



## Mémoire de Master

### Présenté au

**Département:** Génie Électrique  
**Domaine:** Sciences et Technologies  
**Filière:** Electrotechnique  
**Spécialité:** Electrotechnique Industrielle

### Réalisé par :

**SLIMANI Amar**

Et

**BEKKOU Amrane**

## Thème

# Gestion d'énergie d'un système hybride pile à combustible batterie pour des applications véhiculaire

Soutenu le ; **30/06/2024**

Devant le Jury composé de :

Mr : S. LADJOUZI

M.C.B Univ. Bouira Président

Mme: N. YASSAM.C.A

Univ. Bouira

Rapporteur

Mr: K. SAOUDI

Prof. Univ. Bouira

Examineur

## Remerciement

Ce travail a été effectué au sein du Département des Sciences et sciences appliquées de l'Université de Bouira.

Nous tenons à remercier chaleureusement, en premier lieu, notre promotrice Mme.YASSA Nacera pour ses orientations, ses précieux conseils tout au long de la rédaction de ce mémoire.

Nous remercions distingués vont à Monsieur LADJOUZI Samir, Maître de conférences classe B, à l'université Akli Mohand Oulhadj de Bouira, pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury.

Nous remercions vivement Monsieur SAOUDI Kamel, Professeur, à l'université Akli Mohand Oulhadj de Bouira, pour avoir accepté d'examiner ce mémoire.

Nous remercions aussi tous les enseignants qui ont partagé avec nous leurs connaissances et qui ont contribué à notre formation, et à qui nous exprimons notre profonde gratitude.

Enfin, j'associe à ces remerciements tous ceux qui ont contribué à réaliser ce travail.

## Résumé

Les piles à combustible et les batteries présentent des similitudes notables, car toutes deux produisent une tension continue à leurs bornes en utilisant des procédés électrochimiques. Cependant, il existe des différences fondamentales dans leur fonctionnement, leur structure et leurs applications.

Contrairement aux batteries, qui stockent l'énergie chimique en interne et la convertissent en électricité, les piles à combustible convertissent directement l'énergie d'un combustible riche en hydrogène en électricité.

L'intégration des supercondensateurs dans les systèmes de stockage d'énergie hybrides, aux côtés des piles à combustible, représente une solution innovante et efficace pour optimiser la gestion de l'énergie. Cette combinaison permet de lisser les charges de pointe et de compenser les limites des sources d'énergie principales.

L'objectif de notre travail est de prendre en compte la gestion de l'énergie des sources d'énergie hybrides, en utilisant une pile à combustible comme source principale, une liaison à courant continu et des supercondensateurs comme source d'énergie transitoire pour la voiture.

**Mots clés :** Pile à combustible, supercondensateurs, hybride, hacheur « boost », hacheur « Buck-boost ».

## Abstract

Fuel cells and batteries have notable similarities, as both produce DC voltage at their terminals using electrochemical processes. However, there are fundamental differences in their operation, structure and applications.

Unlike batteries, which store chemical energy internally and convert it into electricity, fuel cells directly convert the energy of a hydrogen-rich fuel into electricity.

The integration of supercapacitors in hybrid energy storage systems, alongside fuel cells, represents an innovative and efficient solution to optimize energy management. This combination helps smooth peak loads and compensate for the limitations of primary energy sources.

The objective of our work is to take into account the energy management of hybrid energy sources, using a fuel cell as the main source, a DC link and supercapacitors as a transient energy source for the car.

**Keywords:** Fuel cell, supercapacitors, hybrid, “boost” chopper, “Buck-boost” chopper.

## ملخص

هناك أوجه تشابه ملحوظة بين خلايا الوقود والبطاريات، حيث ينتج كلاهما جهدًا مستمرًا في أطرافهما باستخدام العمليات الكهروكيميائية. ومع ذلك، هناك اختلافات جوهرية في عملها وبنيتها وتطبيقاتها.

على عكس البطاريات، التي تخزن الطاقة الكيميائية داخليًا وتحولها إلى كهرباء، تقوم خلايا الوقود بتحويل طاقة الوقود الغني بالهيدروجين مباشرة إلى كهرباء.

يمثل دمج المكثفات الفائقة في أنظمة تخزين الطاقة الهجينة، إلى جانب خلايا الوقود، حلاً مبتكرًا وفعالاً لتحسين إدارة الطاقة. يساعد هذا المزيج على تسهيل أحمال الذروة والتعويض عن القيود المفروضة على مصادر الطاقة الأولية.

الهدف من عملنا هو مراعاة إدارة الطاقة لمصادر الطاقة الهجينة، وذلك باستخدام خلية الوقود كمصدر رئيسي، ووصلة التيار المستمر والمكثفات الفائقة كمصدر طاقة عابر للسيارة.

الكلمات المفتاحية: خلية الوقود، المكثفات الفائقة، الهجين، المروحية "المعززة"، المروحية "باك بوست".

## **Sommaire**

# Sommaire

<b>Introduction Générale.....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre1 : Véhicule hybride à pile à combustible</b>	
1.1 Introduction.....	3
1.2 Véhicule hybride à pile à combustible.....	3
1.3 Les différentes architectures hybrides.....	3
1.3.1 Architecture hybride série.....	3
1.3.2 Architecture hybride Parallèle .....	5
1.4 Les modes de fonctionnement.....	7
1.4.1 Entièrement électrique .....	7
1.4.2 Série hybride .....	8
1.4.3 Hybride parallèle .....	8
1.4.4 Régénération d'énergie (Récupération d'énergie) .....	8
1.4.5 Mode démarrage/arrêt automatique.....	8
1.5 Les types de véhicules hybrides.....	9
1.5.1 Hybrides série-parallèle.....	9
1.5.2 Hybrides électriques à prolongateur d'autonomie.....	9
1.5.3 Hybrides magnétiques.....	9
1.5.4 Hybrides à pile à combustible.....	9
1.6 Conclusion.....	10
<b>Chapitre 2 : Généralités sur La pile à combustible et les supercondensateurs</b>	
2.1 Introduction .....	11
2.2 La pile à combustible.....	11
2.2.1 Structure d'une pile à combustible.....	13
2.2.2 Structure d'une cellule élémentaire de PEMFC.....	13
2.2.2.1 Électrolyte .....	13
2.2.2.2 Électrodes (anode/cathode).....	14
2.2.2.3 Catalyseur.....	14
2.2.2.4 Couche de diffusion de gaz.....	15
2.2.2.5 Les plaques bipolaires.....	16
2.2.3 Les différents types de pile à combustible.....	17
2.2.3.1 Trios types PAC a électrolyte acide.....	17

## Sommaire

2.2.3.2 Trios types PAC a électrolyte basique.....	17
2.2.4 Principe de fonctionnement de la pile à combustible.....	17
2.2.4.1 Principe de fonctionnement de la pile à combustible PEMFC.....	19
2.2.5 Caractéristique des différentes piles à combustible.....	22
2.2.6 Le domaine d'application.....	23
2.2.7 Les avantages et les inconvénients des piles à combustible .....	24
2.2.7.1 Les avantages.....	24
2.2.7.2 Les inconvénients.....	24
2.3 Les supercondensateurs.....	24
2.3.1 Principe de fonctionnement des supercondensateurs.....	25
2.3.1.1 Principes physiques de base.....	25
2.3.1.2 Couche double électrique.....	28
2.3.2 Technologie des supercondensateurs.....	31
2.3.2.1 Matériaux d'électrodes.....	31
2.4 Conclusion.....	33

## **Chapitre 3 : Modélisation de système**

3.1 Introduction .....	34
3.2 Description de la structure du système hybride.....	34
3.3 Modélisation des convertisseurs statiques .....	35
3.3.1 Convertisseur DC/DC boost.....	35
3.3.1.1 Source embarquée utilisant une Pile à combustible.....	35
3.3.1.2 Commande du convertisseur DC/DC boost .....	37
3.3.1.3 Résultat de simulation de convertisseur DC/DC boost.....	43
3.3.2 Convertisseur DC/DC bidirectionnel en courant.....	43
3.3.2.1 Source embarquée utilisant un supercondensateur.....	43
3.3.2.2 Modélisation du convertisseur DC/DC bidirectionnel en courant.....	44
3.3.2.3 Commande du convertisseur .....	46
3.4 Association des deux source (PEMFC/SC) .....	48
3.4.1 Résultatde simulation .....	48

## Sommaire

3.5 Gestion d'énergie .....	50
3.6 Schéma globale de simulation.....	51
3.7 Résultatde simulation .....	51
3.8 Conclusion.....	54
<b>Conclusion générale</b> .....	55
<b>Bibliographie</b> .....	56
<b>ANNEXE</b>	



## **Liste des Figures**

## Liste des Figures

### Chapitre1 : Véhicule hybride à pile à combustible

<b>Figure 1.1.</b> Véhicule hybride série.....	4
<b>Figure 1.2.</b> L'architecture hybride parallèle simple arbre .....	5
<b>Figure 1.3.</b> L'architecture double arbre.....	6
<b>Figure 1.4.</b> L'architecture hybride combinée.....	7

### Chapitre 2 : Généralités sur La pile à combustible et les supercondensateurs

<b>Figure 2.1.</b> Schéma de la première pile à combustible de William Grove (1839) .....	12
<b>Figure 2.2.</b> Exemple de stack chez ZSW.....	13
<b>Figure 2.3.</b> Catalyseur du coté anode.....	15
<b>Figure 2.4.</b> Couche de diffusion de gaz .....	15
<b>Figure 2.5.</b> Structure d'un empilement de cellule PEMFC .....	17
<b>Figure 2.6.</b> Schéma de principe d'une pile à combustible de type PEM .....	18
<b>Figure 2.7.</b> Schéma de principe de fonctionnement de PEMFC.....	20
<b>Figure 2.8.</b> Classification des piles à combustibles selon la puissance et le rendementÉlectrique .....	21
<b>Figure 2.9.</b> Schéma de principe des différents types de piles à combustible.....	22
<b>Figure 2.10.</b> Schéma de principe des supercondensateurs.....	26
<b>Figure 2.11.</b> Principe d'assemblage des supercondensateurs .....	27
<b>Figure 2.12.</b> Circuit équivalent simplifié d'un supercondensateur .....	27
<b>Figure 2.13.</b> Supercondensateurs asymétriques ESMA (3200 F - 80000 F, 1,7 V, 1,4 kW).....	28
<b>Figure 2.14.</b> Modèle de Helmholtz de la couche double électrique.....	28
<b>Figure 2.15.</b> Modèle de Gouy et Chapman de la couche double électrique.....	29
<b>Figure 2.16.</b> Modèle de Stern de la couche double électrique.....	30

### Chapitre 3 : Modélisation de système

<b>Figure 3.1 :</b> Structure parallèle à deux convertisseurs .....	35
<b>Figure 3.2.</b> Schéma électrique du convertisseur boost.....	35
<b>Figure 3.3.</b> Schéma de principe de Convertisseur boost .....	36

<b>Figure 3.4.</b> Schéma bloc du convertisseur élévateur .....	37
<b>Figure 3.5.</b> Schéma bloc de la boucle de courant .....	38
<b>Figure 3.6.</b> Régulation de la tension du bus par hacheur .....	39
<b>Figure 3.7.</b> ( $V_{bus}$ ) tension de charge ( $I_L$ ) courant de la pile ( $P_{fc}$ ) puissance de la pile et la puissance référence ( $I_{bus}$ ) courant de la charge .....	41
<b>Figure 3.8.</b> Schéma électrique du convertisseur buck-boost .....	42
<b>Figure 3.9.</b> Schéma électrique du convertisseur bidirectionnel.....	42
<b>Figure 3.10.</b> Allures des puissances de tensions obtenues par simulation pour les deux profils de Conduite (Orange bus et Manhattan bus).....	47
<b>Figure 3.11.</b> Principe de base de la décomposition fréquentielle .....	48
<b>Figure 3.12.</b> Allures des Puissances obtenues par simulation pour les deux profils de Conduite (Orange bus et Manhattan bus) .....	51
<b>Figure 3.13.</b> Allures des Tensions obtenues par simulation pour les deux profils de Conduite (Orange bus et Manhattan bus) .....	51
<b>Figure 3.14.</b> Allures des Courants obtenues par simulation pour les deux profils de Conduite (Orange bus et Manhattan bus) .....	52

