courbes de polarisation similaires. Ces hypothèses sur l'invariance des performances d'une cellule à l'autre sont essentielles pour établir des modèles d'ordre réduit pour l'ensemble du système.

Lorsque le courant électrique est extrait de la PÀC, l'oxygène et l'hydrogène sont consommés, entraînant la production d'eau et de chaleur. Afin de maintenir la pression partielle d'hydrogène souhaitée, le niveau d'hydrogène doit être régulé par le circuit d'alimentation, comprenant un réservoir d'hydrogène haute pression et une servovalve d'alimentation. De même, le niveau d'air doit être ajusté par le système d'air pour maintenir la pression partielle d'oxygène. Ce système d'air est constitué d'un compresseur d'air, d'un moteur électrique et de conduites reliant les différents composants.

Le compresseur joue un rôle crucial dans la fourniture du débit d'air requis tout en augmentant la pression atmosphérique, ce qui améliore considérablement la vitesse de réaction à la cathode, ainsi que l'efficacité globale et la densité de puissance. Étant donné que le flux d'air comprimé émis par le compresseur est à une température élevée, l'utilisation d'un refroidisseur d'air devient nécessaire afin de réduire la température de l'air entrant dans le pack.

Dans le but de prévenir la déshydratation de la membrane de la PÀC, un humidificateur est employé. L'humidificateur utilise l'eau provenant du réservoir d'eau. Le niveau d'eau dans le réservoir est maintenu en accumulant l'eau produite par le pack, qui est ensuite transportée avec le flux d'air.

Pour atténuer l'excès de chaleur générée lors de la réaction de la pile à combustible, un système de refroidissement est mis en place. Ce système fait circuler de l'eau dés-ionisée à travers le pack à pile à combustible et dissipe l'excès de chaleur en utilisant un échangeur de chaleur.

I.6.1 Modèle de la tension du pack à pile à combustible :

La tension du pack de pile à combustible PÀC est déterminée en fonction d'un ensemble de paramètres, comprenant le courant du pack, la pression cathodique, les pressions partielles des réactifs, la température de la pile à combustible et l'humidité de la membrane. Cette relation entre le courant et la tension est généralement représentée par une courbe de polarisation, qui illustre la variation de la tension de la cellule u_{FC} en fonction de la densité de courant i_{fc} (La figure I.6 illustre un exemple pertinent). Étant donné que plusieurs cellules sont reliées en série pour former le pack de PÀC, la tension totale du pack u_{FC} est obtenue en sommant les tensions individuelles des cellules, tandis que le courant du pack i_{fc} correspond au courant d'une cellule. La densité de courant peut être définie comme le rapport entre le courant du pack et la surface active de la cellule $i_{fc} = i_{FC}/A_{fc}$. Dans l'hypothèse que toutes les cellules sont identiques, la tension du pack peut être calculée en multipliant la tension d'une cellule u_{FC} par le nombre de cellules dans le pack n , comme illustré ci-dessous :

$$u_{FC} = n \cdot u_{fc} \quad (I.1)$$

En se basant sur des relations physiques et empiriques, la tension d'une cellule de la pile à combustible est calculée et s'exprime par : [7-8, 9] :

$$u_{fc} = E - u_{act} - u_{ohm} - u_{conc} \quad (I.2)$$

Où : E représente la tension à vide de la pile à combustible (potentiel de Nerst) u_{act} , u_{ohm} , u_{conc} représentent respectivement les surtensions d'activation, ohmiques et de concentration; elles sont exprimées comme suit: Les notations utilisées sont les suivantes : E pour la tension à vide de la pile à combustible (potentiel de Nernst), u_{act} pour la surtension d'activation, u_{ohm} pour la surtension ohmique et u_{conc} pour la surtension de concentration. Ces différentes surtensions sont définies par les équations suivantes :

1. Tension à vide E : Elle est calculée à partir du bilan énergétique entre les réactifs et les produits et la constante de Faraday, comme suit :

$$E = 1.229 - 0.85 \times 10^{-3} (T_{fc} - 298.15) + 4.308 \times 10^{-5} T_{fc} \left[\ln(p_{H_2}) + \frac{1}{2} \ln(p_{O_2}) \right] \quad (I.3)$$

Où T_{fc} est la température de la pile exprimée en (Kelvin), p_{H_2} , p_{O_2} sont les pressions d'hydrogène et d'oxygène exprimées en bar.

2. Pertes d'activation u_{act} : Elles sont dues principalement aux cinétiques des réactions chimiques [40]. La relation entre les pertes d'activation et la densité du courant est décrite par l'équation de Tafel qui est approximée comme suit [7-8] :

$$u_{act} = u_0 + u_a \left(1 - e^{-c_1 i_{fc}}\right) \quad (I.4)$$

Où u_0 représente la chute de tension à densité de courant nulle, u_a (volts) et c_1 sont constantes ; ces trois paramètres peuvent être déterminés empiriquement [26-29]:

$$c_1 = 10$$

$$u_0 = 0.279 - 0.85 \times 10^{-3} (T_{fc} - 298.15) + 4.3085 \times 10^{-5} T_{fc} \times \dots$$

$$\left[\ln \left(\frac{p_{ca} - p_{sat}}{1.01325} \right) + \frac{1}{2} \ln \left(\frac{0.1173 (p_{ca} - p_{sat})}{1.01325} \right) \right]$$

$$u_a = \left(-1.618 \times 10^{-5} T_{fc} + 1.618 \times 10^{-2} \right) \left(\frac{p_{O_2}}{0.1173} + p_{sat} \right)^2 + \dots$$

$$\left(1.8 \times 10^{-4} T_{fc} - 0.166 \right) \left(\frac{p_{O_2}}{0.1173} + p_{sat} \right) + \left(-5.8 \times 10^{-4} T_{fc} + 0.5736 \right)$$

3. Pertes ohmiques u_{ohm} : Elles sont dues d'une part à la résistance de contact des différentes couches de la pile et d'autre part à la résistance que rencontrent les particules chargées : les ions H^+ dans l'électrolyte et les électrons e^- dans les électrodes, les plaques bipolaires et les connexions [7-8, 9]. D'après la loi d'Ohm, les pertes ohmiques peuvent être exprimées par la relation suivante :

$$u_{ohm} = i_{fc} \cdot R_{ohm} \quad (I.5)$$

La résistance ohmique R_{ohm} peut être exprimée en fonction de la conductivité de la membrane σ_m ($\Omega \cdot cm$)⁻¹, sous la forme suivante :

$$R_{ohm} = \frac{t_m}{\sigma_m} \quad (I.6)$$

Où: t_m et σ_m sont respectivement l'épaisseur et la conductivité de la membrane, sachant que la conductivité dépend à la fois de la teneur en eau de la membrane λ_m et de la température de la pile à combustible T_{fc} . La valeur de λ_m varie entre 0 et 14 pour une humidité relative entre 0% et 100%. La variation de la conductivité de la membrane en fonction de l'humidité et de la température est donnée sous la forme suivante [7-8] :

$$\sigma_m = b_1 \exp \left(b_2 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T_{fc}} \right) \right) \quad (I.7)$$

b_2 est une constante fixe, tandis que b_1 peut être déterminée en relation avec la teneur en eau de la membrane λ_m , comme indiqué ci-dessous :

$$b_1 = (b_{11}\lambda_m - b_{12}) \quad (I.8)$$

Les constantes b_{11} , b_{12} et b_2 sont habituellement déterminées empiriquement. Pour la membrane de type Nafion 117 [45-48] : $b_{11} = 0.005139$, $b_{12} = 0.00326$ et $b_2 = 350$.

4. Les pertes de concentrations apparaissent à des densités de courant élevées, la faible vitesse de transport des réactifs ou des produits vers le site de la réaction est la principale cause de la chute de concentration. Pour calculer ces pertes nous utilisons une équation empirique approximative comme [7-8] :

$$u_{conc} = i \left(c_2 \frac{i_{fc}}{i_{fc\max}} \right)^{c_3} \quad (I.9)$$

Où: c_2 , c_3 et $i_{fc\max}$ sont des constantes qui dépendent de la température et de la pression partielle des réactifs et peuvent être déterminées empiriquement comme suit [7-8]:

$$c_2 = \begin{cases} \left(7.16 \times 10^{-4} T_{fc} - 0.622\right) \left(\frac{p_{O_2}}{0.1173} + p_{sat}\right) + \left(-1.45 \times 10^{-3} T_{fc} - 1.68\right) \\ \text{pour } \left(\frac{p_{O_2}}{0.1173} + p_{sat}\right) < 2 \text{ atm} \\ \left(8.66 \times 10^{-5} T_{fc} - 0.068\right) \left(\frac{p_{O_2}}{0.1173} + p_{sat}\right) + \left(-1.6 \times 10^{-4} T_{fc} - 0.54\right) \\ \text{pour } \left(\frac{p_{O_2}}{0.1173} + p_{sat}\right) > 2 \text{ atm} \end{cases}$$

$$c_3 = 2$$

$$i_{fc \max} = 2.2$$

Afin de vérifier l'efficacité du modèle de tension du pack à pile à combustible, des simulations ont été menées en utilisant Matlab/Simulink, et les caractéristiques suivantes ont été observées :

- a. La Figure I.6 illustre la caractéristique de polarisation d'une cellule individuelle de pile à combustible, maintenue à une température constante de 80°C, en analysant son comportement en fonction de diverses pressions cathodiques allant de 1 à 3 bars (conformément à l'Équation I.4).

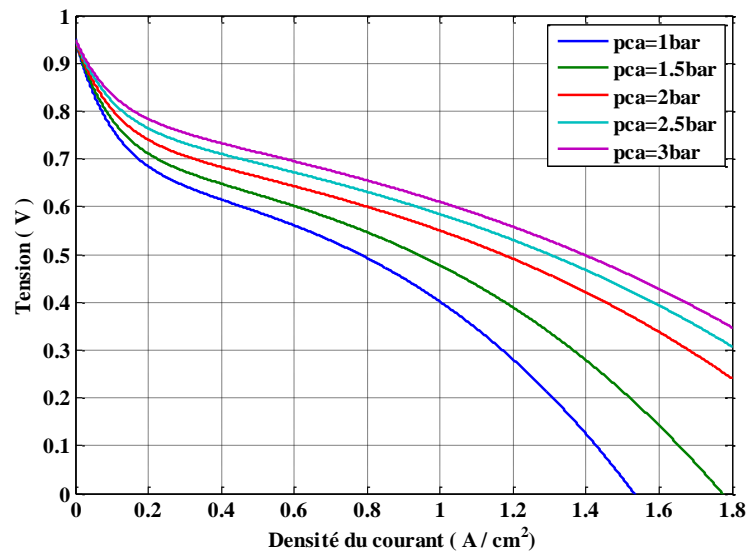


Figure I. 6: Tension d'une cellule à PÀC en fonction de la densité de courant à température constante (80°C) et pour différentes valeurs de la pression cathodique (entre 1 et 3 bars) constante (80°C) et pour différentes valeurs de la pression cathodique (entre 1 et 3 bars)

- b. La Figure I.6 présente la courbe de tension du pack complet de pile à combustible $n = 381$ en fonction du courant $A_{fc} = 280 \text{ cm}^2$, à une température constante, pour différentes valeurs de pression cathodique. Cette figure met en évidence la nature fortement non linéaire de la relation courant-tension d'une pile à combustible. Nous observons une chute significative de tension lorsque la charge de la pile (courant) augmente, et cette chute est de nature non linéaire.

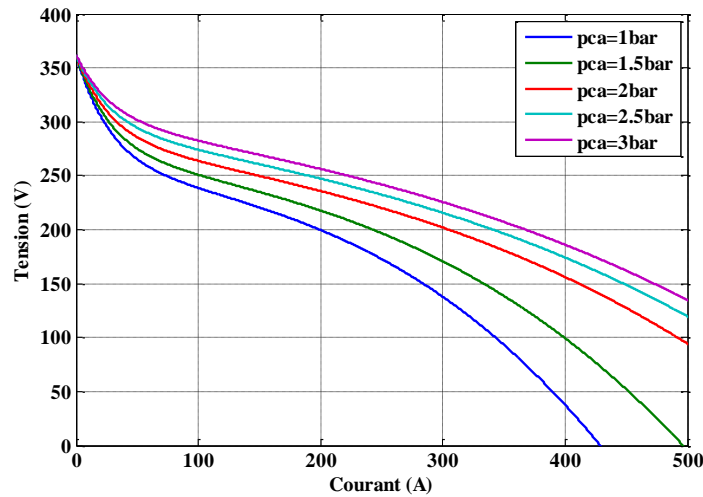


Figure I. 7: Tension du pack en fonction du courant à température constante (80°C) et pour différentes valeurs de la pression cathodique (entre 1 et 3 bars)

- c. La Figure I.8 illustre la variation de la puissance du pack en fonction du courant de charge pour différentes pressions cathodiques, à une température constante de 80°C . On observe une plage de fonctionnement quasi linéaire qui s'étend de la valeur nulle de la puissance jusqu'à sa valeur maximale.

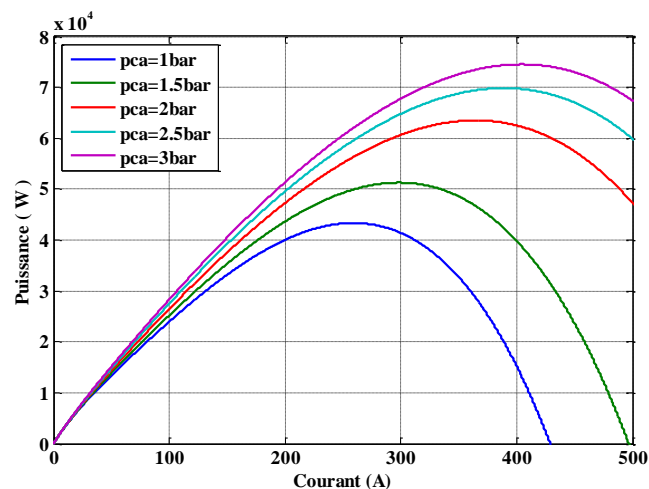


Figure I. 8: Puissance du pack en fonction du courant à température constante (80°C) et pour différentes pressions cathodiques (entre 1 et 3 bars)

d. La Figure I.9 illustre la variation de la tension du pack à une pression cathodique constante de 2,5 bars pour différentes températures de fonctionnement. On observe une augmentation de la tension avec l'augmentation de la température de fonctionnement, ce qui explique pourquoi une température de fonctionnement de 80°C est généralement choisie. Il convient de noter que le compromis entre la réduction des pertes et le fonctionnement à basse température ne permet pas d'adopter une température de 100°C [11].

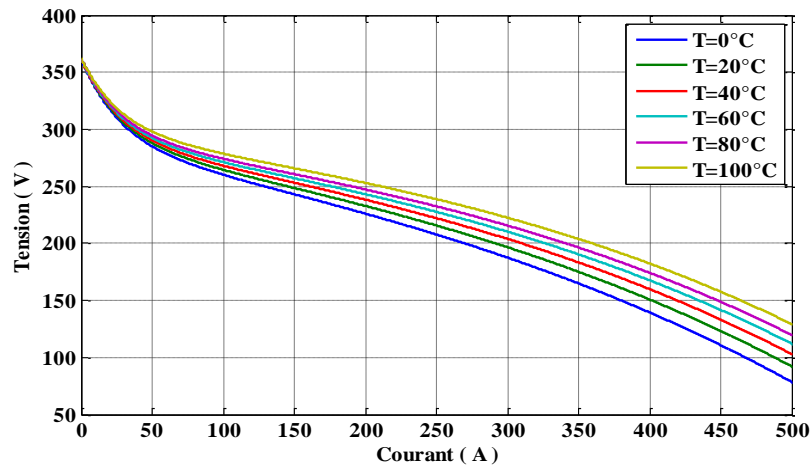


Figure I. 9: Tension du pack en fonction du courant à pression cathodique constante (2.5 bar) et pour différentes températures (entre 0°C et 100°C)

e. La Figure I.10 présente l'influence de l'humidité de la membrane sur la tension du pack. À titre d'illustration, la courbe bleue correspond à une membrane humidifiée à 100%, tandis que la courbe rouge représente une membrane humidifiée à 50%. On observe que la tension du pack est inférieure lorsque la membrane est humidifiée à 50% par rapport à une humidification à 100%. Il est donc essentiel d'assurer une bonne humidification de la membrane en injectant de l'eau avec les réactifs afin d'optimiser les performances du système.

