



Département Génie industriel

Mémoire de fin d'étude

En vue d'obtention le diplôme de Master 2

Spécialité : Maintenance de L'automatisme et de L'instrumentation

Thème :

Dimensionnement et modélisation d'un système hybride à base de pile à combustible et batterie lithium-ion

Présente et soutenu publiquement par :

Nom... **BENFERHAT**

Prénom ... **Yasmine** ...

Nom... **AMRAOUI**

Prénom ... **Mohammed El Amine**...

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
Mme. L.Belkhodja	MCB	IMSI	Président
Mme.CHOUTEK Mama	Pr	IMSI	Encadreur
Mme. K.Belhadri	MCB	IMSI	Examineur

Juin 2026

Remerciement

Au terme de ce travail, nous tenons tout d'abord à remercier **Allah** le Tout-Puissant pour nous avoir donné la force, la volonté et la patience nécessaires afin de mener à bien ce projet.

Nous adressons nos plus sincères remerciements à notre encadreuse, Mme Chouitek Mama, pour son aide précieuse, ses conseils pertinents, sa disponibilité et son suivi tout au long de la réalisation de ce mémoire. Son expérience et ses orientations ont grandement contribué à l'aboutissement de ce travail dans les meilleures conditions.

Nous remercions également tous les enseignants du département qui ont assuré notre formation et enrichi nos connaissances durant notre cursus universitaire.

Nos remerciements vont aussi aux membres du jury pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant d'évaluer ce travail ainsi que pour leurs remarques et suggestions constructives.

Nous exprimons enfin notre gratitude et notre reconnaissance à nos chers parents, à nos familles ainsi qu'à nos amis pour leur soutien moral, leurs encouragements et leur confiance durant toutes nos années d'études.

À tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail, nous adressons nos sincères remerciements.



Dédicace

*On dédie humblement ce travail à toutes les âmes éprises de savoir, à ceux qui portent en eux
l'ardente flamme de la connaissance*

*Et qui poursuivent la noblesse de l'instruction, sans jamais se laisser arrêter par le poids des
années,*

Les vicissitudes de l'existence ou l'abondance des richesses.

*Car la véritable grandeur ne réside ni dans l'âge, ni dans la fortune, mais dans la soif
d'apprendre, la persévérance et l'élévation de l'esprit.*

*À tous ceux qui croient encore que le savoir est la plus précieuse des conquêtes, on dédie ce
succès comme une lumière qui, on l'espère, les inspire*



Table des matières

REMERCIEMENT

DEDICACE

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES SYMBOLES

RESUME1

ABSTRACT2

INTRODUCTION GENERALE3

CHAPITRE I : Généralités sur les systèmes hybrides à pile à combustible

I.1. Introduction7

I.2. La pile à combustible7

I.2.1. Principe de fonctionnement8

I.2.2. Différentes technologies des piles à combustible9

I.2.3. La pile à combustible type PEMFC11

I.3. Les batteries16

I.3.1. Principe de fonctionnement des accumulateurs16

I.3.2. Les différents types d'accumulateurs18

I.3.3. Grandeurs caractéristiques des batteries19

I.3.4. La batterie au Lithium21

I.3.5. La batterie au Lithium-ion22

I.3.6. Principe de fonctionnement23

I.4. Système hybride26

I.4.1. Définition26

I.4.2. Architecture des systèmes hybrides26

I.4.3. Domaines d'application des systèmes hybrides27

I.5. Conclusion28

CHAPITRE II: Dimensionnement du système hybride

II.1 Introduction30

II.2 Cahier des charges du système hybride30

II.2.1 Présentation du système30

II.2.2 Besoin en puissance30

II.3. Dimensionnement de la pile à combustible PEMFC32

II.3.1. Nombre de cellules montées en série32

II.3.2. Nombre de branches en parallèle33

II.4. Dimensionnement de la batterie lithium-ion34

II.4.1. Choix de la technologie35

II.4.2. Consommation énergétique de la batterie	36
II.4.3. Constitution du pack batterie	36
II.5. Dimensionnement des convertisseurs DC-DC	38
II.5.1. Convertisseur Boost de la pile à combustible PEMFC	38
II.5.2. Convertisseur buck boost bidirectionnel de la batterie	41
II.6. Conclusion.....	42
 CHAPITRE III : <u>Modélisation des composants du système hybride</u>	
III.1. Introduction	45
III.2. Modélisation du comportement du stack de piles à combustible	45
III.2.1. Pertes d'activation.....	46
III.2.2. Pertes ohmiques	47
III.2.3. Pertes de concentration	47
III.2.4. Tension délivrée par la pile en fonction de courant débité	47
III.2.5. Modélisation du convertisseur Boost lié à la pile à combustible	49
III.2.6. Simulations sur Matlab	51
III.3. Modélisation du stack de batteries lithium-ion	54
III.3.1. Modélisation du convertisseur DC/DC bidirectionnel lié à la batterie	56
III.3.2. Simulation sur Matlab.....	58
III.4. Conclusion	60
 CHAPITRE IV : <u>Gestion d'Energie et simulation du système hybride</u>	
IV.1. Introduction.....	62
IV.2. Architecture du système hybride.....	62
IV.3. Stratégies de gestion de l'énergie.....	63
IV.4. Implémentation sous Matlab/Simulink	64
IV.5. Résultats et discussions	65
IV.5.1. Gestion sous contrainte de puissance de la PàC.....	67
IV.5.2. Gestion sous contraintes de puissance et de temps de réponse de la PAC	69
IV.6. Conclusion	75
CONCLUSION GENERALE.....	76
BIBLIOGRAPHIQUES.....	79

Liste des figures

Figure I. 1 : Expérience de Sir W. Grove en 1839.	8
Figure I.2 : Schéma de principe d'une pile à combustible PEMFC	9
Figure I.3 : Réactions électrochimiques des PACs.	10
Figure I.4 : Exemple de pile à combustible PEMFC assemblée en stack.....	11
Figure I.5: Diagramme de Ragone, permettant de comparer différents dispositifs énergétiques en fonction de leurs densités de puissance et d'énergie.	12
Figure I.6: Schéma d'un stack de PEMFC Plaques bipolaires.	13
Figure I.7: Assemblage d'une cellule élémentaire. Principe de fonctionnement de la PEMFC	14
Figure I.8: Principe de fonctionnement d'une pile PEMFC.	15
Figure I.9: Vue éclatée d'un accumulateur.	17
Figure I.10: Principe de fonctionnement des accumulateurs.	17
Figure I.11: Diagramme de Ragone supercondensateur et accumulateurs électrochimiques. ...	19
Figure I.12: Représentation schématisée du principe de fonctionnement d'un accumulateur Li-métal (a), en comparaison d'un accumulateur Li-ion (b).....	21
Figure I.13: Transport des ions à l'intérieur d'un accumulateur Li-ion.	24
Figure II.1 : La configuration finale de la pile à combustible PEMFC.	34
Figure II. 2 : Cellule NMC 18650.	35
Figure II.3 : La configuration final de la batterie lithium-ion.....	38
Figure II.4 : Convertisseur boost connecte à la pile à combustible.....	38
Figure II. 5 : Convertisseur DC-DC bidirectionnel lié avec la batterie lithium-ion	41
Figure III.1 : Caractéristique tension-courant d'une pile PEM.....	46
Figure III.2: Phase de conduction de l'interrupteur.....	49
Figure III.3 : Phase de blocage de l'interrupteur.....	50
Figure III.4 : Courbe de polarisation de la pile à combustible.....	51
Figure III.5: Puissance de la pile à combustible.....	52
Figure III.6: Commande transistor.	52
Figure III.7 : Courant inductance du convertisseur.	53
Figure III.8 : Tension sortie boost.	54
Figure III. 9 : Modèle RC d'une batterie lithium-ion	55
Figure III. 10 : Convertisseur DC/DC bidirectionnel en courant.....	56
Figure III. 11 : Le schéma équivalent du circuit de la phase 1.	57
Figure III. 12 : Le schéma équivalent du circuit de la phase 2.	57
Figure III. 13 : La tension à vide en fonction de l'état de charge.	58
Figure III.14 : Tension de la batterie à différents courants de décharges	59
Figure IV. 1 : Structure du système hybride.	63
Figure IV. 2 : Schema de simulation de la pile a combustible.....	64
Figure IV. 3 : Schema de simulation de la batterie	65
Figure IV. 4 : Profil de puissance de la charge	66
Figure IV. 5 : Courbes des puissances dans le véhicule	67

Figure IV. 6 : Courants des références et les tensions de la pile à combustible et la batterie sous contrainte de puissance de la pile	68
Figure IV. 7 : Courbes des puissances dans le véhicule	69
Figure IV. 8 : Courants de références des sources d'énergie	70
Figure IV. 9 : Évolution du courant de référence, des tensions et des courants de la pile à combustible avec convertisseur boost.....	71
Figure IV. 10 : Courants et tensions du système batterie–convertisseur bidirectionnel	72
Figure IV. 11 : Etat de charge de la batterie	73
Figure IV. 12 : Évolution des puissances de référence et des puissances réelles de la pile à combustible et de la batterie	74

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Différentes technologies de piles à combustibles.	10
Tableau I.2 : Spécifications de différentes technologies d'accumulateurs.	18
Tableau I.3 : Comparaison entre une pile à combustible et une batterie Li-ion.....	23
Tableau II. 1: Les contraintes de dimensionnement du système hybride.	32
Tableau II. 2 : Spécifications de la cellule.	35
Tableau II.3 : Spécification du convertisseur boost.	39
Tableau II.4 : Le dimensionnement du Convertisseur boost.	41
Tableau II.5: Paramètres de dimensionnement du convertisseur buck/boost	42
Tableau III. 1 : Les paramètres de la pile.	48
Tableau IV. 1 : Paramètres du système hybride	66

Liste des abréviations

Abréviation:	Signification:
PAC	Pile À Combustible
PEMFC	Proton Exchange Membrane Fuel Cell
Li-ion	Lithium-ion
DC	Direct Current (Courant continu)
DC-DC	Convertisseur Continu-Continu
PWM	Pulse Width Modulation
CCM	Continuous Conduction Mode
SOC	State Of Charge
OCV	Open Circuit Voltage
EV	Electric Vehicle
HEV	Hybrid Electric Vehicle
Matlab	Matrix Laboratory
NMC	Nickel Manganèse Cobalt
H ₂	Hydrogène
O ₂	Oxygène
R _c	Résistance – Condensateur

Liste des symboles

Symbols	Designation	Unite
V	Tension électrique	V
I	Courant électrique	A
P	Puissance électrique	W
E	Énergie	Wh / J
H	Rendement	%
R	Résistance électrique	Ω
C	Capacité électrique	F
L	Inductance	H
F	Fréquence de découpage	Hz
D	Rapport cyclique	—
V_{dc}	Tension du bus continu	V
V_{in}	Tension d'entrée	V
V_{out}	Tension de sortie	V
IL	Courant dans inductance	A
ΔI	Ondulation du courant	A
ΔV	Ondulation de tension	V
N_s	Nombre de cellules en série	—
N_p	Nombre de branches en parallèle	—
SOC	État de charge de la batterie	%
OCV	Tension à vide	V
Q	Capacité de la batterie	Ah
U_{batt}	Tension batterie	V
U_{dc}	Tension du bus DC	V
i	Densité de courant	mA/cm ²
R_{int}	Résistance interne	Ω
η_{act}	Surtension d'activation	V
η_{ohm}	Pertes ohmiques	V
η_{conc}	Pertes de concentration	V

Résumé

Ce travail présente l'étude, le dimensionnement et la modélisation d'un système hybride destiné à l'alimentation d'un véhicule électrique, basé sur l'association d'une pile à combustible de type PEMFC et d'une batterie lithium-ion. L'objectif principal est d'améliorer les performances énergétiques du véhicule tout en assurant une meilleure gestion de la puissance et une réduction des émissions polluantes.

Dans un premier temps, une étude bibliographique a été réalisée afin de présenter les principes de fonctionnement des piles à combustible, des batteries lithium-ion ainsi que les différentes architectures des systèmes hybrides utilisées dans les applications de transport électrique.

Ensuite, le dimensionnement du système hybride a été effectué à partir des exigences du cahier des charges du véhicule étudié. Cette étape a permis de déterminer la configuration de la pile à combustible, du pack batterie et des convertisseurs DC-DC associés afin de satisfaire les besoins en puissance, en tension et en stabilité du système.

Par ailleurs, une modélisation mathématique de la pile à combustible PEMFC, de la batterie lithium-ion et des convertisseurs statiques a été développée. Les différents modèles ont été implémentés et validés sous l'environnement Matlab/Simulink afin d'analyser le comportement dynamique du système hybride.

Les résultats obtenus montrent que l'association de la pile à combustible et de la batterie lithium-ion permet d'assurer une alimentation stable du véhicule, une bonne répartition de puissance ainsi qu'une amélioration des performances énergétiques globales. Le système proposé représente ainsi une solution efficace et prometteuse pour les applications de véhicules électriques hybrides.

Mots-clés : Véhicule électrique hybride, pile à combustible PEMFC, batterie lithium-ion, système hybride, convertisseur DC-DC, Matlab/Simulink, gestion d'énergie.

Abstract

This work presents the study, sizing, and modeling of a hybrid system intended for powering an electric vehicle, based on the combination of a PEMFC fuel cell and a lithium-ion battery. The main objective is to improve the vehicle's energy performance while ensuring better power management and reducing pollutant emissions.

First, a bibliographic study was carried out to present the operating principles of fuel cells, lithium-ion batteries, and the different hybrid system architectures used in electric transportation applications.

Next, the sizing of the hybrid system was performed according to the specifications and requirements of the studied vehicle. This step made it possible to determine the configuration of the fuel cell, the battery pack, and the associated DC-DC converters in order to satisfy the power, voltage, and system stability requirements.

Furthermore, a mathematical modeling of the PEMFC fuel cell, the lithium-ion battery, and the static converters was developed. The different models were implemented and validated using the MATLAB/Simulink environment in order to analyze the dynamic behavior of the hybrid system.

The obtained results show that the combination of the fuel cell and the lithium-ion battery ensure a stable power supply for the vehicle, efficient power sharing, and an improvement in the overall energy performance. Therefore, the proposed system represents an efficient and promising solution for hybrid electric vehicle applications.

Keywords: Hybrid electric vehicle, PEMFC fuel cell, lithium-ion battery, hybrid system, DC-DC converter, MATLAB/Simulink, energy management.

Introduction Générale

Face à l'augmentation continue des besoins énergétiques et aux problèmes environnementaux liés à l'utilisation des énergies fossiles, le développement de systèmes énergétiques propres, performants et durables est devenu une priorité mondiale. Dans le domaine des transports, les véhicules électriques représentent une solution prometteuse permettant de réduire les émissions polluantes et la dépendance aux carburants fossiles. Toutefois, les systèmes de stockage d'énergie classiques présentent encore certaines limitations en termes d'autonomie, de puissance et de rapidité de réponse.

Parmi les technologies les plus prometteuses, les piles à combustible de type PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) attirent un intérêt particulier grâce à leur rendement élevé, leur fonctionnement silencieux et leurs faibles émissions polluantes. Elles permettent de produire de l'énergie électrique à partir de l'hydrogène tout en ne rejetant que de l'eau et de la chaleur. Cependant, leur dynamique lente et leur difficulté à répondre rapidement aux fortes variations de charge limitent leur utilisation seule dans les applications de traction électrique.

En parallèle, les batteries lithium-ion se distinguent par leur forte densité d'énergie, leur bonne densité de puissance et leur excellente réponse dynamique. Elles sont capables de fournir rapidement des pics de puissance et de récupérer l'énergie lors du freinage régénératif. Néanmoins, leur autonomie reste limitée lorsqu'elles sont utilisées comme source principale d'énergie.

Afin de tirer profit des avantages de chaque technologie, l'association d'une pile à combustible PEMFC avec une batterie lithium-ion au sein d'un système hybride constitue une solution particulièrement intéressante pour les véhicules électriques hybrides. Dans cette architecture, la pile à combustible assure principalement la fourniture d'énergie en régime permanent, tandis que la batterie intervient lors des fortes sollicitations de puissance et des phases transitoires.

L'objectif de ce travail est donc d'étudier, de dimensionner et de modéliser un système hybride associant une pile à combustible PEMFC et une batterie lithium-ion destiné à l'alimentation d'un véhicule électrique hybride. Cette étude porte également sur le dimensionnement et la modélisation des convertisseurs DC-DC nécessaires à l'adaptation énergétique entre les différentes sources et le bus continu du système.

Ce mémoire est organisé en plusieurs chapitres :

- Le premier chapitre présente les généralités sur les piles à combustible, les batteries lithium-ion ainsi que les architectures des systèmes hybrides et leurs domaines d'application.

- Le deuxième chapitre est consacré au dimensionnement du système hybride étudié, incluant la pile à combustible, la batterie lithium-ion et les convertisseurs DC-DC associés.
- Le troisième chapitre traite la modélisation mathématique des différentes sources d'énergie et des convertisseurs statiques ainsi que l'analyse des résultats obtenus sous Matlab/Simulink.
- Le dernier chapitre est dédié à la gestion de l'énergie du système hybride afin d'assurer une répartition optimale de la puissance entre la pile à combustible et la batterie
- Enfin, une conclusion générale vient clôturer ce mémoire en synthétisant les principaux résultats obtenus et en présentant les perspectives futures liées à l'amélioration du système hybride étudié.

Chapitre I

*Généralités sur les systèmes hybrides
à pile à combustible*

I.1. Introduction

Face aux défis énergétiques actuels, marqués par l'augmentation de la demande en énergie, la raréfaction des ressources fossiles et les contraintes environnementales, le développement de systèmes énergétiques propres et performants est devenu une nécessité. Parmi les solutions les plus prometteuses, les piles à combustible et les batteries lithium-ion occupent une place centrale grâce à leurs performances énergétiques élevées et leur faible impact environnemental [9].

La pile à combustible permet de convertir directement l'énergie chimique de l'hydrogène en énergie électrique avec un rendement élevé et des émissions quasi nulles. Cependant, sa dynamique lente et sa sensibilité aux variations rapides de charge limitent son utilisation seule dans certaines applications [5].

En parallèle, les batteries lithium-ion offrent une forte densité d'énergie, une excellente réponse dynamique et une grande capacité de stockage. Elles sont particulièrement adaptées pour fournir ou absorber rapidement de la puissance [8].

L'association de ces deux technologies au sein d'un système hybride permet de combiner leurs avantages respectifs : la pile assure l'énergie à long terme, tandis que la batterie compense les variations de puissance et améliore la stabilité du système [10].

Ce chapitre présente les bases théoriques nécessaires à l'étude du système hybride. Il décrit d'abord le principe de fonctionnement des piles à combustible, puis celui des batteries lithium-ion, avant d'introduire les architectures des systèmes hybrides et leurs domaines d'application.

I.2. La pile à combustible

Une pile à combustible est un dispositif électrochimique qui convertit directement l'énergie chimique d'un combustible, généralement l'hydrogène, et d'un comburant, généralement l'oxygène, en énergie électrique, sans passer par une étape de combustion. Son fonctionnement repose sur le principe inverse de l'électrolyse (Figure I.1) : la réaction électrochimique entre l'hydrogène et l'oxygène génère un flux d'électrons dans un circuit externe, produisant ainsi de l'électricité, tandis que l'eau et la chaleur constituent les principaux sous-produits. Ce procédé permet une production d'énergie efficace, propre et continue tant que les réactifs sont alimentés [1].

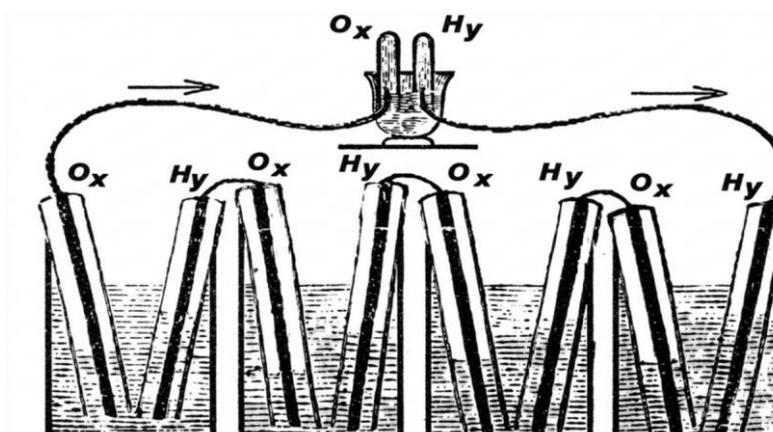


Figure I. 1 : Expérience de Sir W. Grove en 1839.

I.2.1. Principe de fonctionnement

Une pile à combustible est un dispositif qui transforme directement l'énergie chimique d'un combustible, le plus souvent l'hydrogène, en énergie électrique, sans passer par une combustion ni par des systèmes mécaniques comme une turbine ou un moteur (Figure I.2). Cette conversion se fait grâce à une réaction électrochimique d'oxydoréduction entre l'hydrogène et l'oxygène, qui produit de l'électricité, de l'eau et de la chaleur [1].



La pile est principalement constituée de deux électrodes : l'anode et la cathode, séparées par un électrolyte. L'électrolyte permet le passage des protons (H^+) mais empêche le passage direct des électrons [1].

À l'anode, l'hydrogène est oxydé : il libère des électrons et des protons. Les électrons circulent dans un circuit externe, ce qui génère le courant électrique, tandis que les protons traversent l'électrolyte vers la cathode. À la cathode, l'oxygène réagit avec les protons et les électrons pour former de l'eau [1].

Ces réactions se produisent en présence d'un catalyseur (c'est-à-dire un composé capable d'augmenter la vitesse de réaction, sans être consommé par lui-même) [2], généralement du platine, au niveau de zones appelées « points triples », où se rencontrent le gaz, l'électrode et l'électrolyte. La structure de la pile doit également permettre la diffusion des gaz, l'évacuation de l'eau formée et la dissipation de la chaleur afin d'assurer un fonctionnement efficace [1].