## ANNEXE

**Figure 4.1.** Ondulation du courant

**Figure 4.2.** Ondulation de tension

## **Listes des Acronymes et Symboles**

### **Acronymes**

AFC	: Alkaline Fuel Cell (Pile à combustible alcaline)
DC	: direct current (courant continu)
DMFC	: Direct Méthanol Fuel Cell (Pile à combustible directe au méthanol)
EDLC	: electrical double layer capacitors (condensateurs à double couche électrique)
EME	: électrode membrane électrode
IGBT	: insulated-gate bipolar transistor (transistor bipolaire à grille isolée)
MCFC	: Molten Carbonate Fuel Cell (Pile à combustible au carbonate fondu)
MLI	: modulation de largeur d'impulsions
PAC	: pile à combustible
PAFC	: Phosphorique Acid Fuel Cell (Pile à combustible à acide phosphorique)
PANI	: polyaniline
PEM	: Proton Exchange Membranes
PEMFC	: polymer exchange membrane fuel cell (pile à combustible à membrane électrolyte polymère)
PI	: régulateur proportionnel intégrale
PPy	: polypyrrole
PTFE	: poly tétra fluoro éthène (polymère partiellement cristallin à structure linéaire)
PTh	: polythiophène
SEHPC	: système d'énergie hybride à pile à combustible
SOFC	: Solid Oxyde Fuel Cell (Pile à combustible à oxyde solide)

## Symboles

$a$	: surface
$C$	: capacite
$C_{dl}$	: la capacité surfacique
$C_{diff}$	: la capacité de la couche diffusée
$C_H$	: la capacité associée à la couche compacte
$CO_3O_4$	: l'oxyde de cobalt
$COOH$	: acides carboxyliques
$C_{sc}$	: la capacite de supercondensateur
$d$	: épaisseur
$e^-$	: électron
$H$	: l'interrupteur
$H^+$	: protons
$H_2$	: hydrogène
$H_2O$	: l'eau
$I_{bus}$	: courant aux bornes de la charge
$I_{bus\_mes}$	: courant mesurée aux bornes de la charge
$I_c$	: courant aux bornes de la capacite
$I_{c\_ref}$	: courant de référence aux bornes de la capacite
$iL$	: courant dans la bobine
$I_{L\_ref}$	: courant de référence aux bornes de la l'inductance
$I_{sc}$	: le courant de supercondensateur
$L$	: l'inductance
$MnO_2$	: l'oxyde de manganèse
$NiO$	: l'oxyde de nickel

## Symbole

$O_2$	: oxygène
$Q$	: charge électrique
$RuO_2$	: l'oxyde de ruthénium
$R_{sc}$	: résistance de supercondensateur
$SO_3H^-$	: Acide sulfonique
$V$	: tension appliquée
$V_{bus}$	: la tension aux bornes de la charge
$V_{bus\_mes}$	: la tension mesurée aux bornes de la charge
$V_c$	: la tension aux bornes de la capacité
$V_e$	: la tension d'entrée
$V_{e\_mes}$	: la tension d'entrée mesurée
$V_L$	: la tension aux bornes de l'inductance
$V_{L\_ref}$	: la référence de tension aux bornes de l'inductance
$V_{sc}$	: la tension aux bornes de supercondensateur
$V_{sc\_mes}$	: la tension mesurée aux bornes de supercondensateur
$W$	: l'énergie électrostatique
$W_e$	: l'énergie électrique
$\alpha$	: rapport cyclique
$\epsilon$	: constante diélectrique du matériau isolant
$\Delta Q$	: la chaleur
$u$	: rapport cyclique de sc associé
$u_{11}$	: rapport cyclique de sc 1
$u_{13}$	: rapport cyclique de sc 2

## **Introduction générale**



## Introductions générales

L'hydrogène apparaît comme une solution prometteuse grâce à sa haute capacité de stockage, environ 30000 Wh/Kg, ce qui a conduit à l'émergence de nouvelles technologies fondées sur les piles à combustible. Ces piles peuvent être utilisées dans divers domaines, qu'ils soient stationnaires ou mobiles.[1]

Les véhicules hybrides, qui combinent un moteur à combustion interne avec une source d'énergie électrique secondaire, représentent une alternative viable à court terme. Ils permettent de réduire la consommation de carburant et de servir de transition vers une mobilité entièrement électrique. De plus, leur maintenance est souvent plus complexe en raison de la présence de deux systèmes de propulsion (moteur thermique et moteur électrique). En comparaison, les véhicules électriques, qui ne nécessitent pas de carburant fossile, bénéficient de coûts de fonctionnement et d'entretien généralement plus bas et d'une empreinte écologique réduite.

Plus spécifiquement, les véhicules hybrides à pile à combustible offrent une production d'électricité embarquée grâce à une pile à combustible, combinée avec des systèmes de stockage de l'énergie (supercondensateurs, batteries...). Ces véhicules combinent les avantages des voitures électriques (zéro émission et indépendance vis-à-vis du pétrole) avec ceux des véhicules conventionnels (meilleure autonomie et ravitaillement rapide en hydrogène).

À ce jour, l'intégration simultanée d'une pile à combustible et d'un supercondensateur dans un véhicule n'a pas encore atteint une adoption généralisée sur le marché. Bien que les deux technologies soient développées et utilisées individuellement pour des applications spécifiques, elles ne sont pas encore couramment combinées dans les véhicules de série disponibles pour le grand public.

Les supercondensateurs sont souvent utilisés pour leurs capacités de stockage d'énergie à haute densité et leur capacité à fournir et absorber rapidement l'énergie, ce qui les rend adaptés à des applications comme la récupération d'énergie au freinage et l'amélioration de la performance des systèmes hybrides et électriques. La production de l'hydrogène à partir de l'électrolyse de l'eau moyennant les énergies renouvelables tel l'énergie solaire, éolienne, hydraulique ou géothermique représente une solution idéale visée pour plusieurs raisons importantes. Tout d'abord, ces sources d'énergie sont respectueuses de l'environnement. Sur le plan technologique, les progrès dans les systèmes d'électrolyse et

de stockage de l'hydrogène améliorent continuellement l'efficacité et la rentabilité de cette méthode de production. En fin, l'utilisation des énergies renouvelables offre une indépendance énergétique accrue en réduisant la dépendance vis-à-vis des importations d'énergie, tout en renforçant la sécurité énergétique des nations. La disponibilité répandue et la flexibilité géographique des ressources renouvelables comme le solaire et l'éolien permettent une localisation optimale des installations de production d'hydrogène, adaptées aux besoins locaux et aux conditions environnementales spécifiques.

Ce mémoire s'inscrit dans le cadre de la gestion d'énergie d'une source hybride utilisant un bus continu, convertisseurs, pile à combustible et des supercondensateurs pour traction électrique « Véhicule hybride ». Il est équipé d'une pile à combustible de type PEMFC, utilisé comme source principale et d'un module de supercondensateurs, employé comme source d'appoint de puissance.

Pour adapter les niveaux de tension entre les sources d'alimentation et la charge dans un véhicule, deux convertisseurs statiques sont nécessaires : un de type Boost et un autre de type Buck-boost. Ces convertisseurs permettent de stabiliser la tension du bus continu à une valeur constante et de réguler la puissance ou le courant requis par la charge.

## **Chapitre 1: véhicule hybride à pile à combustible**

## **1.1 Introduction**

Un système d'énergie hybride à pile à combustible (SEHPC) est un système qui associe une pile à combustible à d'autres composants énergétiques tels que des batteries et des supercondensateurs, afin de fournir de l'énergie électrique à un véhicule ou à une application stationnaire. La pile à combustible constitue le cœur de ce système, transformant l'hydrogène et l'oxygène en électricité, avec pour seul sous-produit de l'eau.

Dans ce chapitre, nous explorerons en détails les différentes architectures hybrides, les avantages et les applications de cette technologie émergente, mettant en lumière son importance fondamentale dans la transition vers un avenir énergétique plus durable et respectueux de l'environnement.

## **1.2 véhicules hybrides à pile à combustible**

Une automobile hybride à pile à combustible, c'est la source de puissance qui est hybride, la motorisation restante entièrement électrique. Ainsi, un véhicule à pile à combustible hybride utilise une source secondaire d'énergie électrique qui peut être utilisée en charge et en décharge.

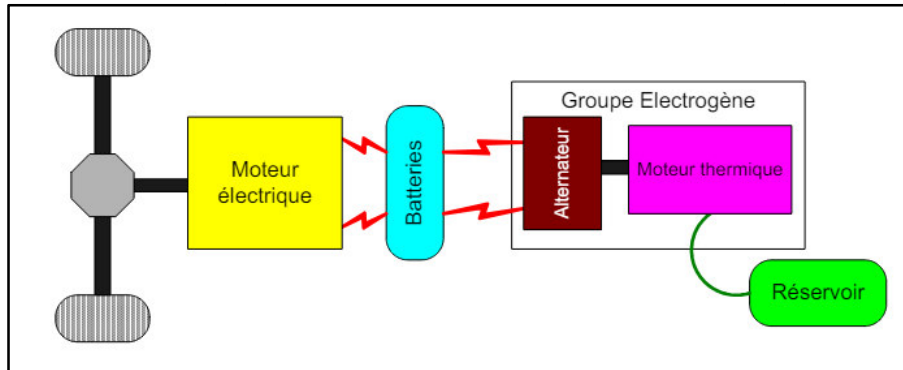
## **1.3 Les différentes architectures hybrides**

Les architectures hybrides sont les configurations variées dans lesquelles les éléments d'un système d'énergie hybride sont organisés afin de satisfaire des exigences particulières en termes de performances, d'efficacité et de fonctionnalités. Parmi les architectures hybrides les plus fréquentes dans le domaine des véhicules et des systèmes de propulsion, voici quelques-unes :

### **1.3.1 Architecture hybride série**

La caractéristique d'un véhicule hybride série est que le moteur thermique ne soit pas directement relié aux roues pour assurer la propulsion. Au lieu de cela, il sert à alimenter un générateur qui génère de l'électricité pour alimenter le ou les moteurs électriques chargés de la propulsion. Il est fréquent que ce genre de véhicule soit performant pour les déplacements urbains avec des arrêts fréquents et des démarrages en douceur, car il permet une utilisation optimale du moteur électrique.

De plus, l'utilisation d'un moteur thermique à régime constant peut contribuer à améliorer l'efficacité énergétique globale du véhicule.



**Figure 1.1 : Véhicule hybride série [2]**

Les véhicules hybrides de série présentent de nombreux avantages importants :

En optimisant l'utilisation du moteur thermique, qui fonctionne généralement à un régime constant et est spécialement réglé pour générer de l'électricité, les véhicules hybrides en série peuvent atteindre une efficacité énergétique globale supérieure à celle des véhicules équipés uniquement d'un moteur thermique. Grâce à leur capacité à fonctionner en mode électrique pur à basse vitesse, les véhicules hybrides en série réduisent significativement les émissions de gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques dans les environnements urbains, où les arrêts fréquents et les faibles vitesses sont courants. De plus, en utilisant le moteur thermique de manière plus propre et efficace, la consommation de carburant globale des véhicules hybrides en série est réduite. Cela est possible grâce à une utilisation efficace de l'énergie électrique stockée dans la batterie et à la récupération de l'énergie cinétique lors du freinage. Cette méthode diminue la dépendance aux énergies fossiles et permet aux propriétaires de réaliser des économies à long terme.