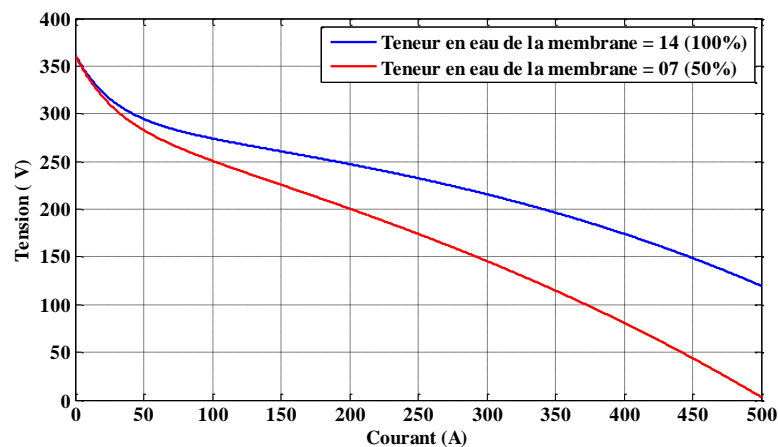


Figure I. 10: Tension du pack pour une pression cathodique de 2.5 bars pour deux valeurs de la teneur en eau de la membrane

I.7 Convertisseur statique lié à la pile à combustible :

I.7.1 Modélisme et contrôle du convertisseur :

Comme il a été précédemment observé, la tension de sortie du pack à pile à combustible présente une variation en fonction du courant fourni, étant donné que la pile à combustible n'est pas capable d'inverser le courant. Afin d'adapter cette tension plus élevée au bus continu, il est nécessaire de connecter un convertisseur statique survolteur (parallèle) unidirectionnel en courant à la sortie du pack. Ce convertisseur permet de réguler la tension à environ 220V, à pleine puissance, en fonction des besoins du système. Cette régulation vise à optimiser l'efficacité globale du système à pile à combustible tout en prolongeant la durée de vie du pack en limitant les variations abruptes du courant fourni.

La représentation du schéma de base du convertisseur statique unidirectionnel de courant utilisé dans notre étude est illustrée dans la Figure I.11. La relation qui décrit le convertisseur parallèle sans pertes, reliant la tension du pack u_{FC} à la tension du bus continu u_{Bus} en fonction du rapport cyclique d_{FC} associé à la conduction de l'interrupteur commandé, est exprimée par l'équation suivante [12] :

$$\frac{u_{Bus}}{u_{FC}} = \frac{1}{1-d_{FC}} \quad (\text{I.10})$$

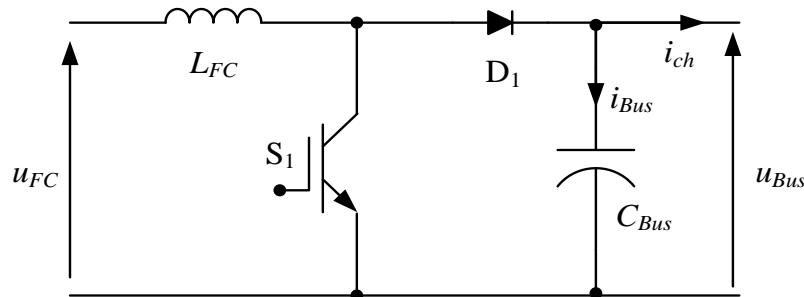


Figure I. 11: Convertisseur statique unidirectionnel associé au pack à PÀC.

Pour assurer le contrôle du convertisseur statique, un signal de modulation de largeur d'impulsion (MLI) basé sur le principe classique est appliqué à la grille de l'interrupteur S_1 . Le rapport cyclique ($0 \leq d_{FC} \leq 1$) de la MLI est utilisé comme entrée de commande du système, permettant de déterminer la durée relative de la période d'activation de l'interrupteur par rapport à la période complète du signal.

Selon l'état de l'interrupteur S1 (fermé ou ouvert), il est possible d'analyser le fonctionnement du convertisseur et de le représenter par un modèle instantané. Lorsque l'interrupteur S1 est fermé, le modèle peut être décrit comme suit :

$$\begin{cases} L_{FC} \frac{di_{FC}(t)}{dt} = u_{FC}(t) \\ i_{ch}(t) + C_{Bus} \frac{du_{Bus}(t)}{dt} = 0 \end{cases} \quad (\text{I.11})$$

Modèle instantané lorsque S1 est ouvert :

$$\begin{cases} L_{FC} \frac{di_{FC}(t)}{dt} + u_{Bus}(t) = u_{FC}(t) \\ i_{ch}(t) + C_{Bus} \frac{du_{Bus}(t)}{dt} = i_{FC}(t) \end{cases} \quad (\text{I.12})$$

Nous pouvons procéder à la représentation du convertisseur en utilisant un système d'équations unifié basé sur un modèle aux valeurs moyennes, également connu sous le nom de modèle moyenné. Dans cette approche, nous considérons les interrupteurs comme des éléments idéaux.

$$\begin{cases} L_{FC} \frac{di_{FC}}{dt} = u_{FC} - (1 - d_{FC}) u_{Bus} \\ C_{Bus} \frac{du_{Bus}}{dt} = (1 - d_{FC}) i_{FC} - i_{ch} \end{cases} \quad (\text{I.13})$$

Ce modèle présente une utilité immédiate dans le cadre de la simulation du convertisseur. En introduisant la variable D_{FC} , définie comme la différence entre 1 et d_{FC} , l'équation I.13 peut être reformulée de la manière suivante :

$$\begin{cases} L_{FC} \frac{di_{FC}}{dt} = u_{FC} - D_{FC} u_{Bus} \\ C_{Bus} \frac{du_{Bus}}{dt} = D_{FC} i_{FC} - i_{ch} \end{cases} \quad (\text{I.14})$$

I.7.2. Calcul de l'inductance de lissage du convertisseur parallèle :

Les ondulations du courant au niveau de l'inductance, positionnée à la sortie du convertisseur élévateur unidirectionnel en courant considéré, sont représentées dans la Figure I.12.

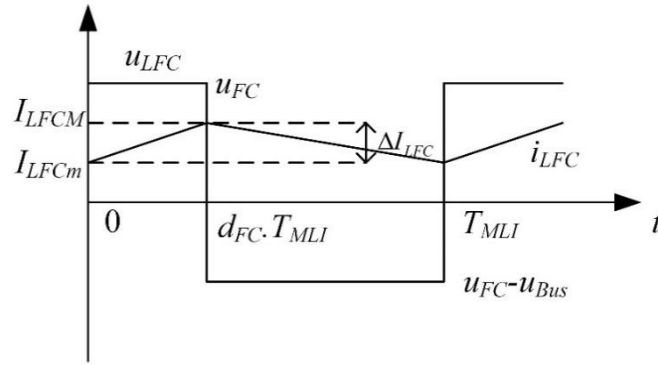


Figure I. 12: Ondulation du courant de l'inductance LFC

En négligeant l'ondulation de tension autour de la valeur moyenne, l'ondulation de courant dans l'inductance est calculée comme suit [13].

Pour $0 < t < d_{FC} \cdot T_{MLI}$:

$$i_{LFC}(t) = \frac{u_{FC}}{L_{FC}} t + I_{LFCm} \quad (I.15)$$

A l'instant $t = d_{FC} \cdot T_{MLI}$:

$$i_{LFC}(d_{FC} T_{MLI}) = \frac{u_{FC}}{L_{FC}} d_{FC} T_{MLI} + I_{LFCm} = I_{LFCM} \quad (I.16)$$

D'où:

$$\Delta I_{LFC} = I_{LFCM} - I_{LFCm} = \frac{u_{FC}}{L_{FC} f_{MLI}} d_{FC} \quad (I.17)$$

Or:

$$u_{Bus} = \frac{u_{FC}}{1 - d_{FC}} \quad (I.18)$$

Nous pouvons donc écrire:

$$\Delta I_{LFC} = \frac{d_{FC} (1 - d_{FC}) u_{Bus}}{L_{FC} f_{MLI}} \quad (I.19)$$

Paramètre:

u_{FC} : La tension aux bornes du pack de PÀC (V).

u_{Bus} : Tension du bus continu (V).

T_{MLI} : Période de commutation du signal de commande de l'interrupteur $T_{MLI} = 1/f_{MLI}$

d_{FC} : Rapport cyclique du signal de l'interrupteur $d_{FC}=t_{on}/T_{MLI}$.

I_{LFCm} : Le courant minimum dans l'inductance (A)

I_{LFCM} : Le courant maximum dans l'inductance (A).

ΔI_{LFC} : Ondulation de courant dans l'inductance (A).

L_{FC} : la valeur de l'inductance de lissage en henrys (H).

Pour garantir une stabilité de fonctionnement optimale du convertisseur statique unidirectionnel en courant et minimiser les fluctuations du courant circulant dans l'inductance, il est essentiel de déterminer avec précision la valeur de l'inductance en prenant en considération le niveau d'ondulation maximale de courant souhaité.

L'ondulation maximale est obtenue pour un rapport cyclique de 0.5 car : $\frac{\delta \Delta I_{LFC}}{\delta d_{FC}} = 0$ pour un

rapport cyclique : $d_{FC} = 0.5$, elle est donc donnée par:

$$\Delta I_{LFC} = \frac{u_{Bus}}{4L_{FC}f_{MLI}} \quad (I. 20)$$

Ainsi l'inductance minimale pour un hacheur survolteur est donnée par la relation:

$$L_{FCmin} = \frac{u_{Bus}}{4f_{MLI}\Delta I_{LFCmax}} \quad (I.20)$$

Les valeurs numériques des caractéristiques retenues de l'inductance du convertisseur de puissance pour le fonctionnement nominal du système sont récapitulées dans le tableau ci-dessous.

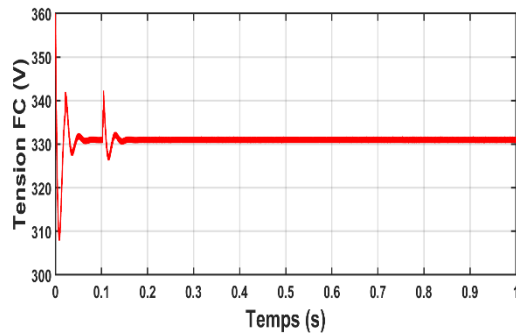
Tableau I. 2: Caractéristiques des convertisseurs de puissance.

u_{Bus}	f_{MLI}	ΔI_{LFCmax}	L_{FC}
400V	25KHz	7,14A	700 μ H

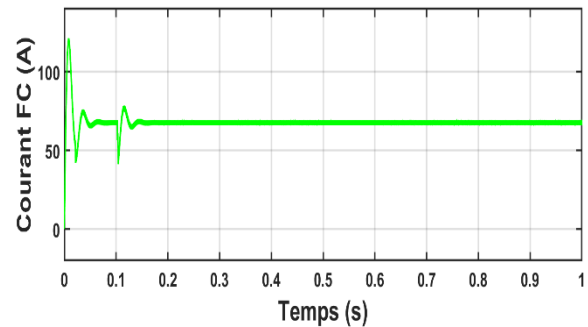
Il est important de souligner que les deux convertisseurs DC-DC associés à la source hybride (PÀC + SC) ont été dimensionnés en tenant compte d'une fréquence MLI identique (25 kHz) lors de la conception des filtres.

I.8 Les résultats de simulation de l'hybridation de la PÀC :

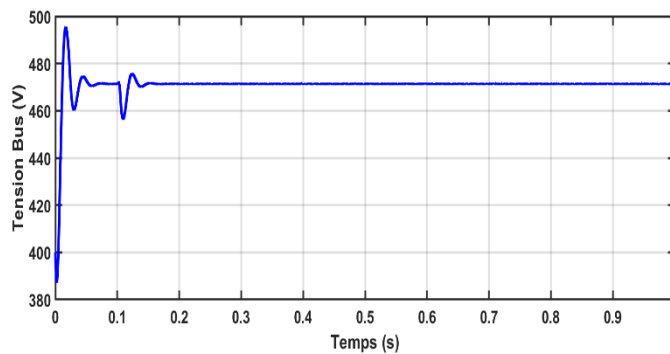
Les figures I.13 a,b et c représentent respectivement la tension de la pile à combustible qui est la tension à l'entrée du hacheur boost, le courant au niveau de l'inductance et la tension de Bus continu à la sortie du hacheur boost pour un rapport cyclique égale à 0.3. On voit bien que l'hacheur fonctionne en mode continu, en plus la tension de sortie est égale à la tension d'entrée 330 V sur $(1-0.3)$ qui donne 471V.



a. Tension FC (V)



b. Courant FC (A)



c. Tension Bus (V)

Figure I. 13: Les performances opérationnelles de la PÀC pour un rapport cyclique égale à 0,3.

Les figures I.14 a,b et c représentent respectivement la tension de la pile à combustible qui est la tension à l'entrée du hacheur boost, le courant au niveau de l'inductance et la tension de Bus continu à la sortie du hacheur boost pour un rapport cyclique égale à 0.5. On voit bien que l'hacheur fonctionne en mode continu, en plus la tension de sortie est égale à la tension d'entrée 305 V sur $(1-0.5)$ qui donne 610V.

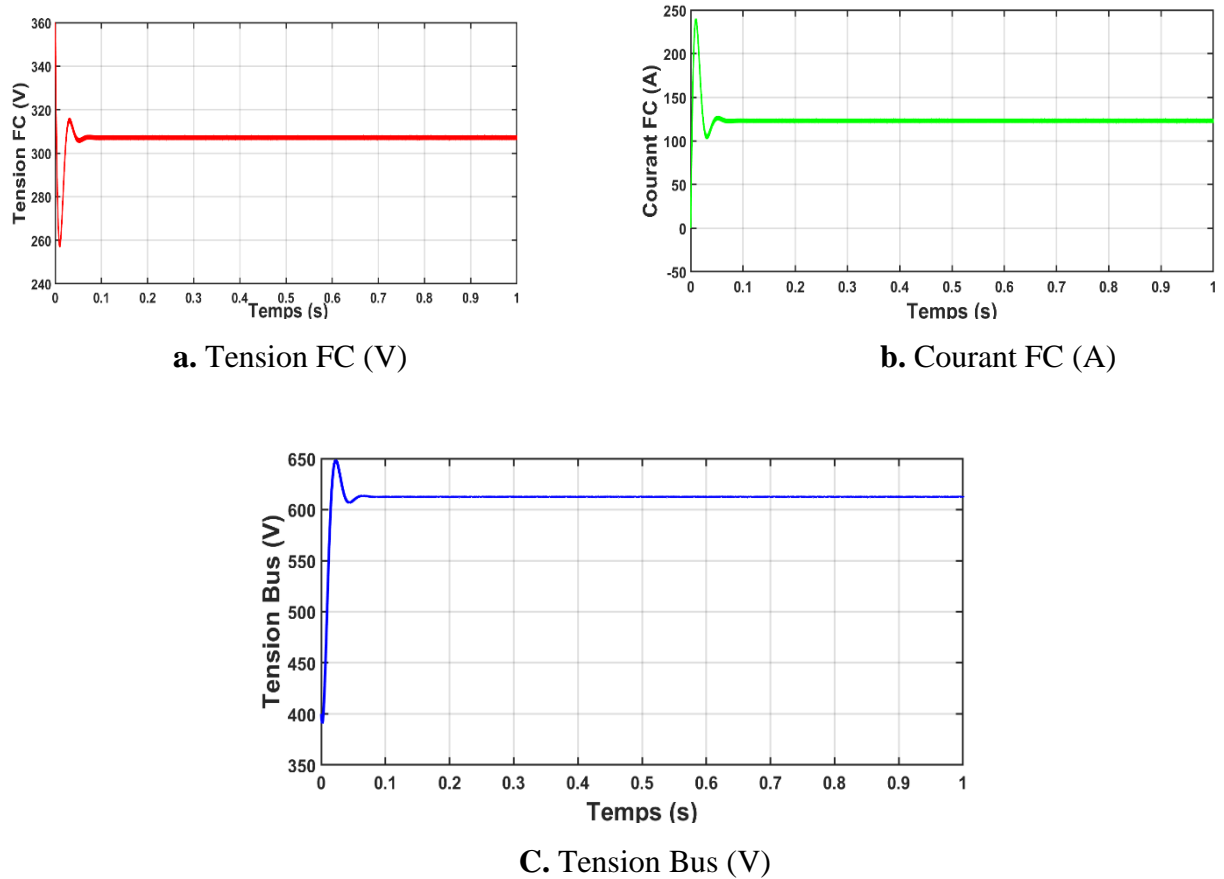
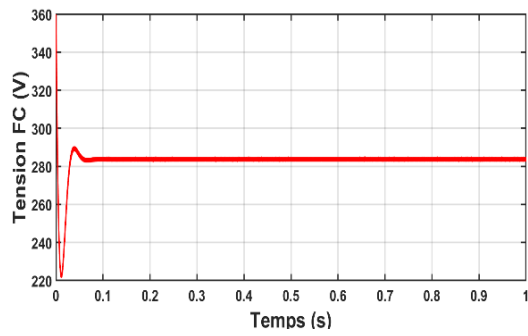


Figure I. 14: Les performances opérationnelles de la PÀC pour un rapport cyclique égale à 0,5.

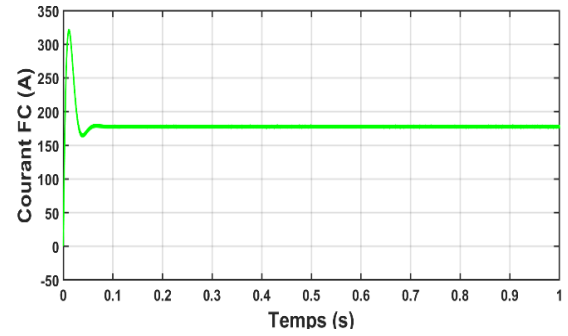
Les figures I.15 a,b et c représentent respectivement la tension de la pile à combustible qui est la tension à l'entrée du hacheur boost, le courant au niveau de l'inductance et la tension de Bus continu à la sortie du hacheur boost pour un rapport cyclique égale à 0.6. On voit bien que l'hacheur fonctionne en mode continu, en plus la tension de sortie est égale à la tension d'entrée 281 V sur $(1-0.6)$ qui donne 702.5V.