L'anode :



La cathode :

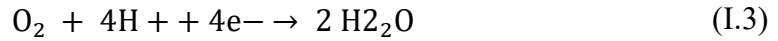
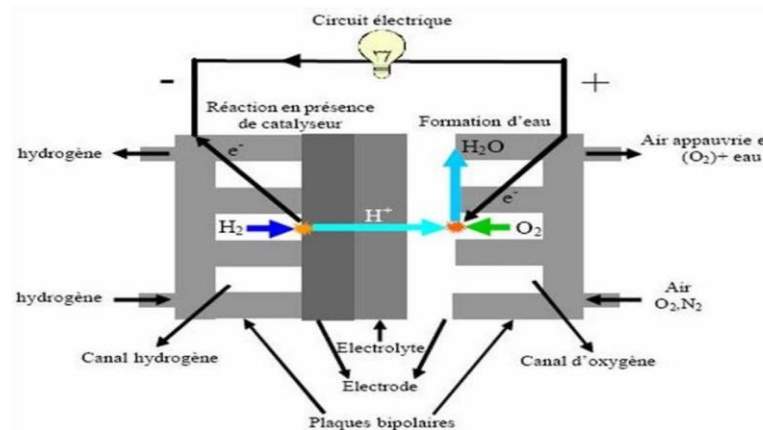


Figure I.2 : Schéma de principe d'une pile à combustible PEMFC .

I.2.2. Différentes technologies des piles à combustible

Les piles à combustible se déclinent en plusieurs technologies, classées principalement selon la nature de l'électrolyte utilisé, qui influence directement les ions transportés (Figure I.3), la température de fonctionnement, les performances ainsi que les domaines d'application. Les principaux types sont résumés dans le tableau (I.1) suivant, à l'exception des piles de type DMFC (Direct Methanol Fuel Cell), qui constituent une variante des piles PEM et utilisent le méthanol comme carburant, directement alimenté à l'anode [1],[2].

- AFC : Pile alcaline (Alkaline Fuel Cell).
- MCFC : Pile à carbonate de fondu (Molten Carbonate Fuel Cell).
- SOFC : Pile à oxyde solide (Solid Oxide Fuel Cell).
- PAFC : Pile à acide phosphorique (Phosphoric Acid Fuel Cell).
- PEMFC : Pile à membrane polymère échangeuse de protons (Proton Exchange Membrane Fuel Cell).
- DMFC : Pile alimentée directement par méthanol (Direct Méthanol Fuel Cell).

Tableau I.1 : Différentes technologies de piles à combustibles.

	PEMFC	DMFC	PAFC	AFC	SOFC	MCFC
	Basse Température				Haute Température	
Température	70 à 100°C	70 à 90°C	150 à 220°C	50 à 250°C	700 à 1050°C	600 à 800°C
Electrolyte	Membrane en polymère solide	Membrane en polymère solide	Acide phosphorique liquide	Potasse (KOH) liquide	Céramique solide	Sel de carbonate fondu liquide
Combustibles possibles	Hydrogène	Méthanol	Hydrogène, gaz naturel (reformage)	Hydrogène	Hydrogène, gaz naturel, méthanol...	Hydrogène, gaz naturel, méthanol...
Gamme de puissance	1W à 10MW	1W à plusieurs kW	200kW à 10MW	1W à 100kW	1kW à 100MW	500kW à 10MW
Rendement Electrique	30 – 45%	30 – 45%	35 – 45% 75% en cogénération	55 – 60%	50 – 55% 70% en cogénération	50 – 60%
Applications	Spatial, Transport, Stationnaire, Equipements portable	Transport, Equipements portable	Stationnaire, Cogénération, Transport	Spatial, Défense, Equipements portables	Stationnaire Cogénération	Stationnaire, Cogénération
Principaux constructeurs	Ballard Nuevera Axane* Helion* (*français)	Siemens Hitachi Sanyo	Siemens Ifc (onsi) Fuji	Siemens Fuji Zevco Ifc	Siemens- Westinghouse Sulzer	IFC Hitachi Fuji

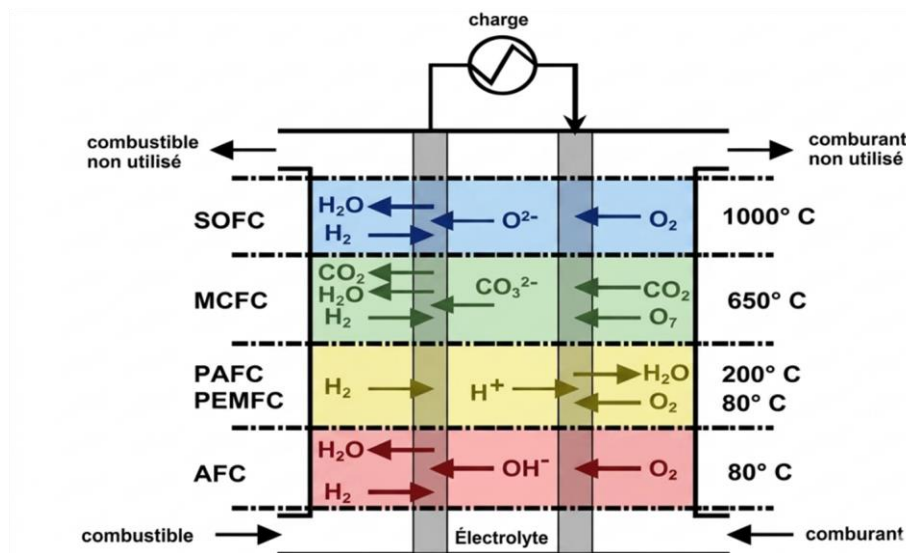


Figure I.3 : Réactions électrochimiques des PACs.

I.2.3. La pile à combustible type PEMFC

Dans cette étude, nous nous concentrerons uniquement sur les piles à combustible de type PEMFC (Figure I.4). Cette technologie fait actuellement l'objet d'un intérêt croissant en raison de la diversité de ses domaines d'application, aussi bien pour les systèmes stationnaires que pour les applications automobiles et portables.



Figure I.4 : Exemple de pile à combustible PEMFC assemblée en stack.

I.2.3.1. Les Performances et avantages des PEMFC

- Rendement de conversion élevé, généralement compris entre 50 % et 60 %.
- Sa température de fonctionnement modérée 40°C à 120°C.
- Sa bonne densité de puissance (Figure I.5).
- Démarrage et arrêt rapides grâce au principe de conversion électrochimique.
- Faible impact environnemental, les principaux rejets étant l'eau et la chaleur.
- Fonctionnement silencieux, en raison du faible nombre de pièces mécaniques en mouvement.
- Sa petite taille.

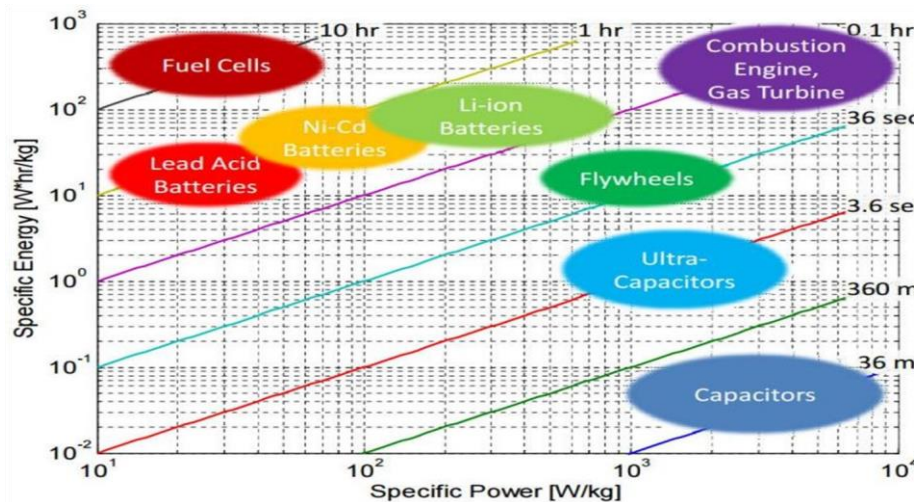


Figure I.5: Diagramme de Ragone, permettant de comparer différents dispositifs énergétiques en fonction de leurs densités de puissance et d'énergie.

I.2.3.2. Inconvénients

- Utilisation de catalyseurs à base de métaux précieux, ce qui augmente le coût du système.
- Difficulté liée au stockage de l'hydrogène, nécessitant des solutions sous pression ou des matériaux spécifiques.
- Problèmes de durabilité dus à la dégradation progressive des composants au cours du temps.

I.2.3.3. Description de la cellule à combustible PEMFC

Une pile à combustible PEMFC est constituée d'un empilement de cellules élémentaires formant un stack (Figure I.6). Chaque cellule comprend principalement une membrane électrolyte, deux électrodes (anode et cathode), des couches de diffusion des gaz ainsi que des plaques bipolaires (Figure I.7). L'ensemble de ces composants assure la conversion électrochimique de l'hydrogène et de l'oxygène en énergie électrique, avec production d'eau et de chaleur [5].

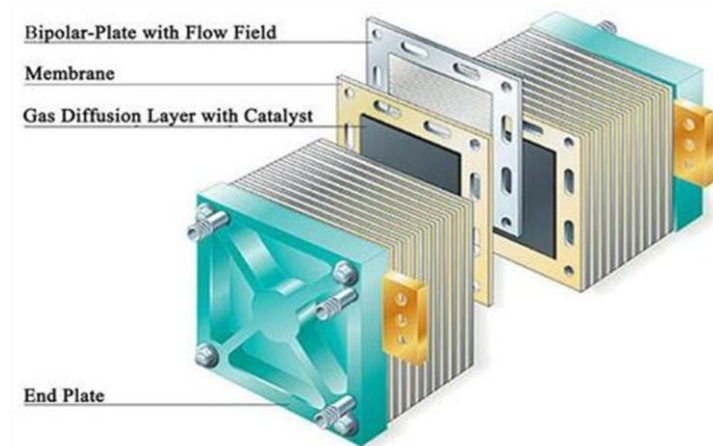


Figure I.6: Schéma d'un stack de PEMFC Plaques bipolaires.

Les plaques bipolaires assurent la distribution des gaz réactifs vers les électrodes, la collecte du courant électrique et l'évacuation de l'eau produite. Elles permettent également la connexion électrique entre les cellules successives dans le stack.

Elles sont généralement fabriquées en graphite, en métal ou en matériaux composites, offrant une bonne conductivité électrique et une résistance à la corrosion.

Des canaux gravés dans leur surface garantissent une alimentation uniforme en gaz et facilitent l'évacuation de l'eau. Un circuit de refroidissement peut aussi être intégré afin de maintenir la température de fonctionnement de la pile [5].

1.2.3.3.2. Couches de diffusion

Les couches de diffusion, placées entre les plaques bipolaires et les électrodes, assurent une répartition homogène des gaz sur toute la surface active et facilitent le transport des électrons.

Elles doivent être poreuses et conductrices. Elles sont généralement constituées de feutre de carbone ou de mousses métalliques. Un traitement hydrophobe est souvent appliqué pour favoriser l'évacuation de l'eau et éviter l'inondation des électrodes [5].

1.2.3.3.3. Électrodes (anode et cathode)

Les électrodes sont le siège des réactions électrochimiques. À l'anode, l'hydrogène est oxydé en protons et électrons. Les électrons circulent dans le circuit externe tandis que les protons

traversent la membrane. À la cathode, l'oxygène réagit avec les protons et les électrons pour former de l'eau.

Les électrodes sont composées d'un mélange de carbone conducteur, d'électrolyte polymère et d'un catalyseur, généralement du platine, afin d'améliorer la vitesse des réactions [5]

I.2.3.3.4. Membrane électrolyte

La membrane constitue l'élément central de la cellule. Elle permet uniquement le passage des protons tout en bloquant les électrons et les gaz, assurant ainsi la séparation des deux compartiments.

Elle doit présenter une bonne conductivité protonique, une étanchéité aux gaz et une stabilité chimique.

I.2.3.3.5. Catalyseur

Le catalyseur est un matériau métallique utilisé pour accélérer les réactions électrochimiques se produisant au niveau des électrodes. Il permet d'augmenter la vitesse de transformation des réactifs tout en assurant une bonne stabilité chimique face aux conditions de fonctionnement, notamment dans un milieu acide et corrosif. Pour cette raison, le platine, qui est un métal noble présentant une excellente résistance à la corrosion et une forte activité catalytique, est le matériau le plus couramment employé [5].

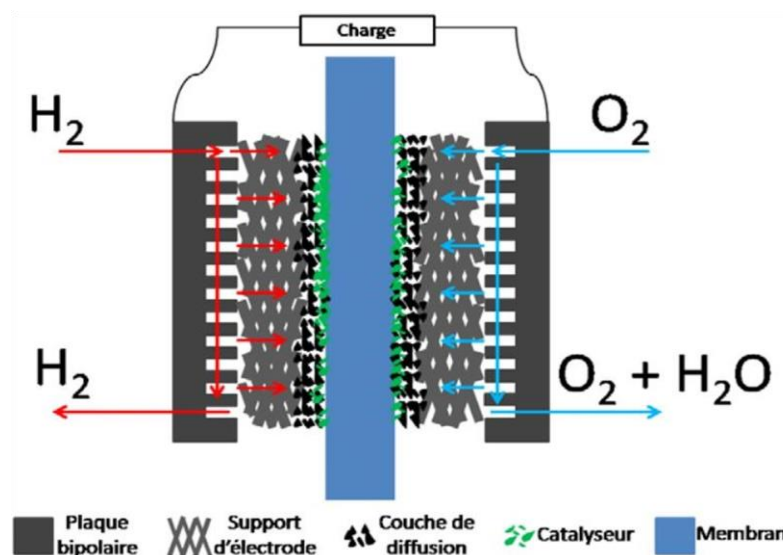


Figure I.7: Assemblage d'une cellule élémentaire. Principe de fonctionnement de la PEMFC

La pile à combustible à membrane échangeuse de protons est un type de pile à combustible qui fonctionne à basse température, généralement autour de 80 °C. Elle utilise une membrane polymère jouant le rôle d'électrolyte, dont la fonction principale est d'assurer le transport des protons H^+ tout en empêchant le passage des électrons [1].

Le principe de fonctionnement (Figure I.8) repose sur des réactions électrochimiques se produisant aux électrodes. À l'anode, l'hydrogène est oxydé en protons et en électrons sous l'action d'un catalyseur à base de platine. Les protons traversent la membrane électrolyte, tandis que les électrons circulent à travers un circuit externe, générant ainsi un courant électrique. À la cathode, les protons, les électrons et l'oxygène réagissent pour former de l'eau et produire de la chaleur [4].

La membrane doit être maintenue hydratée afin de garantir une bonne conductivité ionique, ce qui explique le fonctionnement à température modérée. Les plaques bipolaires, placées entre les cellules, assurent la distribution des gaz réactifs et la collecte du courant électrique. Elles peuvent être réalisées à partir de matériaux tels que le graphite, le métal ou les composites [1].

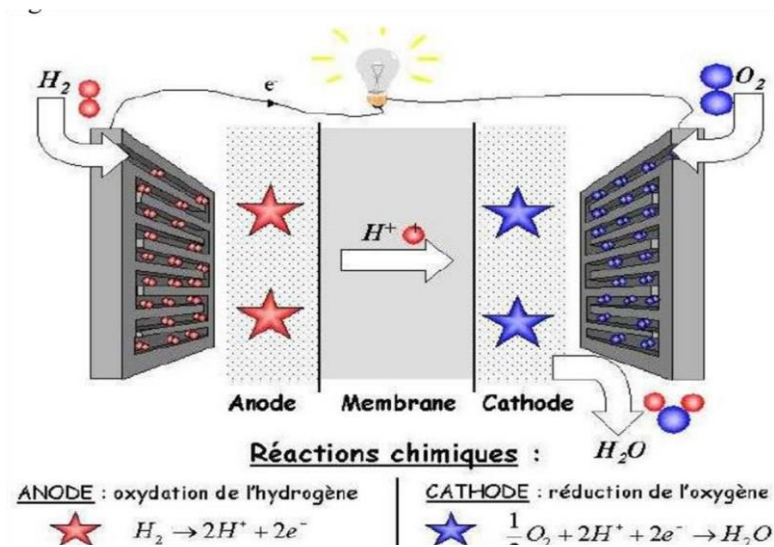


Figure I.8: Principe de fonctionnement d'une pile PEMFC.

I.2.3.5. Evolutions technologiques de la pile PEMFC

Les piles à combustible de type PEMFC connaissent un développement important grâce à leur compacité, leur bon rendement énergétique et leur faible impact environnemental. Elles trouvent des applications dans trois principaux domaines [5].

1. Applications portables

Pour des puissances inférieures à 1 kW, les PEMFC peuvent alimenter des dispositifs électroniques transportables tels que les téléphones et les ordinateurs portables. Leur principal avantage réside dans un temps de recharge très rapide grâce au remplissage du réservoir d'hydrogène, contrairement aux batteries classiques dont la recharge nécessite plusieurs heures [5].

2. Applications de transport

Les PEMFC constituent une alternative prometteuse aux batteries pour la traction électrique des véhicules. Elles offrent une autonomie plus élevée, un ravitaillement rapide et des émissions locales quasi nulles. Elles sont utilisées dans les voitures à hydrogène, les bus, ainsi que dans les véhicules de manutention comme les chariots élévateurs.

3. Applications stationnaires

Pour des puissances plus élevées, les PEMFC sont employées pour la production d'électricité continue, la cogénération chaleur–électricité, l'alimentation de secours et les sites isolés. Ces systèmes permettent d'améliorer le rendement global et de réduire les émissions de CO₂.

Ainsi, la polyvalence des PEMFC en fait une technologie attractive pour de nombreuses applications énergétiques, aussi bien mobiles que stationnaires.

I.3. Les batteries**I.3.1. Principe de fonctionnement des accumulateurs**

Un accumulateur électrochimique (Figure I.9) est constitué de quatre éléments principaux voir figure (I.10) : une électrode positive (cathode en convention générateur), une électrode négative (anode), un séparateur et un électrolyte. Les deux électrodes sont immergées dans l'électrolyte tandis que le séparateur empêche leur contact direct tout en permettant le passage des ions [7].

Son fonctionnement (fig I.10) repose sur des réactions d'oxydo-réduction se produisant aux électrodes. Deux couples électrochimiques interviennent : l'un à l'anode et l'autre à la cathode. Ces réactions chimiques permettent la circulation des électrons dans le circuit

externe et des ions dans l'électrolyte, ce qui assure la conversion de l'énergie chimique en énergie électrique [7].

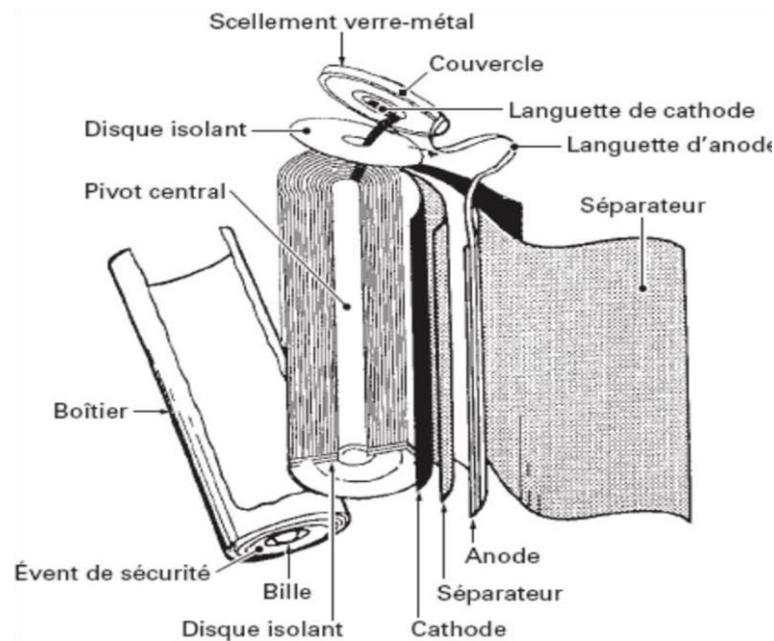


Figure I.9: Vue éclatée d'un accumulateur.

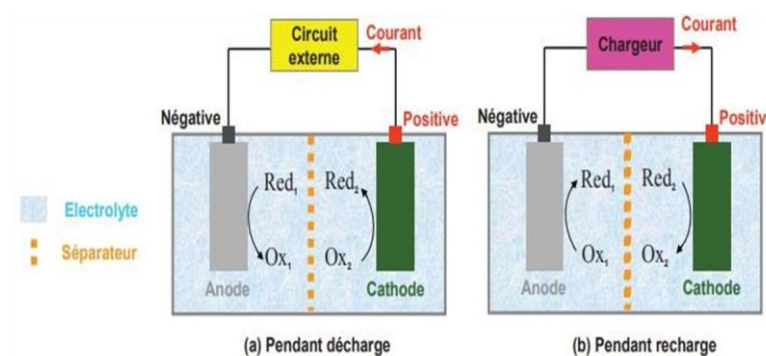


Figure I.10: Principe de fonctionnement des accumulateurs.

I.3.2. Les différents types d'accumulateurs

Il existe plusieurs technologies (Tableau I.2) d'accumulateurs électrochimiques, notamment le plomb, le NiMH, le NiCd, le NiZn et la famille lithium-ion (Li-ion). Leurs performances peuvent être comparées à l'aide du diagramme de Ragone (fig I.11), qui met en relation la puissance massique et l'énergie massique.

Cette comparaison montre que les accumulateurs lithium-ion offrent généralement les meilleures performances en termes de densité d'énergie et de puissance.

Tableau I.2 : Spécifications de différentes technologies d'accumulateurs.