Les désavantages du véhicule hybride sont nombreux :

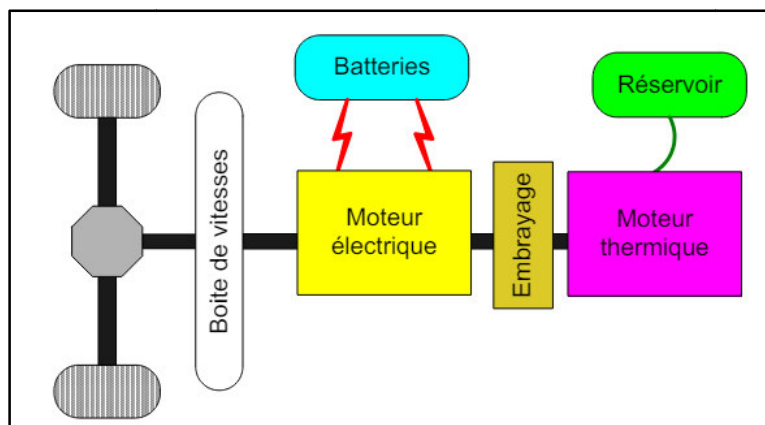
L'achat de véhicules hybrides en série est généralement plus coûteux que celui des véhicules à moteur thermique traditionnels en raison de la technologie hybride

supplémentaire. Bien que ces véhicules offrent une certaine autonomie en mode électrique, celle-ci est souvent limitée par la capacité de la batterie, ce qui peut restreindre la distance parcourue en mode électrique complet. Malgré les efforts pour améliorer l'efficacité du moteur thermique, sa consommation de carburant peut varier en fonction de la charge de la batterie et des exigences de propulsion du véhicule. Cela peut entraîner une perte d'efficacité énergétique sur certaines distances où le moteur thermique est plus sollicité.

### 1.3.2 Architecture hybride Parallèle

Dans un système hybride parallèle, le moteur électrique est directement relié aux roues et peut être utilisé seul ou conjointement avec le moteur à combustion interne pour propulser le véhicule, contrairement à d'autres architectures telles que le système hybride série, où le moteur à combustion interne est uniquement utilisé pour recharger la batterie.

Le point de jonction entre les différentes chaînes de traction est cette fois mécanique dans le cas de l'architecture parallèle. Quand les divers moteurs sont rassemblés sur le même arbre, une boîte de vitesses permet de transférer la puissance aux roues. L'architecture hybride parallèle simple arbre est mentionnée dans la **Figure 1.2 [2]**.

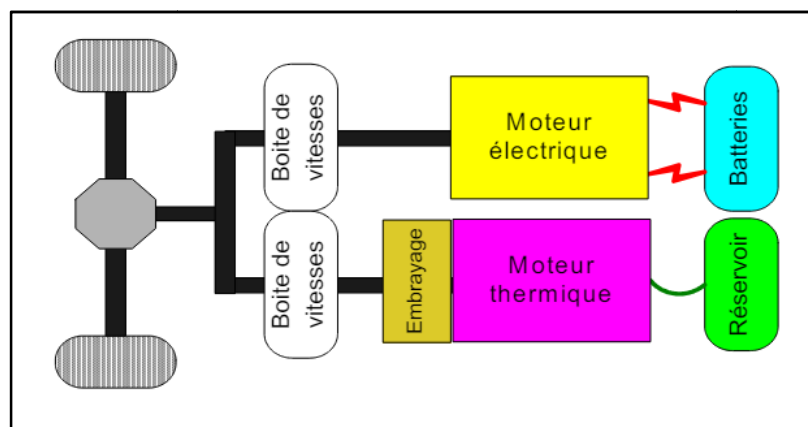


**Figure 1.2 :**L'architecture hybride parallèle simple arbre[2]

Lorsque la puissance du moteur électrique est faible, on parle d'alternateur-démarrage, placé en amont de l'embrayage. Dans ce scénario, le moteur thermique prend en charge la majeure partie de la propulsion, et l'alternateur-démarrage est sollicité uniquement au démarrage du moteur thermique.

Lorsque le véhicule est à l'arrêt, le moteur thermique est désactivé pour réduire la consommation de carburant et les émissions de polluants. Pendant les phases de démarrage, le moteur thermique peut fonctionner à un régime beaucoup plus élevé que lorsqu'un démarreur traditionnel est utilisé, ce qui permet de réduire considérablement les émissions de polluants. Lorsque les deux moteurs ont des puissances équivalentes, le moteur électrique est placé entre l'embrayage et la boîte de vitesses, et les régimes des deux moteurs sont linéaires par rapport au régime des roues. La propulsion du véhicule nécessite donc une répartition du couple aux roues entre les deux moteurs, en prenant en compte les rapports de boîte. Un des désavantages de cette architecture réside dans la diminution du couple aux roues lors des variations de rapports, ce qui nuit au confort de conduite.

Afin de pallier cet inconvénient, il est possible de remplacer la boîte de vitesses par un variateur de vitesse continu. Il est également possible de connecter le moteur électrique à un arbre différent, ce qui est appelé architecture double arbre, comme illustré dans la **Figure 1.3**. Il est évident que la taille des composants et la répartition de la puissance sur les deux chaînes de traction sont moins limitées. Dans l'architecture double arbre, les deux moteurs fonctionnent de manière autonome et à tout moment, l'un des deux moteurs est responsable de la traction du véhicule[2].



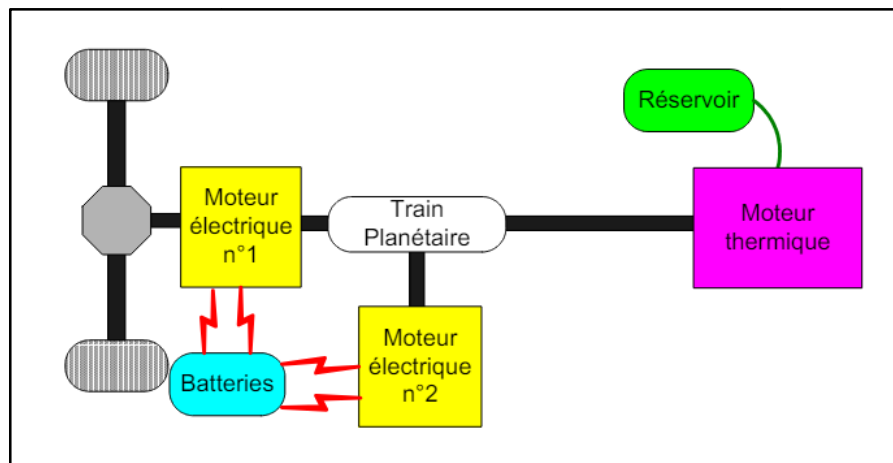
**Figure 1.3** :L'architecture double arbre [2]

## Chapitre 1 ; véhicule hybride à pile à combustible

Quand le moteur électrique est connecté directement aux roues, afin de garantir une diminution significative de la consommation de carburant et des émissions de polluants, il est nécessaire que sa puissance soit assez élevée. Il est possible d'utiliser un moteur



électrique de moindre puissance en ajoutant une deuxième boîte de vitesses, comme illustré dans la **Figure 1.3**. Néanmoins, cette dernière solution semble difficilement réalisable en raison de son coût et de sa complexité mécanique. Le couple aux roues est calculé dans les architectures simples et double arbre en additionnant les couples fournis par les moteurs (à l'aide des rapports de réduction). L'architecture combinée utilise un train planétaire pour augmenter la vitesse, comme illustré dans la **Figure 1.4**[2].



**Figure 1.4 :L'architecture hybride combinée[2]**

En cas d'utilisation uniquement d'un moteur thermique et d'un moteur électrique, le seul degré de liberté réside dans le choix des régimes de chaque moteur. En revanche, en ajoutant un deuxième moteur électrique, comme illustré dans la **Figure 1.4**, le couple et le régime du moteur thermique peuvent être sélectionnés quasiment indépendamment des conditions de conduite (vitesse du véhicule, couple demandé aux roues par le conducteur).

Cette liste de configurations est loin d'être complète, mais illustre les configurations les plus couramment employées. Une autre option a été suggérée, mais elle est généralement plus complexe (avec plusieurs embrayages, trois moteurs électriques, etc.) [2].

## **1.4 Les différentes méthodes de fonctionnement**

### **1.4.1 Entièrement électrique**

## Chapitre 1 ; véhicule hybride à pile à combustible

Pendant cette procédure, la voiture est propulsée exclusivement par son moteur électrique. L'énergie nécessaire provient de sa batterie. Ce mode de fonctionnement est fréquemment

utilisé à faible vitesse ou sur de courtes distances pour réduire la consommation de carburant et les émissions.

#### **1.4.2 Série hybride**

Dans cette configuration, les roues ne sont pas directement entraînées par le moteur à combustion interne. Ce dernier fonctionne plutôt comme un générateur pour produire de l'électricité. Cette électricité alimente le moteur électrique ou recharge la batterie. Cette situation se produit lorsque la batterie est insuffisante ou lorsqu'il y a une forte demande de puissance.

#### **1.4.3 Hybride parallèle**

Dans cette configuration, le véhicule fonctionne grâce à une combinaison d'un moteur à combustion interne et d'un moteur électrique. La collaboration entre ces deux moteurs permet de générer la puissance nécessaire lors des accélérations ou des situations de conduite à grande vitesse. Ce mode de fonctionnement est couramment utilisé lorsque la demande de puissance est élevée.

#### **1.4.4 Régénération d'énergie (Récupération d'énergie)**

Lorsque vous freinez ou ralentissez, l'énergie cinétique est transformée en électricité. La batterie du véhicule est rechargée grâce à cette électricité récupérée. Ce processus permet de récupérer une partie de l'énergie habituellement perdue lors du freinage, contribuant ainsi à améliorer l'efficacité énergétique globale du véhicule.

#### **1.4.5 Mode démarrage/arrêt automatique**

Ce système désactive automatiquement le moteur à combustion interne lorsque le véhicule est immobile, contribuant ainsi à réduire la consommation de carburant et les émissions. Le moteur redémarre lorsque le conducteur relâche la pédale de frein, permettant une reprise de la propulsion sans problème. Cela réduit la consommation de carburant et les émissions lorsque le véhicule est à l'arrêt.

Ces différentes approches permettent aux véhicules hybrides d'améliorer l'efficacité de leur système de propulsion, ce qui se traduit par une amélioration significative de leur efficacité énergétique et une diminution importante des émissions polluantes.

## **1.5 Les types de véhicules hybrides**

### **1.5.1 Hybrides série-parallèles**

Les véhicules hybrides série-parallèles peuvent fonctionner en mode série, parallèle ou combiné. Ce type combine les avantages des deux architectures pour optimiser l'efficacité et les performances.

### **1.5.2 Hybrides électriques à prolongateur d'autonomie**

Ces véhicules sont essentiellement électriques, mais ils sont également équipés d'un moteur à combustion interne spécialement conçu pour recharger la batterie lorsqu'elle est à un niveau bas. Dans cette configuration, le moteur à combustion interne ne transmet pas directement la puissance aux roues du véhicule.

### **1.5.3 Hybrides magnétiques**

Dans ces véhicules innovants, l'énergie magnétique est captée et stockée à l'aide d'aimants permanents. Cette énergie peut ensuite être déployée stratégiquement, notamment pour renforcer l'accélération ou répondre à d'autres besoins de puissance élevés. Par exemple, elle peut alimenter un moteur électrique ou offrir un soutien additionnel à un moteur à combustion interne, améliorant ainsi l'efficacité énergétique et les performances globales du véhicule.

### **1.5.4 Hybrides à pile à combustible**

Les véhicules à pile à combustible utilisent une batterie pour convertir l'hydrogène en électricité. Ensuite, cette électricité alimente un moteur électrique qui propulse le véhicule. Dans les hybrides à pile à combustible, une petite batterie peut être intégrée pour stocker l'énergie excédentaire et la restituer lors des accélérations ou des montées.

**1.6 Conclusion**

Ce chapitre met en évidence quelques concepts fondamentaux liés aux véhicules hybrides. En exposant les divers éléments et les trois architectures principales : série, parallèle et combinée, ainsi que le mode de fonctionnement, ainsi que les divers types de véhicules hybrides, tels que les hybrides parallèles, en série, rechargeables, et autres, ils proposent des caractéristiques spécifiques qui répondent à divers besoins et préférences des consommateurs

## **Chapitre 2 : Généralités sur la pile à combustible et les supercondensateurs**

## Chapitre 2 :Généralités sur la pile à combustible et les supercondensateurs

### **2.1 Introduction**

L'avenir de la technologie énergétique est représenté par la pile à combustible, qui propose une méthode révolutionnaire de production d'électricité écologique et performante. L'énergie chimique des combustibles stockée dans l'hydrogène est directement convertie en électricité grâce à cette technologie innovante, dont l'eau est le seul sous-produit. Ils présentent de nombreux bénéfices, tels que des démarrages rapides, une puissance élevée et une densité de fonctionnement basse, avec des émissions de polluants minimales et une grande efficacité.