En générale le hacheur boost ne peut pas dépasser un rapport cyclique supérieur à 0.6.

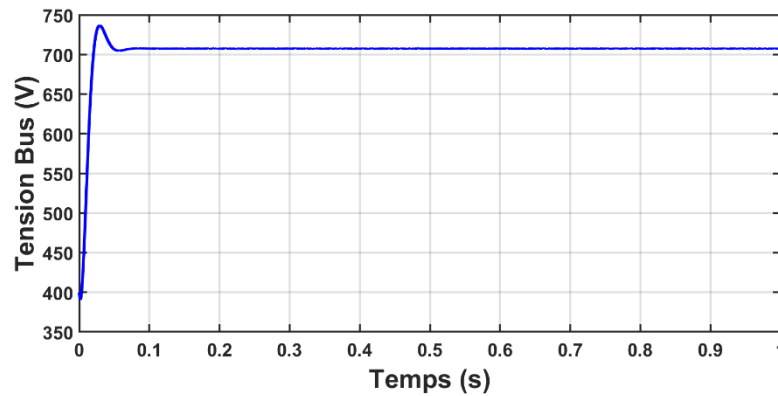
On peut remarquer aussi que lorsque le courant augmente la chute de tension de la pile à combustible augment aussi.



a. Tension FC (V)



b. Courant FC (A)



c. Tension Bus (V)

Figure I. 15: Les performances opérationnelles de la PÀC pour un rapport cyclique égale à 0,6.

I.9 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons entrepris une exploration approfondie des aspects clés de la modélisation du convertisseur DC-DC boost associé au système PEMFC (pile à combustible de type PEMFC). Nous avons accordé une attention particulière à l'étude détaillée des différents composants fondamentaux du convertisseur, ainsi qu'à leur interaction afin d'assurer une conversion de puissance efficace. En outre, nous avons abordé en détail les techniques de modélisation employées, telles que l'utilisation d'équations différentielles et de simulations sous Matlab Simulink, qui nous ont permis d'évaluer les performances du convertisseur et d'identifier les paramètres de conception optimaux. Cette approche rigoureuse nous a permis d'obtenir une compréhension approfondie de la dynamique du convertisseur et de développer des solutions innovantes pour améliorer ses performances.

Chapitre II:

Modélisation du convertisseur DC-DC associé au supercondensateur

II.1. Introduction :

Dans le précédent chapitre, une étude approfondie a été consacrée à l'analyse détaillée de la modélisation du convertisseur DC-DC, qui est utilisé en conjonction avec le système de pile à combustible de type PEMFC.

Ce chapitre se focalise sur la modélisation du supercondensateur et du convertisseur DC-DC qui lui est associé. Les supercondensateurs représentent des éléments essentiels dans les systèmes de stockage d'énergie, offrant une densité de puissance élevée, une longue durée de vie et une capacité de charge rapide. Afin de tirer pleinement parti de ces avantages, il est impératif de les intégrer avec un convertisseur DC-DC, permettant de réguler la tension d'alimentation et d'optimiser l'échange d'énergie avec le reste du système.

Au sein de cette section, une attention minutieuse sera portée à la modélisation du supercondensateur, avec une analyse détaillée de ses principes de fonctionnement et de ses caractéristiques physiques. De plus, un modèle est proposé pour représenter le comportement du supercondensateur dans les simulations sera examiné.

Par la suite, une étude sera menée sur la modélisation du convertisseur DC-DC associé au supercondensateur, en utilisant l'environnement Matlab/Simulink. Différentes topologies de convertisseurs DC-DC adaptées à l'utilisation avec les supercondensateurs, notamment les convertisseurs élévateurs, abaisseurs et élévateurs-abaisseurs, seront examinées en détail. Une attention particulière sera accordée aux caractéristiques clés et aux paramètres importants à prendre en compte lors de la modélisation.

II.2. Principe de fonctionnement des super condensateurs :

II.2.1. Principe fondamental :

Les supercondensateurs sont des dispositifs similaires aux capacités électrostatiques conventionnelles, fonctionnant sur la base du principe de la double couche électrique (illustré dans la figure II.1). Ils sont composés d'un électrolyte, un conducteur ionique isolant électronique, placé entre deux électrodes conductrices électroniques ayant une surface spécifique très élevée (plusieurs centaines ou milliers de mètres carrés par gramme de matériau).

En appliquant une différence de potentiel entre les deux électrodes d'un supercondensateur, les ions positifs ou négatifs dans l'électrolyte se déplacent, créant une accumulation de charges électriques près de l'interface électrode-électrolyte des deux côtés, tel qu'illustré dans (la Figure II.1) [13].

Le terme capacitance, ou capacité, correspond au quotient de la charge électrique stockée par la tension électrique appliquée, et permet de quantifier la capacité d'un dispositif à stocker de l'énergie électrique. Dans le cas d'une capacité linéaire, les relations fondamentales sont définies par les formules suivantes :

$$C = \frac{Q}{U} = \varepsilon \frac{S}{e} \quad (\text{II. 1})$$

$$E = \frac{1}{2} CU^2 \quad (\text{II. 2})$$

Avec : C étant la capacitance, Q la charge électrique, U la tension appliquée, ε la constante diélectrique du matériau isolant, S sa surface, e son épaisseur, et E l'énergie électrostatique stockée.

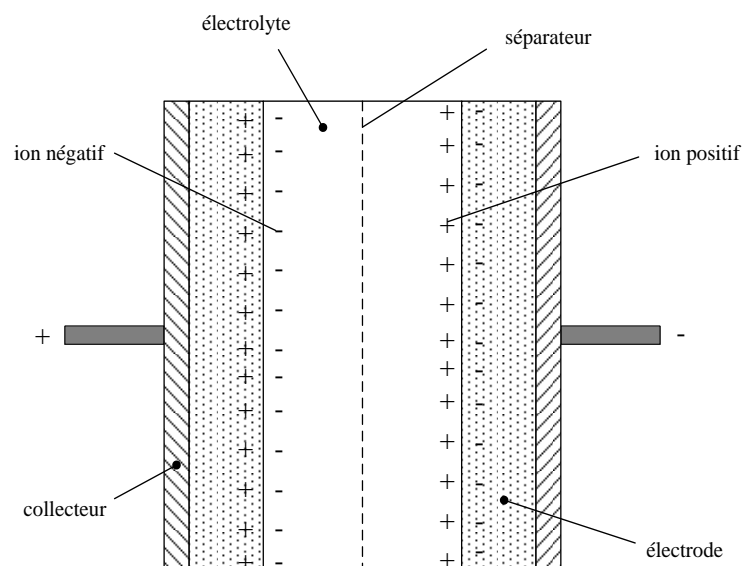


Figure II. 1: Structure interne d'un super condensateur

Un Comme illustré dans la figure II.1, un supercondensateur est constitué de deux électrodes poreuses imprégnées d'électrolyte, séparées par une membrane isolante et poreuse qui assure la conduction ionique. La double couche électrique se forme à chaque interface électrode-électrolyte, si bien qu'on peut simplifier un supercondensateur comme l'association en série de deux capacités, à savoir C_1 à l'électrode positive et C_2 à l'électrode négative (cf. figure II.2).

Pour obtenir la capacité totale C d'un supercondensateur, il suffit de calculer la mise en série des deux capacités individuelles C_1 et C_2 , qui se forment sur chaque interface électrode-électrolyte à l'électrode positive et à l'électrode négative, comme illustré sur la (figure II.2), [14]:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \quad (\text{II. 3})$$

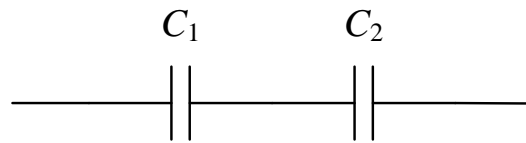


Figure II. 2: Circuit équivalent simplifié d'un SC

II.2.2. Différents types de SCs :

Les supercondensateurs sont des systèmes de stockage d'électricité rechargeables composés de deux électrodes identiques séparées par un électrolyte. Ils sont également appelés générateurs secondaires et sont classés en deux familles selon le matériau utilisé pour les électrodes. [13]

- Les super condensateurs à stockage électrostatique, également appelés SCs, sont caractérisés par un mécanisme de stockage de l'énergie basé sur le déplacement de charges électroniques et ioniques, qui est ensuite stockée dans une double couche électrique. Ces condensateurs utilisent des électrodes à base de carbone activé, qui représentent la technologie d'électrode la plus couramment utilisée en raison de leur capacité à fournir une puissance spécifique élevée de plusieurs kW.kg-1, une durée de vie théoriquement infinie (plus de 100000 cycles de charge-décharge en pratique), ainsi

qu'une surface spécifique supérieure à 1000 m².g⁻¹, pouvant atteindre jusqu'à 3000 m².g⁻¹.

- Les super condensateurs électrochimiques, également connus sous le nom de super condensateurs hybrides, combinent le fonctionnement des super condensateurs électrostatiques et celui des accumulateurs en utilisant des électrodes susceptibles de subir des réactions redox réversibles, ce qui leur permet de mettre en œuvre des processus électrostatiques et faradiques. Selon la nature des matériaux d'électrodes, ils peuvent être classés en deux familles : les super condensateurs à base d'oxydes métalliques et les super condensateurs à base des polymères conducteurs [15].

Il est également possible de catégoriser les SCs selon :

- Les performances des super condensateurs, telles que leur énergie et leur puissance spécifiques, dépendent en grande partie de leurs électrolytes. On distingue généralement deux types d'électrolytes pour ces dispositifs : les électrolytes aqueux, tels que l'acide sulfurique ou la potasse, et les électrolytes organiques, comme le carbonate de propylène ou l'acétonitrile.
- Les SCs sont munis de séparateurs, qui permettent d'isoler les deux électrodes contenant l'électrolyte. Les matériaux couramment utilisés pour les séparateurs sont les polymères et le papier pour les milieux organiques, tandis que les milieux aqueux requièrent plutôt des matériaux tels que la céramique et la fibre de verre.

II.2.3. La modélisation et l'étude des propriétés des super condensateurs :

II.2.3.1 Modélisation des super condensateurs :

La représentation des principaux phénomènes physiques à l'intérieur d'un composant permet d'établir des modèles de super condensateurs qui prédisent leur comportement dans diverses applications. On peut classer ces modèles en trois catégories: [32]

- Les modèles électrochimiques de type "microscopique" constituent une méthode de représentation locale des phénomènes impliqués dans les processus électrochimiques. Ces modèles permettent une analyse fine des phénomènes à l'échelle moléculaire ou atomique, offrant ainsi une meilleure compréhension de leur nature et de leur mécanisme [16-17].
- Les modèles fréquentiels sont une méthode couramment utilisée pour caractériser les dispositifs électroniques et électromécaniques. Ils se basent sur l'analyse de la réponse

en fréquence du dispositif, ce qui permet de décrire ses propriétés de manière détaillée et de prédire son comportement en réponse à des signaux d'entrée spécifiques [16-17].

- Les modèles de type circuit électrique, appelés également modèles macroscopiques, permettent de représenter les phénomènes électriques à grande échelle. Dans de nombreuses applications, notamment dans le domaine de l'ingénierie électrique, ces modèles sont privilégiés car ils permettent une analyse globale des systèmes électriques.

Dans le paragraphe suivant, nous exposons brièvement quelques généralités sur les deux méthodes de caractérisation des supercondensateurs, ainsi que quelques modèles de circuits électriques existants pour ce composant. Notre objectif est de sélectionner un modèle réaliste et efficace en termes de temps de calcul, de manière à ne pas alourdir la simulation globale de notre système.

II.2.3.2 Méthodes de caractérisation :

Afin de déterminer les paramètres des modèles et de cerner le fonctionnement des supercondensateurs tout en comparant les performances des différents modèles, deux méthodes de caractérisation sont couramment employées : la caractérisation temporelle et la caractérisation fréquentielle.

1. Caractérisation temporelle :

La caractérisation temporelle est une méthode couramment utilisée pour identifier les paramètres d'un supercondensateur à partir de mesures temporelles de courant et de tension. Cette approche présente l'avantage de permettre une mise en œuvre simple et de faire fonctionner l'élément à des niveaux de courant proches de la réalité. Cependant, elle ne permet pas d'identifier les différentes constantes de temps régissant le fonctionnement du supercondensateur.

2. Caractérisation fréquentielle :

La caractérisation fréquentielle consiste à appliquer au super condensateur une faible tension sinusoïdale superposée à une tension continue et à analyser la sortie en courant. La fréquence du signal sinusoïdal peut varier et ceci permet de déduire le comportement du super condensateur dans un domaine fréquentiel assez large autour d'un point de fonctionnement (tension, courant). Cette méthode est réalisée grâce à un appareil spécifique, dénommé "spectromètre d'impédance".

II.2.3.3 Choix d'un modèle :

1. Modèle RC du constructeur :

Étant donné que les supercondensateurs à double couche fonctionnent principalement de manière électrostatique, ils sont considérés comme des dispositifs capacitifs. Pour simplifier leur modélisation, on peut approximer un supercondensateur par une capacité de stockage C en série avec une résistance R (Figure II.3). Bien que ce modèle soit souvent utilisé par les constructeurs dans leurs spécifications, il ne peut pas rendre compte de tous les phénomènes physiques associés au stockage d'énergie dans les supercondensateurs.

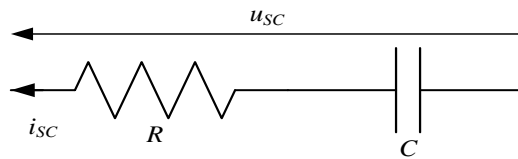


Figure II. 3: Modèle constructeur d'un SC.

Pour Certains fabricants de supercondensateurs, tels que MAXWELL, peuvent fournir des instructions sur la procédure expérimentale pour caractériser un élément. En utilisant les paramètres du produit (PC 7223) tels que $R = 0,85 \text{ m}\Omega$, $C = 2700 \text{ F}$, $I_{SCnom} = 400\text{A}$ et $U_{SCmax}=2,7\text{V}$, une simulation de charge/décharge du supercondensateur sous Matlab/Simulink a été effectuée, ce qui a donné les résultats présentés dans la figure II.4. Cette figure montre la tension de charge et de décharge en réponse à deux échelons de courant avec une amplitude de 100 A chacun pendant 60 secondes (soit un quart du courant nominal). À l'instant $t = 5\text{s}$, la tension de charge augmente rapidement de 0 V à $u_r=R.i_{SC}$, puis augmente linéairement jusqu'à la fin du temps de charge, lorsque le courant de charge atteint zéro, la tension chute de 2,307 V à 2,222 V, qui est la tension de charge finale. À l'instant $t = 125\text{s}$, la tension de décharge chute rapidement d'une petite valeur u_r , puis chute linéairement jusqu'à la fin de temps de décharge, lorsque le courant de décharge est nul à l'instant $t=185\text{s}$, la tension du supercondensateur revient à une valeur presque nulle. Les résultats montrent que le temps de charge et de décharge est très rapide, de l'ordre de 60 s en utilisant seulement un quart du courant nominal.

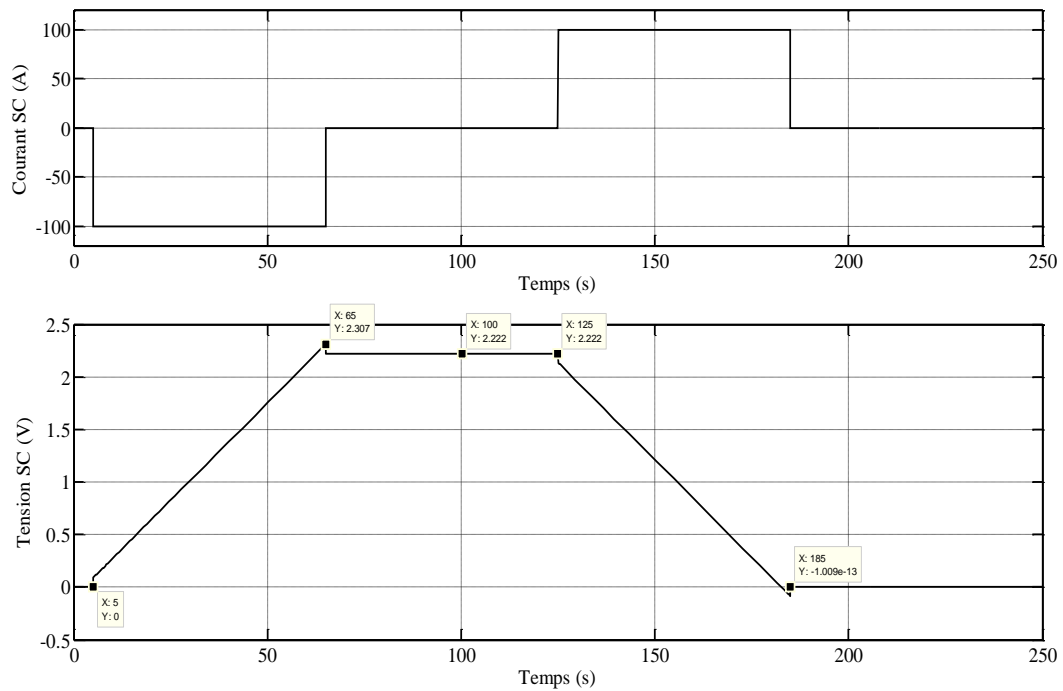


Figure II. 4: Charge et décharge du super condensateur “PC 7223” avec un courant de 100A

En outre, les résultats correspondants aux tensions de charge et de décharge sont présentés dans la figure II.5, où deux échelons de courant ont été appliqués, l'un négatif et l'autre positif, avec une amplitude de 400 A (courant nominal) sur une période de 15 secondes. L'analyse de cette figure confirme la rapidité des processus de charge et de décharge des supercondensateurs, qui s'effectuent en environ 15 secondes. Ainsi, il est manifeste que les supercondensateurs sont extrêmement appropriés pour des applications exigeant des transferts d'énergie à forte densité de puissance, les rendant particulièrement adaptés en tant que systèmes de stockage rapide dans les systèmes électriques hybrides à piles à combustible, qui nécessitent des densités de puissance élevées.