Technologies	Plomb acide	NiCd	NimH	Li-ion Phosphate de Fer	Li-ion (1)
Energie massique (Wh/kg)	30-50	45-80	60-110	100-120	100-200
Energie volumique (Wh/l)	75-120	80-150	220-330	190-220	220-330
Densité de puissance (2) (W/kg)	700		900	800 (3)	1500 (3)
Nombre de cycles	600(1) 1200(2)	2000	1500	>2000	500-1000
Autodécharge mensuelle	5%	20%	30% (4)	5% (5)	10% (5)
Tension nominale	2V	1,2V	1,2V	3,2V	3,6V
Technologie	Plomb-acide	NiCd	NimH	Li-ion Phosphate de Fer	Li-ion
Gamme de température	-20 °C +60 °C	-40 °C +60 °C	-20°C +60°C	0°C +45°C (charge) -20°C +60°C (décharge)	-20°C +60°C (6)
Avantages	Coût	Fiabilité Basse température	Densité d'énergie	Densité d'énergie, sécurité, coût, nombre de cycles	Energie et puissance massique
Inconvénients	Faible énergie Mort subite	Faible énergie toxicité	Terre rare (7), coût, comportement en température	Charge à basse température (6)	Sécurité des gros accumulateurs, coût
Estimation de coût (€/kWh)	250 (a) 200 (b)	600	1500 à 2000	1000 à 1800 (8)	2000 (8)

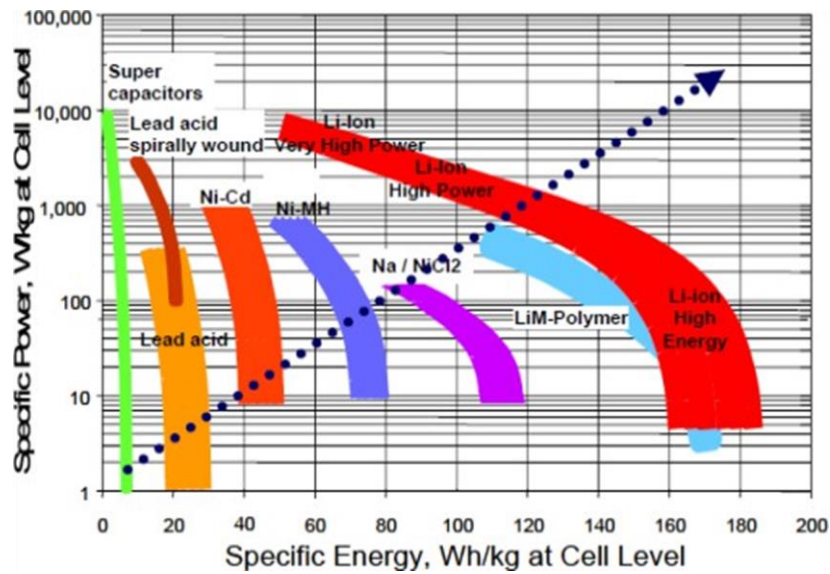


Figure I.11: Diagramme de Ragone supercondensateur et accumulateurs électrochimiques.

I.3.3. Grandeurs des caractéristiques des batteries

I.3.3.1. Plage de tension

Chaque batterie possède une plage de tension de fonctionnement limitée par une tension minimale (tension d'arrêt) et une tension maximale. Un fonctionnement en dehors de cette plage peut provoquer une dégradation ou un endommagement irréversible de la batterie.

I.3.3.2. Rendement faradique

Le rendement faradique correspond au rapport entre la charge récupérée lors de la décharge et la charge fournie pendant la charge. Il traduit l'efficacité énergétique de la batterie et est proche de 100 % pour les batteries lithium-ion [7].

I.3.3.3. Capacité (C)

La capacité représente la quantité de charge électrique que la batterie peut délivrer lors d'une décharge complète pour un courant donné. Elle s'exprime en ampère-heure (Ah). Cette capacité diminue lorsque le courant de décharge augmente [7].

$$Q = \int_{t_0}^t i_b(t) dt \quad (\text{I.4})$$

I.3.3.4. État de charge (SoC)

Le State of Charge (SoC) indique le niveau d'énergie restant dans la batterie. Il est exprimé en pourcentage : 100 % correspond à une batterie pleine et 0 % à une batterie déchargée [7].

$$SOC = \frac{\text{Charge disponible en Ah}}{\text{Capacité de la batterie}} = \frac{Q_{\text{restante}}}{Q_{\text{nominale}}} \quad (I.5)$$

I.3.3.5. Profondeur de décharge (DoD)

La profondeur de décharge représente la fraction d'énergie déjà consommée. Elle est complémentaire du SoC et vérifie [7] :

$$DoD = 1 - SoC. \quad (I.6)$$

I.3.3.6. Tension à vide (OCV)

La tension à vide est la tension mesurée aux bornes de la batterie lorsque aucun courant ne circule. Elle dépend directement du SoC et sert à estimer l'état de charge [7].

I.3.3.7. Tension nominale

La tension nominale est la tension moyenne de fonctionnement de la batterie. Elle dépend de la technologie utilisée (environ 3,7 V pour le Li-ion, 2 V pour le plomb, 1,2 V pour NiMH/NiCd) [7].

I.3.3.8. Durée de vie

La durée de vie correspond au nombre de cycles charge/décharge que la batterie peut supporter avant que sa capacité ne chute significativement (souvent 80 % de la capacité initiale) [7].

I.3.3.9. État de santé (SoH)

Le State of Health (SoH) indique le niveau de vieillissement de la batterie. Il est défini comme le rapport entre la capacité actuelle et la capacité initiale [7].

$$SoH = \frac{\text{Capacité actuelle de la batterie}}{\text{Capacité initiale de la batterie}} = \frac{C_{\text{actuelle}}}{C_{\text{initiale}}} \quad (I.7)$$

I.3.4. La batterie au Lithium

Le lithium est le métal solide le plus léger du tableau périodique. Il possède une masse molaire de $6,941 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ et une masse volumique de $0,53 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Ces propriétés lui confèrent une capacité spécifique théorique élevée, atteignant $3860 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$. Par ailleurs, le lithium est l'élément métallique présentant le pouvoir réducteur le plus important, avec un potentiel électrochimique du couple Li^+/Li égal à $-3,04 \text{ V}$ par rapport à l'électrode normale à hydrogène (ENH).

L'utilisation du lithium comme électrode négative permet ainsi d'obtenir des accumulateurs dont la tension peut atteindre 4 à 5 V. L'association d'une capacité spécifique élevée et d'une différence de potentiel importante confère aux accumulateurs au lithium une densité d'énergie massique particulièrement attractive.

Développés depuis les années 1970, les accumulateurs au lithium se répartissent principalement en deux grandes catégories (Figure I.12) :

- Les accumulateurs lithium-ion (Li-ion).
- Les accumulateurs lithium-métal (Li-métal).

Ces deux technologies se distinguent essentiellement par la nature des matériaux utilisés au niveau des électrodes [8].

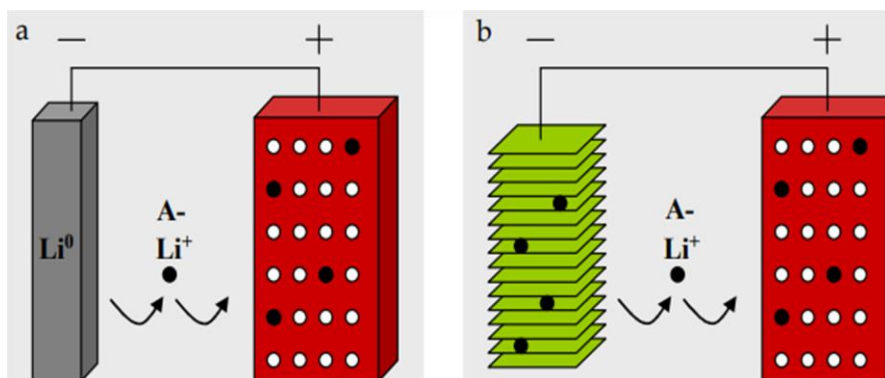


Figure I.12: Représentation schématique du principe de fonctionnement d'un accumulateur Li-métal (a), en comparaison d'un accumulateur Li-ion (b).

I.3.5. La batterie au Lithium-ion

Contrairement aux accumulateurs lithium-métal, les accumulateurs Li-ion se caractérisent par l'absence de lithium métallique dans le système, que ce soit au niveau des électrodes ou de l'électrolyte. Le lithium y est exclusivement présent sous forme ionique (Li^+) [8].

Au cours du fonctionnement, les ions lithium s'insèrent de manière réversible dans les matériaux d'électrode, appelés matériaux d'insertion. Lors de la charge, les ions lithium sont extraits de l'électrode positive et migrent à travers l'électrolyte (par diffusion et migration ionique) pour s'insérer dans l'électrode négative.

En phase de décharge, le processus inverse se produit : les ions lithium se désinsèrent de l'électrode négative et s'intercalent dans la structure hôte du matériau de l'électrode positive.

Ce mécanisme réversible de transfert d'ions lithium entre les deux électrodes est communément appelé mécanisme « rocking-chair », en référence au mouvement alternatif des ions d'une électrode à l'autre [8].

I.3.5.1. Avantages des batteries Lithium-ion

- Haute densité d'énergie : permet de stocker une grande quantité d'énergie pour une masse et un volume réduit.
- Haute densité de puissance (surtout version HP) : capable de fournir et d'absorber rapidement des pics de puissance.
- Rendement énergétique élevé : généralement supérieur à 90 %, ce qui limite les pertes d'énergie.
- Bonne réponse dynamique : adaptée aux variations rapides de charge (accélération, freinage).
- Faible effet mémoire : elle ne nécessite pas de cycles complets de charge/décharge.
- Autodécharge faible : elle conserve bien l'énergie stockée lorsqu'elle n'est pas utilisée.
- Longue durée de vie en cyclage : plusieurs milliers de cycles selon les conditions d'utilisation.
- Maintenance réduite : ne nécessite pas d'entretien spécifique régulier.
- Compatibilité avec les systèmes hybrides : idéale pour être couplée avec une pile à combustible afin d'absorber les variations rapides de puissance.

- Technologie mature et largement industrialisée : très utilisée dans les véhicules électriques, systèmes embarqués et stockage stationnaire.

Le tableau (I.3) ci-dessous présente une récapitulation des différents critères de la pile à combustible ainsi que la batterie à li-ions

Tableau I.3 : Comparaison entre une pile à combustible et une batterie Li-ion

Critère :	Pile à combustible :	Batterie Li-ion :
Densité d'énergie :	Élevée	Élevée
Densité de puissance :	Moyenne	Élevée
Temps de réponse :	Lent	Rapide
Rôle dans hybride :	Source principale	Support dynamique

I.3.6. Principe de fonctionnement

Dans un accumulateur lithium-ion, le lithium demeure à l'état ionique (Li^+) au sein de l'ensemble des composants de la cellule, sans présence de lithium métallique dans les conditions normales de fonctionnement.

Le principe de fonctionnement repose sur un mécanisme d'intercalation/dés intercalation réversible des ions lithium, assurant le transfert de charge à l'intérieur de la batterie. Le transport ionique s'effectue à travers l'électrolyte et le séparateur, tandis que les électrons circulent simultanément dans le circuit externe afin de maintenir l'électroneutralité du système.

Lors de la décharge, (fig I.13) les ions Li^+ se détachent du matériau actif de l'électrode négative (généralement à base de carbone), migrent à travers l'électrolyte sous l'effet du gradient de potentiel électrochimique, puis s'insèrent dans la structure cristalline du matériau d'électrode positive (oxyde de métal de transition, phosphate, etc.).

En phase de charge, le processus est inversé : les ions lithium se dés intercalent de l'électrode positive et se réinsèrent dans l'électrode négative.

Chaque transfert d'un ion Li^+ à travers l'électrolyte est compensé par le passage d'un électron dans le circuit extérieur, garantissant ainsi la conservation de la charge.

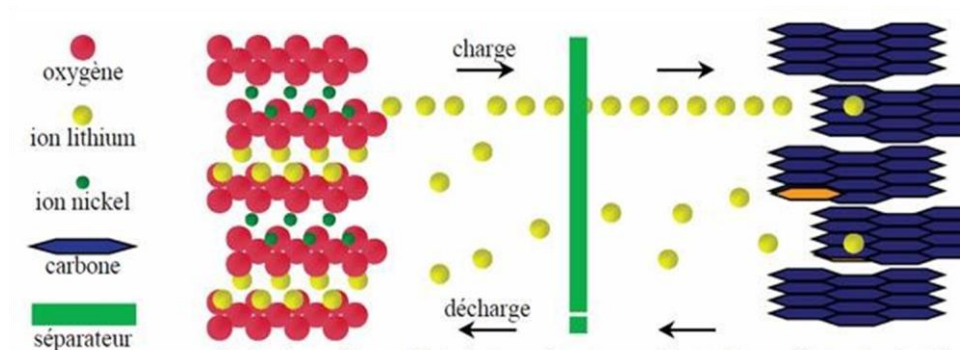


Figure I.13: Transport des ions à l'intérieur d'un accumulateur Li-ion.

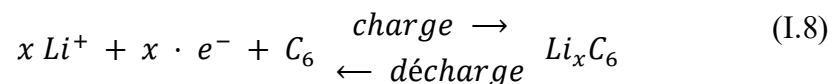
I.3.6.1. Électrode négative des accumulateurs Li-ion

Les électrodes négatives des accumulateurs lithium-ion sont principalement constituées de matériaux d'insertion tels que le graphite ou certains composés de métaux de transition (ex. $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$). Contrairement aux premiers accumulateurs au lithium des années 1960 utilisant le lithium métallique, les systèmes Li-ion actuels évitent la présence de lithium métal afin d'améliorer la sécurité et la durée de vie.

L'utilisation du lithium métallique posait deux problèmes majeurs :

- Formation d'une couche de passivation instable, entraînant une perte progressive de capacité due à la consommation irréversible du lithium.
- Croissance de dendrites de lithium, susceptible de provoquer des courts-circuits internes par percement du séparateur.

Pour surmonter ces limitations, le lithium métallique a été remplacé par des matériaux anodiques d'intercalation, dont le plus utilisé est le graphite. À température ambiante, le graphite peut insérer réversiblement un atome de lithium pour six atomes de carbone (composition LiC_6). Les ions Li^+ s'intercalent entre les plans graphitiques selon un mécanisme réversible d'insertion/désinsertion.

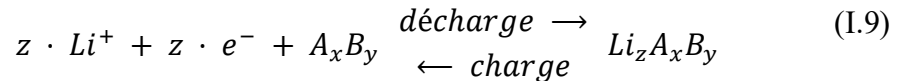


I.3.6.2. Électrode positive des accumulateurs Li-ion

Les accumulateurs lithium-ion sont généralement classés selon la composition du matériau actif de l'électrode positive (cathode), celle-ci influençant directement la tension nominale, la capacité spécifique et la stabilité thermique du système.

L'électrode positive est constituée de matériaux d'insertion à base de composés lithiés de métaux de transition (oxydes lamellaires, spinelles ou phosphates). Ces matériaux possèdent une structure cristalline capable d'accueillir et de libérer réversiblement des ions lithium sans modification majeure du réseau hôte.

Le mécanisme électrochimique repose sur une réaction d'intercalation/dés intercalation réversible des ions Li^+ , pouvant s'écrire de manière générale :



Où A_xB_y représente le composé hôte de l'électrode positive.

Lors de la décharge, les ions lithium s'insèrent dans la structure du matériau cathodique en captant des électrons provenant du circuit externe. En phase de charge, les ions Li^+ sont extraits du matériau, accompagnés du transfert d'électrons vers le circuit extérieur.

La nature du matériau cathodique détermine principalement les performances globales de la batterie, notamment la tension de cellule, la densité énergétique et la stabilité thermique.

I.3.6.3. Électrolyte des accumulateurs Li-ion

L'électrolyte assure la conduction des ions Li^+ entre l'anode et la cathode tout en empêchant le passage des électrons.

Deux types principaux existent :

- Électrolyte liquide : sel de lithium (ex. LiPF_6) dissous dans des solvants organiques ; forte conductivité ionique à température ambiante ($\sim 10^{-3} \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$), largement utilisé dans les batteries commerciales.
- Électrolyte polymère : sel de lithium incorporé dans une matrice polymère.
 - Gélifié : contient un solvant liquide.
 - Solide sec : sans solvant ; permet l'utilisation du lithium métallique mais nécessite une température élevée en raison de sa faible conductivité à température ambiante

I.3.6.4. Séparateur des accumulateurs Li-ion

Le séparateur est une membrane électriquement isolante et ioniquement conductrice, placée entre l'anode et la cathode afin d'éviter tout court-circuit interne tout en permettant la migration des ions Li^+ .

I.4. Système hybride

I.4.1. Définition

Un système hybride est un système énergétique qui combine deux sources d'énergie ou plus afin d'assurer une production d'électricité plus stable, plus fiable et mieux adaptée aux besoins.

Généralement, il associe une source renouvelable (comme le solaire ou l'éolien) à une autre source ou à un dispositif de stockage (batterie, pile à combustible, etc.) pour compenser l'intermittence et garantir la continuité de l'alimentation [9].

I.4.2. Architecture des systèmes hybrides

I.4.2.1. Architecture série

Dans l'architecture série du système hybride, la pile à combustible est la source principale d'énergie. Elle produit l'électricité nécessaire pour alimenter la charge à travers un bus continu. La batterie lithium-ion est utilisée comme élément de stockage pour aider lors des variations de puissance et pour stabiliser la tension du système.

La charge est alimentée uniquement par l'énergie électrique, ce qui permet une meilleure gestion du flux d'énergie. La batterie intervient surtout lors des pics de puissance afin de protéger la pile à combustible contre les variations brusques de courant. Cette architecture est simple et bien adaptée aux systèmes hybrides à base de pile à combustible.

I.4.2.2. Architecture parallèle

Dans l'architecture parallèle appliquée au système hybride pile à combustible / batterie lithium-ion, les deux sources d'énergie sont connectées directement au bus continu et peuvent alimenter simultanément la charge.

Dans cette configuration, la pile à combustible constitue la source principale d'énergie et fournit la puissance nécessaire en régime normal. La batterie lithium-ion intervient en complément lors des fortes demandes de puissance (mode boost) ou lors des variations rapides de charge. Elle peut également assurer seule l'alimentation pendant une courte durée si nécessaire.

Contrairement à l'architecture série, où l'énergie transite toujours par un seul chemin, l'architecture parallèle permet un partage direct de puissance entre les deux sources. Cette configuration améliore la flexibilité du système et permet d'optimiser le rendement énergétique en fonction des conditions de fonctionnement.

Cependant, elle nécessite une stratégie de gestion d'énergie plus élaborée afin d'assurer un bon équilibre entre la pile à combustible et la batterie.

I.4.2.3. Architecture série/parallèle

L'architecture série/parallèle combine les avantages des configurations série et parallèle afin d'améliorer la flexibilité et le rendement énergétique du système hybride. Dans le cadre du système étudié, cette structure permet à la pile à combustible et à la batterie lithium-ion de fonctionner soit indépendamment, soit simultanément selon les besoins de la charge.

Dans certaines conditions de fonctionnement, la pile à combustible alimente directement la charge tout en rechargeant la batterie, ce qui correspond à un mode proche de l'architecture série. Dans d'autres situations, la pile et la batterie peuvent fournir ensemble la puissance demandée, comme dans une architecture parallèle, afin de répondre aux pics de charge ou d'améliorer le rendement global.

Cette combinaison permet d'optimiser la gestion énergétique en adaptant le mode de fonctionnement aux conditions d'utilisation. Elle offre ainsi une meilleure exploitation des sources d'énergie, une réduction des contraintes dynamiques sur la pile à combustible et une amélioration de la performance globale du système.

Cependant, cette architecture nécessite une stratégie de commande plus complexe afin d'assurer une répartition efficace de la puissance entre les deux sources.

I.4.3. Domaines d'application des systèmes hybrides

I.4.3.1. Transport

C'est le domaine le plus connu.

- Les systèmes hybrides sont utilisés dans :
- Véhicules électriques à hydrogène
- Bus hybrides
- Camions et véhicules utilitaires
- Trains légers
- Navires hybrides

I.4.3.2. Production d'énergie stationnaire

- Alimentation de secours (hôpitaux, centres de données)

- Micro-réseaux électriques
- Bâtiments autonomes
- Sites isolés (zones rurales, désertiques)

La batterie stabilise la tension et compense les variations de charge, tandis que la pile assure l'autonomie longue durée.

I.4.3.3. Intégration des énergies renouvelables

Les systèmes hybrides sont adaptés pour :

- Couplage avec panneaux solaires
- Couplage avec éoliennes
- Stockage d'énergie renouvelable

La pile à combustible peut utiliser l'hydrogène produit par électrolyse, ce qui permet de stocker l'énergie renouvelable sous forme chimique.

I.4.3.2. Applications industrielles

- Systèmes d'alimentation pour équipements industriels
- Télécommunications
- Stations de base isolées
- Groupes électrogènes propres

I.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les bases théoriques du système hybride étudié, composé d'une pile à combustible et d'une batterie lithium-ion.

Nous avons expliqué le principe de fonctionnement de la pile à combustible, qui permet de produire de l'électricité à partir de l'hydrogène avec un faible impact environnemental. Ensuite, nous avons décrit le fonctionnement de la batterie lithium-ion, caractérisée par sa bonne densité d'énergie et sa réponse rapide aux variations de puissance.

Enfin, les différentes architectures des systèmes hybrides ont été présentées, montrant l'intérêt de combiner ces deux sources afin d'améliorer les performances, la stabilité et la gestion de l'énergie.

Ce chapitre constitue ainsi une base essentielle pour aborder la modélisation et le dimensionnement du système hybride dans la suite du travail.

Chapitre II

*Dimensionnement du système
hybride*

II.1 Introduction

Ce chapitre est consacré au dimensionnement du système hybride étudié. Le système considéré est destiné à l'alimentation d'un véhicule électrique hybride combinant une pile à combustible PEMFC et une batterie lithium-ion.

Le dimensionnement consiste à déterminer les valeurs des grandeurs caractérisant les différentes sources d'énergie ainsi que les convertisseurs associés afin de satisfaire les exigences imposées par le cahier des charges du véhicule.

Dans cette architecture hybride, la pile à combustible constitue la source principale d'énergie et assure l'alimentation du véhicule en régime permanent, tandis que la batterie lithium-ion fournit la puissance complémentaire lors des phases transitoires et des fortes accélérations.

Ce chapitre présente le cahier des charges du système hybride, le dimensionnement de la pile à combustible PEMFC, le dimensionnement de la batterie lithium-ion ainsi que le dimensionnement des convertisseurs DC-DC associés.