Les systèmes hybrides qui combinent deux sources d'énergie distinctes afin d'améliorer l'efficacité et diminuer les émissions sont devenues un élément essentiel de la transition vers une mobilité plus durable. Ces systèmes sont dominés par les batteries, ou les supercondensateurs, qui sont deux types de technologies de stockage d'énergie employées dans les systèmes hybrides pour les véhicules.

Les supercondensateurs sont des composants indispensables dans les systèmes hybrides, en même temps que les batteries. L'utilisation de ces batteries offre de nombreux avantages différents, ce qui permet d'améliorer considérablement les performances globales du système. La charge et la décharge rapides, la durée de vie prolongée, une efficacité énergétique élevée et la capacité à fournir des impulsions de puissance élevées lors des accélérations sont parmi les avantages. De cette façon, l'incorporation de supercondensateurs dans les véhicules hybrides permet d'améliorer leur performance énergétique et de procurer une expérience de conduite plus dynamique et efficace.

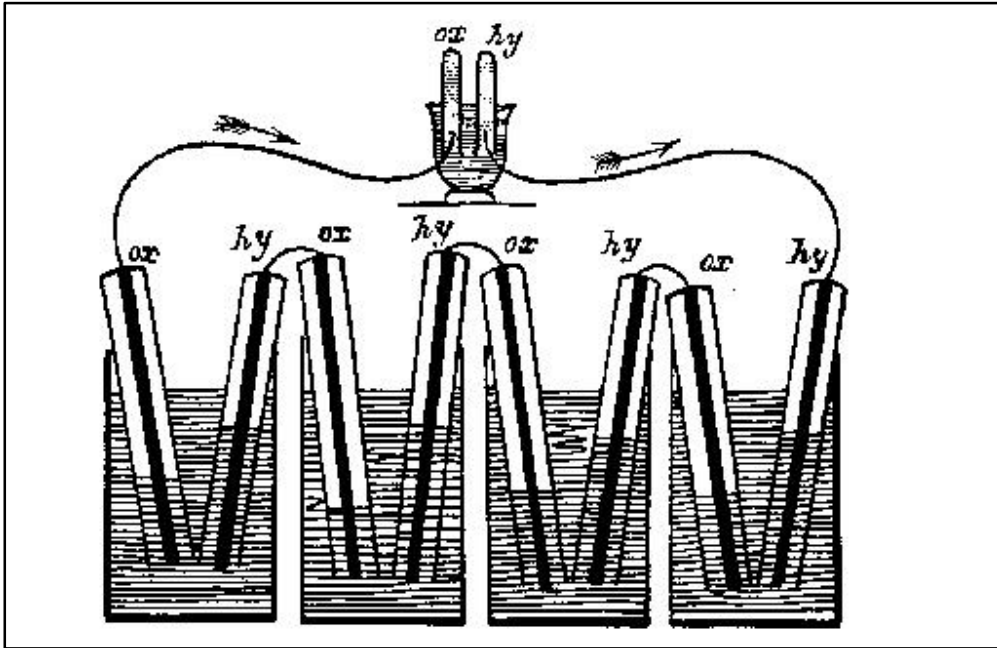
Dans ce chapitre, notre attention est portée sur la présentation des principes généraux des piles à combustibles, des supercondensateurs et des accumulateurs électrochimiques. Nous abordons également de manière plus détaillée les principaux éléments de notre système, tels que les piles à combustible, les batteries et les super condensateurs.

### **2.2 La pile à combustible**

En 1800, moins de deux décennies après qu'Antoine Lavoisier eut mis en évidence la composition chimique de l'eau en hydrogène et oxygène, les britanniques William Nicholson et Anthony Carlisle confirment cette réalité. Ils effectuent, par application d'un courant électrique, la décomposition de cette eau en ses deux éléments, ce fut la première électrolyse. La découverte de l'effet "pile à combustible" est généralement attribuée au chimiste suisse-allemand Christian

## Chapitre 2 : Généralités sur la pile à combustible et les supercondensateurs

Friedrich Schönbein, en 1839. Mais la première pile fabriquée en laboratoire, la même année, est le fait de William Robert Grove, avocat britannique, aussi chimiste amateur et vice-président de la London Royal Institution. Cet effet "pile à combustible" est l'inverse de l'électrolyse. Le schéma de cette première pile est reproduit sur la figure ci-dessous[3].



**Figure 2.1 :** Schéma de la première pile à combustible de William Grove (1839)[3]

Mais cette innovation tombe dans l'oubli pendant plus d'un siècle. Ce n'est qu'au début des années 1960 que la firme américaine General Electric, à la recherche d'un générateur plus performant que les batteries traditionnelles, la reprise pour la développer et en installer deux modules de 1 kW dans les premières capsules spatiales Gemini : ce fut le véritable point de départ de l'aventure industrielle de cette technologie[3].

Une pile à combustible (PAC) permet de convertir l'énergie chimique de combustion en divers types d'énergie<sup>56</sup>, comme l'électricité, la chaleur et l'eau notamment.

Son principe est basé sur l'inversion du processus d'électrolyse, qui transforme l'énergie chimique en chaleur. La pile à combustible PEMFC (polymer exchange membrane fuel cell) ou pile à membrane échangeuse de protons sera étudiée de manière plus approfondie. Elle est constituée d'une cathode et d'une anode séparée par une membrane poreuse hydratée qui joue le rôle d'électrolyte.

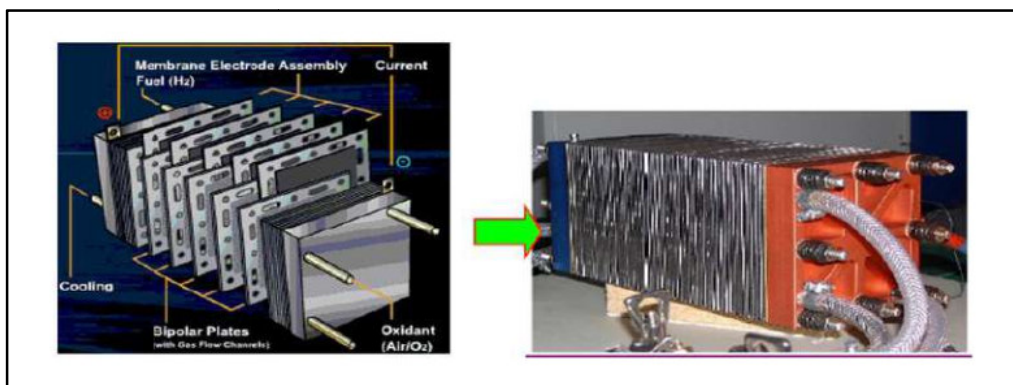


## Chapitre 2 :Généralités sur la pile à combustible et les supercondensateurs

### 2.2.1 Structure d'une pile à combustible

Un stack est un empilement de cellules formant une pile à combustible. L'ensemble électrode-membrane-électrode est composé de ces cellules élémentaires [4]. Le combustible alimente l'anode et le comburant alimente la cathode, et seuls les ions et les gaz peuvent passer sans les électrons. En arrivant à la surface de l'anode, un atome d'hydrogène se subdivise en deux parties, les protons et les électrons. Dans cette situation, les électrons sont contraints de passer par un circuit externe afin de finaliser le processus de conversion. Une cellule basique d'une PAC produit une tension extrêmement basse d'environ 1.2V.

Pour obtenir une puissance élevée, il est nécessaire de connecter plusieurs cellules de base en série afin de créer un ensemble appelé stack. On désigne ces éléments de liaison sous le nom de plaques bipolaires, car ils relient le pôle positif d'une cellule au pôle négatif d'une deuxième cellule (en série). Outre leur fonction électrique (recueil du courant généré par chaque cellule de base vers les électrodes de sortie), les plaques bipolaires sont utilisées pour la circulation, le refroidissement ou le chauffage, ainsi que pour l'assemblage de divers fluides[5].



**Figure 2.2 :**Exemple de stack chez ZSW [5]

### 2.2.2 Structure d'une cellule élémentaire de PEMFC

#### 2.2.2.1 Électrolyte

Les membranes conductrices de protons sont au cœur des piles à combustible type PEMFC. Leur importance est évidente car ce sont leurs propriétés conductrices Cela réglera la recombinaison électrochimique de l'hydrogène et de l'oxygène, et d'où ses performances. Fonctionnement limité en chute ohmique à haute densité courant, principalement lié à la membrane (la résistance de la membrane est liée au rapport de l'épaisseur à la conductivité protonique). En plus, ils doivent

## Chapitre 2 : Généralités sur la pile à combustible et les supercondensateurs

montrer bonne propriétés mécaniques et chimique dans des conditions de Fonctionnement, ne pas être perméables aux gaz maintenir une teneur en eau élevée à haute température puisque cela conditionne les propriétés de conduction.

Les membranes ont des groupes acides dans leur structure polymère Les échangeurs de protons PEM (Proton Exchange Membranes), généralement Terminer ( $SO_3H^-$ ) ou COOH, Il permet le transfert des protons de l'anode vers la cathode[4].

### **2.2.2.2 Électrodes (anode/cathode)[4]**

Le polymère ionique joue un rôle crucial dans le fonctionnement des piles à combustible en supportant le catalyseur finement divisé et en facilitant son contact avec les gaz. En plus de cela, il permet le déplacement des espèces protoniques des sites catalytiques d'oxydation de l'hydrogène vers ceux où l'oxygène est réduit. De manière simultanée, il évacue les électrons des sites catalytiques anodiques et les redistribue efficacement vers les sites catalytiques cathodiques, assurant ainsi un flux d'énergie stable et continu dans le système.

Le catalyseur utilisé dans ce type de pile est du platine pur ou allié à un élément de transition (Cr, Mn, Ni, Co, Fe). En effet, seul ce métal noble possède l'activité électro catalytique suffisante vis-à-vis de la réduction d'oxygène et de l'oxydation de l'hydrogène et peut, de plus, résister durablement à la corrosion (dissolution) dans cet environnement chimique très acide. La teneur en platine varie entre 0,01 et 1 mg/cm<sup>2</sup> d'électrode.

Ces électrodes sont réalisées par dépôt, sur un tissu de carbone conducteur ou sur un feutre, de très petites particules de platine (2 à 3 nanomètres supportées sur des poudres de carbone), de particules de PTFE et d'électrolyte polymère liquide. Elles peuvent être réalisées en plusieurs couches laminées.

Ces électrodes sont assemblées puis collées de part et d'autre de la membrane par pressage à chaud. L'ensemble électrode membrane électrode (EME) a une épaisseur inférieure au millimètre. Cet ensemble EME est intégré entre deux plaques bipolaires.

### **2.2.2.3 Catalyseur**

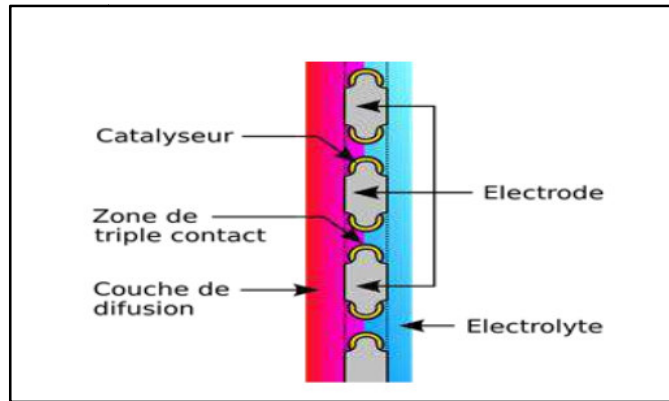
Les catalyseurs sont utilisés pour faciliter, accélérer et augmenter l'efficacité des réactions électrochimiques, mais ne sont pas consommés dans le procédé. Le catalyseur est déposé sur la

## Chapitre 2 : Généralités sur la pile à combustible et lessupercondensateurs

surface de chaque électrode en contact avec l'électrolyte, ainsi qu'un liant, qui peut être hydrophobe

## Chapitre 2 :Généralités sur la pile à combustible et les supercondensateurs

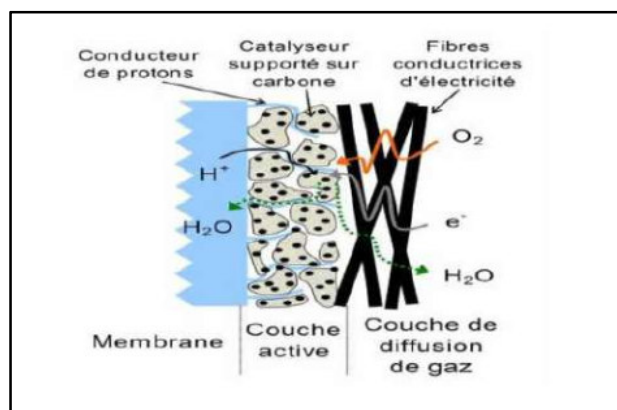
pour faciliter le drainage de l'eau ou hydrophile pour augmenter le contact avec l'électrolyte. L'anode utilise un mélange platine/ruthénium et la cathode utilise du platine seul [5].