Il convient cependant de souligner que ce modèle ne tient pas compte des variations de résistance et de capacité en fonction des contraintes électriques. Par conséquent, sa validité est limitée à certains domaines de courant et de tension. Ainsi, dans le cadre de notre étude, nous ne nous limiterons pas à ce modèle simplifié, et nous examinerons d'autres modèles plus sophistiqués dans les prochains paragraphes.

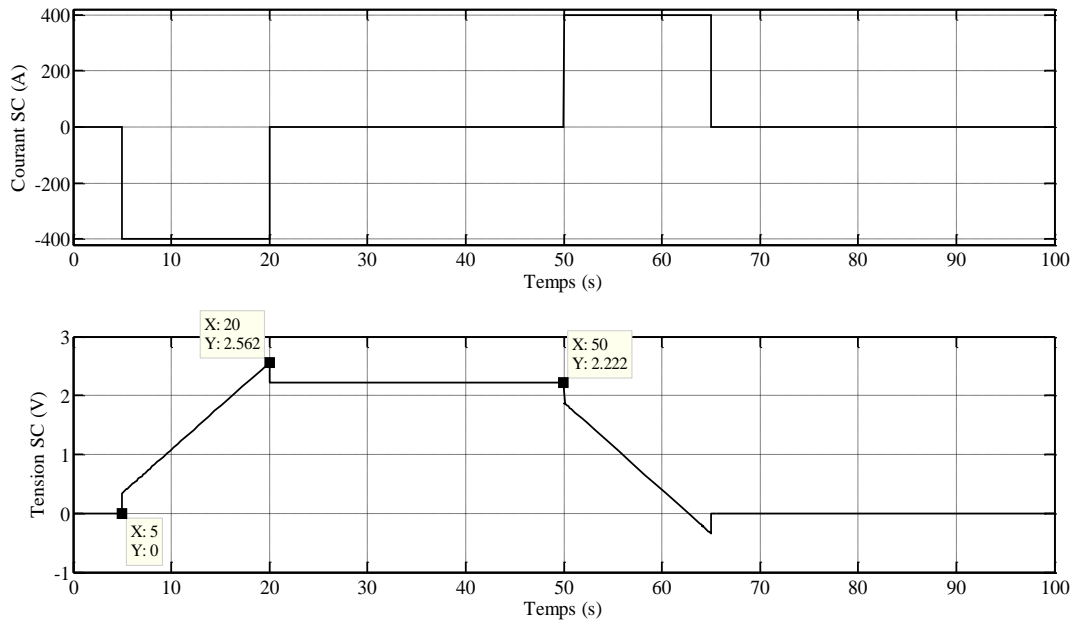


Figure II. 5: Charge et décharge du super condensateur "PC 7223" avec un courant de 400A

II.2.3.4 Systèmes passifs d'équilibrage :

1. Système d'équilibrage avec résistance :

La configuration du système est caractérisée par une simplicité notable, se limitant à une connexion en parallèle d'une résistance à chaque élément de supercondensateur, telle qu'illustrée dans la figure II.6.

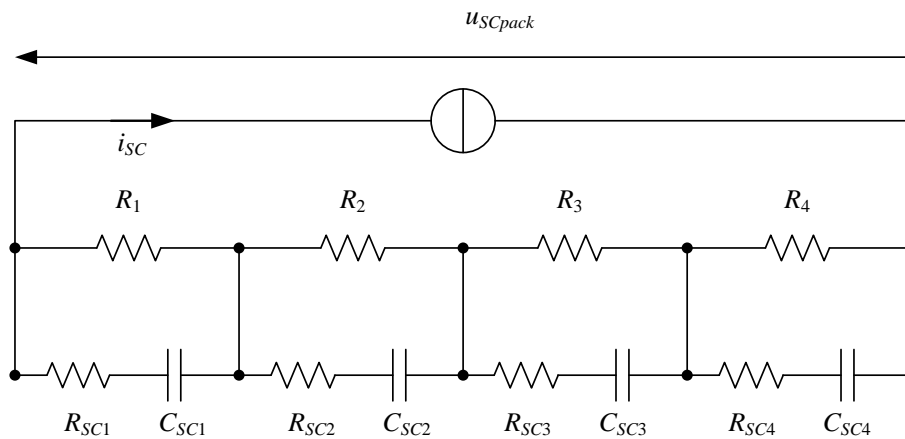


Figure II. 6: Système d'équilibrage résistif

Différents critères contribuent à déterminer la valeur de la résistance, mais le critère principal est de maintenir la tension maximale aux bornes de l'élément dans des limites acceptables. Parmi les inconvénients associés à cette structure, on peut mentionner les suivants [13, 18]:

- La limitation de la dynamique du Pack de super condensateur.
- Le rendement très faible (10 %) lié à la dissipation d'énergie dans les résistances.

2. Système d'équilibrage avec diodes zener :

Les diodes zener sont mises en parallèle sur les éléments de SC (figure II.7):

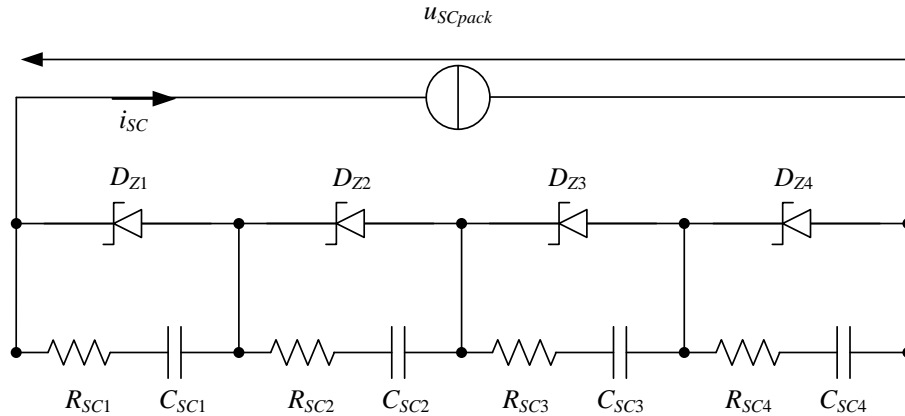


Figure II. 7: Système d'équilibrage avec diodes zener

La détermination de la tension zener des diodes est basée sur la tension maximale acceptée par les éléments de supercondensateur. Il est donc un défi de sélectionner la diode zener appropriée pour une application spécifique (I_{nom} , U_{Cmax}). Dans le système d'équilibrage. Toutefois, cette approche présente des avantages significatifs par rapport au système résistif, tels qu'une efficacité accrue (90%) et une amélioration de la dynamique. Il convient toutefois de noter que l'utilisation de diodes zener dans cette solution engendre une dissipation d'énergie lorsque la tension aux bornes de l'élément atteint sa valeur maximale. Si plusieurs éléments atteignent leur limite de tension, cette dissipation peut devenir considérable [13, 18]. Afin de résoudre ces problématiques, il est possible d'adopter des structures basées sur des convertisseurs statiques, qui permettent de réduire les pertes par dissipation dans le système d'équilibrage.

3. Systèmes actifs d'équilibrage :

La réalisation du système d'équilibrage actif est plus compliquée que celle du système passif. Dans le cas d'une association en série de plus de deux SCs, le principe de ce système consiste à placer un circuit buck-boost pour chaque paire de cellules, (figure II.8). Ce circuit à base de deux interrupteurs (MOS) permet de dévier une partie du courant de charge afin d'obtenir une dynamique de charge identique pour l'ensemble des SCs. La commande des deux interrupteurs (T_1 et T_2 par exemple) est basée sur la comparaison des niveaux des tensions des SCs (u_{SC1} et u_{SC2} par exemple) avec un rapport cyclique de 50%. La logique de cette commande est résumée ci-dessous :

La mise en œuvre du système d'équilibrage actif présente une complexité supérieure à celle du système passif. Lorsqu'il s'agit de connecter en série plus de deux supercondensateurs, le principe de ce système consiste à intégrer un circuit buck-boost pour chaque paire de cellules, tel qu'illustré dans la figure II.8. Ce circuit, qui fait appel à deux interrupteurs MOS, permet de dévier une partie du courant de charge afin d'assurer une dynamique de charge uniforme pour l'ensemble des supercondensateurs. La commande des interrupteurs (par exemple, T_1 et T_2) repose sur la comparaison des niveaux de tension des supercondensateurs (par exemple, u_{SC1} et u_{SC2}) avec un rapport cyclique de 50%. La logique de cette commande est succinctement exposée ci-dessous :

- $u_{SC1} > u_{SC2}$, le transistor T_2 se bloque (OFF) et T_1 s'amorce (ON)
- $u_{SC1} < u_{SC2}$, le transistor T_1 se bloque (OFF) et T_2 s'amorce (ON)

Le principe de contrôle reste uniforme pour tous les circuits buck-boost. En maintenant une fréquence de commutation invariable, on dimensionne l'inductance de manière à obtenir une moyenne de valeur ($2 \cdot i_{eq}$) afin de garantir une efficacité optimale. Les équations II.4 et II.5 énoncent les résultats issus de ces considérations [1].

$$i_{eq} = \frac{C_{SC2} - C_{SC1}}{C_{SC2} + C_{SC1}} i_{SC} = \frac{\chi}{200 + \chi} i_{SC} \quad (\text{II.4})$$

$$L_{eq} = \frac{u_{SC1}}{16 \cdot i_{eq} \cdot f} \cdot \left\{ 1 + \frac{u_{SC1}}{u_{SC2} + U_d} \right\} \quad (\text{II.5})$$

Avec :

- χ : La différence relative en % entre C_{SC2} et C_{SC1} par rapport à la capacité de base (C_{SC1}).
- U_d : la tension de seuil des diodes.
- f : la fréquence de commutation des transistors.

Afin de mettre en place ce type de système d'équilibrage actif, il est requis d'avoir un nombre de circuits équivalent à $(n_{SC} - 1)$, où n_{SC} représente le nombre de supercondensateurs connectés en série. Le schéma de ce système d'équilibrage est illustré dans la figure II.8. Cette configuration présente un rendement remarquablement élevé, atteignant environ 97 %, et garantit une dynamique d'équilibrage optimale [1].

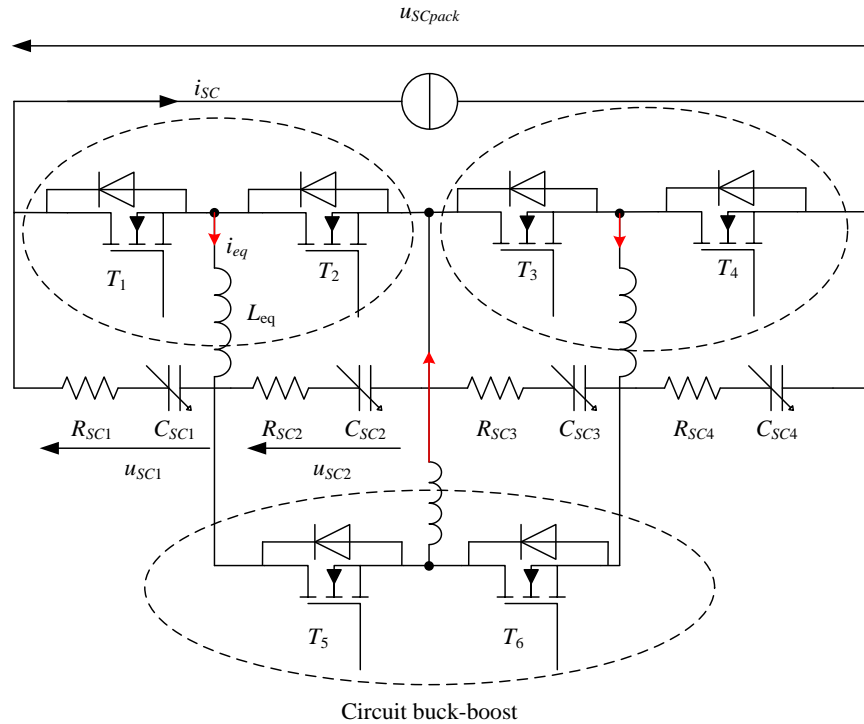


Figure II. 8: Equilibrage de 4 cellules à base de convertisseurs buck-boost.

II.3. Modélisation du convertisseur statique bidirectionnel associé aux SCs :

III.3.1. Modélisation et commande du convertisseur :

Le convertisseur de puissance bidirectionnel en courant joue un rôle essentiel en tant qu'interface entre les sources d'énergie électrique réversible en courant des SCs et le bus continu. Son objectif est de garantir l'adaptation des niveaux de tension des SCs au bus continu ainsi que la possibilité d'un transfert d'énergie bidirectionnel entre les SCs et le bus continu, permettant ainsi le stockage et la restitution d'énergie. Le schéma de base du convertisseur statique bidirectionnel en courant utilisé dans notre travail est illustré dans la figure II.9. On y retrouve la même structure que le convertisseur survolteur unidirectionnel, à ceci près qu'un interrupteur S3 (IGBT) remplace la diode et est commandé par un signal complémentaire à celui de l'interrupteur S2 (IGBT). Cette configuration permet une circulation bidirectionnelle du courant entre les SCs et le bus continu.

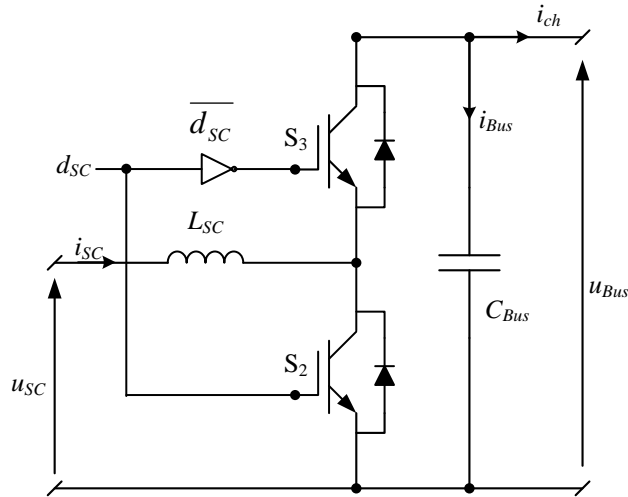


Figure II. 9: Convertisseur statique bidirectionnel associé aux SCs

L'équation caractéristique de ce convertisseur, qui établit la corrélation entre la tension d'entrée des SCs (u_{SC}) et la tension de sortie du Bus continu (u_{Bus}) en fonction des rapports cycliques (d_{SC}) et des interrupteurs (S_2 et S_3), est exprimée par la relation suivante.

$$\frac{u_{Bus}}{u_{SC}} = \frac{1}{1-d_{SC}} \quad (\text{II.6})$$

La technique classique de modulation de largeur d'impulsion (MLI) sera utilisée pour assurer le contrôle complémentaire du convertisseur bidirectionnel en utilisant le signal de commande des interrupteurs S_2 et S_3 . Le rapport cyclique $0 \leq d_{SC} \leq 1$ représente l'entrée de commande du système. Le modèle en termes de valeurs moyennes de ce convertisseur est exprimé par l'équation suivante :

$$\begin{cases} L_{SC} \frac{di_{SC}}{dt} = u_{SC} - (1-d_{SC})u_{Bus} \\ C_{Bus} \frac{du_{Bus}}{dt} = (1-d_{SC})i_{SC} - i_{ch} \end{cases} \quad (\text{II.7})$$

En prenant en compte que $1 - d_{SC} = D_{SC}$, l'équation II.7 se transforme comme suit :

$$\begin{cases} L_{SC} \frac{di_{SC}}{dt} = u_{SC} - D_{SC}u_{Bus} \\ C_{Bus} \frac{du_{Bus}}{dt} = D_{SC}i_{SC} - i_{ch} \end{cases} \quad (\text{II.8})$$

II.3.2. Calcul de l'inductance de lissage du convertisseur bidirectionnel :

La détermination de l'inductance de filtrage est réalisée conformément à la section (I.7.2 du chapitre I), avec la particularité que ce convertisseur présente deux modes de fonctionnement différents, à savoir le mode abaisseur et le mode élévateur, comme clairement illustré dans la figure II.10.