II.2 Cahier des charges du système hybride

II.2.1 Présentation du système

Le système hybride étudié dans ce travail est destiné à un véhicule électrique hybride associant une pile à combustible PEMFC et une batterie lithium-ion. Les caractéristiques du véhicule sont supposées similaires à celles du prototype Volkswagen Bora HY Power.

Le véhicule étudié présente les performances suivantes :

- Vitesse maximale : 136 km/h
- Accélération : 0 à 100 km/h en 12,5 s

II.2.2 Besoin en puissance

Dans cette étude, le système hybride considéré est destiné à l'alimentation d'un véhicule électrique hybride associant une pile à combustible PEMFC et une batterie lithium-ion. Les caractéristiques du véhicule étudié sont supposées similaires à celles du prototype Volkswagen Bora HY Power.

Afin de répondre aux exigences de traction du véhicule, plusieurs contraintes énergétiques et électriques ont été définies.

À la vitesse maximale, la puissance nécessaire à la traction est estimée à 29 kW. En tenant compte des auxiliaires du véhicule (système de refroidissement, électronique de commande,

climatisation, compresseur d'air, etc.), une marge de 20 % est ajoutée, ce qui conduit à une puissance totale d'environ 35 kW.

Durant les phases transitoires et les fortes accélérations, notamment lors du passage de 0 à 100 km/h, la puissance demandée peut atteindre environ 60 kW. Pour satisfaire cette demande tout en assurant un fonctionnement optimal du système hybride, les sources d'énergie ont été réparties selon leurs caractéristiques dynamiques.

La pile à combustible PEMFC constitue la source principale d'énergie du véhicule. Elle est dimensionnée pour fournir une puissance maximale de 40 kW afin d'assurer le fonctionnement en régime permanent avec une marge de sécurité suffisante.

La batterie lithium-ion intervient comme source auxiliaire. Elle fournit la puissance complémentaire lors des appels de puissance élevés, notamment pendant les accélérations et les phases transitoires. Elle permet également la récupération de l'énergie lors du freinage régénératif. La puissance maximale de la batterie est fixée à 60 kW.

L'architecture énergétique du système repose sur un bus continu de 400 V, choisi afin de réduire les pertes par effet Joule, limiter les niveaux de courant et améliorer le rendement global du système électrique.

La pile à combustible délivrant une tension plus faible et variable, celle-ci est raccordée au bus continu à travers un convertisseur DC-DC Boost permettant d'élever la tension jusqu'à 400 V.

La batterie lithium-ion est connectée au même bus via un convertisseur DC-DC bidirectionnel assurant :

- Le transfert d'énergie vers la charge lors de la décharge.
- La recharge de la batterie lors du freinage régénératif.

Les principales contraintes de dimensionnement du système hybride sont résumées dans le tableau (II.1) suivant :

Tableau II. 1: Les contraintes de dimensionnement du système hybride.

Paramètre	Valeur
Type de véhicule	Véhicule hybride PAC/Batterie
Vitesse maximale	136 km/h
Accélération (0–100 km/h)	12,5 s
Puissance à vitesse maximale	29 kW
Puissance avec auxiliaires	≈ 35 kW
Puissance maximale pile à combustible	40 kW
Puissance maximale batterie	60 kW
Tension du bus continu	400 V
Tension minimale PAC	200 V
Courant maximal PAC	100 A
Tension nominale batterie	400 V
Courant maximal batterie	150 A

II.3. Dimensionnement de la pile à combustible PEMFC

La pile à combustible constitue la source principale d'énergie du véhicule hybride. Sachant que :

- La puissance nécessaire est estimée à 29 kW.
- Une majoration de 20 % est ajoutée afin de prendre en compte la consommation des auxiliaires.
- La puissance requise est donc estimée à environ 35 kW.
- Afin d'assurer une marge de sécurité, la puissance maximale de la pile est fixée à 40 kW.
- La tension maximale d'une cellule PEM est supposée égale à 0,53 V.
- La puissance maximale d'une cellule est de 64 W.
- La pile doit alimenter un bus continu de 400 V via un convertisseur Boost.

II.3.1. Nombre de cellules montées en série

On a :

Bus continues : $U_{dc} = 400$ V, Pour le bon fonctionnement du convertisseur Boost, la pile à combustible doit fournir environ la moitié de la tension du bus continu.

Ainsi :

$$U_{pile} = \frac{U_{dc}}{2} \quad (\text{II. 1})$$

$$U_{pile} = \frac{400}{2} = 200 \text{ V}$$

La tension minimale imposée à la sortie de la pile est donc fixée à 200 V afin d'assurer le bon fonctionnement du convertisseur Boost.

Chaque cellule PEMFC fournit une tension maximale de : $E_{cell} = 0,53 \text{ V}$

Le nombre de cellules nécessaires en série est donné par :

$$N_{ps} = \frac{U_{pile}}{E_{cell}} \quad (\text{II. 2})$$

$$N_{ps} = \frac{200}{0.53} \approx 377 \text{ cellules}$$

Chaque stack est constitué de 125 cellules.

Le nombre de stacks montés en série est alors :

$$N_{stack} = \frac{N_{ps}}{125} \quad (\text{II. 3})$$

$$N_{stack} = \frac{377}{125} \approx 3 \text{ stacks}$$

II.3.2. Nombre de branches en parallèle

La puissance fournie par une cellule est :

$$P_{cell} = 64 \text{ W}$$

La puissance fournie par une branche est :

$$P_{branche} = (N_{stack} \times 125) \times P_{cell} \quad (\text{II. 4})$$

$$P_{branche} = 375 \times 64 = 24000 \text{ W}$$

La puissance totale désirée étant de 40 kW :

$$N_{branche/parallele} = \frac{P_{total}}{P_{stack}} \quad (\text{II. 5})$$

$$N_{\text{branche/parallèle}} = \frac{40000}{24000} \approx 1,66 \approx 2$$

Ainsi, le système est constitué de deux branches montées en parallèle.

Chaque branche comprend trois stacks connectés en série, et chaque stack est formé de 125 cellules élémentaires (Figure II.1).

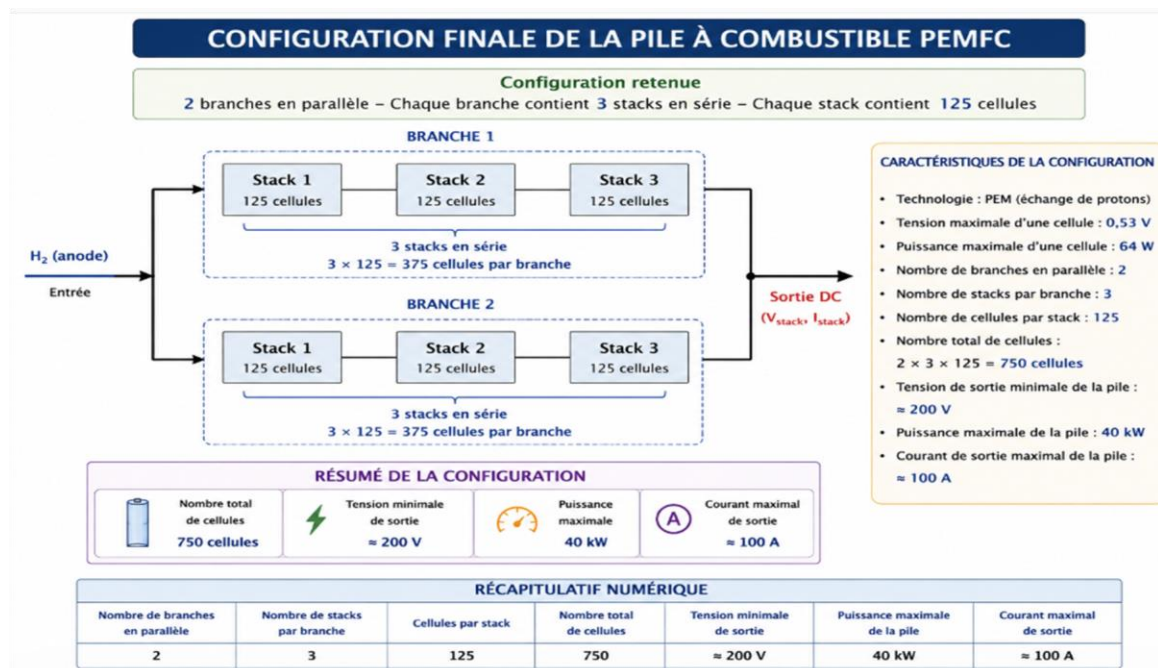


Figure II.1 : La configuration finale de la pile à combustible

II.4. Dimensionnement de la batterie lithium-ion

Le calcul du format des batteries pour un véhicule électrique est crucial, car il impacte directement la durée de vie du système de stockage, l'autonomie du véhicule et son coût global. Un dimensionnement efficace permet donc de trouver un bon milieu entre la performance énergétique, la fiabilité et l'aspect économique du véhicule.

Le dimensionnement consiste à déterminer le nombre de cellules en série N_{bs} et en parallèle N_{bp} de batteries nécessaires pour assurer la mission.[13]

II.4.1. Choix de la technologie

La cellule choisie est de technologie Nickel-Manganèse-Cobalt (NMC) au format cylindrique 18650 (Figure II .2).

Ce type de cellule présente plusieurs avantages pour les véhicules électriques :

- Bonne densité énergétique.
- Faible encombrement.
- Bonne durée de vie.
- Disponibilité commerciale.
- Coût relativement réduit.[14]



Figure II. 2 : Cellule NMC 18650.

Les spécifications principales de la cellule sont données dans le tableau (II.2) suivant :

Tableau II. 2 : Spécifications de la cellule.

Contrainte	Symbole	Valeur	Unité
Diamètre	D_{cell}	18	mm
Longueur	l_{cell}	65	mm
Poids	m_{cell}	0.044	kg
Tension maximale	$U_{cell,max}$	4.2	V
Tension nominale	$U_{cell,nom}$	3.657	V
Tension minimale	$U_{cell,min}$	2.5	V
Capacité nominale	$Q_{cell,nom}$	2.75	Ah
Résistance interne	R_{cell}	120.3	mΩ
Taux de décharge maximum	C_{rate}	10	h ⁻¹ (C)

II.4.2. Consommation énergétique de la batterie

La batterie lithium-ion est utilisée principalement pour :

- Fournir les pics de puissance pendant les accélérations ;
- Assister la pile à combustible durant les régimes transitoires ;
- Récupérer l'énergie pendant le freinage régénératif.

La tension nominale du pack batterie est fixée à 400 V afin d'être directement compatible avec le bus continu.

Le choix d'une énergie d'environ 16 kWh représente un compromis entre :

- Autonomie énergétique.
- Masse du véhicule.
- Coût du système.

II.4.3. Constitution du pack batterie

Le pack de batteries est composé de plusieurs cellules ou modules connectés en série et en parallèle afin de satisfaire les exigences de tension et de capacité du véhicule électrique. Le montage en série permet d'élever la tension totale du pack pour l'adapter au bus continu du système, tandis que le montage en parallèle augmente la capacité énergétique ainsi que le courant pouvant être délivré. Cette configuration hybride assure donc un équilibre optimal entre la tension, la puissance, l'autonomie et la fiabilité du système.

II.4.3.1. Nombre de cellules en série

$$N_{bs} = \frac{U_{batt}}{U_{cell,nom}} \quad (\text{II. 6})$$

Avec :

- N_{bs} : Nombre des cellules de batterie en série
- U_{batt} : La tension du pack de batteries de traction en V
- $U_{cell,nom}$: Tension nominale de la cellule en V

$$N_{bs} = \frac{400}{3.657} \Rightarrow N_{bs} \approx 110 \text{ cellules}$$

II.4.3.2. Nombre des stacks batteries en parallèle

$$N_{bp} = \frac{Q_{batt}}{Q_{cell,batt}} \quad (\text{II. 7})$$

Avec :

- N_{bp} : Nombre des stacks batteries en parallèle
- Q_{batt} : Capacité du pack de batteries en Ah
- $Q_{cell,batt}$: Capacité nominale de la cellule 18650

$$Q_{batt} = \frac{E_{batt}}{U_{batt}} \quad (\text{II. 8})$$

$$Q_{batt} = \frac{16000}{400} = 40Ah$$

Avec :

- E_{batt} : L'énergie absorbée en Wh
- U_{batt} : La tension du pack de batteries de traction en V

$$N_{bp} = \frac{Q_{batt}}{Q_{cell,nom}} \quad (\text{II.9})$$

$$N_{bp} = \frac{40}{2,75} \Rightarrow N_{bp} \approx 15$$

II.4.3.3. Nombre total des cellules batteries

$$N_{tot} = N_{bs} \times N_{bp} \quad (\text{II. 10})$$

$$N_{tot} = 110 \times 15 = 1650 \text{ cellules}$$

La configuration finale de la batterie lithium-ion est présenter dans la figure II.3 :

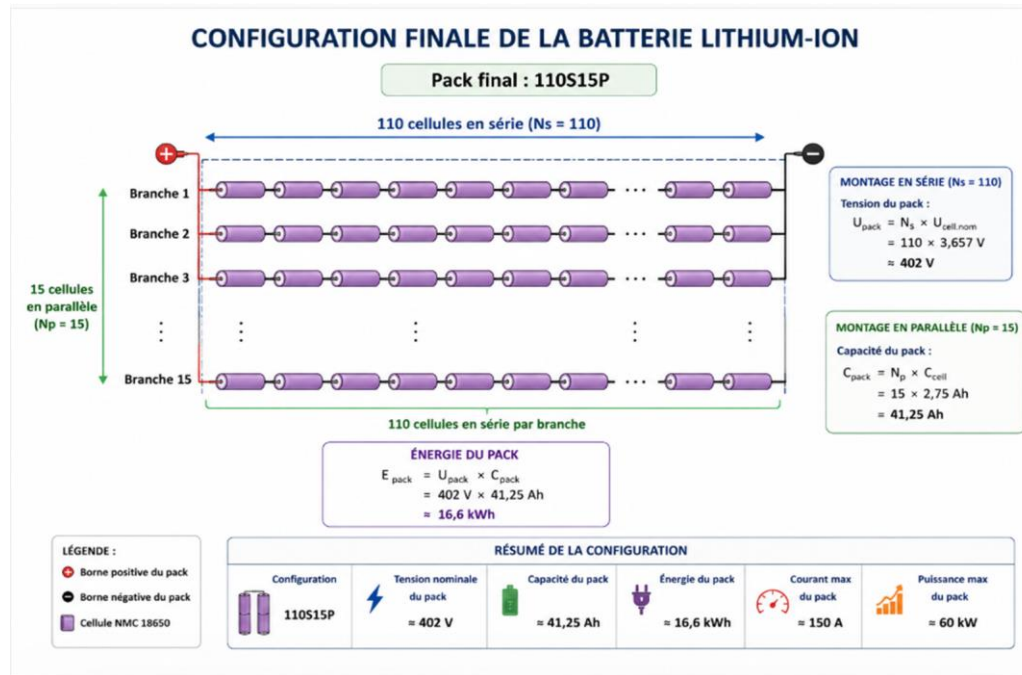


Figure II.3 : La configuration final de la batterie lithium-ion.

II.5. Dimensionnement des convertisseurs DC-DC

II.5.1. Convertisseur Boost de la pile à combustible PEMFC

Le convertisseur assurant l'interface entre la pile à combustible (PAC) et le bus continu (convertisseur DC-DC de type Boost (survolteur)) (Figure II.4). Son rôle principal est d'élever la tension relativement faible et variable fournie par la pile à combustible vers une tension de bus continu (U_{dc}) plus élevée et stable, nécessaire à l'alimentation du système électrique du véhicule (Tableau II.3).

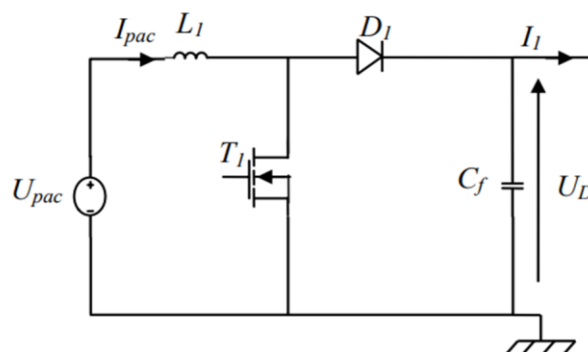


Figure II.4 : Convertisseur boost connecte à la pile à combustible.

Tableau II.3 : Spécification du convertisseur boost.

Topologie :	Boost(élevateur).
Fonction :	Elever la tension continue.
Tension de sortie (bus DC) :	400V
Puissance de sortie :	40KW
Commande :	Modulation PWM (régulation de tension)

II.5.1.1. Dimensionnement de l'inductance (L_1)

L'inductance est dimensionnée afin de limiter l'ondulation du courant de la pile (ΔI_{pac}), ce qui est particulièrement important pour préserver la durée de vie de la pile à combustible. L'ondulation maximale du courant apparaît généralement pour un rapport cyclique ($\alpha_1=0.5$). La valeur minimale de l'inductance est déterminée par la relation [11] :

$$L_1 = \frac{U_{DC}}{4 * f * \Delta I_{pac}} \quad (\text{II. 11})$$

Tel que l'ondulation du courant maximal est exprimée par :

$$\Delta I_{pac} = \frac{U_{DC}}{4 * f * L_1} \quad (\text{II. 12})$$

Pour une fréquence de découpage ($f=15$ kHz), la tension de sortie ($U_{DC} = 400V$) et une ondulation maximale du courant ($\Delta I_{pac} = 2$ A).

$$L_1 = \frac{400}{4 * 15 * 2} = 3,333$$

On obtient : $L_1 = 3.33$ mH

II.5.1.2. Dimensionnement du condensateur de filtrage (C_f)

Le condensateur de sortie a pour rôle de maintenir la tension du bus continu (U_{DC}) avec une ondulation limitée (ΔU_{DC}). Sa capacité minimale est donnée par :

$$C_f = \frac{\alpha_1 * I_1}{f * \Delta U_{DC}} \quad (\text{II. 13})$$

Tel que l'ondulation de la tension maximale est exprimée par :

$$\Delta U_{DC} = \frac{\alpha_1 * I_1}{f * C_f} \quad (\text{II. 14})$$

En considérant un courant maximal ($I_1=100$ A), rapport cyclique ($\alpha_1=1$), et une ondulation de tension maximale ($\Delta U_{DC} = 4$ V)

$$\Delta U_{DC} = \frac{1 * 100}{15 * 4} = 1,666$$

La capacité minimale du condensateur est $C_f = 1.66$ mF

II.5.1.3. Condition de conduction continue (CCM)

Pour faciliter la commande du convertisseur et améliorer la stabilité du système, le fonctionnement en mode de conduction continue (CCM) est privilégié. Dans ce mode.

Le courant circulant dans l'inductance ne s'annule jamais. La limite entre le mode de conduction continue et discontinue est définie par le courant critique :

$$I_{critique} = \frac{2}{27} * \frac{U_{DC}}{f * L_1} \quad (\text{II. 15})$$

$$I_{critique} = \frac{2}{27} * \frac{400}{15 * 3,3} = 0.598$$

Pour les paramètres considérés, on obtient un courant critique approximatif de

$$I_{critique} = 0.6 \text{ A}$$

Ainsi, pour garantir le fonctionnement en mode CCM, le courant dans l'inductance doit rester supérieur ou égal à cette valeur. Le Tableau (II.4) résume le dimensionnement.

Tableau II.4 : Le dimensionnement du Convertisseur boost.

Paramètre calculé :	Symbole :	Valeur :
Rapport de conversion :	G	2
Rapport cyclique :	D	0.5
Inductance :	C_f	3.33 mH
Condensateur de sortie :	L_1	1.66 mF
Courant critique (CCM) :	$I_{critique}$	0.6A
Mode de conduction :	-	CCM

II.5.2. Convertisseur buck boost bidirectionnel de la batterie

Les convertisseurs DC/DC représentent un composant clé des systèmes d'électronique de puissance. Présents dans de nombreuses applications industrielles et automobiles, ils assurent l'adaptation et la régulation de la tension continue, en permettant soit son élévation (convertisseur Boost), soit son abaissement (convertisseur Buck), afin de répondre aux exigences électriques des différents sous-systèmes.[15]

Dans le système d'alimentation du véhicule électrique, le transfert d'énergie entre la batterie de traction et le bus continu est assuré par un convertisseur DC-DC bidirectionnel (Figure II.5). Le changement du sens de circulation de l'énergie est lié à l'inversion du sens du courant, tandis que la tension du bus continu conserve le même signe. Le convertisseur fonctionne ainsi comme un hacheur réversible en courant permettant deux modes de fonctionnement : la décharge de la batterie pour alimenter le bus continu et la recharge de la batterie à partir du bus continu.[12]

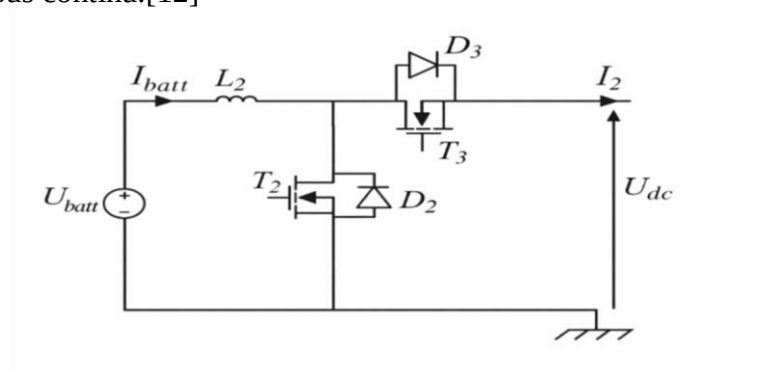


Figure II. 5 : Convertisseur DC-DC bidirectionnel lié avec la batterie lithium-ion

Selon l'étude présentée dans [11], l'inductance de lissage d'un convertisseur Buck-Boost peut être déterminée à partir de l'expression suivante :

$$L = \frac{U_{DC}}{4f\Delta I_{battmax}} \quad (II. 16)$$

Avec :

- f : fréquence de découpage (15 kHz).
- $\Delta I_{battmax}$: l'oscillation du courant dans l'inductance, (2A).
- U_{DC} : Tension de bus continue (400 V).