**Figure 2.3 :**Catalyseur du côté anode [5]

### **2.2.2.4 Couche de diffusion de gaz**

Elle est construite sur du carbone soit sous forme de fibre tissée soit de non tissé pressé avec une épaisseur comprise entre 0.2 et 0.4 mm et une grande porosité.



**Figure 2.4 :**Couche de diffusion de gaz[5]

Ses fonctions sont:

Le matériau de diffusion de gaz dans les piles à combustible assure la transition des gaz vers le catalyseur et l'électrolyte, soutient mécaniquement le groupement membrane-électrode/catalyseur, facilite la circulation du courant électrique vers les électrodes, évacue l'eau

## Chapitre 2 : Généralités sur la pile à combustible et les supercondensateurs

formée et dissipe la chaleur des réactions chimiques, contribuant ainsi à une performance optimale et à la durabilité du système.

### **2.2.2.5 Les plaques bipolaires**

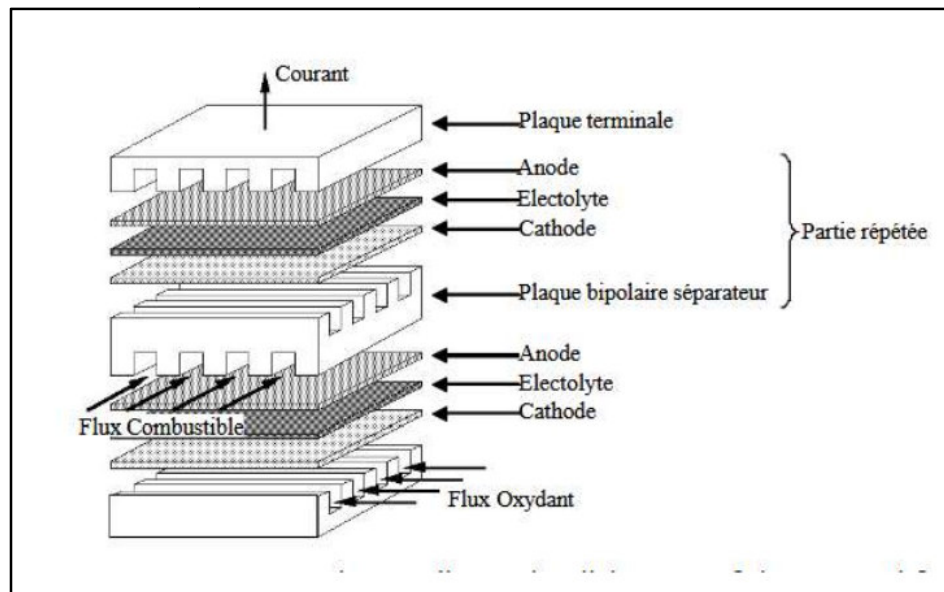
Les plaques bipolaires sont en contact avec la surface des électrodes et permettent sur toute la surface de l'électrode : collection d'électrons (du courant), distribution et séparation des gaz à l'anode et à la cathode, l'évacuation des produits formés (l'eau à l'anode)[4].

Par conséquent, le matériau de la plaque bipolaire doit avoir une certaine conductivité Électricité suffisante (supérieure à 10 siemens/cm), étanchéité à l'air supérieure à Membrane échangeuse de protons et bonne inertie chimique vis-à-vis des fluides Présent dans le noyau cellulaire (eau, acide, oxygène...)[4].

La plaque la plus courante est en graphite avec des canaux de distribution Le gaz est obtenu par usinage. Ces plaques sont disponibles dans le marché, mais le prix très élevé, principalement en raison de l'étape de transformation, il n'est donc pas envisageable applications industrielles. Pour réduire ce coût, deux autres types de plaques bipolaires ont été développés :

Plaques bipolaires à base de composites organiques. Ces plaques utiliser des charges (charbon, graphite, etc.) dispersées dans des matériaux thermoplastiques ou Thermodurcissable. Ces charges rendront les plaques bipolaires conductrices bonne résistance mécanique requise pour captation de courant et liants polymères assemblez différents éléments. Le principal avantage est le faible coût Les matériaux de base, en revanche, les canaux de distribution peuvent Obtenu directement par moulage du polymère chargé sur la cavité, sans nécessiter d'étapes d'usinage ultérieures, et la plaques bipolaires à base de métaux et d'alliages, notamment d'acier Antirouille. Ils possèdent un ensemble de propriétés (résistance mécanique, étanchéité, Conductivité, formabilité et méthode d'assemblage production de masse), ce qui en fait des candidats de choix pour la conception et la production une plaque bipolaire compacte, légère et peu coûteuse. Leur densité est supérieure à Le graphite oblige à les utiliser sous forme de flocons, faciles à passer estampillage. A ces conditions, l'évacuation des calories et le contrôle de la température Grâce à la circulation du fluide, il est possible de s'assurer précisément que le module est en fonctionnement refroidissement interne[4].

## Chapitre 2 :Généralités sur la pile à combustible et les supercondensateurs



**Figure 2.5 :Structure d'un empilement de cellule PEMFC[4]**

### **2.2.3 Les différents types de pile à combustible**

On a 6 types de piles à combustible :

#### **2.2.3.1 Trios types PAC a électrolyte acide**

- 1 Les PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)
- 2 Les DMFC (Direct Méthanol Fuel Cell)
- 3 Les PAFC (Phosphorique Acid Fuel Cell)

#### **2.2.3.2 Trois types PAC a électrolyte basique**

- 1 Les AFC (Alkaline Fuel Cell)
- 2 Les MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell)
- 3 Les SOFC (Solid Oxyde Fuel Cell)

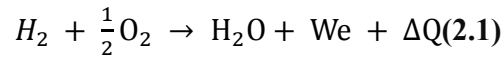
### **2.2.4 Principe de fonctionnement de la pile à combustible**

Les PAC se composent de trois catégories principales de base :

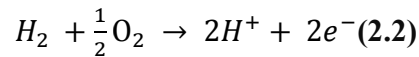
- 1 Uneélectrode de type anode
- 2 Uneélectrode de type cathode
- 3 Un électrolyte qui séparer les deux électrodes

## Chapitre 2 :Généralités sur la pile à combustible et les supercondensateurs

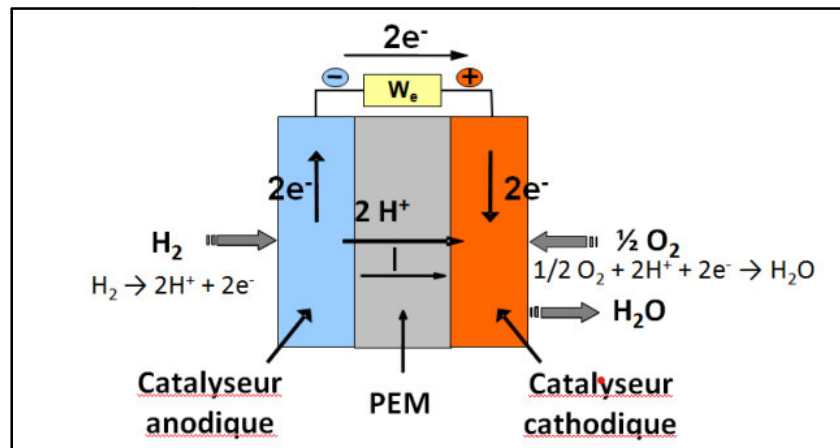
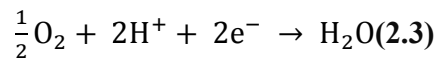
Le processus de fonctionnement de la pile à combustible hydrogène/oxygène (ou hydrogène/air) est assez simple: elle procède à l'oxydation de l'hydrogène et à la réduction de l'oxygène à l'intérieur d'un élément de pile, ce qui entraîne la réaction chimique globale suivante[3] :



Quand on produit de l'eau, de l'énergie électrique  $W_e$  et de la chaleur  $\Delta Q$  en même temps. Il s'agit d'une réaction qui se produit dans une pile composée essentiellement de deux électrodes – l'anode et la cathode – séparées par un électrolyte, contrairement à l'électrolyse de l'eau. À l'anode, l'hydrogène est oxydé électrochimiquement[3].



Quand il produit simultanément de l'eau, de l'électricité et de la chaleur, il produit 2 protons  $H^+$  qui traversent l'électrolyte et 2 électrons qui circulent dans le circuit externe pour générer du courant électrique. Par la suite, ces électrons contribuent à la réduction chimique de l'oxygène, ce qui conduit à la production d'eau[3].



**Figure 2.6 :**Schéma de principe d'une pile à combustible de type PEM[3]

Dans les véhicules hybrides, la pile à combustible la plus fréquemment employée est la pile à combustible à membrane d'échange de protons (PEMFC – Proton Exchange Membrane Fuel Cell). Les raisons de sa popularité sont les suivantes :

## Chapitre 2 : Généralités sur la pile à combustible et les supercondensateurs

- 1 Une grande efficacité énergétique:** Les PEMFC sont très efficaces en termes de rendement énergétique, transformant l'hydrogène en électricité de manière efficace tout en réduisant la production de chaleur perdue.
- 2 Diminuer les émissions:** Les PEMFC ne génèrent que de l'eau et de la chaleur en tant que sous-produits, ce qui diminue les émissions polluantes, ce qui en fait une alternative intéressante pour les véhicules durables.
- 3 Des émissions sonores faibles:** Les PEMFC, à la différence des moteurs à combustion interne, sont extrêmement silencieux pendant leur fonctionnement, ce qui améliore le confort de conduite.
- 4 Démarrage et arrêt rapides:** Les PEMFC offrent la possibilité de démarrer et de s'arrêter rapidement, ce qui les rend parfaitement adaptés aux systèmes hybrides où il est essentiel d'assurer une gestion efficace de l'énergie.
- 5 Une grande densité de puissance:** Les PEMFC présentent une grande densité de puissance, ce qui implique qu'ils peuvent fournir une puissance importante pour propulser les véhicules.
- 6 Rapidement fournir du carburant:** En comparaison avec les batteries, le remplacement de l'hydrogène requis pour les PEMFC est souvent plus rapide que la recharge électrique, ce qui diminue le temps d'immobilisation du véhicule.

### 2.2.4.1 Principe de fonctionnement de la pile à combustible PEMFC

Les membranes en polymère solide sont utilisées comme électrolyte dans les PEMFC. La membrane en polymère est l'acide per-fluoro sulfonique appelé Nafion. Cette membrane polymère est acide par conséquent, les ions sont des ions hydrogène ou des protons. Le PEMFC est alimenté avec de l'hydrogène pur, et l'oxydant est de l'air ou de l'oxygène pur. Les PEMFC sont des piles à combustible à basse température qui conduisent des ions hydrogène. Les PEMFC sont des piles à combustible à basse température qui produisent des ions hydrogène ( $H^+$ ), ce qui les rend non flexibles.

Ces piles à combustible sont les plus utilisées dans le secteur des transports parce qu'ils sont à basse température FC, fonctionnant autour de  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ , donc ils ont des temps de démarrage et d'arrêt relativement courts. Un autre avantage des PEM est qu'ils ont un rendement et une densité de puissance très élevés dans la classe de taille des moteurs des véhicules. Ces caractéristiques sont bien adaptées à une source d'alimentation du véhicule où la densité de puissance est



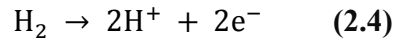
## Chapitre 2 : Généralités sur la pile à combustible et lessupercondensateurs

souhaitée et les demandes de puissance dynamiques sont importantes. Certains des inconvénients du PEMFC

## Chapitre 2 :Généralités sur la pile à combustible et les supercondensateurs

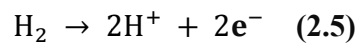
comprennent un risque plus élevé d'intoxication au CO et le fait qu'ils nécessitent un refroidissement [6].