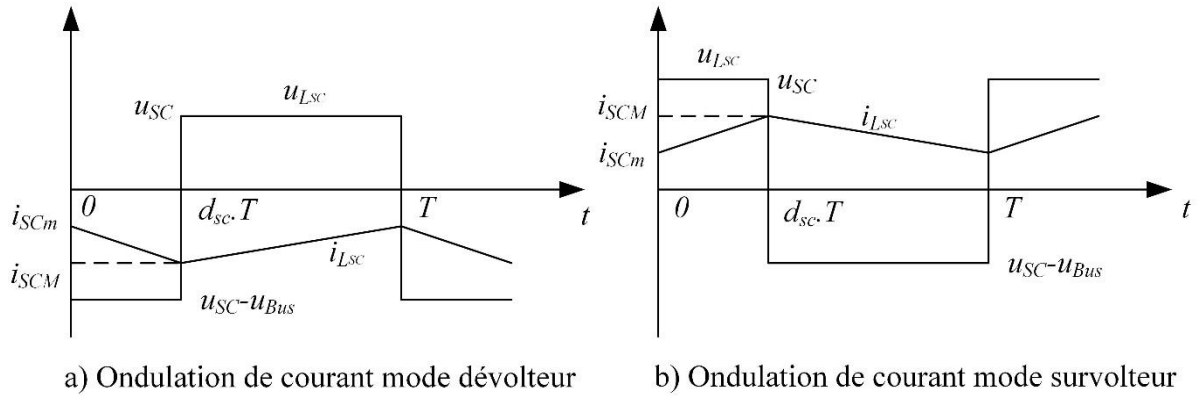


Figure II. 10: Ondulation du courant.

En utilisant la même méthodologie que celle employée pour le convertisseur élévateur en lien avec le PÀC au chapitre I (paragraphe I.2), il est possible d'évaluer l'amplitude des fluctuations du courant dans les deux configurations : survolteur et dévolteur [13, 19-20].

- Dans le cas survolteur, nous avons $\Delta i_{SC} = \frac{u_{SC}}{L_{SC} f_{MLI}} d_{SC}$ avec $u_{Bus} = \frac{u_{SC}}{1-d_{SC}}$, ce qui donne:

$$\Delta i_{SC} = \frac{d_{SC}(1-d_{SC})u_{Bus}}{L_{SC} f_{MLI}} \quad (II.9)$$

- Dans le cas dévolteur, nous avons $\Delta i_{SC} = \frac{u_{Bus} - u_{SC}}{L_{SC} f_{MLI}} d_{SC}$ avec $u_{SC} = d_{SC} u_{Bus}$, ce qui donne:

$$\Delta i_{SC} = \frac{d_{SC}(1-d_{SC})u_{Bus}}{L_{SC} f_{MLI}} \quad (II.10)$$

Où :

- u_{SC} : Tension aux bornes du Pack de super condensateur (V).
- Δi_{SC} : Ondulation du courant dans l'inductance (A).
- L_{SC} : Valeur de l'inductance de lissage (H).

On constate qu'on a la même ondulation pour les deux modes. Pour une fréquence MLI donné, l'ondulation maximale est obtenue pour un rapport cyclique $d_{SC} = 0.5$, elle vaut:

Il est observé que les deux modes présentent la même amplitude d'ondulation. Dans le cas d'une fréquence de modulation MLI fixe, l'amplitude maximale de l'ondulation est obtenue avec un rapport cyclique d_{SC} de 0.5, et sa valeur est la suivante :

$$\Delta I_{SC\max} = \frac{U_{Bus}}{4L_{SC}f_{MLI}} \quad (\text{II.11})$$

Cette relation permet de déterminer la valeur minimale de l'inductance en fonction de l'amplitude maximale de l'ondulation, donnée pour un rapport cyclique de $d_{SC} = 0.5$, de la manière suivante :

$$L_{SC} = \frac{U_{Bus}}{4f_{MLI}\Delta I_{SC\max}} \quad (\text{II.12})$$

Voici un récapitulatif des valeurs numériques des caractéristiques de l'inductance du convertisseur de puissance pour le fonctionnement nominal du système, présenté dans le tableau ci-dessous :

U_{Bus}	f_{MLI}	$\Delta I_{SC\max}$	L_{SC}
400V	25KHz	10A	500 μ H

Tableau II. 1: Caractéristiques des convertisseurs de puissance

II.3.3. Calcul du condensateur de filtrage du bus " C_{Bus} " :

Le condensateur doit avoir la capacité de tolérer les fluctuations des pics de puissance. Les variations de tension en sortie sont induites par le courant alternatif qui traverse le condensateur, comme illustré dans la Figure II.11 [13, 19-20].

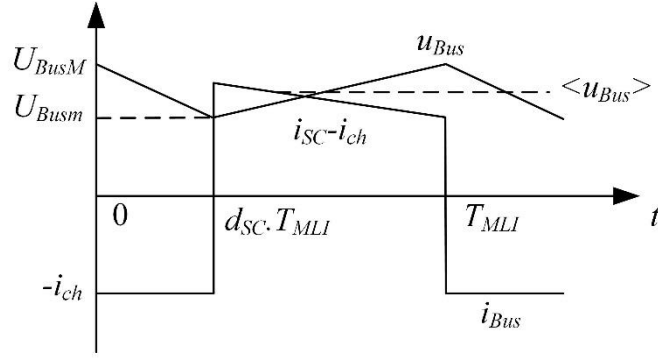


Figure II. 11: Ondulation de tension

Le calcul de l'ondulation de tension peut être effectué comme suit:

Pour $0 < t < d_{SC} \cdot T_{MLI}$:

$$u_{Bus}(t) = U_{BusM} - \frac{i_{ch}}{C_{Bus}} t \quad (\text{II.13})$$

A l'instant $t = d_{SC} \cdot T_{MLI}$, l'équation II.13 devient:

$$u_{Bus}(d_{SC} T_{MLI}) = U_{BusM} - \frac{i_{ch}}{C_{Bus}} d_{SC} T_{MLI} = U_{Busm} \quad (\text{II.14})$$

D'où :

$$\Delta u_{Bus} = U_{BusM} - U_{Busm} = \frac{i_{ch}}{C_{Bus} \cdot f_{MLI}} d_{SC} \quad (\text{II.15})$$

Or $i_{SC} = \frac{i_{ch}}{1 - d_{SC}}$, nous pouvons donc écrire :

$$\Delta u_{Bus} = \frac{d_{SC} (1 - d_{SC}) i_{SC}}{C_{Bus} f_{MLI}} \quad (\text{II.16})$$

Avec:

- C_{Bus} : Valeur du condensateur de filtrage (F).
- i_{SC} : Courant dans l'inductance (A).
- U_{Busm} : Tension minimum aux bornes du condensateur (V).
- U_{BusM} : Tension maximum aux bornes du condensateur (V).
- Δu_{Bus} : Ondulation de tension aux bornes du condensateur (V).

Pour un courant maximal et un rapport cyclique $d_{SC} = 0.5$, l'ondulation maximale de tension est obtenue et s'élève à :

$$\Delta u_{BusM} = \frac{i_{SC}}{4C_{Bus}f_{MLI}} \quad (\text{II.17})$$

La valeur minimale du condensateur est donc donnée par la relation :

$$C_{Bus\min} = \frac{i_{SC}}{4f_{MLI}\Delta u_{BusM}} \quad (\text{II.18})$$

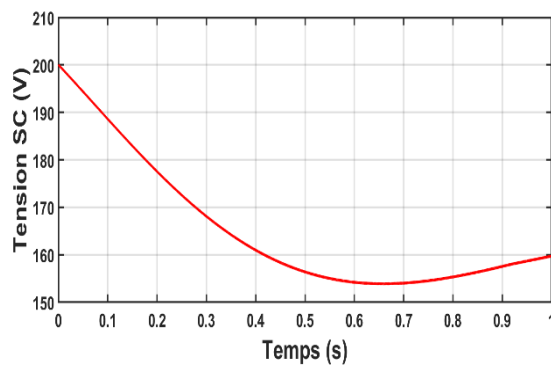
Les valeurs numériques des caractéristiques retenues pour l'inductance du convertisseur de puissance, correspondant au fonctionnement nominal du système, sont récapitulées dans le tableau ci-dessous.

Tableau II. 2: Caractéristiques des convertisseurs de puissance.

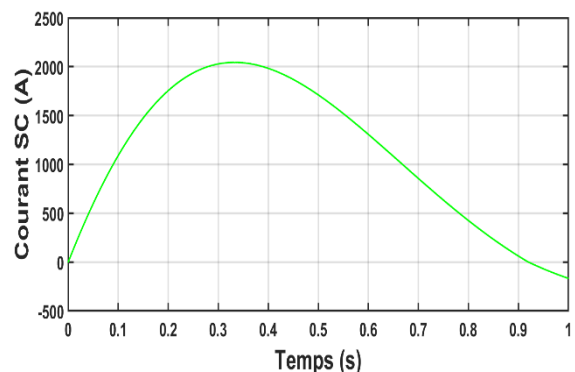
i_{SC}	f_{MLI}	Δu_{BusM}	C_{Bus}
400A	25KHz	0.20V	0.07 F

II.4. Les résultats de simulation de l'hybridation de SC :

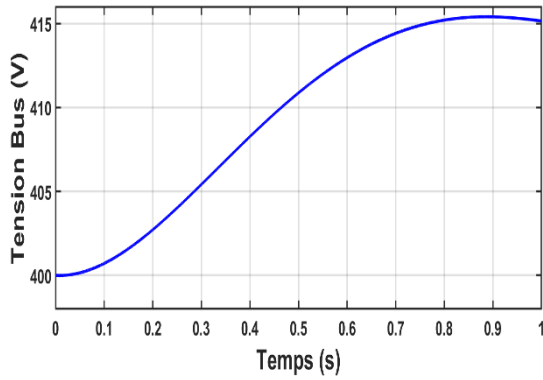
Les figures I.12 a,b,c, et d représentent respectivement la tension de la supercondensateur qui est la tension à l'entrée du hacheur boost, le courant au niveau de l'inductance , la tension de Bus continu et le courant de charge continu à la sortie du hacheur boost pour un rapport cyclique égale à 0.4. On voit bien que l'hacheur fonctionne en mode continu, en plus la tension de sortie est égale à la tension d'entrée 155 V sur (1-0.4) qui donne 415V. Dans ce cas le hacheur fonctionne comme de mode fonctionnement boost et le supercondensateur fournit le courant à la charge.



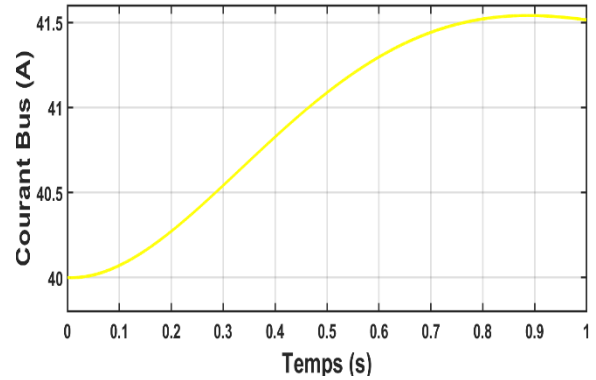
a. Tension SC (V)



b. Courant SC (A)



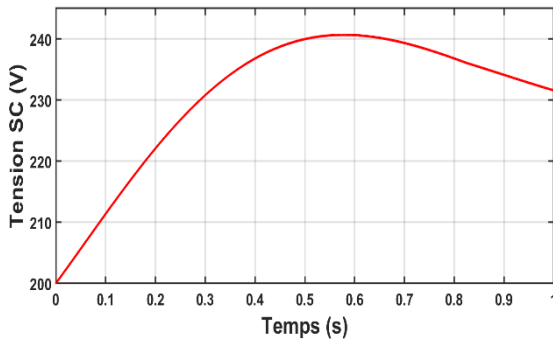
c. Tension du Bus (V)



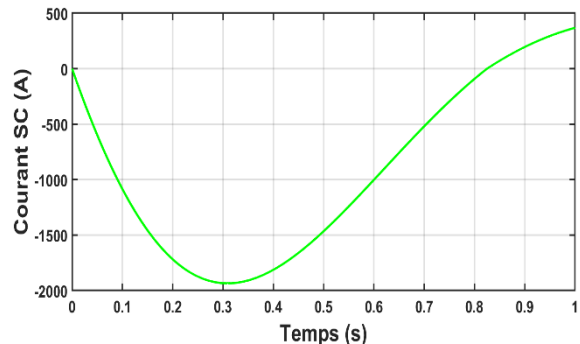
d. Courant du Bus (A)

Figure II. 12: Les performances opérationnelles du supercondensateur pour un rapport cyclique égale à 0,4.

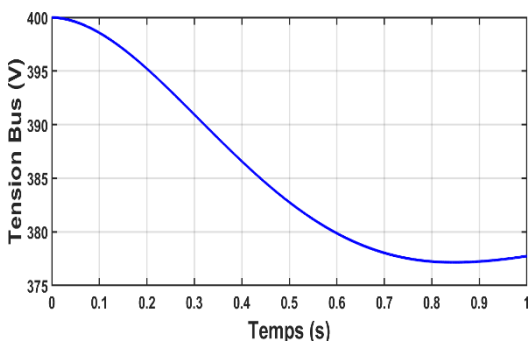
Les figures II.13 a,b,c et d représentent respectivement la tension de la supercondensateur qui est la tension à l’entrée du hacheur Buck-Boost, le courant au niveau de l’inductance, la tension de Bus continu et le courant de charge continu à la sortie du hacheur Buck-Boost pour un rapport cyclique égale à 0.6. On voie bien que l’hacheur fonctionne en mode continu, en plus la tension de sortie est égale à la tension d’entrée 240V sur (0.6) qui donne 380V. dans ce cas le hacheur fonction en mode de fonctionnement Buck et le supercondensateur récupère l’énergie pour la fournir au bus continu.



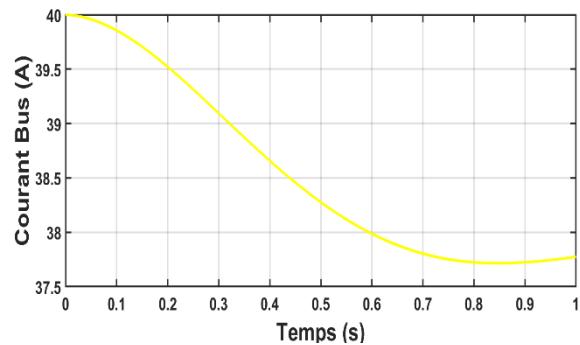
a. Tension SC (V)



b. Courant SC (A)



c. Tension du Bus (V)



d. Courant du Bus

Figure II. 13: Les performances opérationnelles du supercondensateur pour un rapport cyclique égale à 0,6.

II.5. Conclusion :

Ce chapitre se consacre à une exploration approfondie des divers aspects liés aux supercondensateurs, englobant leur modélisation spécifique ainsi que celle du convertisseur DC-DC bidirectionnel qui leur est associé. Au cours de cette section, une étude détaillée des concepts fondamentaux des supercondensateurs est entreprise, englobant leur principe de fonctionnement, leur composition variée et leur caractérisation. De plus, un modèle spécifique est développé pour ces dispositifs. Parallèlement, une modélisation et un dimensionnement adéquat du convertisseur DC-DC bidirectionnel accompagnant le supercondensateur sont réalisés. Enfin, ce chapitre se conclut en présentant les résultats de simulation obtenus à partir de cette modélisation, offrant ainsi une évaluation concrète des performances du système étudié.

En concluant, tout en considérant les éventuels inconvénients liés à l'utilisation des supercondensateurs, il est essentiel de souligner les nombreux avantages qu'ils offrent par rapport à d'autres méthodes de stockage, notamment dans le contexte des systèmes électriques hybrides. Parmi ces atouts majeurs, on peut accorder une importance particulière au stockage direct et à la charge électrostatique rapide, à la facilité de gestion de l'énergie stockée grâce à la conversion électronique de puissance, à une densité de puissance élevée et à une longue durée de vie.

Chapitre III:

Gestion d'énergie pour l'hybridation de la pile à combustible – super condensateur

III.1. Introduction :

Ce chapitre se concentre sur la problématique du contrôle des sources hybrides, qui associent la pile à combustible et le supercondensateur. Contrairement à un système à source d'énergie unique, où la demande de charge est directement régulée par cette dernière, les sources hybrides soulèvent un défi d'une complexité accrue. Il devient impératif d'optimiser la répartition de l'énergie entre ces deux sources afin de répondre aux besoins instantanés de puissance, tout en préservant l'intégrité des composants et en évitant les compromis préjudiciables.