Tableau II.5: Paramètres de dimensionnement du convertisseur buck/boost

Paramètre calculé :	Symbole :	Valeur :
Courant	$I_{battmax}$	150 A
Tension	U_{DC}	400 V
Inductance	L	3,33mH

II.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le dimensionnement du système hybride associant une pile à combustible PEMFC et une batterie lithium-ion destiné à l'alimentation d'un véhicule électrique hybride.

Dans un premier temps, le cahier des charges du système a été défini à partir des exigences énergétiques et dynamiques du véhicule. Les besoins en puissance, en tension ainsi que les contraintes de fonctionnement ont permis d'établir les caractéristiques principales du système hybride.

Ensuite, le dimensionnement de la pile à combustible PEMFC a été réalisé afin d'assurer l'alimentation principale du véhicule. Le nombre de cellules montées en série et en parallèle a été déterminé de manière à satisfaire les contraintes de puissance et de tension imposées par le bus continu de 400 V.

Par ailleurs, le dimensionnement de la batterie lithium-ion a permis de définir une configuration adaptée aux besoins de stockage énergétique et aux fortes demandes de puissance pendant les phases transitoires et les accélérations.

Enfin, les convertisseurs DC-DC associés ont été dimensionnés afin d'assurer l'adaptation énergétique entre les différentes sources et le bus continu tout en garantissant un fonctionnement stable du système.

Les résultats obtenus ainsi que les simulations réalisées sous Matlab/Simulink montrent que le système hybride proposé répond correctement aux exigences du cahier des charges et constitue une solution performante pour les applications de véhicules électriques hybrides.

Chapitre III

Modélisation des composants du système hybride

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à la modélisation et au dimensionnement des principales sources d'énergie utilisées dans un véhicule hybride, en particulier la pile à combustible de type PEMFC ainsi que le convertisseur Boost associé.

Dans un premier temps, nous présentons un modèle mathématique décrivant le comportement électrique de la pile à combustible, en tenant compte des différentes pertes internes influençant ses performances. Ensuite, nous développons la modélisation du convertisseur Boost permettant d'adapter la tension délivrée par la pile au niveau du bus continu.

Dans un second temps, un dimensionnement détaillé de la pile à combustible est réalisé afin de répondre aux exigences de puissance du véhicule. Le dimensionnement des composants du convertisseur, notamment l'inductance et le condensateur, est également effectué en tenant compte des contraintes de fonctionnement et de stabilité.

Enfin, des simulations sous Matlab sont présentées afin de valider les modèles proposés et d'analyser les performances du système en termes de tension, courant, puissance et rendement.

III.2. Modélisation du comportement du stack de piles à combustible

Dans une pile à combustible de type Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC), la tension réelle est inférieure à la tension théorique en raison de phénomènes irréversibles internes. Ces pertes influencent la performance électrique de la pile et déterminent la forme de la courbe de polarisation. On distingue principalement trois types de pertes : les pertes d'activation, les pertes ohmiques et les pertes de concentration (Figure III.1) [1].

$$V_{cell} = E - \Delta V_{act} - \Delta V_{ohm} - \Delta V_{conc} \quad (III. 1)$$

Où :

- V_{cell} : la tension d'une cellule (V).
- E : est la tension réversible théorique donnée par l'équation de Nernst. Elle dépend de la température et des pressions partielles des gaz réactifs (V).
- ΔV_{act} : surtension d'activation(V).

- ΔV_{ohm} : chute ohmique(V).
- ΔV_{conc} : surtension de concentration(V).

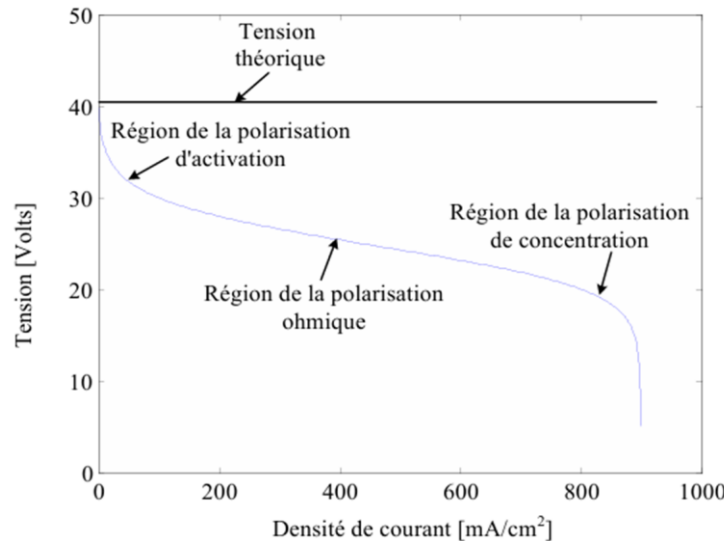


Figure III.1 : Caractéristique tension-courant d'une pile PEM.

III.2.1. Pertes d'activation

Les pertes d'activation sont associées à l'énergie nécessaire pour initier les réactions électrochimiques aux électrodes. Elles sont particulièrement importantes aux faibles densités de courant et sont principalement dues à la réaction de réduction de l'oxygène à la cathode [1].

La surtension d'activation est modélisée par l'équation de Tafel :

$$\Delta V_{act} = A * \ln\left(\frac{I_{cell} + i_n}{i_0}\right) \quad (III. 2)$$

Où :

- I_{cell} : la densité du courant délivré par une cellule de la pile (mA/cm^2).
- i_0 : Le courant d'échange i_0 est le courant correspondant à l'équilibre électrochimique, lorsque les vitesses des réactions d'oxydation et de réduction sont égales, il est de l'ordre de ($0,04 \text{ mA}/\text{cm}^2$).
- i_n : représente un courant parasite dû aux pertes internes, telles que les fuites de gaz ou les courants de court-circuit internes (mA/cm^2).

- A: constante de Tafel (dépend de la température et du matériau catalytique). Il est de l'ordre de (0.06).

III.2.2. Pertes ohmiques

Les pertes ohmiques résultent de la résistance ionique de la membrane et de la résistance électronique des électrodes et des plaques bipolaires. Elles sont proportionnelles au courant traversant la pile.

La chute de tension ohmique est donnée par [1] :

$$\Delta V_{ohm} = R_{cell} * I_{cell} \quad (III. 3)$$

Où :

- R_{cell} : résistance surfacique totale (membrane + électrodes) exprimée en ($\Omega.cm^2$).

III.2.3. Pertes de concentration

Les pertes de concentration apparaissent à forte densité de courant, lorsque la vitesse de consommation des réactifs (H_2 et O_2) dépasse leur vitesse de diffusion vers les électrodes. Les réactifs deviennent insuffisants pour alimenter correctement les réactions électrochimiques.

Elles sont modélisées par [1],[11] :

$$\Delta V_{conc} = -m * \exp(n * I_{cell}) \quad (III. 4)$$

Où :

- m : constante de l'ordre de ($3.10^{-5}V$).
- n : constante de l'ordre de ($8. 10^{-3} cm^2/mA$).

III.2.4. Tension délivrée par la pile en fonction de courant débité

En tenant compte de l'ensemble des pertes internes, la tension d'une cellule peut être exprimée par la relation générale suivante [1],[11] :

$$V_{cell} = E - R_{cell} * I_{cell} - A * \ln\left(\frac{I_{cell} + i_n}{i_0}\right) + m * \exp(n * I_{cell}) \quad (III. 5)$$

En principe, le phénomène de transfert de charge n'apparaît pas lorsque le courant dépasse une certaine valeur seuil (dominantes à faible courant). Par conséquent, ce phénomène sera négligé dans l'étude [11], et la tension de la cellule sera alors exprimée par l'équation suivante :

$$\Delta V_{cell} = E - R_{cell} * I_{cell} - A * \ln(a * I_{cell} + b) \quad (\text{III. 6})$$

Avec :

- **a et b** : constantes d'ajustement expérimental.

Donc : l'expression de la tension aux bornes du stack d'une pile à combustible de type Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) :

$$U_{pac} = N_s * V_{cell} \quad (\text{III. 7})$$

$$U_{pac} = N_s * [E - R_{cell} * I_{cell} - A * \ln(a * I_{cell} + b)] \quad (\text{III. 8})$$

Avec :

- U_{pac} : La tension totale d'une pile à combustible (V).
- N_s : Nombre de cellules connectées en série dans un seul stack

Tableau III. 1 : Les paramètres de la pile.

Constante	Valeur
E [V]	1,2
$R_{cell} [\Omega]$	0,002
A[V]	0,06
a [A^{-1}]	21,273
b	96,297

Finalement :

$$U_{pac} = N_s * [1,2 - 0,002 * I_{cell} - 0,06 * \ln(21,273 * I_{cell} + 96,297)] \quad (\text{III. 9})$$

III.2.5. Modélisation du convertisseur Boost lié à la pile à combustible

La pile à combustible, une modélisation basée sur ses deux phases de fonctionnement est établie.

Le convertisseur est alimenté par une tension d'entrée V_{in} fournie par la pile à combustible, et délivre une tension de sortie V_0 au bus continu à travers un filtre composé d'une inductance L et d'un condensateur C [12].

III.2.5.1. Phase de conduction de l'interrupteur (durée DT)

Lorsque l'interrupteur T est passant (Figure III.2), la diode est bloquée. L'inductance est directement reliée à la source V_{in} , ce qui entraîne une accumulation d'énergie magnétique. Le courant dans l'inductance augmente progressivement [12].

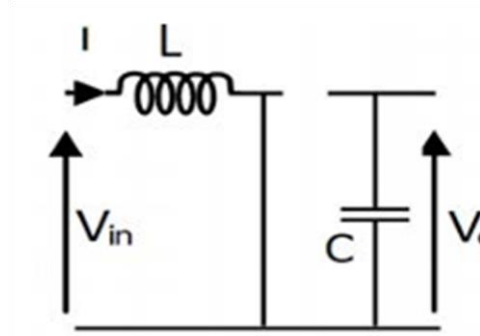


Figure III.2: Phase de conduction de l'interrupteur.

En appliquant la loi des mailles, on obtient :

$$V_{in} = L \frac{di_L}{dt} \quad (\text{III. 10})$$

Durant cette phase, le condensateur C assure l'alimentation de la charge, ce qui peut provoquer une légère diminution de la tension de sortie.

III.2.5.2. Phase de blocage de l'interrupteur (durée $(1 - D)T$)

Lorsque l'interrupteur T est bloqué (Figure III.3), la diode devient passante. L'énergie stockée dans l'inductance est alors transférée vers la charge et le condensateur, ce qui entraîne une élévation de la tension de sortie [12].

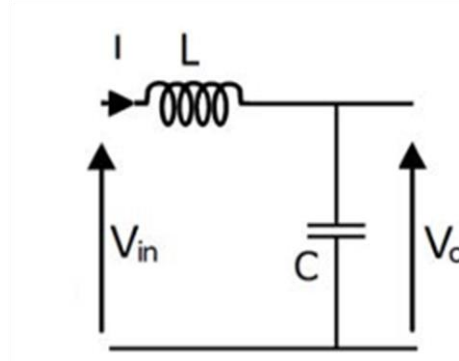


Figure III.3 : Phase de blocage de l'interrupteur.

L'équation de maille s'écrit :

$$V_{in} - V_o = L \frac{di_L}{dt} \quad (\text{III. 11})$$

Dans cette phase, le condensateur se recharge et contribue au maintien de la tension V_o

.

III.2.5.3. Modélisation du condensateur :

Le condensateur de sortie joue un rôle essentiel dans le filtrage de la tension. Il permet de réduire les ondulations dues à la commutation. Son comportement est décrit par [12] :

$$i_c = C \frac{dV_o}{dt} \quad (\text{III. 12})$$

Le courant dans le condensateur correspond à la différence entre le courant de l'inductance et le courant absorbé par la charge :

$$i_c = i_L - i_{charge} \quad (\text{III. 13})$$

Ainsi, la dynamique de la tension de sortie dépend directement de cette relation.

III.2.5.4. Modèle moyen du convertisseur

En introduisant le rapport cyclique Det en moyennant les équations sur une période de découpage, on obtient le modèle moyen suivant [12] :

$$L \frac{di_L}{dt} = D \cdot (V_{in}) + (1 - D) \cdot (V_{in} - V_0) \quad (\text{III. 14})$$

$$\begin{aligned} &= V_{in}(D + 1 - D) - (1 - D)V_0 \\ &= V_{in} - (1 - D)V_0 \end{aligned}$$

$$L \frac{di_L}{dt} = V_{in} - (1 - D)V_0 \quad (\text{III. 15})$$

Ce modèle montre que la tension de sortie est contrôlée par le rapport cyclique. Il confirme également le caractère élévateur du convertisseur Boost, puisque pour $0 < D < 1$, on a :

$$V_0 > V_{in}$$

III.2.6. Simulations sur Matlab

III.2.6.1. La courbe de polarisation

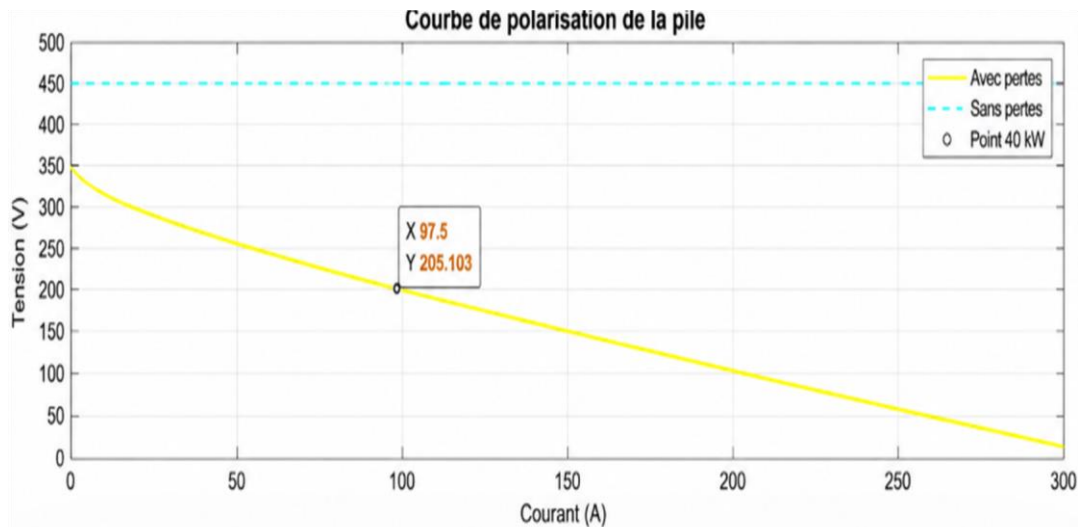


Figure III.4 : Courbe de polarisation de la pile à combustible.

La courbe de polarisation montre une diminution non linéaire de la tension avec l'augmentation du courant, due aux pertes électrochimiques internes. À faible courant, les pertes d'activation dominent ; dans la zone intermédiaire, les pertes ohmiques deviennent prépondérantes ; et à fort courant, les pertes de concentration apparaissent négligées dans notre étude [11]. L'écart entre la tension réelle et idéale met en évidence l'impact global de ces pertes sur les performances de la pile.

III.2.6.2. La courbe de puissance de la pile à combustible

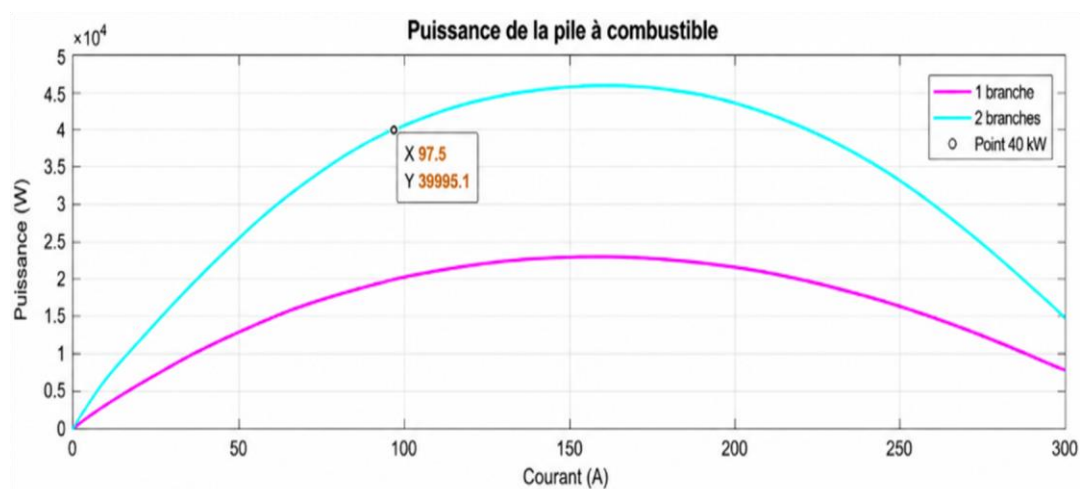


Figure III.5: Puissance de la pile à combustible.

III.2.6.3. Convertisseur Boost lié à la pile à combustible

III.2.6.3.1. Commande du transistor (PWM)

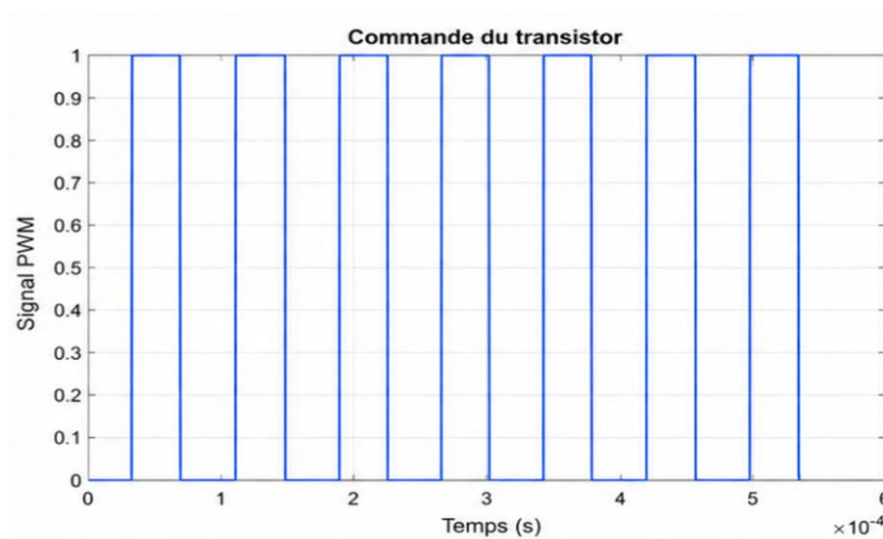


Figure III.6: Commande transistor.

Le signal de commande du transistor est un signal PWM (modulation de largeur d'impulsion) de forme rectangulaire (Figure III.6). Il alterne entre les états ON (1) et OFF (0) avec une fréquence fixe. Le rapport cyclique reste constant, ce qui permet de contrôler le fonctionnement du convertisseur Boost et de fixer la valeur de la tension de sortie. Cette commande assure un fonctionnement stable du système en régime de commutation.

III.2.6.3.2. Courant dans l'inductance

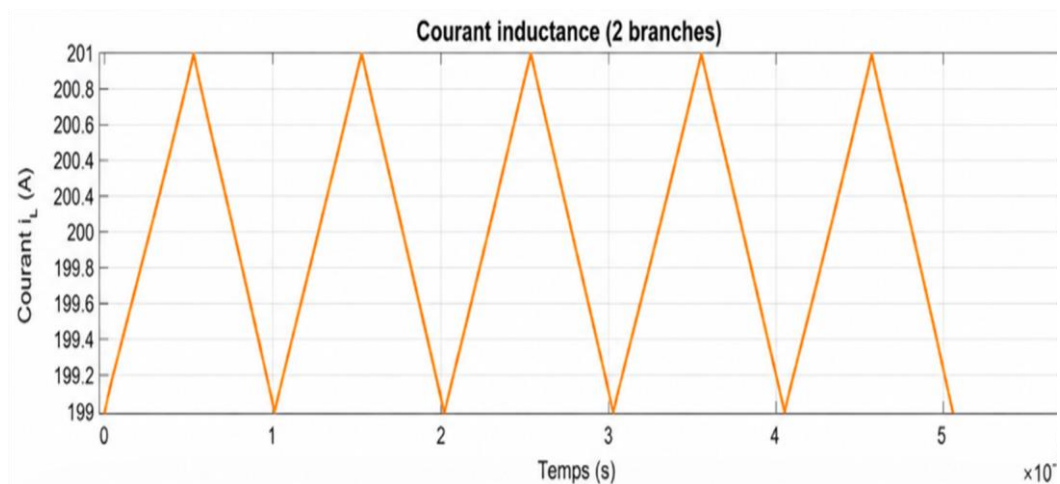


Figure III.7 : Courant inductance du convertisseur.

Le courant dans l'inductance présente une forme triangulaire (Figure III.7) caractéristique du fonctionnement en commutation du convertisseur. Sa valeur moyenne est d'environ 200 A, correspondant au courant total fourni par les deux branches de la pile. L'ondulation du courant est faible (environ 2 A) et le courant reste toujours positif, ce qui confirme que le convertisseur fonctionne en mode de conduction continu (CCM). Ce mode est recherché car il garantit une meilleure stabilité et un fonctionnement optimal.

III.2.6.3.3. Tension de sortie du convertisseur Boost

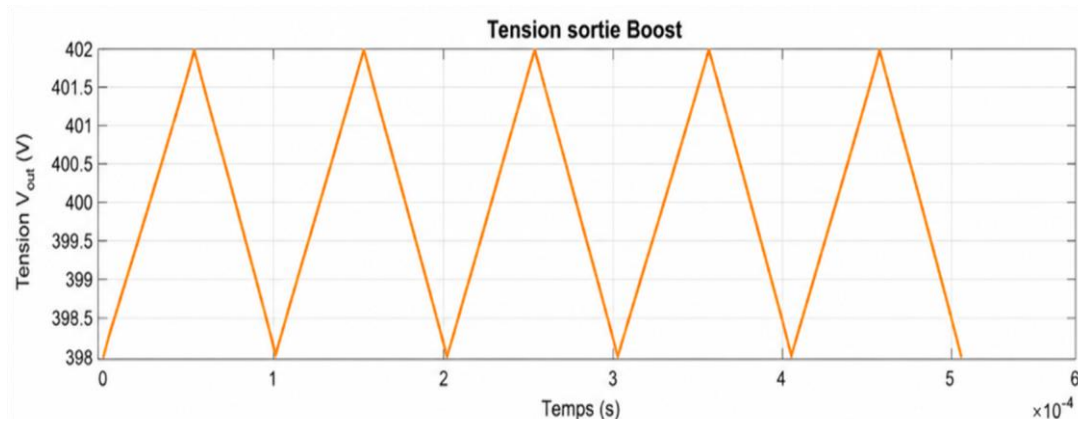


Figure III.8 : Tension sortie boost.