### 1 La réaction chimique globale du PEMFC est la suivante

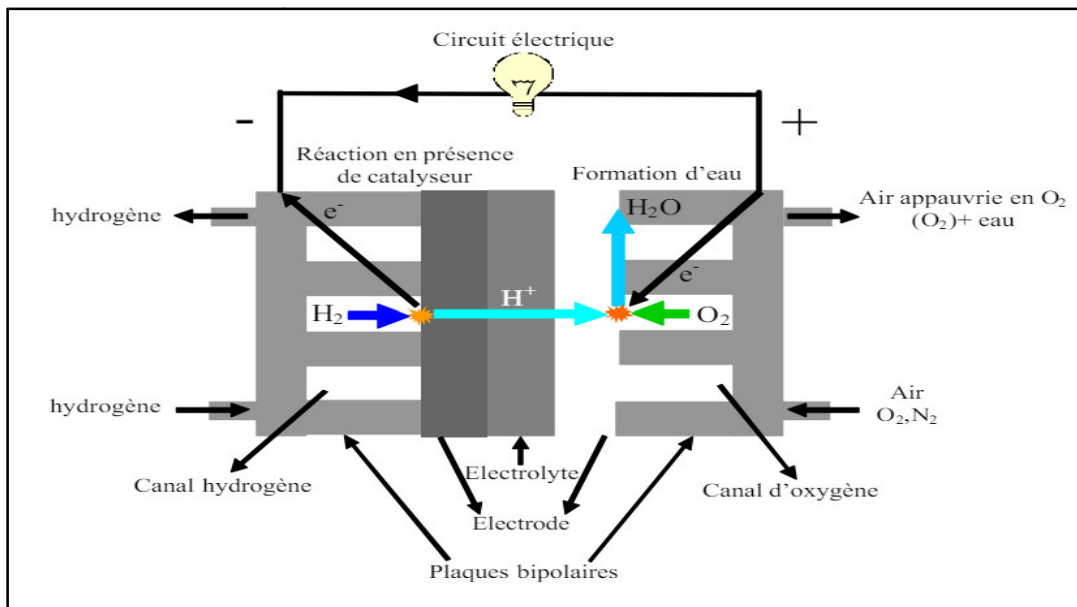
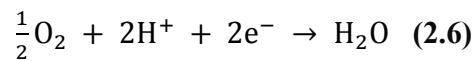


### 2 Les demi-réactions chimiques pour le PEMFC sont les suivantes

#### 2.1 Oxydation réaction



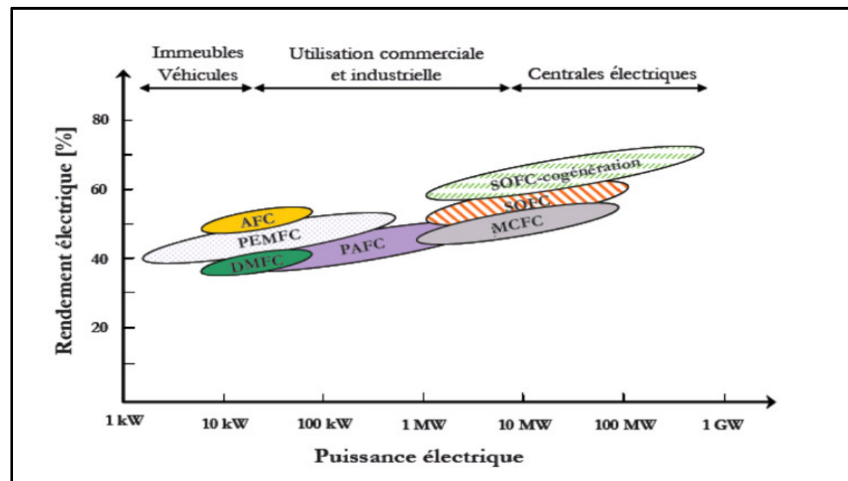
#### 2.2 Réduction réaction



**Figure 2.7 :**Schéma de principe de fonctionnement de PEMFC [4]

La représentation graphique illustre la classification qui permet de trier les diverses piles à combustible en fonction de leur capacité électrique, de leur performance et de leurs destinées.

## Chapitre 2 : Généralités sur la pile à combustible et les supercondensateurs



**Figure 2.8 :** Classification des piles à combustibles selon la puissance et le rendement électrique

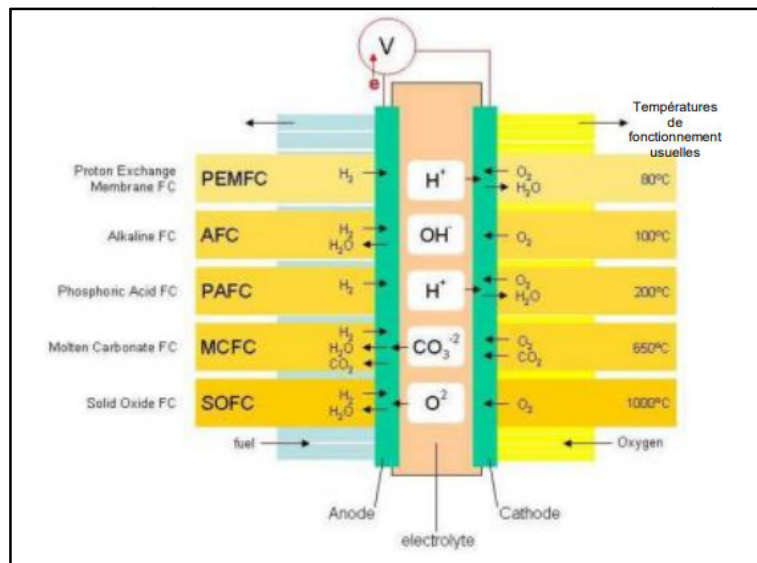
[7]

Dans le tableau ci-dessous, vous trouverez les diverses caractéristiques des piles à combustible :

	PEMFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC	DMFC
Électrolyte	Polymère conducteur de protons	Solution alcaline	Acide phosphorique	Carbonate Fondu	Céramique	Polymère conducteur de protons
Catalyseur	Platine	Platine	Platine	Nickel et L'oxyde de Nickel	Cermet Nickel-Zircone	Platine
Charge mobile	$H^+$	$OH^-$	$H^+$	$CO_3^{2-}$	$O^2$	$H^+$
Température de fonctionnement En ( $^{\circ}C$ )	40-90	65-220	205	650	600-1000	50-130
Rendement Électrique pile En (%)	35-40	60-70	50	65	45-65	20-30
Champs d'applications	Automobile, Cogénération	Application spatiales	Cogénération	Cogénération	Cogénération	Application mobiles

**Tableau 2.1 :** Les principales caractéristiques et propriétés des différentes piles à combustible [8]

## Chapitre 2 :Généralités sur la pile à combustible et les supercondensateurs



**Figure 2.9** :Schéma de principe des différents types de piles à combustible [9]

### 2.2.5 Caractéristique des différentes piles à combustible

Afin de sélectionner un type de pile à combustible pour la cogénération, un utilisateur potentiel prendra en considération plusieurs paramètres essentiels tels que :

- 1 La température de fonctionnement:** est déterminée par le désir ou non de mettre en valeur la chaleur produite et les contraintes environnementales. Si l'on souhaite maximiser l'utilisation de l'énergie résiduelle, il sera possible de sélectionner la MCFC ou le SOFC. Elle se retrouve dans ses émissions thermiques à haute température afin de nourrir un cycle thermodynamique en aval.
- 2 La durée de vie:** les piles "tout solide" (PEMFC et SOFC) peuvent affirmer des durées de vie considérablement plus longues que celles qui nécessitent la manipulation et le transfert d'un électrolyte liquide. À titre d'exemple, la PEMFC a démontré un bon fonctionnement au-delà de 100 000 heures dans les conditions optimales. La durabilité dépend principalement de la qualité des combustibles utilisés dans le cas des PEMFC, ainsi que des conditions d'utilisation [10].
- 3 L'échéance:** Les diverses piles sont actuellement à un stade différent de développement. Puisque les PEMFC et MCFC ont connu une croissance et une commercialisation remarquables depuis de nombreuses années.
- 4 Le coût:** Selon les estimations, le coût pourrait atteindre 500 à 1000 €/kW pour les applications stationnaires avec une durée de vie de 50 000 heures d'ici 2020 [10].

## Chapitre 2 : Généralités sur la pile à combustible et les supercondensateurs

### 2.2.6 Le domaine d'application

Les piles à combustible se retrouvent dans différents secteurs d'utilisation :

- 1 Applications embarquées, transport :** Les applications embarquées en transport désignent les logiciels ou programmes informatiques qui sont intégrés dans des systèmes de véhicules, comme les voitures, les trains, les avions, les navires, etc. Ces applications ont été développées dans le but de proposer des fonctionnalités spécifiques liées au transport, comme la navigation, la gestion du moteur, la surveillance des performances, la sécurité des passagers, la communication, et bien d'autres. Elles jouent un rôle dans l'amélioration de l'efficacité, de la sécurité et du confort des déplacements.
- 2 Applications portables :** Les piles à combustible sont employées dans les appareils électroniques portables comme les téléphones mobiles, les ordinateurs portables et les drones afin de garantir une source d'énergie fiable et durable.
- 3 Applications stationnaires:** Le recours aux piles à combustible est employé pour générer de l'électricité dans les édifices, les hôpitaux et d'autres installations où une alimentation électrique fiable est primordiale. Il est également possible d'utiliser ces sources comme source d'énergie de secours en cas de défaillance du réseau électrique.

La production d'électricité en continu et la cogénération chaleur/électricité jouent un rôle crucial dans le secteur de l'énergie. La production stationnaire d'électricité implique la génération continue et stable d'électricité, généralement à partir de sources d'énergie comme le charbon, le gaz naturel, le nucléaire ou les énergies souterraines.

De son côté, la cogénération chaleur/électricité est un procédé plus performant qui permet de générer à la fois de la chaleur et de l'électricité à partir d'une seule source d'énergie disponible. Cela aide à maximiser l'efficacité énergétique et à diminuer les pertes thermiques, ce qui en fait une option plus écologique et abordable.

En rassemblant ces deux méthodes, il est envisageable d'optimiser l'efficacité énergétique et de diminuer l'impact environnemental, ce qui contribue à la transition vers une production d'énergie plus respectueuse de l'environnement et plus durable.

## Chapitre 2 :Généralités sur la pile à combustible et les supercondensateurs

### **2.2.7 Les avantages et les inconvénients des piles à combustible**

#### **2.2.7.1 Les avantages**

- 1 Une utilisation silencieuse
- 2 Une fiabilité solide
- 3 Un maniement relativement simple.
- 4 La polyvalence

#### **2.2.7.2 Les inconvénients**

- 1 Longévité
- 2 Infrastructures restreintes
- 3 Coût considérable
- 4 Stockage d'hydrogène
- 5 Elles ont une consommation d'énergie supérieure à celle des moteurs diesel ou à gaz

### **2.3 Les supercondensateurs**

Les supercondensateurs, aussi connus sous le nom de condensateurs à double couche électrique (EDLC), sont des dispositifs de stockage d'énergie électrique qui se démarquent des batteries classiques par leur capacité à stocker et à libérer de l'énergie de manière beaucoup plus rapide.

L'histoire de ce composant débute à la moitié du 19ème siècle, avec la découverte en 1853, par le physicien Hermann von Helmholtz, du phénomène capacitif nommé couche double électrique [12]. La modélisation dudit phénomène s'étend jusqu'à la moitié du 20ème siècle, avec notamment les études de Helmholtz, Gouy et Chapman, Stern, et Grahame. Le premier brevet, déposé par la société General Electric pour un composant à électrolyte aqueux et électrodes carbonées poreuses, date de 1957[13]. En 1969, un second brevet, de la société américaine Sohio Corporation, décrit des dispositifs supercapacitifs à tenue en tension plus élevée, par usage d'électrolytes non-aqueux. Ce brevet sera cédé à NEC en 1971 [15], société qui commercialisera avec succès les premières supercapacités à couche double électrique sous la dénomination "supercapacitor". Il s'agit de dispositifs de petite dimension (capacités de quelques farads, énergie spécifique modeste, de l'ordre de 0,5 Wh.kg<sup>-1</sup>), destinés à des applications de faible puissance, telle que la sauvegarde mémoire [16].