L'objectif central de ce chapitre consiste à développer des stratégies de commande visant à optimiser les performances globales du système hybride. Ces performances englobent des aspects essentiels tels que l'efficacité énergétique, la durée de vie des composants et la disponibilité de l'énergie. Il est essentiel de trouver un équilibre optimal entre la pile à combustible et le supercondensateur, en exploitant les caractéristiques propres à chaque source afin de maximiser leur utilisation dans différentes conditions de charge.

Afin d'évaluer l'efficacité de la stratégie de gestion d'énergie que nous proposons, nous avons réalisé des simulations à l'aide de l'environnement Matlab/Simulink. Ces simulations nous permettent d'analyser en détail le comportement du système hybride dans diverses conditions de charge et de déterminer les performances obtenues. Les résultats détaillés de ces simulations sont présentés en fin de chapitre, offrant ainsi une analyse approfondie des avantages offerts par notre approche.

III.2. Architecture du système électrique hybride à PÀC :

Le schéma du système, présenté dans la Figure III.1, met en évidence les sources hybrides (PÀC/SC) qui sont reliées au bus continu à l'aide de convertisseurs à courant continu [21].

La charge est considérée comme une source de courant programmable avec des paliers de charge positif, négatif et nul.

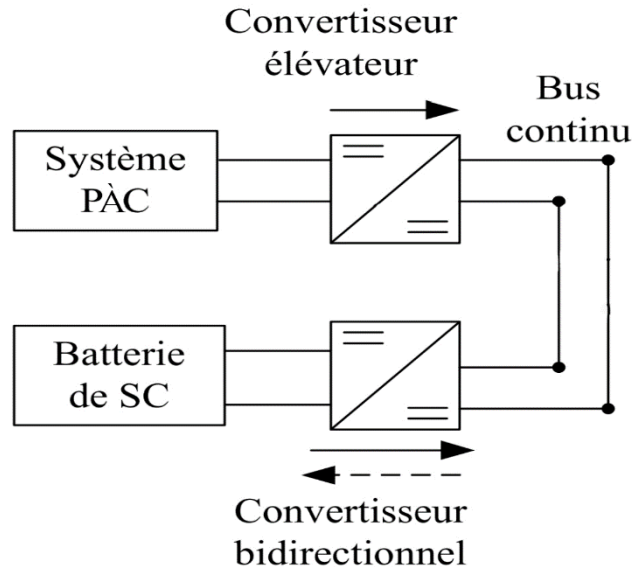


Figure III. 1: Architecture du système électrique à PÀC – SC

La gestion de l'énergie dans cette étude se concentre sur la régulation précise de la tension du bus continu ($u_{Bus} = 400V$). Nous avons intégré une pile à combustible PEMFC ($u_{FC} = 220V$: tension nominale de la pile, $i_{FC} = 280A$: courant nominal de la pile) comme principale source d'énergie. En complément, nous avons ajouté une batterie de super-condensateurs ($u_{SCref} = 200V$: tension de référence, série de 100 super-condensateurs) en tant que source de puissance auxiliaire. Cette configuration permet d'assurer des échanges d'énergie transitoires efficacement. Les performances du système électrique hybride ont été évaluées avec précision à l'aide d'une source de courant programmable.

La régulation de l'échange d'énergie entre le bus continu et les deux sources d'énergie (pile à combustible et super-condensateurs) donne lieu à l'établissement de trois modes de fonctionnement distincts :

- Le mode de charge : se définit par l'alimentation simultanée de l'équipement de stockage d'énergie, qui comprend les (SCs), assurée par (PÀC), notre source principale .
- Le mode de décharge: implique que la source principale (PÀC) et l'équipement de stockage (SCs) fournissent conjointement l'énergie nécessaire à la charge.
- Le mode de récupération (freinage par récupération) : également connu sous le nom de freinage par récupération, se caractérise par le transfert d'énergie de la charge vers la source secondaire de stockage (SCs).

III.3. Système de gestion de l'énergie pour les sources hybrides (PÀC /SCs) :

Dans cette partie, nous proposons un système pour la gestion et le contrôle du flux énergétique qui circule entre les deux sources du système électrique hybride à PÀC

(figure III.2). Pour cela nous avons utilisé quatre boucles de régulation et de contrôles qui sont [22-23]:

- Deux boucles de courant internes dans le cadre du contrôle des courants fournis par la PÀC (i_{FC}) et par les SCs (i_{SC}).
- Deux boucles de tensions externes, La première boucle assure le contrôle de la tension de charge et de décharge des SCs, tandis que la deuxième boucle est spécifiquement conçue pour le contrôle de la tension du Bus continu.

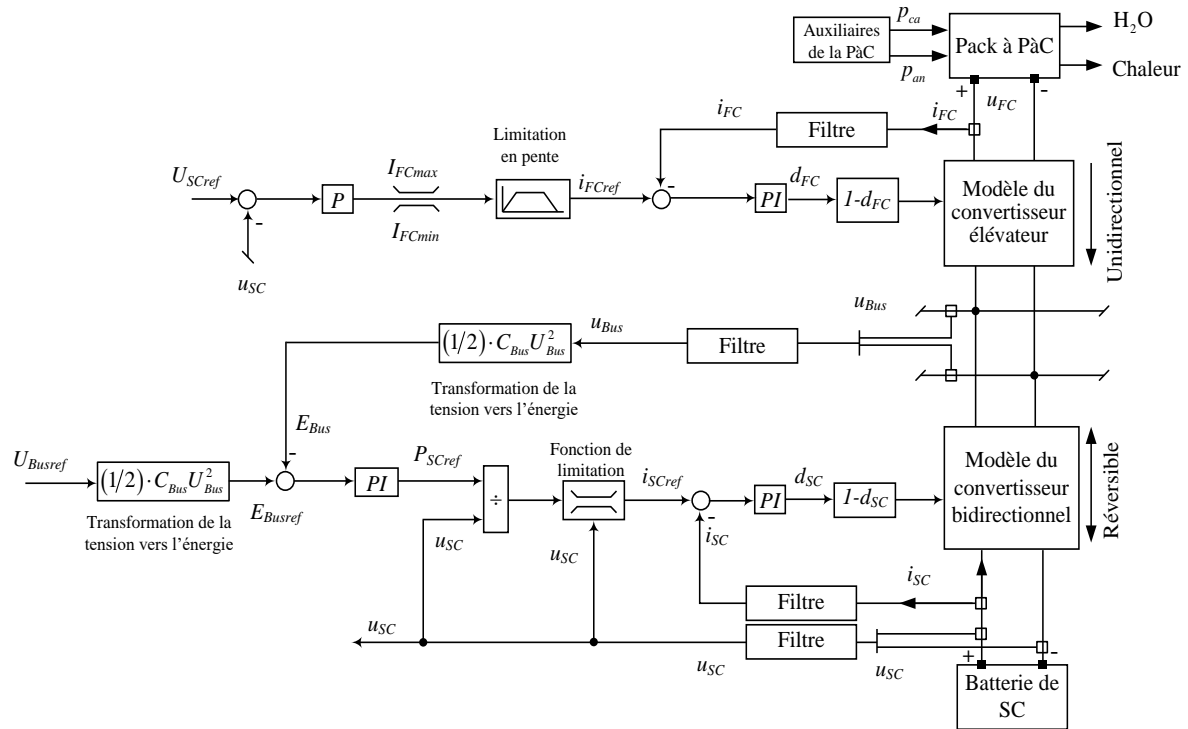


Figure III. 2: Le schéma général du système de gestion d'énergie des sources hybrides

Il est impératif que la stratégie proposée se conforme aux contraintes suivantes :

- Il est essentiel de maintenir la tension des SCs à l'intérieur de l'intervalle défini par $[U_{SCmin}, U_{SCmax}]$ [23-24].
- La pente Afin d'assurer un fonctionnement optimal de la PÀC, il est essentiel de limiter la pente du courant de la PÀC à sa valeur maximale, ce qui prévient les pics importants de λ_{O_2} .
- Il est primordial de maintenir le courant de la PÀC dans la plage définie $[I_{FCmin}, I_{FCnom}]$ pour garantir un fonctionnement optimal. [23-24]

III.3.1. La commande en courant du convertisseur lié au pack à PÀC :

Dans le but de garantir une dynamique et une sécurité optimales de la pile à combustible, le convertisseur associé est asservi en courant à l'aide de contrôleurs de type PI. Bien que ce type de contrôleur soit simple, il offre des performances très satisfaisantes pour ce type de régulation dans les convertisseurs statiques. [25-26].

La figure III.3 présente le schéma de contrôle qui permet d'illustrer le principe de fonctionnement. La référence de courant du pack à pile à combustible i_{FCref} est générée par le système de gestion d'énergie, tandis que le correcteur PI assure la régulation du courant i_{FC}

pour suivre la référence i_{FCref} . Parallèlement, le correcteur génère la valeur moyenne du rapport cyclique d_{FC} , qui est utilisée pour commander le convertisseur élévateur.

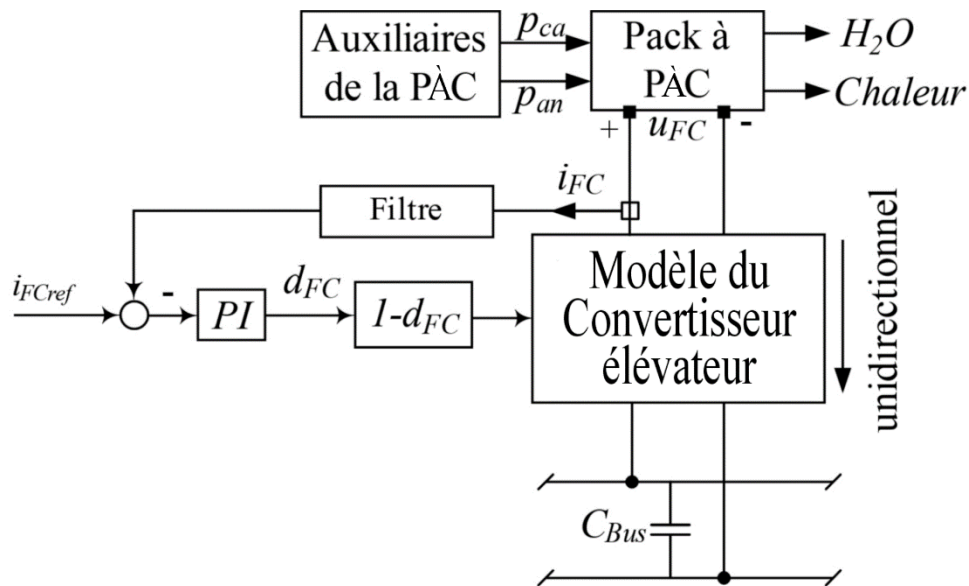


Figure III. 3: Contrôle de courant du convertisseur lié à la PÀC

Diverses méthodes de dimensionnement des régulateurs PI sont décrites dans la littérature spécialisée [24,27]. Il est important de souligner que l'application de ces méthodes conduit à des résultats satisfaisants uniquement dans des conditions spécifiques pour lesquelles elles ont été développées.

Dans notre étude, nous avons opté pour la méthode "essais-erreur" afin de dimensionner les régulateurs PI. Cette approche consiste à ajuster progressivement les paramètres en fonction des performances requises pour le réglage. Étant donné la complexité de notre système comprenant plusieurs boucles, nous avons accordé une attention particulière à garantir une stabilité optimale de ces boucles. Cette exigence a été pleinement prise en compte dans notre travail. De plus, il est bien établi que la méthode "essais-erreur" convient particulièrement aux systèmes dont les paramètres sont plus ou moins précisément connus [28].

III.3.2. Contrôle du courant dans le convertisseur lié aux SCs :

Afin d'assurer une opération sécurisée du convertisseur bidirectionnel en courant et de protéger les SCs des courants élevés de charge et de décharge, nous avons adopté une stratégie de commande en courant pour le convertisseur associé aux SCs. Cette commande utilise un

régulateur de type PI, dont le schéma de principe est représenté sur la figure III.4. [22-23, 29-30].

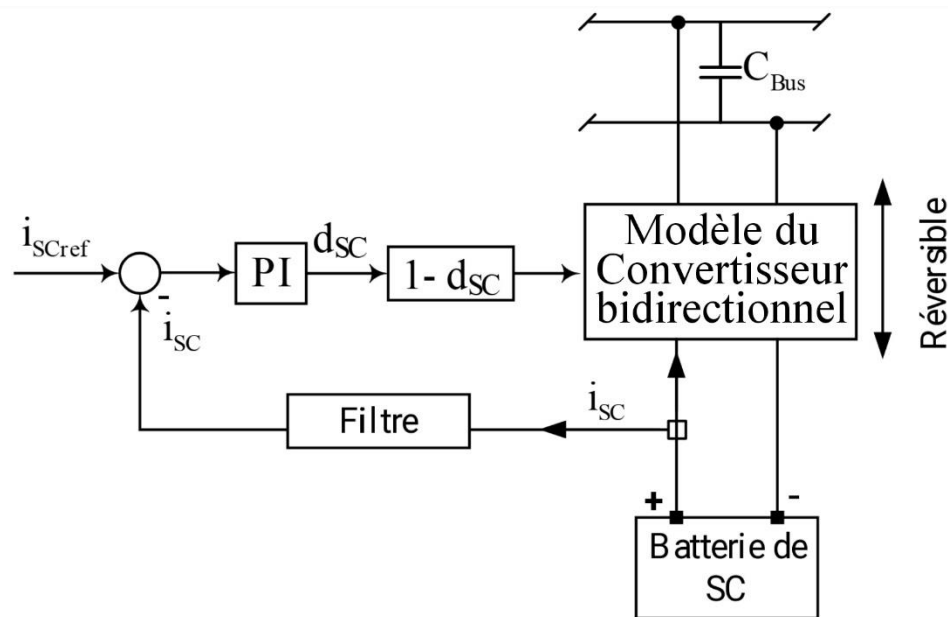


Figure III. 4: Mécanisme de contrôle du convertisseur lié aux SCs.

Le système de gestion d'énergie génère la référence de courant i_{SCref} pour le supercondensateur. Un régulateur PI est utilisé pour asservir le courant i_{SC} , assurant ainsi le suivi de la référence i_{SCref} . Ce régulateur génère le rapport cyclique d_{SC} qui commande le convertisseur bidirectionnel.

Les paramètres du régulateur PI ont été calculés en utilisant les mêmes méthodes de dimensionnement appliquées au régulateur PI de la boucle de courant du convertisseur associé au pack à pile à combustible.

III.3.3. La boucle de contrôle de la tension aux bornes des SCs :

Pour réguler la tension U_{SC} aux bornes des super-condensateurs (qui sont chargés à travers le pack à pile à combustible) afin qu'elle atteigne une valeur de référence U_{SCref} située dans l'intervalle de fonctionnement $[U_{SCmin}, U_{SCmax}]$, nous avons mis en place une boucle de régulation, illustrée dans la Figure III.5 [14-17]. Cette boucle de régulation est composée d'un correcteur proportionnel, d'une limitation d'amplitude dans les valeurs $[I_{FCmin}, I_{FCmax}]$ et d'une limitation de pente pour la variation temporelle du courant du pack à pile à combustible, afin de respecter les contraintes liées au fonctionnement de la pile à combustible. Le signal de sortie

de cette boucle, i_{FCref} , est utilisé comme référence dans la boucle de courant du pack à pile à combustible. Ainsi, le système de régulation est en mesure d'assurer une augmentation et une diminution progressive du courant I_{FC} , tout en évitant de dépasser le courant maximal de la pile.

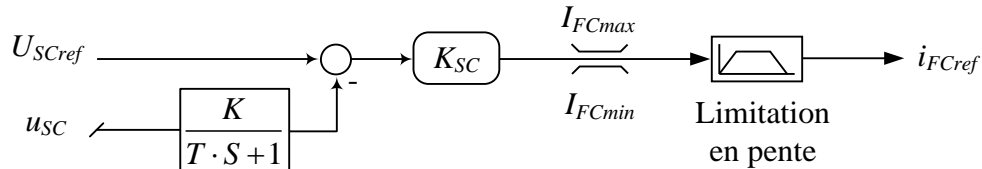


Figure III. 5: Boucle de régulation de la tension des SCs

L'incorporation d'un correcteur intégral peut engendrer une instabilité de la boucle de régulation attribuable à la capacité considérable des super-condensateurs [14, 24]. Dans ce contexte, l'utilisation d'un correcteur proportionnel (P) basique est appropriée, pourvu que le gain soit suffisamment élevé pour engendrer une erreur statique insignifiante. Par conséquent, la fonction de transfert suivante s'avère adéquate pour la modélisation de la boucle de régulation de la tension des super-condensateurs :

Les paramètres utilisés sont : $U_{SCmin} = 135V$, $U_{SCmax} = 270V$, $U_{SCref} = 200V$, $I_{FCmin} = 3A$, $I_{FCmaximal} = I_{FCnominal} = 280A$, $K = 1$, $T = 10^{-4}$, $K_{SC} = 20$.