La tension de sortie du convertisseur (Figure III.8) est maintenue autour de 400 V, ce qui montre que le rôle d'élévation de tension est bien assuré. On observe une légère ondulation d'environ 4 V, due aux phases de charge et de décharge du condensateur de filtrage. Cette faible ondulation confirme que le condensateur est correctement dimensionné et que la tension délivrée à la charge est stable.

III.3. Modélisation du stack de batteries lithium-ion

La modélisation des batteries lithium-ion représente un défi complexe en raison de leur nature multi-domaines, impliquant des interactions entre la physique, l'électrochimie et la thermique. De nombreux modèles ont été développés dans la littérature pour décrire le fonctionnement d'une batterie, simuler ses performances et évaluer ses divers états (comme l'état de charge ou de santé). En règle générale, la complexité du modèle est déterminée par les exigences spécifiées par l'application.[16]

Dans ce travail, nous avons sélectionné le modèle RC (Figure III.9). Ce modèle est basé sur le schéma électrique de la figure II.4. Il utilise une résistance en série R_b pour représenter la résistance interne de la batterie, ainsi qu'un condensateur C_b associé pour modéliser les phénomènes dynamiques liés au stockage de charge et aux effets transitoires. La source de tension OCV représente la tension à vide de la batterie.

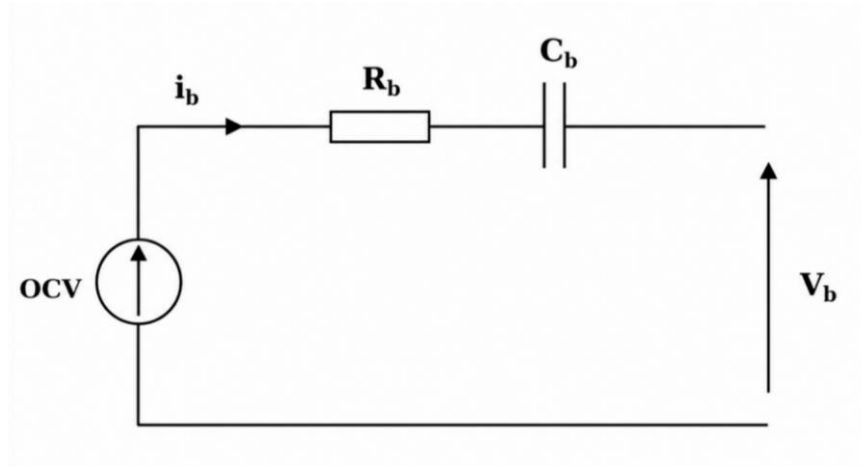


Figure III. 9 : Modèle RC d'une batterie lithium-ion

En appliquant la loi des mailles, la tension aux bornes d'une batterie lithium-ion en régime de décharge peut être exprimée par l'équation suivante :

$$V_b = OCV - R_b \cdot i_b - \frac{1}{C_b} \int i_b dt \quad (\text{III. 16})$$

Où :

- V_b : Tension aux bornes de la batterie
- R_b : Résistance interne de la batterie
- C_b : Capacité équivalente, modélisant les effets dynamiques
- i_b : Courant de la batterie
- OCV (*Open Circuit Voltage*) : Tension à vide de la batterie, dépendante de l'état de charge (SOC)

Dans le cas d'un pack batterie composé de N_{bs} cellules connectées en série et N_{bp} cellules connectées en parallèle, les paramètres équivalents du pack peuvent être déterminés comme suit :

$$V_b = OCV - R_b \cdot i_b - \frac{1}{C_b} \int i_b dt \quad (\text{III. 17})$$

$$R_{b,pack} = \frac{N_{bs}}{N_{bp}} R_b \quad (\text{III. 18})$$

$$C_{b,pack} = \frac{N_{bp}}{N_{bs}} C_b \quad (\text{III. 19})$$

- OCV_{pack} : Tension à circuit ouvert du pack batterie
- $R_{b,pack}$: Résistance interne équivalente du pack batterie
- $C_{b,pack}$: Capacité équivalente du pack batterie

La tension aux bornes du pack batterie peut alors s'écrire :

$$V_{b,pack} = OCV_{pack} - R_{b,pack} \cdot i_b - \frac{1}{C_{b,pack}} \int i_b dt \quad (III. 20)$$

Par ailleurs, l'état de charge de la batterie, appelé State of Charge (SOC), représente le rapport entre la charge restante et la capacité nominale de la batterie. Il peut être exprimé par la relation suivante :

$$SOC = \left(1 - \frac{Q_m}{C_{pack}}\right) \times 100\% \quad (III. 21)$$

Où :

- C_{pack} : capacité nominale du pack batterie
- Q_m : quantité de charge manquante par rapport à la capacité nominale.

III.3.1. Modélisation du convertisseur DC/DC bidirectionnel lié à la batterie

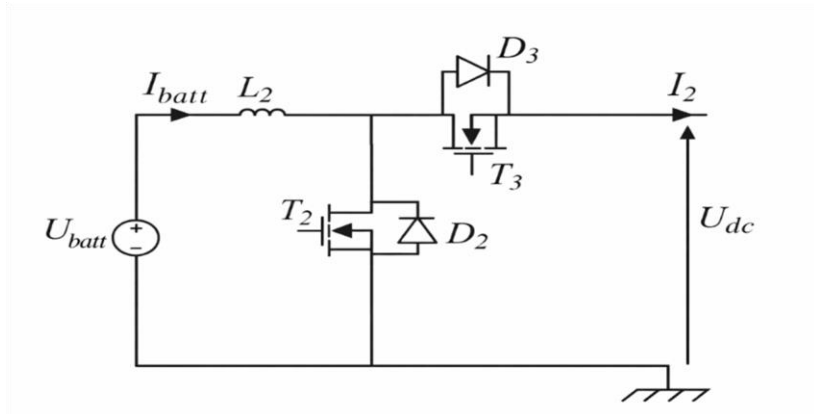


Figure III. 10 : Convertisseur DC/DC bidirectionnel en courant.

Le fonctionnement de ce convertisseur bidirectionnel (Figure III.10) en courant se fait en deux phases, selon l'état des interrupteurs.[12]

Phase 1 : lorsque l'interrupteur T3 est fermé et l'interrupteur T2 est ouvert, le schéma équivalent du circuit correspondant à cette phase est illustré dans la Figure III.11

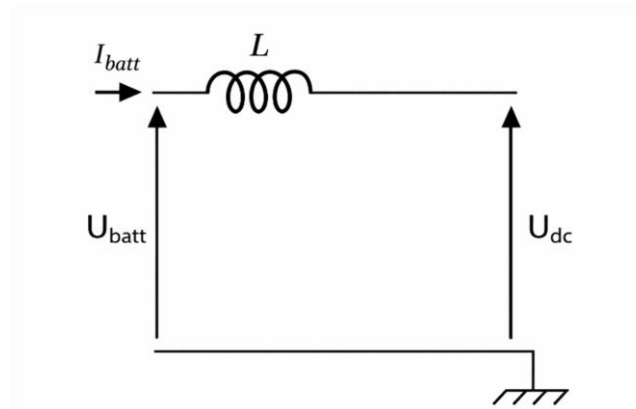


Figure III. 11 : Le schéma équivalent du circuit de la phase 1.

L'équation pour cette phase de fonctionnement du convertisseur peut être donnée par :

$$L \frac{di}{dt} = U_{batt} - (1 - u_3)U_{dc} \quad (\text{III. 22})$$

Avec :

- u_3 : Signal de commande de transistor T3
- $L \frac{di}{dt}$: tension aux bornes de l'inductance
- U_{batt} : tension de batterie (entrée de convertisseur)
- U_{dc} : tension de bus DC (sortie de convertisseur)

Phase 2 : quand l'interrupteur T3 est ouvert et l'interrupteur T2 est fermé, la Figure III.12 présente le schéma équivalent du circuit pour cette phase.

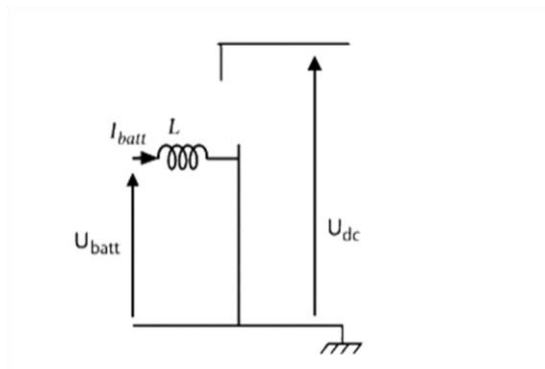


Figure III. 12 : Le schéma équivalent du circuit de la phase 2.

L'équation pour cette phase de fonctionnement du convertisseur peut être donnée par :

$$L \frac{di}{dt} = U_{batt} - (1 - u_2)U_{dc} \quad (\text{III. 23})$$

- u_2 : signal de commande de transistor T2

III.3.2. Simulation sur Matlab

III.3.2.1. OCV-SOC caractéristiques

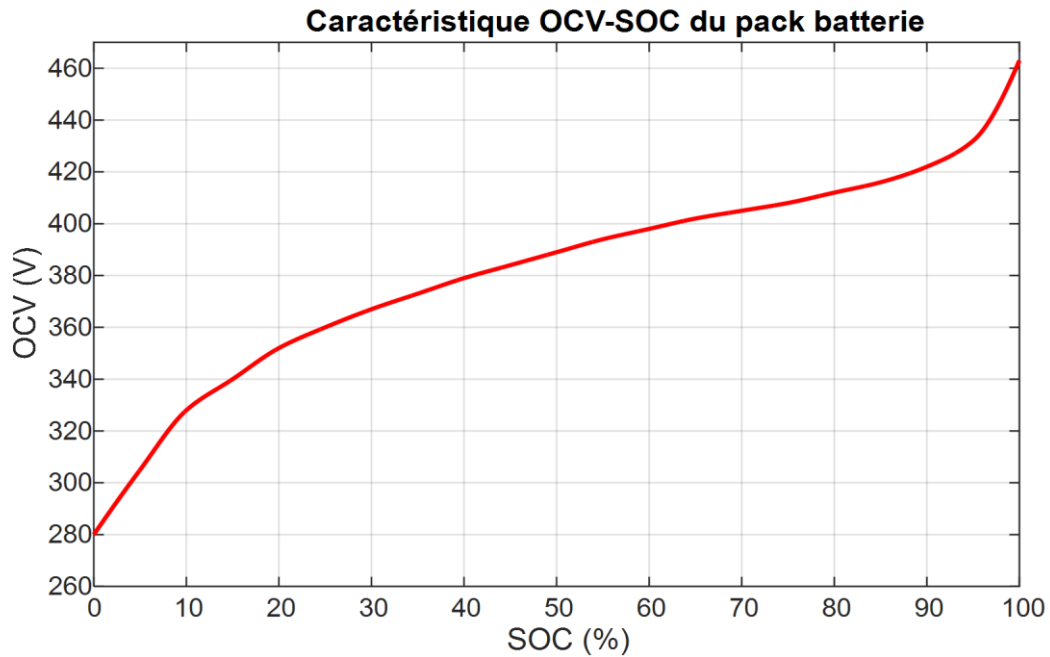


Figure III. 13 : La tension à vide en fonction de l'état de charge.

La FigureII.13 présente la caractéristique OCV–SOC du pack batterie lithium-ion, illustrant l'évolution de la tension à vide en fonction de l'état de charge (SOC). Cette courbe joue un rôle essentiel dans la modélisation de la batterie ainsi que dans l'estimation du SOC au sein des systèmes de gestion d'énergie.

On observe une relation non linéaire typique. À faible SOC (0–20 %), la tension augmente rapidement, ce qui traduit une zone sensible où de faibles variations de charge entraînent des changements importants de tension. Dans la plage intermédiaire (20 % à 80 %), la variation devient plus progressive et quasi linéaire, représentant la zone de fonctionnement optimale de la batterie. En revanche, à fort SOC (80–100 %), la tension augmente de nouveau plus rapidement en raison des phénomènes de saturation électrochimique.

Par ailleurs, il est important de noter que même lorsque le SOC est égal à 0 %, la tension du pack batterie ne tombe pas à zéro mais reste autour de 280 V. Cela s'explique par le fait que le SOC = 0 % ne correspond pas à une décharge totale physique des cellules, mais plutôt à la limite de décharge fixée pour préserver la batterie. En réalité, chaque cellule conserve une tension résiduelle minimale (environ 2.5 V à 3 V pour une cellule NMC), ce qui explique la présence d'une tension non nulle au niveau du pack. Cette contrainte permet d'éviter la dégradation irréversible des cellules et d'assurer la sécurité du système.

Ainsi, cette courbe met en évidence la nécessité d'utiliser des modèles non linéaires pour représenter fidèlement le comportement de la batterie lithium-ion.

III.3.2.2. Tension de la batterie à un décharges constant

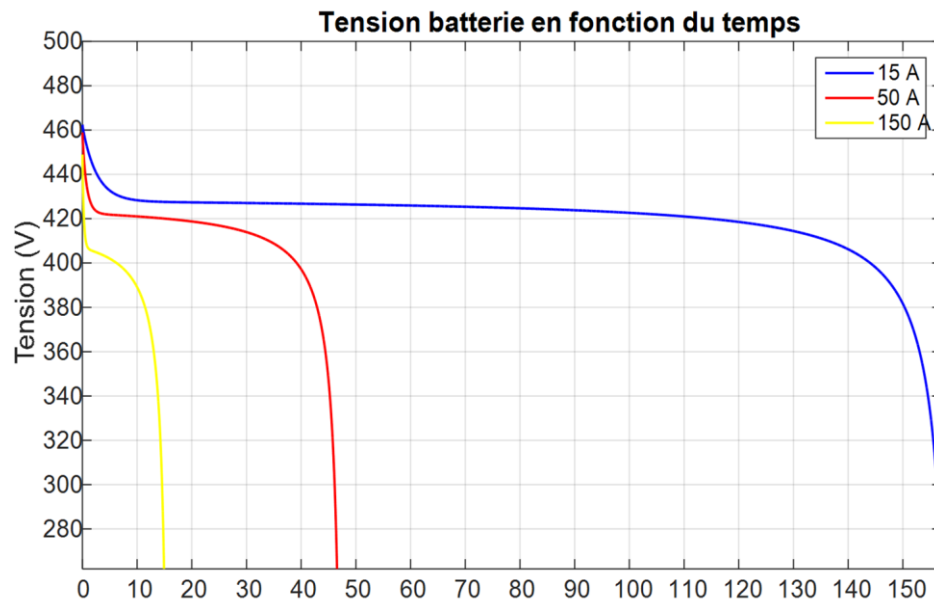


Figure III.14 : Tension de la batterie à différents courants de décharges

La FigureII.14 montre l'évolution de la tension de la batterie pour différents courants de décharge (15 A, 50 A et 150 A). On remarque que plus le courant est élevé, plus la tension chute rapidement et la durée de décharge diminue. À 15 A, la batterie se décharge lentement sur environ 150 minutes, alors qu'à 50 A elle se vide en environ 45 minutes, et à 150 A en moins de 20 minutes. Cela montre clairement que les forts courants accélèrent la décharge et réduisent fortement l'autonomie de la batterie.

III.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié la modélisation des sources d'énergie, notamment la pile à combustible et la batterie lithium-ion, ainsi que les convertisseurs DC-DC utilisés dans le véhicule électrique. Ces éléments assurent le transfert et la gestion de l'énergie au sein du système.

Ainsi, cette étude nous a permis de mieux comprendre les caractéristiques et le principe de fonctionnement des différents composants du système énergétique du véhicule électrique.

Chapitre IV

Gestion d'Energie et simulation du système hybride

IV.1. Introduction

La gestion des flux d'énergie dans un système hybride consiste à assurer une répartition optimale de la puissance entre les différentes sources, notamment la pile à combustible et la batterie. Cette répartition doit satisfaire la demande de la charge tout en respectant les contraintes de fonctionnement, telles que les limites de puissance de la pile et l'état de charge de la batterie.

Dans ce contexte, la gestion d'énergie peut être formulée comme un problème de contrôle optimal visant à minimiser la consommation d'hydrogène tout en maintenant les performances du système. L'objectif est ainsi d'exploiter efficacement les caractéristiques complémentaires des sources hybrides.

Ce chapitre présente la stratégie de gestion optimale adoptée. Pour cela, les modèles présentés précédemment seront utilisés et implantés sous « Matlab/Simulink ». Différents résultats de simulation seront présentés, analysés et discutés afin d'évaluer les performances du système et de la stratégie proposée.

IV.2. Architecture du système hybride

L'architecture retenue pour ce système hybride est basée sur le couplage de deux sources d'énergie complémentaires une pile à combustible à hydrogène (PEMFC) et une batterie lithium-ion raccordées en parallèle sur un bus continu commun de 400 V, tension normalisée pour les véhicules électriques de nouvelle génération (Figure IV. 1).

La pile à combustible, dont la tension de sortie est naturellement variable et inférieure à la tension du bus, est interfacée au bus continu par l'intermédiaire d'un hacheur de type boost, c'est-à-dire un convertisseur DC/DC élévateur unidirectionnel. Ce dernier a pour fonction d'élever et de stabiliser la tension de sortie de la pile jusqu'au niveau du bus de 400 V, tout en assurant un découplage électrique entre la source et le réseau continu. Le caractère unidirectionnel de ce convertisseur est inhérent à la nature même de la pile à combustible, qui est une source de puissance pure incapable d'absorber de l'énergie en retour.

La batterie lithium-ion, est reliée au même bus continu par un convertisseur DC/DC bidirectionnel. Cette bidirectionnalité est essentielle, car elle permet à la batterie d'opérer alternativement en mode décharge, en injectant de la puissance vers le bus lors des pics de demande, et en mode charge, en absorbant l'énergie excédentaire ou l'énergie récupérée lors du

freinage régénératif. Le hacheur bidirectionnel joue ainsi le rôle d'interface active entre la batterie et le bus, assurant un contrôle précis des flux de puissance dans les deux sens.

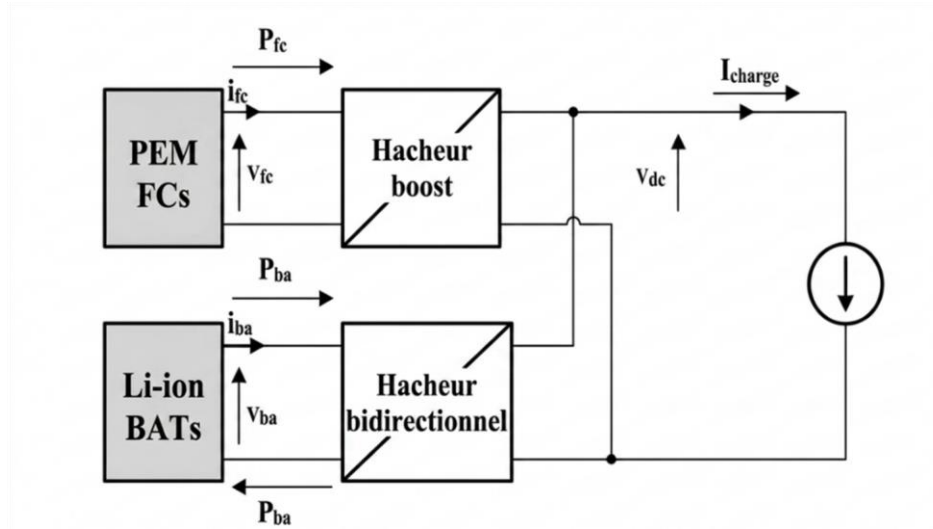


Figure IV. 1 : Structure du système hybride.

IV.3. Stratégies de gestion de l'énergie

La gestion de l'énergie dans l'ensemble (pile à combustible, batterie lithium-ion et charge) vise à minimiser l'énergie électrique fournie par la pile à combustible durant un cycle de conduite vitesse/temps. En effet, la puissance délivrée par la pile à combustible P_{fc} est limitée et son fonctionnement optimal se situe généralement dans une plage restreinte. Ainsi, la batterie lithium-ion joue un rôle essentiel en tant que source auxiliaire de stockage et de fourniture d'énergie.

La batterie intervient pour fournir une puissance complémentaire P_{bat} lors des phases transitoires du véhicule, notamment pendant les fortes accélérations où la demande en puissance dépasse les capacités instantanées de la pile à combustible. De plus, elle permet de récupérer l'énergie lors des phases de freinage (freinage régénératif), contribuant ainsi à améliorer le rendement global du système.

La gestion de l'énergie dans ce système hybride est assurée par une unité de contrôle appelée Energy Management System (EMS). Son rôle principal est de coordonner en temps réel les flux de puissance entre la pile à combustible, la batterie lithium-ion et la charge de traction, en déterminant à chaque instant la part de puissance que doit fournir chacune des deux sources. Chaque convertisseur est construit autour de transistors de type MOSFET, qui jouent le rôle

d'interrupteurs commandés. L'EMS génère un signal PWM dont le rapport cyclique détermine la durée pendant laquelle le transistor est à l'état passant par rapport à la période de commutation totale. C'est précisément ce rapport cyclique qui contrôle la tension et le courant en sortie du convertisseur : plus il est élevé, plus la tension de sortie du boost est grande, et inversement.