Les supercondensateurs de puissance apparaissent dans les années 90. Un programme de développement fut lancé en 1989 par le département d'énergie américain, pour objectif à court terme, des dispositifs d'énergie spécifique supérieure à 5 Wh.kg<sup>-1</sup> et de puissance spécifique

## Chapitre 2 : Généralités sur la pile à combustible et les supercondensateurs

supérieure à 0,5 kW.kg<sup>-1</sup>, et pour objectif à long terme (après 2003), des dispositifs d'énergie spécifique supérieure à 15 Wh.kg<sup>-1</sup> et de puissance spécifique supérieure à 2 kW.kg<sup>-1</sup>[14]. Il était prévu que ces éléments viennent en remplacement des batteries ou des piles à combustible dans les véhicules hybrides, afin de fournir la puissance requise pendant les phases d'accélération et de permettre la récupération pendant les phases de freinage.

### **2.3.1 Principes de fonctionnement des supercondensateurs**

#### **2.3.1.1 Principes physiques de base**

En réalité, les supercondensateurs à couche double électrique, également connus sous le nom de capacités électrochimiques, ont un fonctionnement similaire à celui des capacités électrostatiques traditionnelles. Les deux électrodes métalliques sont généralement séparées par un matériau diélectrique. Une charge électrique est créée au niveau de l'interface électrode-diélectrique, en utilisant une différence de potentiel entre ces deux électrodes pour stocker l'énergie. La capacitance, ou capacité, est le rapport de la charge stockée à la tension appliquée et représente l'aptitude du dispositif à stocker de l'énergie. Les liens de base sont écrits de la manière suivante pour une capacité linéaire :

$$C = \frac{Q}{V} = \epsilon \frac{a}{d} \quad (2.7)$$

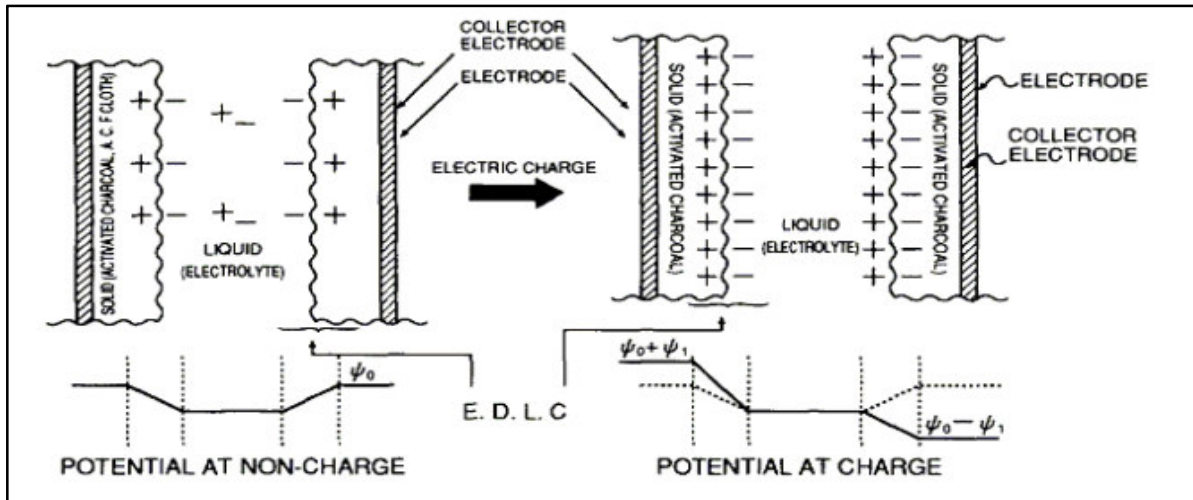
Et:

$$W = \frac{1}{2} CV^2 \quad (2.8)$$

La capacitance est C, la charge électrique est Q, la tension appliquée est V, la constante diélectrique du matériau isolant est  $\epsilon$ , sa surface est a, son épaisseur est d et l'énergie électrostatique est W.

L'énergie est stockée de la même manière dans les supercondensateurs, mais à l'interface entre l'électrode (conducteur électronique) et l'électrolyte (conducteur ionique). Comme indiqué la figure 2.10 [17] :

## Chapitre 2 : Généralités sur la pile à combustible et les supercondensateurs



**Figure 2.10** : Schéma de principe des supercondensateurs [17]

Les molécules de solvant assument le rôle de diélectrique, ce qui entraîne une épaisseur d'isolant de quelques Angströms. Il est donc important que la capacité surfacique de ces composants soit élevée, généralement comprise entre  $10 \mu\text{F.cm}^{-2}$  et  $30 \mu\text{F.cm}^{-2}$ . L'une des raisons de la capacitance élevée des supercondensateurs est l'immense surface de contact entre l'électrode et l'électrolyte, obtenue grâce à l'utilisation de matériaux d'électrode poreux. À titre d'exemple, les charbons actifs actuellement utilisés ont des surfaces spécifiques typiques allant de  $1500 \text{ m}^2.\text{g}^{-1}$  à  $2000 \text{ m}^2.\text{g}^{-1}$ . Un autre résultat du rôle de diélectrique "moléculaire" joué par le solvant est une faible stabilité en tension, limitée par la décomposition du solvant, d'environ 2,5 V pour un solvant organique. Ainsi, comme illustré dans la **figure 2.11**, un supercondensateur est constitué de deux électrodes poreuses remplies d'électrolyte, séparées par une membrane isolante et poreuse (pour garantir la conduction ionique). Chaque interface électrode-électrolyte présente une couche double électrique, ce qui permet de représenter, de manière simplifiée, un supercondensateur comme l'association série de deux capacités (voir **figure 2.12**) : l'une,  $C_1$ , développée à l'électrode positive, et l'autre,  $C_2$ , à l'électrode négative. Ainsi, la capacité totale est de :

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \quad (2.9)$$



## Chapitre 2 : Généralités sur la pile à combustible et les supercondensateurs

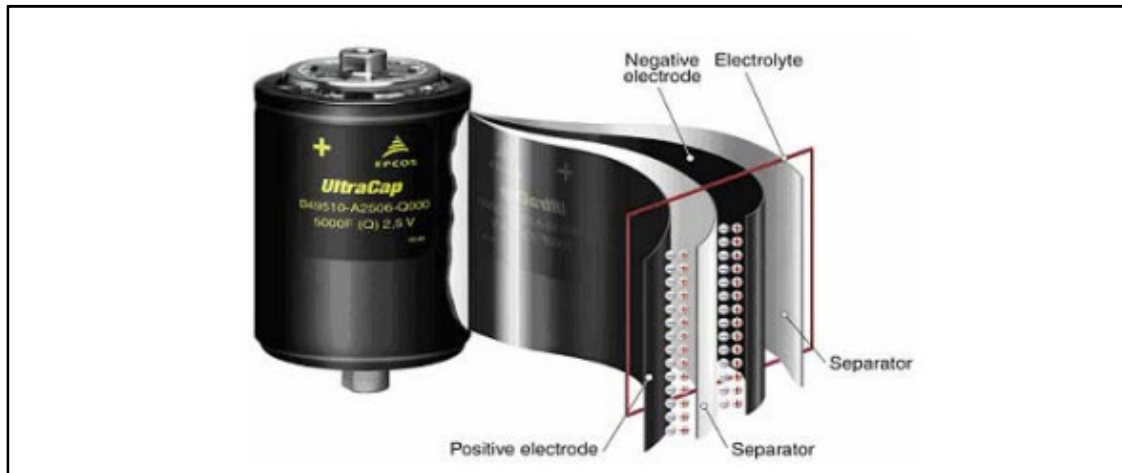


Figure 2.11 :Principe d'assemblage des supercondensateurs[18]

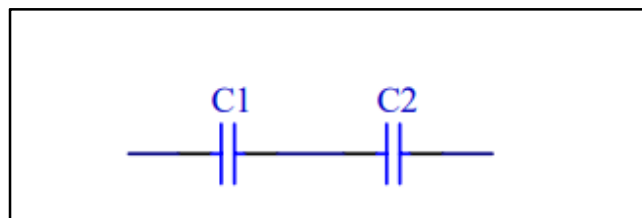


Figure 2.12 :Circuit équivalent simplifié d'un supercondensateur[18]

Le matériau d'électrodes le plus utilisé actuellement, en ce qui concerne la technologie, est le charbon actif. Les supercondensateurs provenant de cette industrie utilisent le principe de la couche double électrique et sont reconnus comme symétriques. Cela n'indique en aucun cas que les capacités développées à chaque électrode sont identiques. Dans la réalité, les anions étant généralement beaucoup moins hydratés que les cations, ils ont une accessibilité plus facile à la microporosité et présentent une couche d'épaisseur plus faible. De telle sorte que les valeurs de capacité d'anode sont supérieures à celles de cathode.

Il existe également des dispositifs appelés asymétriques, comme illustré dans la **figure 2.13**, où les électrodes sont différentes : une électrode négative polarisable en charbon actif et une électrode positive faradique contenant de l'hydroxyde métallique (par exemple de l'hydroxyde de nickel). Le mode de fonctionnement de ces dispositifs est hybride, avec une électrode négative qui est électrostatique et une électrode positive qui est électrochimique. Par conséquent, la capacitance de

## Chapitre 2 :Généralités sur la pile à combustible et les supercondensateurs

l'électrode positive est considérablement plus élevée que celle de son homologue négative, ce qui constitue donc grandement la capacitance obtenue.

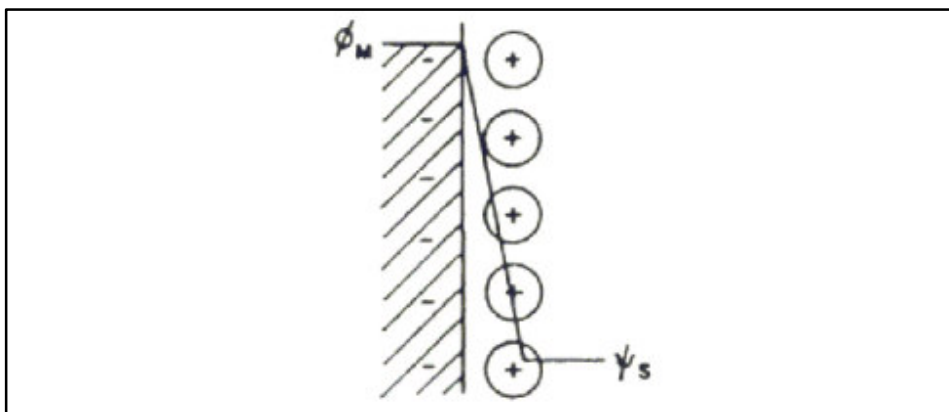


**Figure 2.13** :Supercondensateurs asymétriques ESMA (3200 F - 80000 F, 1,7 V, 1,4 kW) [19]

### 2.3.1.2 Couche double électrique

Selon Helmholtz en 1853, les supercondensateurs à couche double électrique sont basés sur les caractéristiques capacitives de l'interface entre un conducteur électronique solide et un conducteur ionique liquide. Les ions de l'électrolyte sont répartis au niveau de la surface de chaque électrode, sous l'effet électrostatique de la tension appliquée, pour stocker l'énergie.

Le physiologiste et physicien allemand Hermann Von Helmholtz étudia pour la première fois la capacité de l'interface entre un conducteur électronique solide et un conducteur ionique liquide. Il représenta cette interface par deux répartitions superficielles de charges, l'une électronique côté électrode, l'autre ionique et de signe opposé côté électrolyte **figure 2.14**.