III.3.4. La boucle de régulation de la tension appliquée au bus continu :

Pour assurer un fonctionnement du système, il est essentiel de maintenir la tension du bus continu à sa valeur de référence U_{Busref} . À cette fin, une boucle de régulation a été mise en place en utilisant des supercondensateurs (SCs), comme le montre la Figure III.6. Cette boucle de régulation intègre un correcteur PI, permettant d'obtenir un contrôle précis.

Dans le but d'assurer la linéarité du système, il a été décidé d'utiliser l'énergie accumulée dans le condensateur du bus continu comme variable de commande, plutôt que de s'appuyer uniquement sur la tension du bus continu. Cette approche est clairement représentée dans la Figure III.6 [21-24].

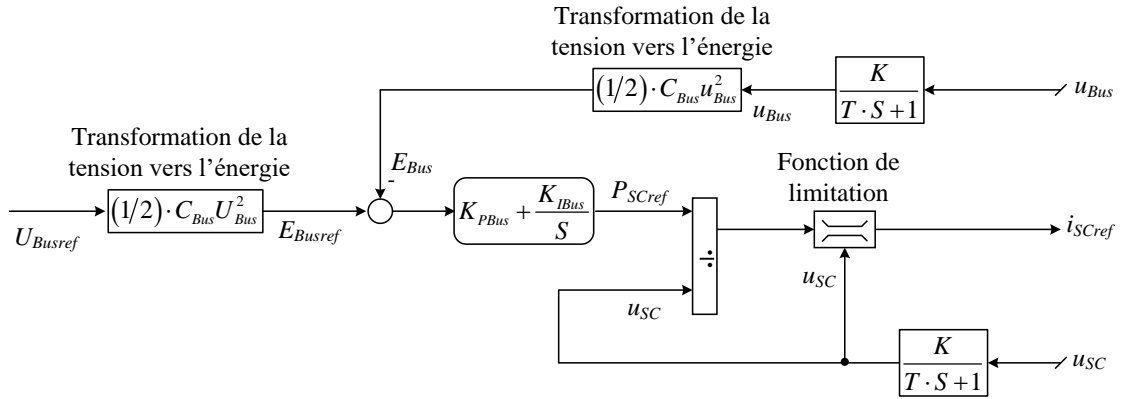


Figure III. 6: Boucle de régulation de la tension du Bus continu

En vertu de la loi de conservation de l'énergie, le contrôleur PI de l'énergie du bus continu génère la puissance de référence des supercondensateurs p_{SCref} . Il est possible d'obtenir la valeur de courant de référence i_{SCref} en divisant cette puissance p_{SCref} par la tension mesurée des supercondensateurs u_{SC} , tout en maintenant cette dernière dans l'intervalle $[U_{SCmin}, U_{SCmax}]$. La borne supérieure de cet intervalle correspond à la tension nominale de l'organe de stockage, tandis que la borne inférieure est traditionnellement définie à $U_{SCmax} / 2$, indiquant une profondeur de décharge au-delà de laquelle l'efficacité de décharge devient négligeable [22-24, 29-30].

$$i_{SCref} = \frac{P_{SCref}}{u_{SC}} \quad (\text{III.1})$$

Dans la Figure III.7, la fonction de limitation est représentée graphiquement dans le but de limiter le signal de référence i_{SCref} à l'intervalle $[I_{SCmin}, I_{SCmax}]$. Cet intervalle est défini en fonction de la tension des supercondensateurs, comme indiqué ci-dessous [22-23]:

$$\begin{cases} I_{SCmin} = -I_{SCnom} \cdot \min\left(1, \frac{U_{SCmax} - u_{SC}}{\Delta u}\right) \\ I_{SCmax} = I_{SCnom} \cdot \min\left(1, \frac{u_{SC} - U_{SCmin}}{\Delta u}\right) \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

En ajustant les paramètres de contrôle I_{SCnom} et Δu , il est possible de déterminer les valeurs pour lesquelles le courant maximal de décharge I_{SCmax} est nul lorsque la tension aux bornes de l'organe de stockage atteint U_{SCmin} , et le courant minimal de charge I_{SCmin} est nul

lorsque la tension aux bornes de l'organe de stockage atteint U_{SCmax} .

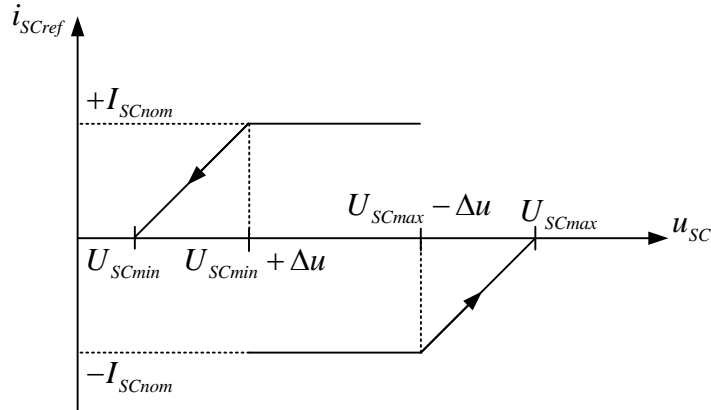


Figure III. 7: Fonction de limitation du courant des SCs

La relation qui nous permet de passer de la tension du Bus continu vers son énergie est donnée par :

$$E_{Busref} = \frac{1}{2} \cdot C_{Bus} \cdot U_{Bus}^2 \quad (\text{III. 3})$$

Afin de déterminer les paramètres du régulateur PI, diverses méthodes peuvent être employées en se basant sur la fonction de transfert [22-23]. Dans notre situation, nous avons opté pour la méthode d'essai-erreur.

Les paramètres utilisés dans la boucle de régulation de la tension du Bus continu sont les suivants :

$$K_{I-DC-Bus} = 2000, K_{P-DC-Bus} = 500, K = 1, T = 10^{-4}, C_{Bus} = 0.07F, U_{Busref} = 500V, I_{SCnom} = 400A.$$

III.4. Les résultats de simulation de l'hybridation de la PÀC – SC :

Ce mémoire traite du système hybride électrique à pile à combustible, qui se compose de deux sources d'énergie, comme mentionné précédemment. La source principale est constituée d'une PÀC de type PEMFC, tandis que les SCs jouent le rôle de source auxiliaire. L'intégration des supercondensateurs dans ce système vise à améliorer sa dynamique et à optimiser les performances du pack à pile à combustible. Dans cette étude nous avons adopté une approche de contrôle indépendant pour gérer efficacement l'énergie circulant entre les différentes sources hybrides, telles que la pile à combustible, les supercondensateurs et le bus continu [21].

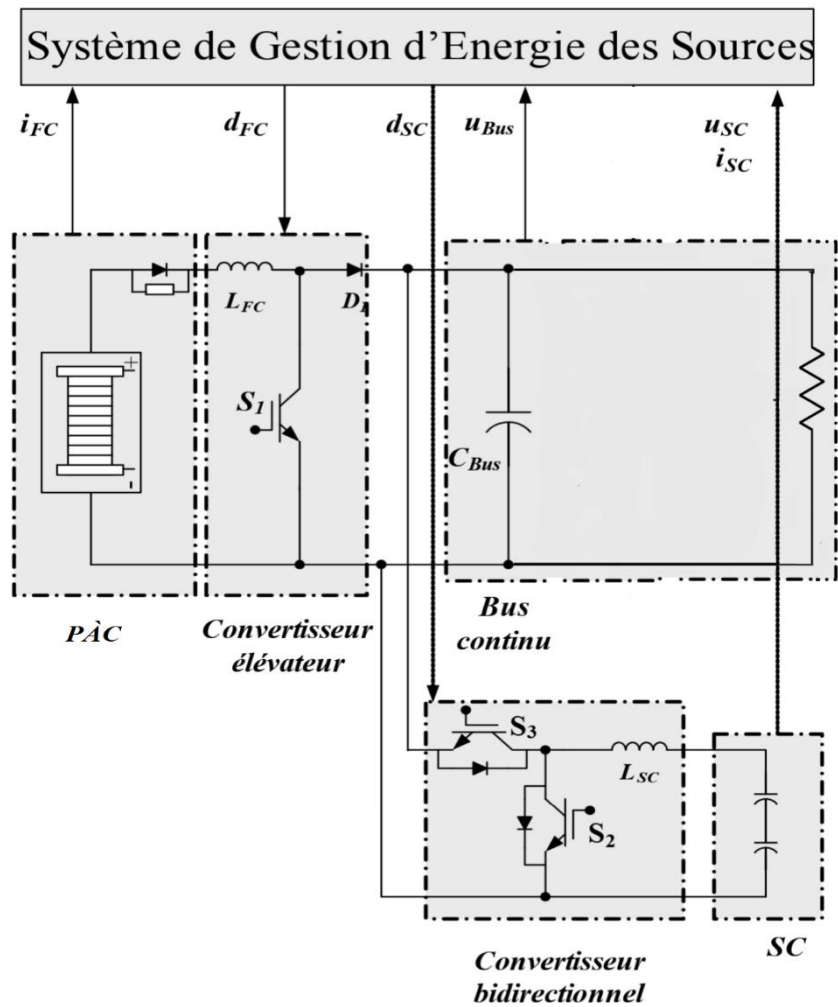


Figure III. 8: Systèmes de contrôles pour le système hybride électrique à PAC

Les performances du système hybride électrique à pile à combustible, qui reposent sur la stratégie de gestion d'énergie des sources hybrides proposée, sont exposées dans les figures (III.9 à III.12).

La Figure III.9.a présente le courant total de la pile à combustible. Nous pouvons observer que les variations significatives de courant sont parfaitement normales et prévisibles en raison des fluctuations de charge. Conformément aux attentes, lorsque le courant généré augmente, la tension du pack à pile à combustible diminue de manière significative, comme illustré dans la Figure III.9.b.

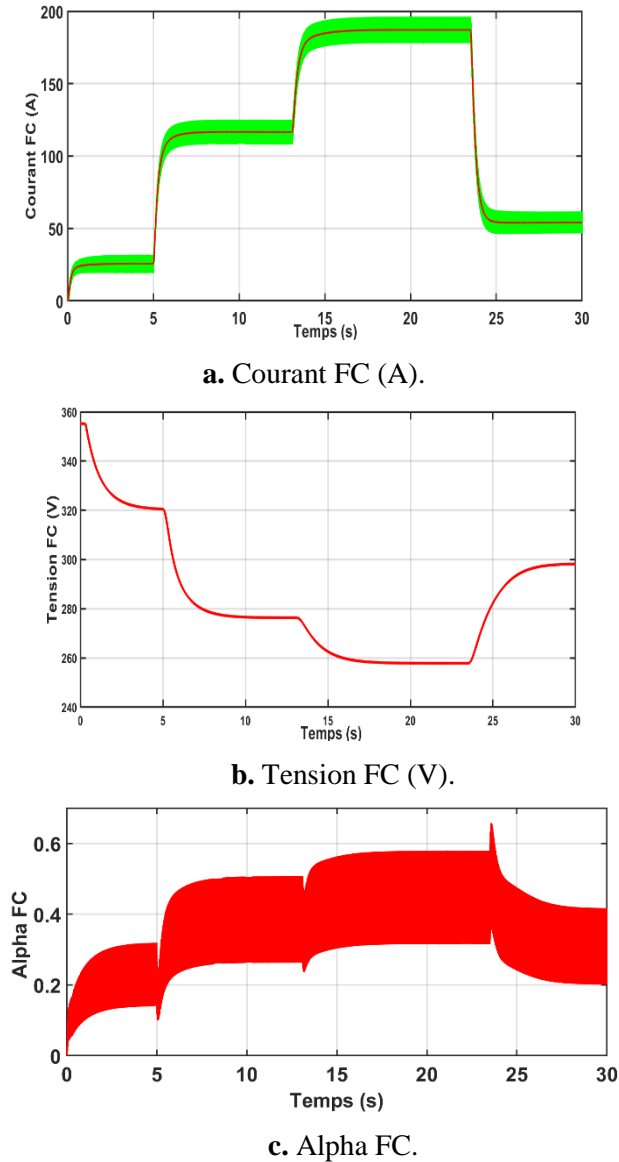


Figure III. 9: Performances de fonctionnement du système à PÀC (Boost).

En contraste avec la variation de courant plutôt lente à l'intérieur de la pile à combustible (PÀC), nous pouvons observer la dynamique rapide des modes de décharge et de récupération du supercondensateur (SC). Cette dynamique rapide permet de compenser l'inertie inhérente à la dynamique du pack à pile à combustible, comme le démontrent les résultats présentés dans la Figure III.10.a et la Figure III.10.b. Dans le but d'optimiser la capacité du supercondensateur à fournir et à stocker de l'énergie, la tension u_{SC} du (SC) est ajustée sur une plage étendue autour de sa valeur de référence de 182 V. Ce réglage est effectué à l'aide d'un régulateur de type P qui établit des limites précises pour la tension du SC, avec des valeurs minimale (U_{SCmin}) et maximale (U_{SCmax}) prédéfinies.

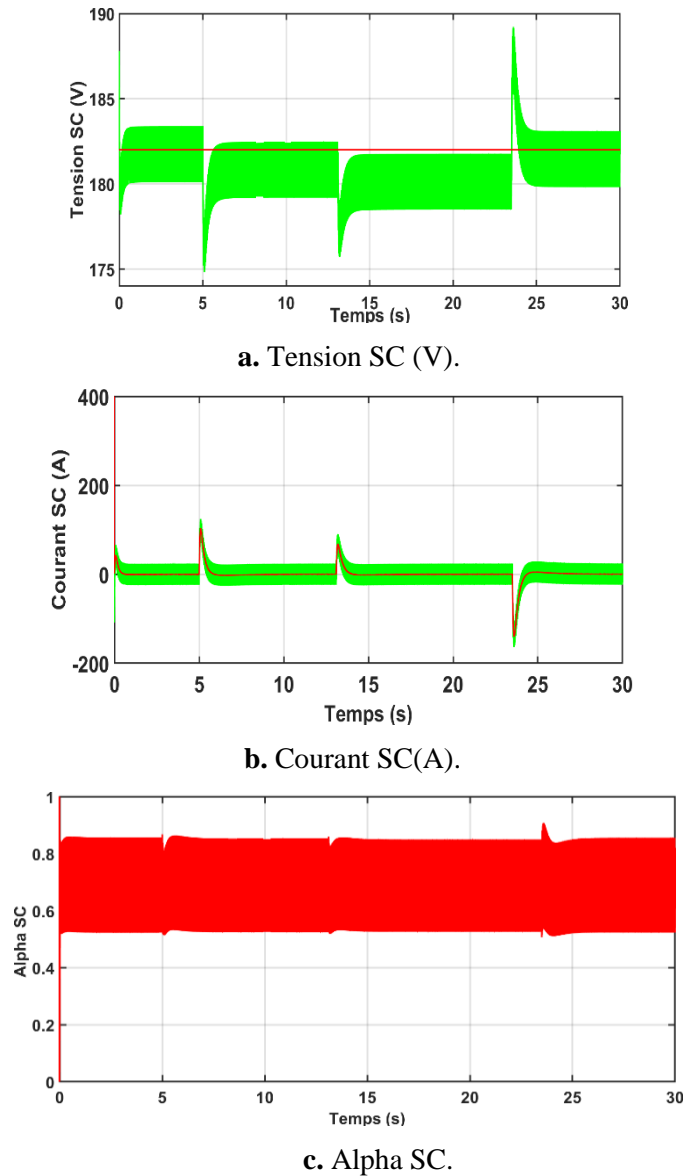
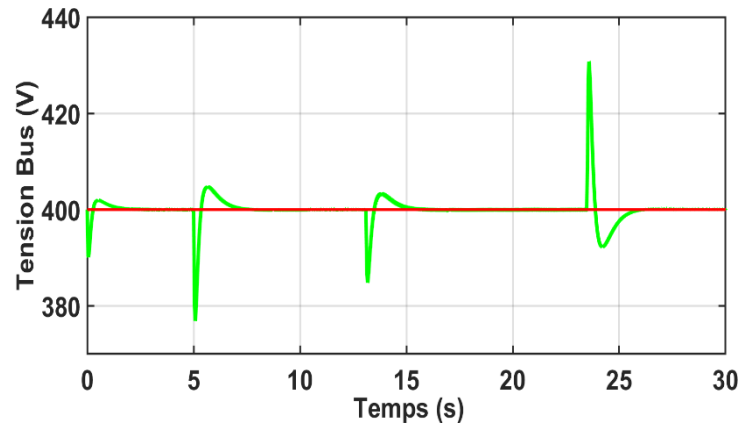
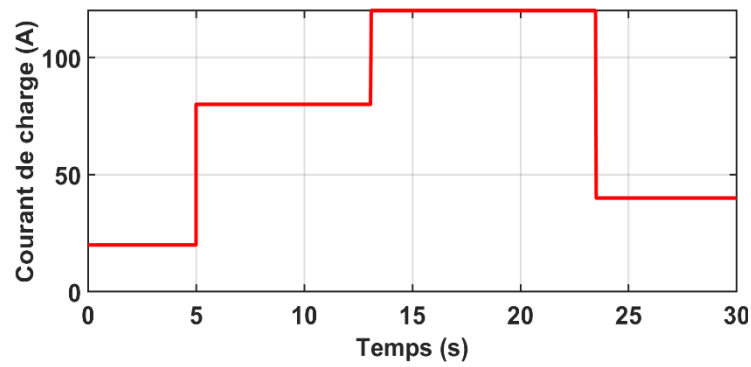


Figure III. 10: Performances de fonctionnement du SC (Buck-Boost).