Afin de simplifier l'étude et de se concentrer sur la stratégie de gestion d'énergie, les courants de référence de la pile à combustible et de la batterie ont été directement imposés aux sources contrôlées en courant dans Matlab/Simulink. Cette approche permet de valider le partage de puissance entre les sources et d'étudier le comportement dynamique de la pile à combustible et de la batterie lors des variations de charge et des pics de puissance.

IV.4. Implémentation sous Matlab/Simulink

a. Pile à combustible

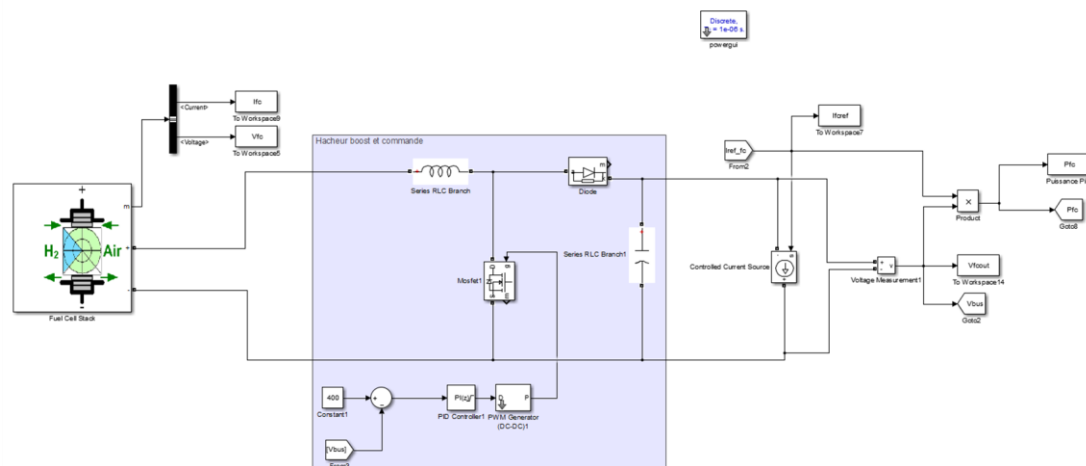


Figure IV. 2 : Schema de simulation de la pile a combustible

b. Batterie Lithium_ion

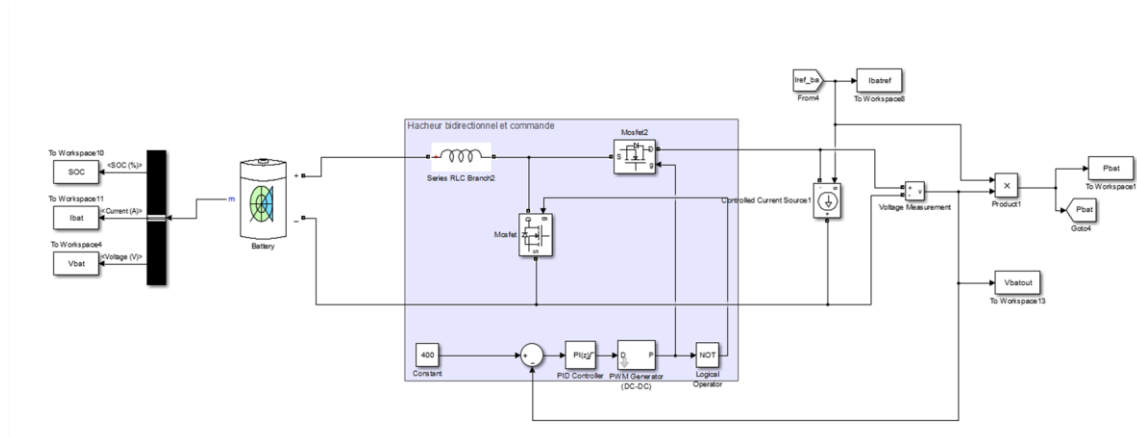


Figure IV. 3 : Schema de simulation de la batterie

IV.5. Résultats et discussions

Pour valider la stratégie de gestion d'énergie proposée, nous avons créé un profil de consommation de puissance. Ce profil est présenté dans la Figure IV.4 Il montre les différentes conditions de fonctionnement du véhicule électrique hybride. Cela comprend une phase de démarrage, des phases d'accélération avec des demandes élevées de puissance, des régimes permanents et des phases de décélération. Ces phases simulent la récupération d'énergie. Les paramètres du système hybride Tableau IV.1 que nous avons étudié ont été intégrés dans l'environnement de simulation Matlab/Simulink. Cela nous a permis d'analyser le comportement énergétique de la pile à combustible et de la batterie lithium-ion face aux variations de charge.

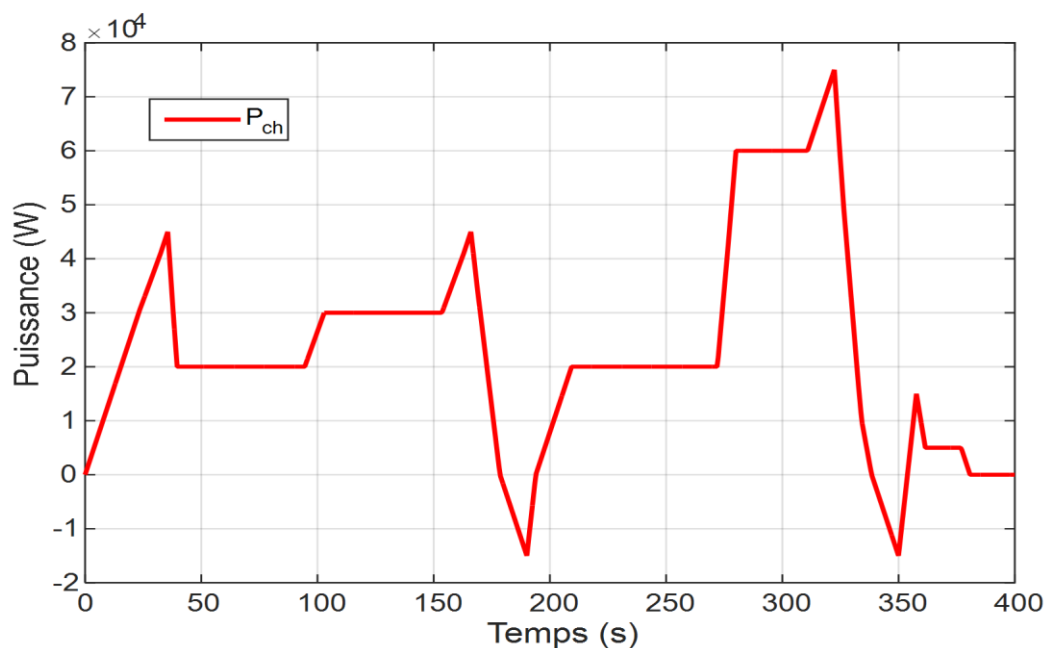


Figure IV. 4 : Profil de puissance de la charge

Tableau IV. 1 : Paramètres du système hybride

Sources	Paramètre	Valeur
Piles à combustible	Tension nominale [V]	250
	Puissance maximale [W]	40 000
	Puissance minimale [W]	0
Batterie lithium-ion	Tension nominale [V]	400
	Capacité [Ah]	40
	Résistance interne [Ω]	0,01

IV.5.1. Gestion sous contrainte de puissance de la PAC

- Courbes de puissances dans le véhicule

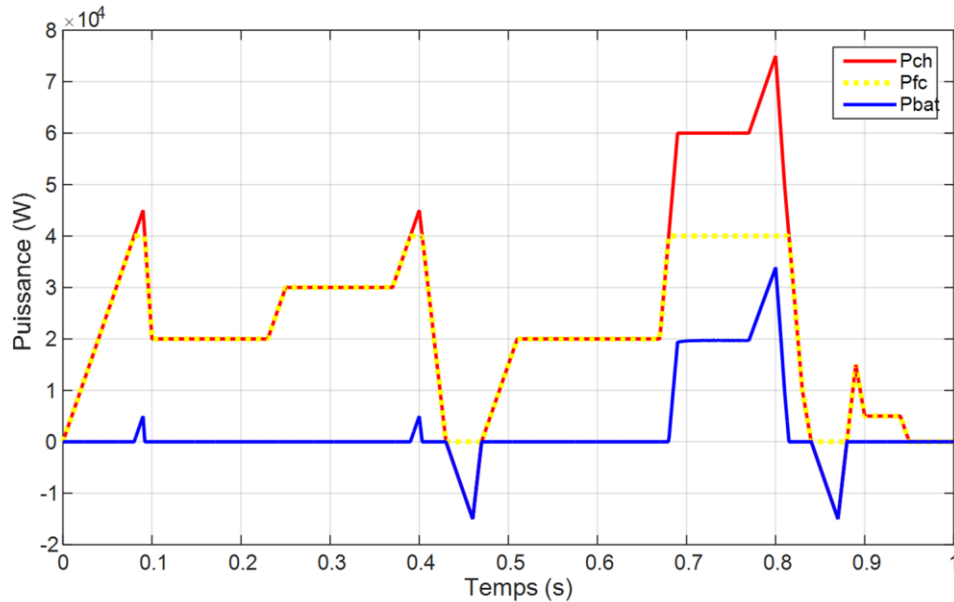


Figure IV. 5 : Courbes des puissances dans le véhicule

La Figure IV.5 présente la répartition des puissances dans le système hybride du véhicule électrique entre la charge P_{ch} , la pile à combustible P_{fc} et la batterie lithium-ion P_{bat} . La puissance de la pile à combustible est limitée à une valeur maximale d'environ 40 kW, ce qui constitue la contrainte principale du système. Durant les phases de fonctionnement normal où la demande de puissance reste inférieure à cette limite, la pile fournit presque seule la puissance demandée par la charge.

Lors des pics de puissance, notamment entre 0.7 s et 0.8 s, la demande de la charge dépasse la puissance maximale de la pile. Dans ce cas, la batterie intervient pour fournir la puissance complémentaire afin de satisfaire les besoins du véhicule.

Pendant les phases de freinage régénératif, la puissance de charge devient faible ou négative, et la batterie absorbe l'énergie récupérée, ce qui apparaît par une puissance négative de P_{bat} .

- Courants des références et tensions des sources d'énergies

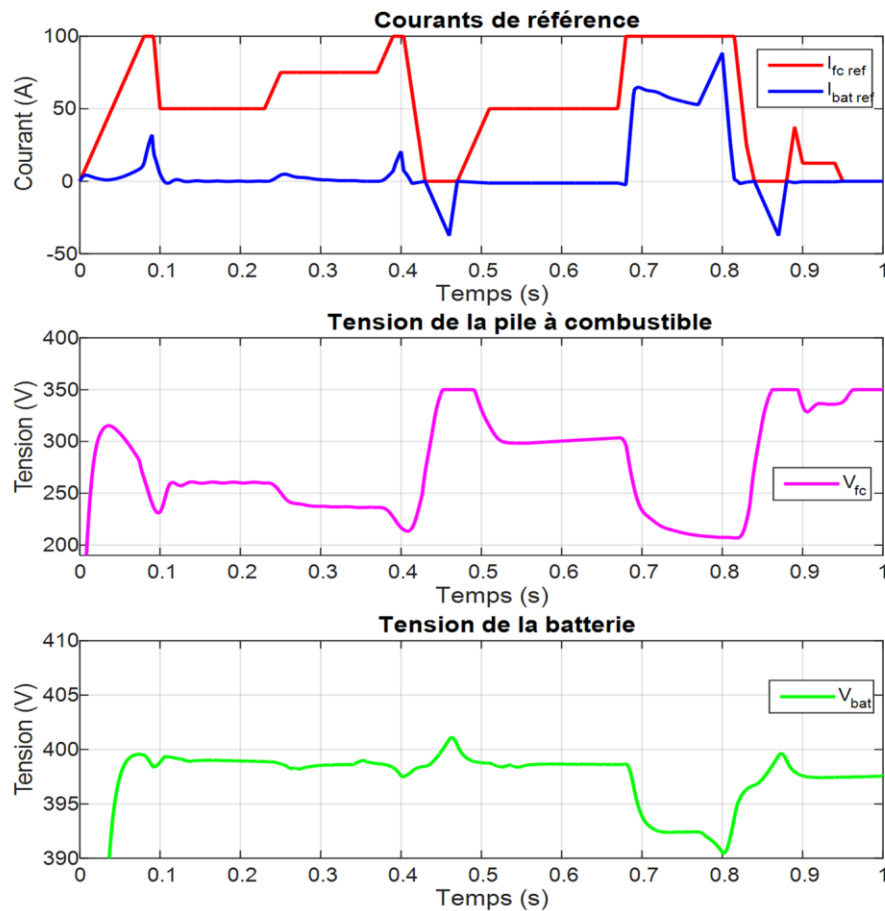


Figure IV. 6 : Courants des références et les tensions de la pile à combustible et la batterie sous contrainte de puissance de la pile

On remarque à partir de la figure (IV. 2) que la tension de la pile à combustible varie inversement avec le courant fourni. Lors des fortes demandes de puissance, notamment entre 0,7s et 0,8s, l'augmentation du courant provoque une diminution de la tension jusqu'à environ 200V à cause des pertes internes et des phénomènes électrochimiques de la pile.

La tension de la batterie lithium-ion reste globalement stable autour de 400V malgré les variations de fonctionnement du système hybride. De légères chutes de tension apparaissent pendant les phases de forte décharge, tandis qu'une légère augmentation est observée durant les phases de récupération d'énergie régénérative.

Cependant, une gestion basée uniquement sur la contrainte de puissance maximale de la pile peut entraîner des variations rapides de courant et de puissance, ce qui peut affecter le fonctionnement de la pile à combustible et accélérer sa dégradation au cours du temps. C'est

pour cette raison qu'une seconde stratégie de gestion tenant compte à la fois de la contrainte de puissance et du temps de réponse de la pile à combustible sera étudiée.

IV.5.2. Gestion sous contraintes de puissance et de temps de réponse de la PAC

- Courbes de puissances dans le véhicule

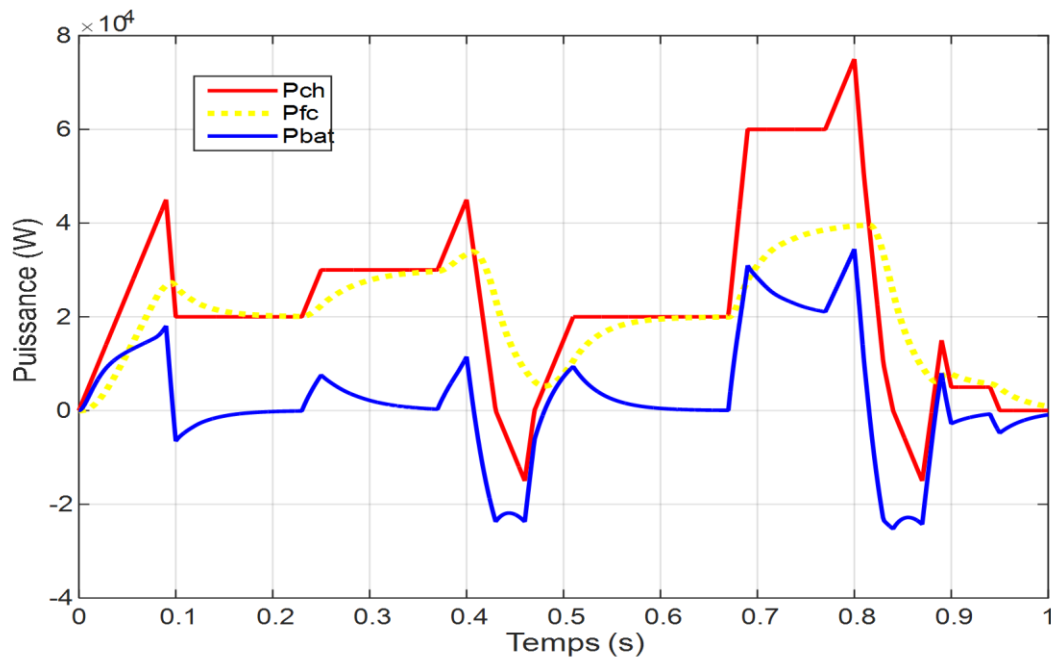


Figure IV. 7 : Courbes des puissances dans le véhicule

On observe (Figure IV. 3) que la pile à combustible ne suit pas instantanément les variations rapides de la puissance demandée. En raison de son temps de réponse relativement lent, la puissance de la pile augmente et diminue progressivement. Ainsi, lors des pics de puissance, comme entre 0,7 s et 0,8 s où la charge atteint environ 75 kW, la pile reste limitée à une puissance proche de sa valeur maximale d'environ 40 kW. La batterie intervient alors pour fournir la puissance complémentaire nécessaire au véhicule.

Pendant les phases de diminution rapide de la charge ou de freinage régénératif, la puissance de la batterie devient négative, ce qui indique qu'elle absorbe l'énergie récupérée afin de se recharger. On remarque également que la pile à combustible continue à fournir de la puissance pendant un court instant même lorsque la charge diminue brutalement, ce qui traduit son inertie dynamique et son temps de réponse limité.

Ces résultats montrent que la stratégie de gestion d'énergie permet d'assurer la continuité de l'alimentation du véhicule tout en protégeant la pile à combustible contre les variations brusques de puissance.

- **Courants des références des sources d'énergies**

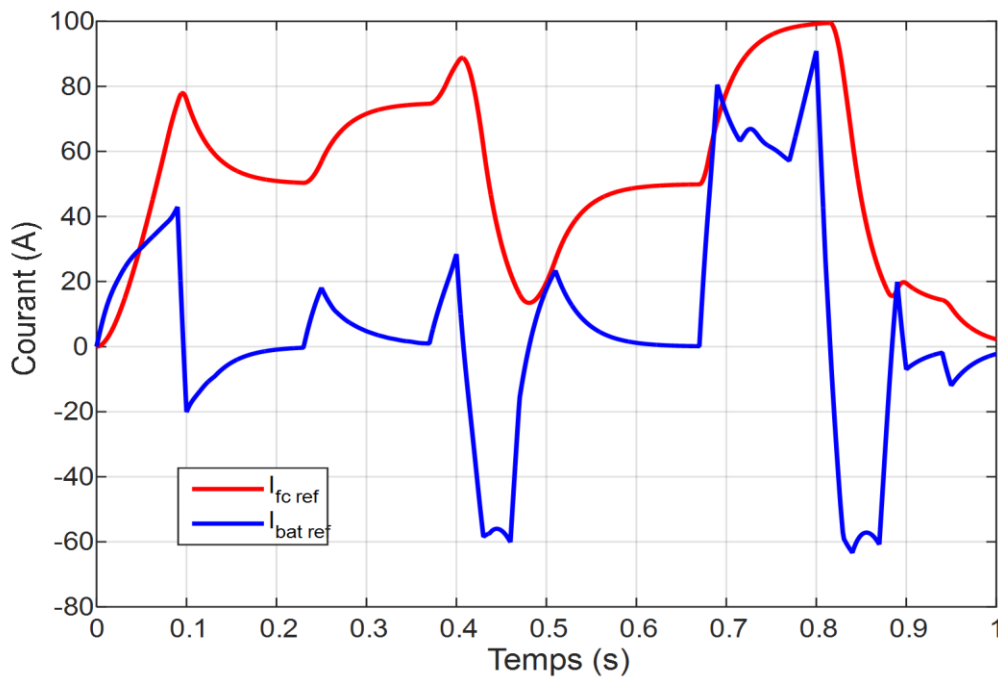


Figure IV. 8 : Courants de références des sources d'énergie

La Figure IV.8 montre que la pile à combustible fournit le courant principal du système hybride, tandis que la batterie intervient lors des variations brusques et des pics de puissance afin de compenser le temps de réponse de la pile à combustible ainsi que les demandes de puissance supérieures à la puissance maximale de la pile. La stratégie EMS affecte ainsi la puissance transitoire à la batterie pour protéger la pile contre les sollicitations rapides pouvant accélérer sa dégradation.

Durant les phases de freinage régénératif, le courant de la batterie devient négatif, ce qui traduit la récupération et le stockage de l'énergie. Ces résultats confirment le bon fonctionnement de la stratégie de gestion d'énergie et la bonne coordination entre la pile à combustible et la batterie.

- Courbes des courant de référence, des tensions et des courants de la pile à combustible avec convertisseur boost

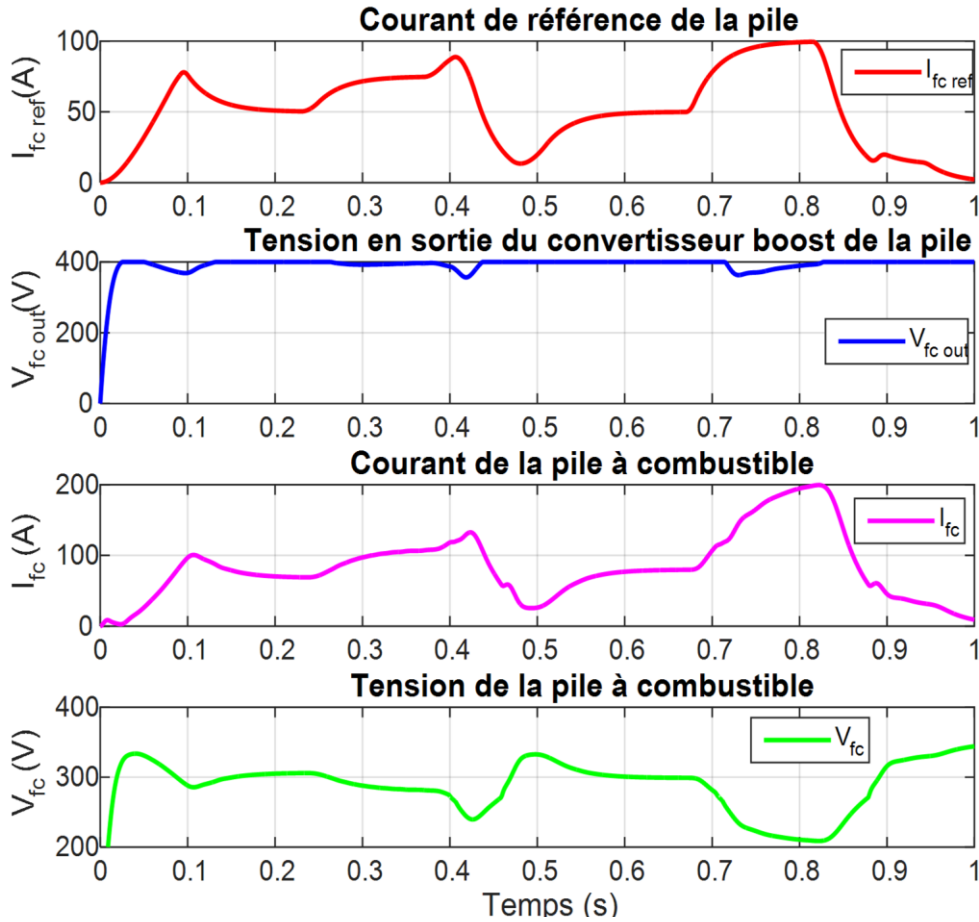


Figure IV. 9 : Évolution du courant de référence, des tensions et des courants de la pile à combustible avec convertisseur boost

On observe (Figure IV.4) que la tension en sortie du convertisseur boost V_{fc_out} reste globalement stable autour de 400 V malgré les variations de charge et de courant. Cette tension correspond à la tension du bus continu *DC bus*, maintenue constante grâce à l'action du convertisseur boost et de la commande de régulation. Les faibles variations observées sont dues aux transitoires rapides et aux changements brusques de puissance demandée.