La tension du bus continu est maintenue à sa valeur de référence de 400V, comme illustré dans la Figure III.11.a, de manière indépendante des fluctuations du courant de charge, comme observé dans la Figure III.11.b.



a. Tension de bus



b. Courant de la charge

Figure III. 11: Performances de fonctionnement de Bus continu

L'échange d'énergie entre le pack à pile à combustible, le supercondensateur (SC) et le dispositif de charge est illustré dans la Figure III.12.

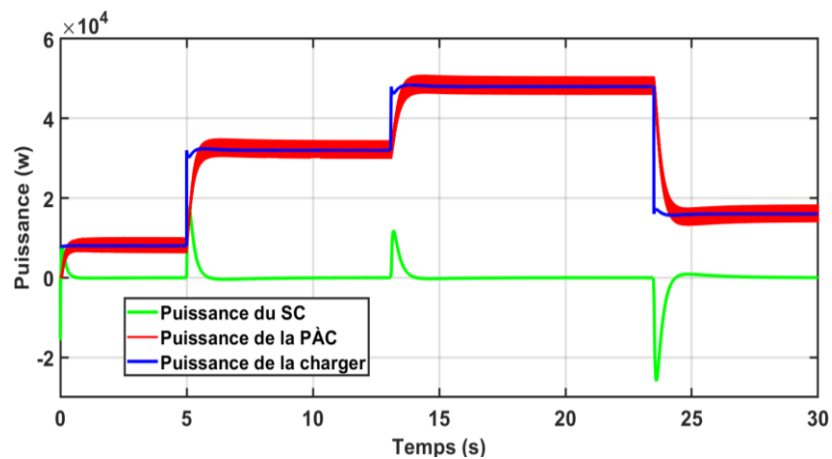


Figure III. 12: Puissances du système hybride.

III.5. Conclusion :

Dans le cadre de ce chapitre de mémoire, une stratégie de gestion d'énergie simple et efficace a été présentée pour le système hybride électrique à pile à combustible. Cette stratégie repose sur l'adoption d'un pack à pile à combustible de type PEMFC en tant que source principale, et un supercondensateur en tant que source auxiliaire, offrant une dynamique rapide et réactive. La régulation de la tension du bus continu est utilisée comme pilier fondamental de cette stratégie, avec l'application de correcteurs PI conventionnels pour assurer un contrôle précis et robuste.

Grâce à l'utilisation de simulations effectuées avec l'environnement Matlab/Simulink, une évaluation des performances du système a été réalisée dans des conditions de pleine charge et de faible charge. Les résultats obtenus indiquent de manière évidente que l'intégration de la source auxiliaire (le supercondensateur) permet d'améliorer considérablement les performances transitoires du système à pile à combustible. Ces résultats viennent confirmer la haute efficacité de la stratégie de gestion d'énergie et de contrôle proposée, validant ainsi sa pertinence et son potentiel dans le contexte étudié.

Pour conclure, ce chapitre a abouti à la conception et à la validation d'une stratégie de gestion d'énergie spécifiquement élaborée pour le système hybride électrique à pile à combustible. Les résultats obtenus renforcent la pertinence et l'efficacité de cette stratégie, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives pour une amélioration significative des performances du système et une optimisation de l'utilisation de l'énergie.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif central de ce mémoire était de focaliser l'attention sur la problématique inhérente à la gestion et au contrôle du transfert d'énergie dans le contexte d'un système hybride, composé d'une pile à combustible et d'un supercondensateur. Dans cette perspective, l'objectif fondamental de cette étude était d'élaborer des méthodologies et des techniques de pointe en vue d'améliorer l'efficacité énergétique de ces systèmes hybrides.

Au cours de cette étude, une analyse des composants clés du système hybride, tels que la pile à combustible et le supercondensateur, a été effectuée en utilisant une modélisation prenant en compte leurs caractéristiques physiques et leur comportement dynamique. Cette modélisation a permis d'obtenir une meilleure compréhension du fonctionnement du système et de développer des stratégies de gestion de l'énergie plus efficaces.

Une partie significative de ce mémoire a été consacrée à la détermination de la structure du système électrique hybride, avec la pile à combustible comme source d'énergie principale et le supercondensateur comme source d'énergie auxiliaire. L'interaction entre le bus continu et les sources d'énergie a été établie à l'aide de deux convertisseurs à courant continu : un convertisseur unidirectionnel en courant pour réguler la charge du supercondensateur, et un convertisseur bidirectionnel en courant pour le transfert d'énergie entre le supercondensateur et le bus continu.

Ensuite, une modélisation détaillée des différents composants du système électrique hybride a été réalisée, en commençant par la modélisation du système à pile à combustible. Suite à l'analyse des résultats issus des simulations dynamiques, il a été conclu que l'intégration d'un limiteur de pente de courant de charge est essentielle pour atténuer les effets des régimes transitoires sévères sur la pile à combustible. De plus, plusieurs modèles équivalents de supercondensateurs ont été proposés et soumis à des simulations, permettant ainsi de sélectionner celui offrant un équilibre optimal entre précision, accessibilité des paramètres et utilisation pratique, tout en maintenant une dimension temporelle et une complexité globale du modèle raisonnables.

Enfin, une stratégie de gestion énergétique a été élaborée pour les sources hybrides, reposant sur l'implémentation de quatre boucles de régulation utilisant des régulateurs proportionnels-intégraux. Ces boucles englobent la régulation du courant fourni par la pile à combustible, la régulation du courant échangé entre les supercondensateurs et le système, la régulation de la tension des supercondensateurs, ainsi que la régulation de la tension du bus continu.

En somme, ce mémoire a permis de consolider nos connaissances relatives à la gestion et au contrôle du transfert d'énergie au sein des systèmes hybrides impliquant une combinaison de piles à combustible et de supercondensateurs. Les apports de cette recherche ouvrent de nouvelles perspectives en termes d'amélioration des performances des systèmes hybrides, contribuant ainsi à l'évolution des technologies liées au stockage et à la conversion de l'énergie. Cette étude représente une étape significative vers la concrétisation d'un avenir énergétique caractérisé par une plus grande propreté, une efficacité accrue et une durabilité renforcée.

Bibliographie

- [1] Ahmed Neffati, “Stratégies de gestion de l’énergie électrique d’un système multi- source: décision floue optimisée pour véhicule électrique hybride”, Thèse de Doctorat à l’Université de Toulouse III Paul Sabatier, France, 2013.
- [2] E. I. Lechartier, "Contribution au prognostic de pile à combustible PEMFC basé sur modèle semi-analytique," Besançon, 2016.
- [3] Zhiming ZHANG “ Modélisation mécanique des interfaces multi-contacts dans une pile à combustible “ UNIVERSITÉ D’ÉVRY-VAL D’ESSONNE novembre 2010.
- [4] Hydrogène : comment fonctionne une pile à combustible ? Available: <https://www.sirenergies.com/article/hydrogene-comment-fonctionne-une-pile-a-combustible/>
- [5] <http://www.hydrogencarsnow.com/index.php/toyota-mirai/>
- [6] JiuJun Zhang, “PEM fuel cell electrocatalysts and catalyst layers: fundamentals and applications”, British Library, Springer-Verlag, 2008.
- [7] Jay T. Pukrushpan; Huei Peng; Anna G. Stefanopoulou, “Control-oriented modeling and analysis for automotive fuel cell systems”, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 126, N°. 1, 2004.
- [8] Jay T. Pukrushpan; Huei Peng; Anna G. Stefanopoulou, “Simulation and analysis of transient fuel cell system performance based on a dynamic reactant flow model”, ASME, International Mechanical Engineering Congress & Exposition (IMECE’ 02), New Orleans, Louisiana, USA, 17-22 November 2002.
- [9] Bei Gou; Woon Ki Na; Bill Diong, “Fuel cells: modeling, control, and applications”, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2010.
- [10] M. Grujicic; K. M. Chittajallu; E H Law; J T Pukrushpan, “Model-based control strategies in the dynamic interaction of air supply and fuel cell”, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part A, Journal of Power and Energy, Vol. 218, N°. 7, 2004.
- [11] Jay Tawee Pukrushpan, “Modeling and control of fuel cell systems and fuel processors”, Thèse de Doctorat à l’Université du Michigan, USA, 2003.

- [12] Toufik Azib, “Contribution à l’étude d’électro-générateurs à pile à combustible: conceptions d’architectures et de leurs commandes”, Thèse de Doctorat à l’Université de Paris-Sud XI, France, 2010.
- [13] Jérôme Lachaize, “Etude des stratégies et des structures de commande pour le pilotage des systèmes énergétiques à Pile à Combustible (PàC) destinés à la traction.”, Thèse de Doctorat à L’Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2004.
- [14] P. Thounthong, “Conception d’une source hybride utilisant une pile à combustible et des supercondensateur”, Thèse de doctorat à L’Institut National Polytechnique de Lorraine, France, 2005.
- [15] Mamadou Baïlo Camara, “Supercondensateurs pour échange dynamique d’énergie à bord du véhicule électrique hybride: modélisation, étude des convertisseurs et commande”, Thèse de Doctorat à l’Université de Franche-Comté, France, 2007.
- [16] D. Candusso, “ Hybridation du groupe électrogène à pile à combustible pour l’alimentation d’un véhicule électrique ”, Thèse de doctorat à l’Institut National Polytechnique De Grenoble, France, 2002.
- [17] N. Rizoug, “Modélisation électrique et énergétique des supercondensateurs et méthodes de caractérisation : application au cyclage d’un module de supercondensateurs basse tension en grande puissance ”, Thèse de doctorat à l’Ecole Centrale de Lille et l’Université des Sciences et Technologies de Lille, France, 2006.
- [18] Damien Paire, “Dimensionnement et gestion d’énergie de systèmes d’entraînements électriques hybrides: application à un ascenseur avec récupération d’énergie”, Thèse de doctorat à l’Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, France, 2010.
- [19] F. Porcher, “Dimensionnement du convertisseur d’interface avec le Pack Supercondensateurs”, Document interne ALSTOM, FCS-00-D140-TRT+006 1A, 2002.
- [20] Jérôme Bernard, “Véhicules hybrides à pile à combustible: dimensionnement et stratégies de commande”, Thèse de Doctorat à l’Université de

Valenciennes et Du Hainaut-Cambresis, France, 2007.

- [21] Daoud Rezzak; Nasserline Boudjerda, “Management and control strategy of a hybrid energy source fuel cell/super capacitor in electric vehicles”, International Transactions on Electrical Energy Systems, 2016, DOI 10.1002/etep.2308.
- [22] Phatiphat Thounthong; Stéphane Rael; Bernard Davat, “Analysis of super capacitor as second source based on fuel cell power generation”, IEEE Transactions on Energy
- [23] Phatiphat Thounthong; Stéphane Rael; Bernard Davat, “Control strategy of fuel cell and supercapacitors association for a distributed generation system”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 57, N°. 06, 2007.
- [24] Phatiphat Thounthong; Stéphane Raël; Bernard Davat, “Test of a PEM fuel cell with low voltage static converter”, Journal of Power Sources, Vol. 153, N°. 01, 2006.
- [25] Toufik Azib; Olivier Bethoux; Ghislain Remy; Claude Marchand; Eric Berthelot, “Système hybride à pile à combustible et supercondensateur: structures, contrôle, commande et gestion d’énergie”, European Journal of Electrical Engineering. Vol. 14, N°. 2-3, 2011.
- [26] T. Azib; O. Bethoux; G. Remy; C. Marchand, “Structure and control strategy for a parallel hybrid fuel cell/supercapacitors power source”, IEEE, Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC 2009), Dearborn, MI, USA, 7-10 Sept. 2009.
- [27] Toufik Azib; Olivier Bethoux; Ghislain Remy; Claude Marchand, “Saturation management of a controlled fuel-cell/ultra capacitor hybrid vehicle”, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 60, N°. 9, 2011.
- [28] Wibowo Wahyu Kunto; Jeong Seokkwon, “Genetic algorithm tuned PI controller on PMSM simplified vector control”, Journal of Central South University, Vol. 20, N°. 11, 2013.
- [29] F. Belhachemi, “Modélisation et caractérisation des supercondensateurs à couche double électrique utilisés en électronique de puissance”, Thèse de doctorat à l’Institut National Polytechnique de Lorraine, France, 2001.

- [30] M. Y. Ayad, "Mise en oeuvre des supercondensateurs dans les sources hybrides continues", Thèse de doctorat à l'Institut National Polytechnique de Lorraine, France, 2004.
- [31] Daoud Rezzak; Nasserline Boudjerda; Aimad Boudouda, "Simulation and Control of Fuel Cell/Super-Capacitor Hybrid Sources for Electric Vehicle Applications", International Conference on Information Processing and Electrical Engineering (ICIPEE'14), Tébessa, Algerie, 24-25, Novembre 2014.
- [32] W. Lajnef, "Modélisation des supercondensateurs et évaluation de leur vieillissement en cyclage actif à forts niveaux de courant pour des applications véhicules électriques et hybrides," Université Sciences et Technologies-Bordeaux I, 2006.

Abstract

ملخص:

تركز مذكرة الماستر هذه على نمذجة الأنظمة الكهربائية الهجينة التي تستخدم خلية الوقود والمكثف الفائق كمصدر للطاقة الهجينة. يتم دمج خلية الوقود برابط التيار المستمر من خلال محول تعزيز، يلبي متوسط متطلبات الطاقة بشكل فعال. يتم توصيل المكثف الفائق برابط التيار المستمر عبر محول ثنائي الاتجاه مع وحدات تحكم تناسبية-تكاملية تقليدية لمتطلبات الطاقة العابرة للحمل. الأهداف الأساسية ذات شقين: تحسين أداء خلايا الوقود من خلال التخفيف من التشغيل الحالي السريع وتمكين استجابة ديناميكية سريعة برابط التيار المستمر من خلال المكثف الفائق. تقوم عمليات المحاكاة الدقيقة المصممة للأنظمة الكهربائية الهجينة بتقييم الاستراتيجية المقترحة. يعمل هذا البحث على تطوير المعرفة في تكنولوجيا خلايا الوقود، وتحسين تكاملها مع أنظمة الطاقة المستدامة. تساهم النتائج في تصميم نظام كهربائي هجين فعال. من خلال تسخير خلايا الوقود والمكثفات الفائقة، يمكن تحقيق حلول طاقة أنظف ومستدامة، مما يمهد الطريق لمستقبل أكثر خضرة.

كلمات مفتاحية: إدارة الطاقة، خلايا الوقود، المكثف الفائق، وحدة تحكم PI، نظام كهربائي هجين.

Résumé :

Ce mémoire de Master se concentre sur la modélisation des systèmes électriques hybrides qui utilisent une pile à combustible et un supercondensateur comme source d'énergie hybride. La pile à combustible est intégrée de manière transparente au bus continu (DC) grâce à un convertisseur élévateur, répondant ainsi efficacement aux besoins de puissance moyenne. De même, le supercondensateur est connecté au bus continu (DC) via un convertisseur abaisseur-élévateur équipé de contrôleurs PI pour satisfaire les exigences de puissance transitoire. Les objectifs principaux sont doubles : optimiser les performances de la pile à combustible en atténuant le fonctionnement rapide du courant, et permettre une réponse dynamique réactive du bus DC grâce au supercondensateur. Des simulations minutieuses, adaptées aux systèmes électriques hybrides, évaluent la stratégie proposée. Cette recherche fait progresser les connaissances dans le domaine de la technologie des piles à combustible, en optimisant leur intégration dans les systèmes d'énergie durables. Les résultats contribuent à la conception d'un système électrique hybride efficace. En exploitant les piles à combustible et les supercondensateurs, des solutions énergétiques plus propres et durables peuvent être obtenues, ouvrant la voie à un avenir plus écologique.

Mots Clés : gestion d'énergie, pile à combustible, super condensateur, régulateur PI, système hybride électrique.

Abstract:

This Master's thesis focuses on the modeling of hybrid electric systems that utilize a fuel cell and supercapacitor as a hybrid power source. The fuel cell is seamlessly integrated into the

DC Bus through a boost converter, catering to average power demands effectively. The supercapacitor is connected to the DC-Bus via a buck-boost converter with PI controllers for transient power requirements. The primary objectives are twofold: optimize fuel cell performance by mitigating rapid current operation and enable a responsive dynamic response of the DC-Bus through the supercapacitor. Meticulous simulations tailored for hybrid electric systems evaluate the proposed strategy. This research advances knowledge in fuel cell technology, optimizing their integration for sustainable energy systems. The outcomes contribute to designing an efficient hybrid electric system. By harnessing fuel cells and supercapacitors, cleaner and sustainable energy solutions can be achieved, paving the way for a greener future.

Key Words: energy management, fuel cell, supercapacitor, PI controller, hybrid electric