Le courant de la pile à combustible I_{fc} est plus élevé que le courant en sortie du convertisseur boost car le convertisseur fonctionne en mode élévateur de tension (boost). En effet, la tension de la pile V_{fc} est inférieure à la tension du bus continu. Ainsi, afin de conserver approximativement la même puissance entre l'entrée et la sortie du convertisseur ($P_{in} \approx P_{out}$),

le courant côté pile doit être plus important que le courant côté sortie du convertisseur. Cette différence est une caractéristique normale du fonctionnement d'un convertisseur boost.

On remarque également que la tension de la pile à combustible évolue inversement au courant fourni par la pile. Lorsque le courant de la pile augmente fortement, la tension V_{fc} diminue en raison des pertes internes et des phénomènes électrochimiques de polarisation de la pile à combustible.

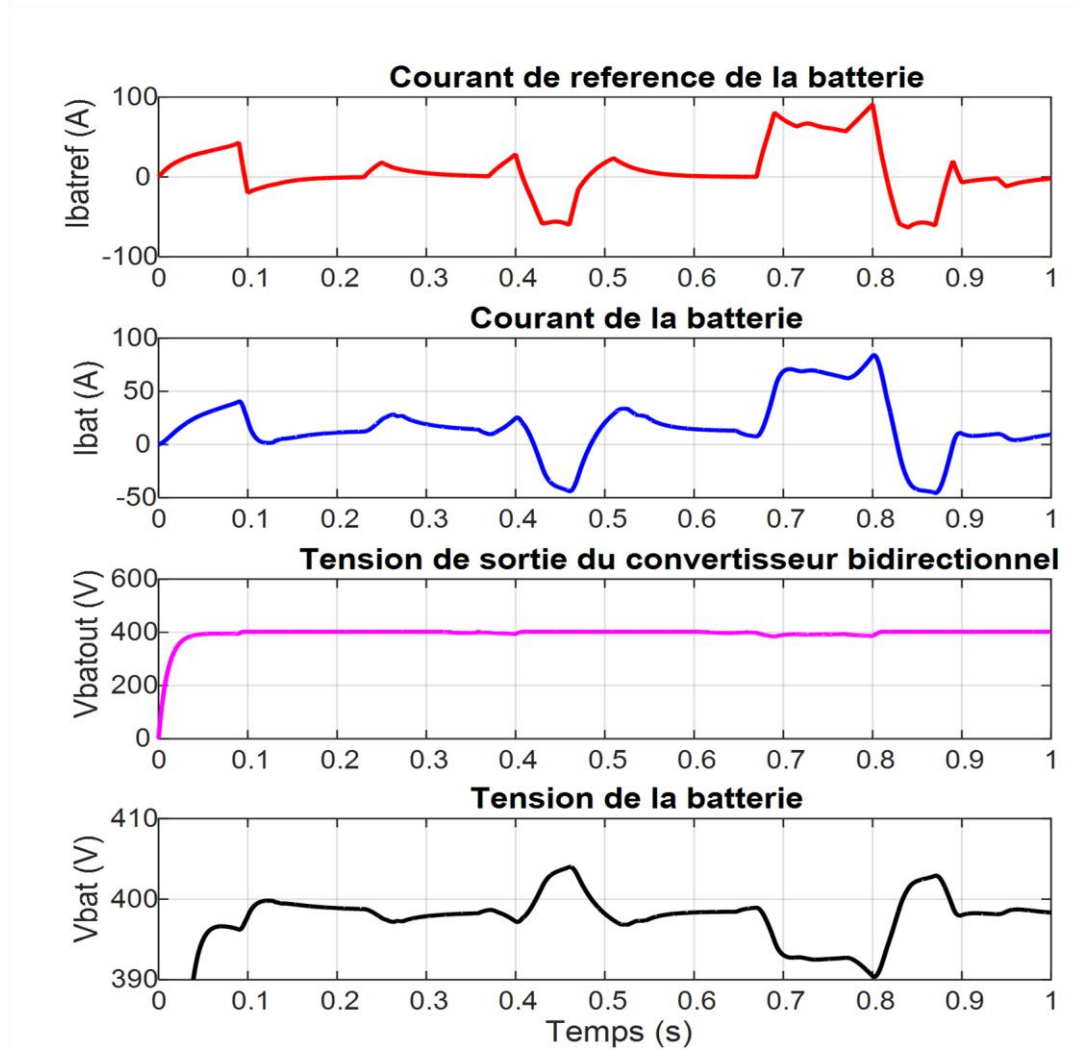


Figure IV. 10 : Courants et tensions du système batterie-convertisseur bidirectionnel

D'après la (Figure IV.5) le courant réel de la batterie I_{bat} suit correctement la consigne imposée I_{batref} avec un léger retard dynamique lié à la réponse du convertisseur et de la batterie. Entre 0s et 0.1s, la batterie fournit un courant positif correspondant à la phase de démarrage. Une phase de récupération d'énergie apparaît entre 0.4s et 0.47s avec un courant négatif. La phase de forte sollicitation la plus importante est observée entre 0.68s et 0.8s où le courant

atteint environ 80A, puis une seconde phase de freinage régénératif apparaît entre 0.82s et 0.88s.

La tension de sortie du convertisseur bidirectionnel V_{batout} augmente rapidement au démarrage puis reste stabilisée autour de 400V pendant toute la durée de simulation malgré les variations importantes du courant. Cela montre la bonne régulation du bus continu et l'efficacité du convertisseur DC-DC bidirectionnel.

Concernant la tension de la batterie V_{bat} , elle reste globalement stable autour de sa valeur nominale avec de faibles variations. De légères chutes de tension apparaissent lors des phases de forte décharge, notamment entre 0.68s et 0.82s, tandis qu'une légère augmentation est observée pendant les phases de récupération d'énergie autour de 0.42s et 0.85s. Ces résultats montrent le fonctionnement stable de la batterie lithium-ion et la bonne gestion des échanges de puissance dans le système hybride.

- **Etat de charge**

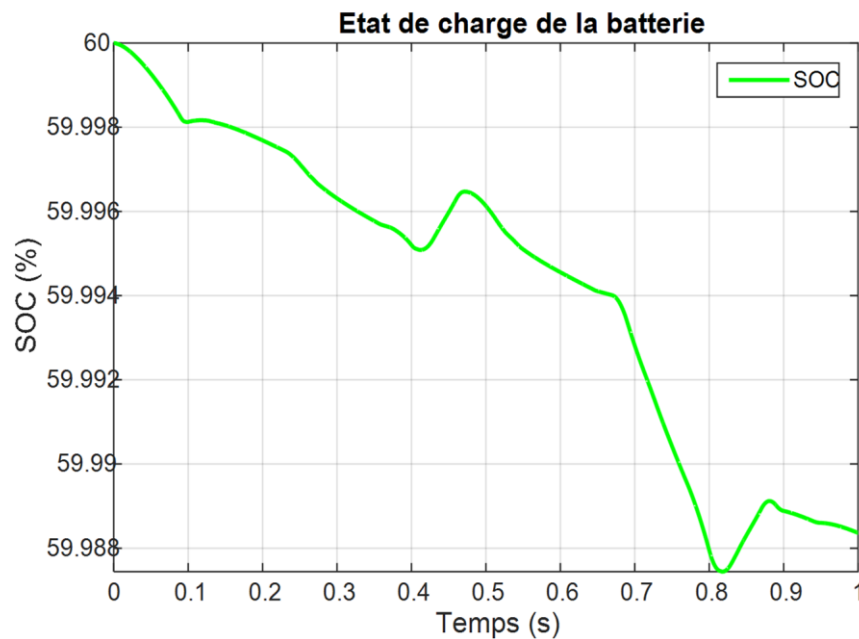


Figure IV. 11 : Etat de charge de la batterie

La FigureIV.11 montre que SOC diminue progressivement au cours du temps, ce qui indique que la batterie fournit de l'énergie afin de compenser les variations de puissance demandées par la charge et les limites dynamiques de la pile à combustible.

Les diminutions les plus importantes du SOC , notamment autour de 0,7 s à 0,8 s, correspondent aux phases de forte sollicitation où la batterie délivre une puissance élevée pour assister la pile à combustible lors des pics de charge.

On remarque également de légères augmentations du SOC , par exemple autour de 0,45 s et après 0,8 s, ce qui traduit les phases de récupération d'énergie pendant le freinage régénératif. Durant ces périodes, la batterie absorbe l'énergie récupérée et se recharge partiellement.

- Les puissances de référence et des puissances réelles

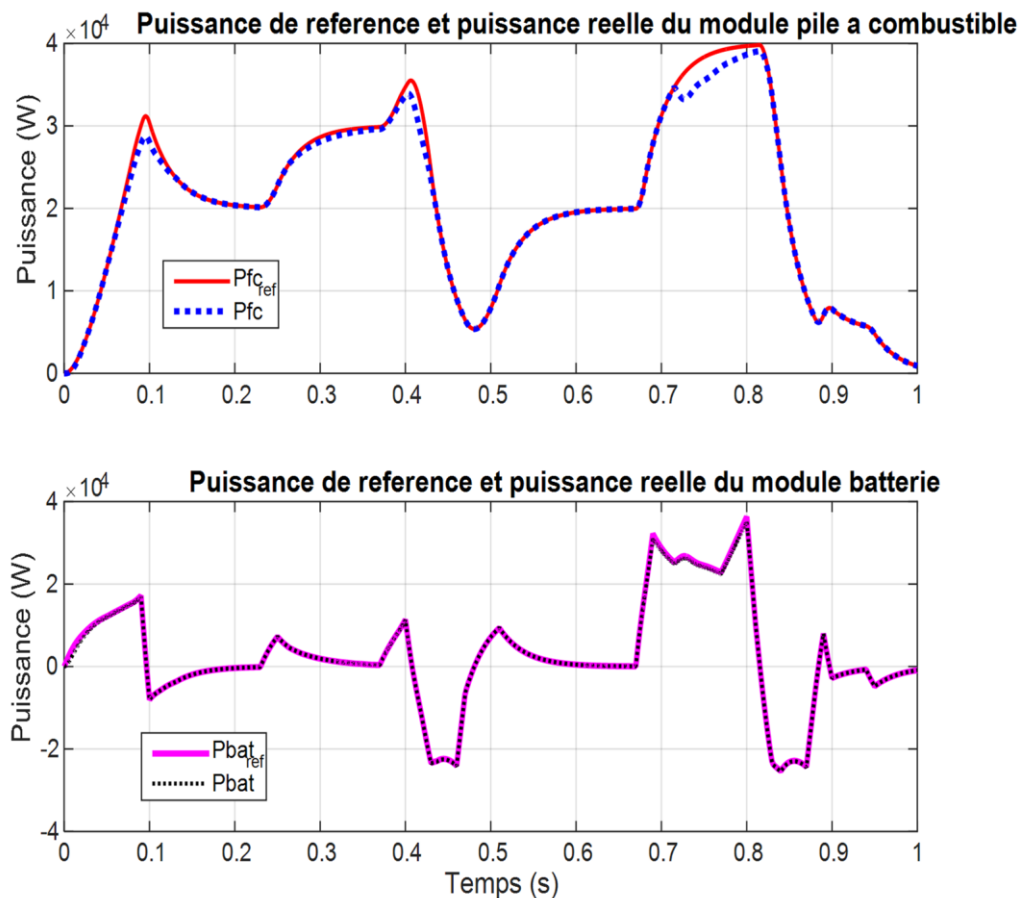


Figure IV. 12 : Évolution des puissances de référence et des puissances réelles de la pile à combustible et de la batterie

D'après la Figure (IV.6) la puissance réelle de la pile P_{fc} suit correctement la puissance de référence P_{fc_ref} avec un faible écart lors des variations de charge. La pile assure principalement la puissance du régime permanent.

La puissance réelle de la batterie P_{bat} suit presque instantanément la puissance de référence P_{batref} . La batterie compense les variations rapides de puissance et intervient durant les phases de récupération d'énergie régénérative observées entre 0.4s et 0.47s puis entre 0.82s et 0.88s.

Ces résultats montrent la bonne coordination entre la pile à combustible et la batterie dans le système hybride.

IV.6. Conclusion

Dans ce chapitre, une stratégie de gestion d'énergie pour un système hybride pile à combustible–batterie lithium-ion a été développée et simulée sous MATLAB/Simulink. Les résultats obtenus montrent que la pile à combustible fournit principalement la puissance du régime permanent, tandis que la batterie compense les pics de puissance et les phases de freinage régénératif.

Les simulations ont également confirmé la bonne régulation du bus continu ainsi que le suivi correct des courants et puissances de référence. Ainsi, la stratégie proposée assure une bonne répartition de puissance et améliore les performances globales du système hybride.

Conclusion Générale

Au terme de ce travail de fin d'études, nous avons étudié, dimensionné, modélisé et simulé un système hybride associant une pile à combustible PEMFC et une batterie lithium-ion destiné à l'alimentation d'un véhicule électrique hybride. L'objectif principal de cette étude était de développer une architecture énergétique capable d'assurer les besoins en puissance du véhicule tout en améliorant l'autonomie, l'efficacité énergétique et le respect de l'environnement.

Dans le premier chapitre, une étude bibliographique a été réalisée afin de présenter le contexte énergétique actuel et les enjeux liés au développement des véhicules électriques. Les différentes technologies de stockage et de conversion d'énergie ont été analysées, notamment les piles à combustible PEMFC et les batteries lithium-ion. Cette étude a permis de mettre en évidence les avantages et les limites de chaque source d'énergie ainsi que l'intérêt de leur association au sein d'une architecture hybride. Les différentes configurations de systèmes hybrides utilisées dans les véhicules électriques ont également été présentées afin d'identifier la solution la plus adaptée aux exigences du cahier des charges.

Le deuxième chapitre a été consacré au dimensionnement des différents composants constituant le système hybride. À partir des caractéristiques du véhicule et des contraintes de fonctionnement imposées, les paramètres de la pile à combustible, de la batterie lithium-ion, du bus continu ainsi que des convertisseurs DC-DC ont été déterminés. Les résultats obtenus ont permis de sélectionner une configuration capable de satisfaire les besoins énergétiques du véhicule tout en garantissant la stabilité et la fiabilité du système électrique.

Dans le troisième chapitre, les modèles mathématiques des différentes sources d'énergie et des convertisseurs statiques ont été développés. Une attention particulière a été portée à la modélisation de la pile à combustible PEMFC, de la batterie lithium-ion et des convertisseurs DC-DC afin de représenter fidèlement leur comportement dynamique. Cette étape a constitué une base essentielle pour l'analyse et l'évaluation des performances du système hybride dans différentes conditions de fonctionnement.

Le quatrième chapitre a été consacré à l'implémentation et à la simulation du système hybride sous l'environnement Matlab/Simulink. Les résultats obtenus ont permis de valider les modèles développés et de vérifier le bon fonctionnement de l'architecture proposée. Les simulations ont montré une bonne régulation de la tension du bus continu, une répartition efficace de la puissance entre la pile à combustible et la batterie ainsi qu'un comportement satisfaisant lors des phases transitoires. Ces résultats confirment la pertinence du système hybride étudié pour les applications de véhicules électriques.

De manière générale, ce travail a démontré que l'association d'une pile à combustible PEMFC avec une batterie lithium-ion constitue une solution performante pour répondre aux exigences croissantes des véhicules électriques modernes. Cette hybridation permet de combiner les avantages des deux technologies, à savoir la forte densité énergétique et l'autonomie offertes par la pile à combustible ainsi que la rapidité de réponse et la capacité de stockage de la batterie. Elle contribue également à réduire les émissions polluantes et à améliorer l'efficacité énergétique globale du véhicule.

Dans la continuité de cette étude, plusieurs perspectives peuvent être envisagées. Tout d'abord, l'intégration de stratégies avancées de gestion d'énergie basées sur l'intelligence artificielle, la logique floue, les réseaux de neurones ou l'apprentissage par renforcement pourrait permettre d'optimiser davantage la répartition de puissance entre les différentes sources d'énergie. De telles approches contribueraient à réduire la consommation d'hydrogène, à améliorer le rendement global du système et à prolonger la durée de vie de la pile à combustible et de la batterie.

Par ailleurs, l'intégration d'un système de récupération de l'énergie de freinage constituerait une amélioration importante pour augmenter l'efficacité énergétique du véhicule. L'énergie récupérée pourrait être stockée dans la batterie puis réutilisée lors des phases d'accélération ou de forte demande de puissance.

Une autre perspective concerne l'étude du vieillissement et de la dégradation des composants du système hybride. La prise en compte de l'état de santé de la pile à combustible, de la batterie et des convertisseurs permettrait de développer des stratégies de gestion plus robustes et adaptées aux conditions réelles d'exploitation.

En outre, une validation expérimentale sur une plateforme matérielle ou un prototype réel représenterait une étape essentielle pour confirmer les performances observées en simulation. Cette démarche permettrait d'évaluer le comportement du système dans un environnement réel et d'identifier les éventuelles contraintes pratiques liées à son implantation.

Enfin, l'exploration de nouvelles technologies de stockage d'énergie, telles que les supercondensateurs ou les batteries de nouvelle génération, ainsi que l'étude technico-économique du système hybride, pourraient constituer des axes de recherche prometteurs pour le développement futur de véhicules électriques plus performants, plus fiables et plus respectueux de l'environnement.

Bibliographiques

- [1] Alireza PAYMAN, « Contribution à la Gestion de l'Energie dans les Systèmes Hybrides Multi-sources Multi-charges », THÈSE Présentée à L'Institut National Polytechnique de Lorraine En vue de l'obtention du titre de DOCTEUR de l'I.N.P. L en 2009.
- [2] Mimi Belatel, Fatima Zohra Aissous et Fadila Ferhat, « Contribution à l'étude d'une pile a combustible utilisée pour la production de l'énergie électrique verte », Revue des Energies Renouvelables Vol. 15 N°1 (2012) 13 – 28 DOI : <https://doi.org/10.54966/jreen.v15i1.297>.
- [3] Benhakkoum Abid, Hidayat Allah Katar Nada « Dimensionnement et Modélisation d'un Système Hybride (Pile à combustible et Batterie lithium-ion) » mémoire de fin d'études de master académique, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA ,2022/2023.
- [4] Christophe ROBIN « Développement d'un modèle prédictif de durée de vie d'une pile PEMFC pour une application aéronautique : étude des interactions entre le cœur de pile et les conditions d'opération du système » Thèse Doctorat soutenue publiquement le 12 novembre 2015.
- [5] Mohammed JOURDANI « Simulation Numérique Couplée des Phénomènes Thermo- fluide, Electrochimique et Mécanique dans une Pile à Combustible type PEMFC » Thèse Doctorat, 02 mars 2019.
- [6] Thomas Gaumont « Résistance protonique d'électrodes de piles à combustible à membrane (PEMFC) : effets de l'humidité et des d'gradations » Thèse Doctorat ,8 février 2017.
- [7] An LI « Analyse expérimentale et modélisation d'éléments de batterie et de leurs assemblages – Application aux véhicules électriques et hybrides » Thèse Doctorat, année 2012/2013.
- [8] Céline BARCHASZ « Développement d'accumulateurs lithium/soufre » THÈSE Doctorat, 2011.
- [9] Ludmil Stoyanov « Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables » THÈSE Doctorat, 2011.
- [10] [10] Tedjani MESBAHI « Influence des stratégies de gestion d'une source hybride de véhicule électrique sur son dimensionnement et sa durée de vie par intégration d'un modèle multi-physique » THÈSE Doctorat N° d'ordre : 293,25/03/2016.
- [11] Hattab MAKER « optimisation et gestion d'énergie pour un système hybride : association pile à combustible et supercondensateur » THÈSE Doctorat, 2008.
- [12] Rania MKAHL « Contribution à la modélisation, au dimensionnement et à la gestion des flux énergétiques d'un système de recharge de véhicules électriques : étude de l'interconnexion avec le réseau électrique » THÈSE Doctorat, 2015.
- [13] Sadoun, Redha. Intérêt d'une Source d'Energie Electrique Hybride pour véhicule électrique urbain-dimensionnement et tests de cyclage. Diss. Ecole Centrale de Lille, 2013.
- [14] LeBel, F. (2017). Méthode de dimensionnement et modélisation de batteries lithium-ion. Knowledge UdeS (Institutional Deposit of the University of Sherbrooke). <http://hdl.handle.net/11143/11600>
- [15] ABBOU, Bouchra, and D. J. O. U. D. I. Boutkhil. Modélisation d'un convertisseur DC-DC dans un système de stockage batterie Li-ion et supercondensateur. Diss. Directeur: Mr. M. BOUCHAOUR/Co-Directeur: Mr MERAD Lotfi, 2022.
- [16] Akram Eddahech. Modélisation du vieillissement et détermination de l'état de santé de batteries lithium-ion pour application véhicule électrique et hybride. Autre. Université Sciences et Technologies - Bordeaux I, 2013. Français. (NNT : 2013BOR14992) . (tel-00957678)