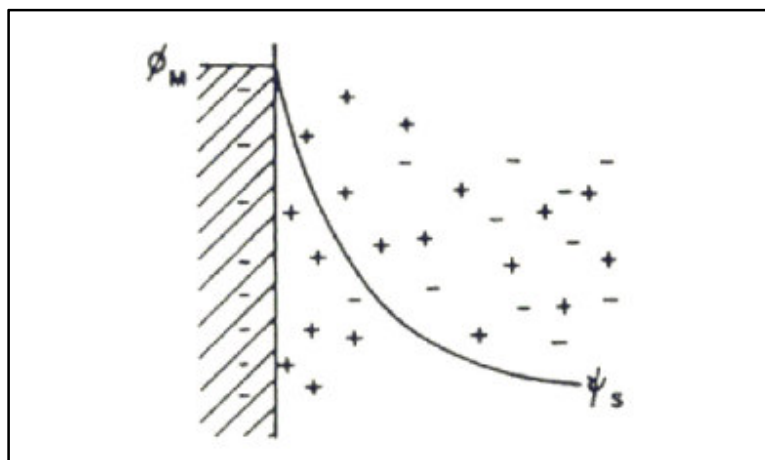


**Figure 2.14** :Modèle de Helmholtz de la couche double électrique[20]

## Chapitre 2 : Généralités sur la pile à combustible et les supercondensateurs

La représentation de la capacité surfacique est d'une part linéaire, ce que l'expérience ne confirme pas, et d'autre part supérieure de plus d'un ordre de grandeur à celles observées expérimentalement. La principale difficulté réside dans l'hypothèse selon laquelle les charges se trouvent dans le voisinage immédiat de l'interface, ce qui n'est pas vérifié du côté de l'électrolyte, ce qui entraîne une faible conductivité électrique.

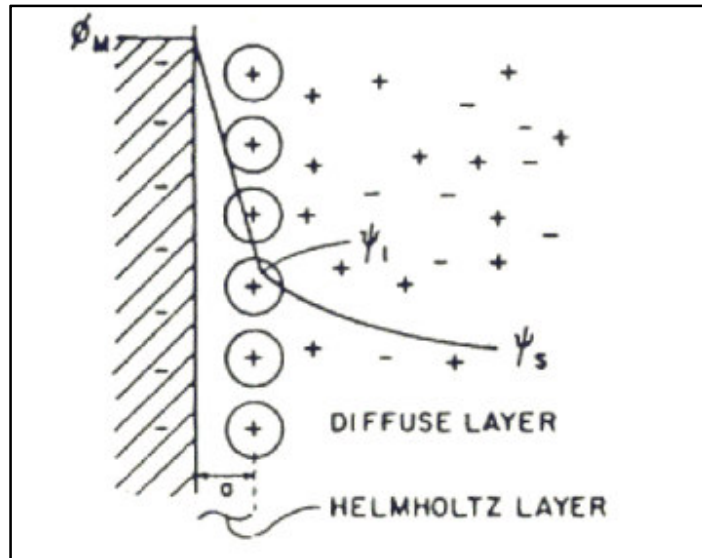
En 1910, Gouy introduisit, dans l'analyse du comportement capacitif de la couche double électrique, la statistique de Boltzmann, c'est-à-dire la probabilité de présence d'un ion en un point de l'espace, en raison de l'agitation thermique. Il proposa donc une répartition volumique des charges dans l'électrolyte, une répartition appelée aujourd'hui couche diffusée **figure 2.15**. Chapman développa en 1913 la formulation mathématique de la couche diffusée de Gouy, qui repose sur le traitement conjoint de l'équation de Poisson et de la fonction de distribution de Boltzmann. Dans le cas d'électrolytes dilués, la modélisation obtenue surestime la capacité liée à la couche double électrique, à l'exception des faibles valeurs de potentiel. Différentes raisons expliquent cela, dont la principale est liée à la façon dont les ions sont traités comme des charges ponctuelles, sans dimension, et donc infiniment proches pour certains de l'interface.



**Figure 2.15** : Modèle de Gouy et Chapman de la couche double électrique[20]

En 1924, Stern améliora la théorie de Gouy et Chapman en ajoutant les dimensions des ions et des molécules du solvant et en séparant la charge d'espace en deux zones : une couche compacte, ou couche de Helmholtz, composée d'ions adsorbés à la surface de l'électrode, et la couche diffusée telle que définie par Gouy et Chapman **figure 2.15**.

## Chapitre 2 :Généralités sur la pile à combustible et les supercondensateurs



**Figure 2.16** :Modèle de Stern de la couche double électrique[20]

En conjonction avec la capacité  $C_{diff}$  de la couche diffusée, la capacité surfacique  $C_{dl}$  de la couche double électrique est formée d'une capacité  $C_H$  associée à la couche compacte, de la même nature que celle recommandée par Helmholtz :

$$\frac{1}{C_{dl}} = \frac{1}{C_H} + \frac{1}{C_{diff}} \quad (2.10)$$

Dans les systèmes hybrides, les supercondensateurs à double couche électrique (EDLC) sont les plus fréquemment employés dans les applications véhiculaires, où la puissance et la récupération d'énergie sont des éléments essentiels des systèmes. Voici la raison pour laquelle :

- 1 Densité de puissance élevée:** Les supercondensateurs EDLC ont la capacité de générer et d'absorber des quantités d'énergie considérables à une vitesse très rapide, ce qui en fait une option parfaite pour les applications qui requièrent des pics de puissance, tels que les accélérations et les décélérations dans les véhicules hybrides.
- 2 Longue durée de vie:** Les supercondensateurs EDLC offrent une longévité bien supérieure à celle des batteries classiques, ce qui les rend intéressants pour les applications où une durée de vie sans entretien est requise, telle que dans les véhicules.
- 3 Récupération d'énergie au freinage:** Le stockage de l'énergie récupérée lors du freinage ou du ralentissement du véhicule est rendu possible grâce aux supercondensateurs. Ensuite, cette

## Chapitre 2 : Généralités sur la pile à combustible et les supercondensateurs

énergie peut servir à aider au démarrage ou à accélérer, ce qui permet de diminuer la charge sur le moteur principal et d'améliorer l'efficacité globale du système hybride.

- 4 Faible poids et encombrement:** Il est courant que les supercondensateurs soient plus légers et plus encombrants que les batteries, ce qui est avantageux dans les applications où l'espace et le poids sont limités, comme dans les véhicules.

### **2.3.2 Technologie des supercondensateurs**

Les supercondensateurs sont distingués selon plusieurs critères : les matériaux utilisés pour les électrodes, l'électrolyte et la membrane. Dans cette partie, nous faisons la liste de ces diverses technologies.

#### **2.3.2.1 Matériaux d'électrodes**

La performance des supercondensateurs est grandement influencée par les matériaux utilisés pour les électrodes. Voici certains des matériaux d'électrodes les plus couramment employés dans les supercondensateurs :

##### **1 Carbone activé**

Le carbone activé est l'une des substances les plus fréquemment employées dans les électrodes de supercondensateurs. Sa particularité réside dans sa surface spécifique élevée et sa porosité élevée, ce qui favorise une adsorption efficace des ions électrolytiques. Les supercondensateurs à double couche électrique (EDLC) sont principalement employés avec du carbone activé.

##### **2 Graphène**

Le graphène, une feuille hexagonale de carbone monoatomique, possède une conductivité électrique remarquable et une surface spécifique importante. En utilisant des électrodes en graphène, il est possible d'accroître la densité d'énergie et la capacité spécifique des supercondensateurs, notamment dans les applications qui exigent des performances élevées.

##### **3 Oxydes de métaux conducteurs**

Certaines électrodes pseudocapacitives sont fabriquées à partir d'oxydes de métaux tels que l'oxyde de ruthénium ( $RuO_2$ ), l'oxyde de manganèse ( $MnO_2$ ), l'oxyde de cobalt ( $Co_3O_4$ ) et l'oxyde de

## Chapitre 2 :Généralités sur la pile à combustible et les supercondensateurs

nickel (NiO). Ces matériaux favorisent des réactions rédox rapides avec l'électrolyte, ce qui entraîne une augmentation de la densité d'énergie des supercondensateurs.

### **4 Polymères conducteurs**

Les supercondensateurs sont fabriqués à partir de polymères conducteurs tels que le polypyrrole (PPy), Le polyaniline (PANI) et le polythiophène (PTh). Certains d'entre eux proposent une combinaison de grande capacité spécifique et de propriétés mécaniques souples.

### **5 Nanotubes de carbone**

La structure tubulaire des nanotubes de carbone est unique, avec une surface spécifique importante et une conductivité électrique élevée. Les supercondensateurs sont utilisés comme matériaux d'électrodes afin d'améliorer leurs performances en augmentant leur capacité spécifique et leur conductivité électrique.

### **6 Composites**

On utilise fréquemment des matériaux composites, qui combinent diverses structures et caractéristiques, afin d'optimiser les performances des électrodes de supercondensateurs. Prenons l'exemple de composites de carbone activé avec du graphène ou des nanotubes de carbone qui peuvent améliorer à la fois la conductivité électrique et la capacité spécifique respectivement.

### **7 Electrolyte**

Dans les supercondensateurs, la sélection de l'électrolyte varie en fonction de l'utilisation particulière. Les électrolytes aqueux sont généralement des sels solubles dans l'eau, tandis que les électrolytes organiques sont constitués de solvants organiques tels que l'acétonitrile ou le propylène carbonate. La prise de cette décision revêt une importance capitale car elle a un impact direct sur les performances et la longévité du dispositif, en impactant des éléments tels que la conductivité ionique et la qualité électrochimique.

### **8 Séparateur**

Les supercondensateurs sont constitués d'une membrane isolante poreuse qui joue le rôle de conductrice ionique, séparant ainsi les deux électrodes remplies d'électrolyte. Dans un environnement organique, cette membrane peut être constituée de polymères ou de papier, tandis que dans un environnement aqueux, des matériaux couramment utilisés sont la céramique ou la

## Chapitre 2 : Généralités sur la pile à combustible et les supercondensateurs

fibre de verre. Le fonctionnement du supercondensateur est influencé par des éléments tels que la porosité et l'épaisseur de la membrane, ce qui a un impact significatif sur la résistance globale du composant.

### **2.4 Conclusion**

Dans ce chapitre on a pressenti les généralités sur les piles à combustible, les batteries et les supercondensateurs. En conclu que:

Le PEMFC est le type des piles à combustibles plus utilise dans les systèmes hybrides pour applications véhiculaires.

Dans le système hybride en utilise beaucoup plus des supercondensateurs par rapport à des batteries à cause de leurs Densité de puissance, temps de charge et de décharge très rapide, Rendement de charge et de décharge, durée de vie élevée.

Dans les applications véhiculaires, où la puissance et la récupération d'énergie sont des facteurs critiques, les supercondensateurs à double couche électrique (EDLC) sont les plus couramment utilisés dans les systèmes hybrides

## **Chapitre 3 : Modélisation de système**



### **3.1 Introduction**

Ce chapitre divisé en trois parties se concentre sur la gestion des convertisseurs DC-DC employés dans les véhicules hybrides.

Le chapitre aborde en premier lieu la pile à combustible, qui est connectée à un hacheur élévateur qui permet de réguler la tension de bus continu à l'aide d'un régulateur de type PI, et les supercondensateurs, qui sont connectés à un hacheur réversible en courant, permettent de produire ou de récupérer le surplus de la puissance de charge.

En deuxième lieu on associe les deux source (la pile à combustible et le supercondensateur).

En troisième lieu on se concentre sur la gestion d'énergie de système finale.

### **3.2 Description de la structure du système hybride**

Un système hybride, également appelé système multi-sources, est constitué d'un ensemble de sources qui assurent les énergies en régime permanent, transitoire et impulsif, absorbées ou fournies par la charge. Dans notre étude, nous concentrons uniquement sur les structures parallèles, utilisant principalement une pile à combustible (PàC) accompagnée d'une source d'énergie impulsionnelle réversible, composée de supercondensateurs (SC).

Les structures parallèles PàC /SC sont présentes sous trois formes : la structure parallèle directe, la structure parallèle à deux convertisseurs et la structure parallèle à un convertisseur. Dans notre situation, nous restons limités à la configuration parallèle avec deux convertisseurs.

Structure parallèle à deux convertisseurs **Figure 3.1:** Elle implique d'intégrer un convertisseur statique à chaque source. Le convertisseur dédié à la PàC est unidirectionnel en puissance et fonctionne en mode élévateur de tension. Le convertisseur qui est relié aux SC agit en survolteur lorsque ces derniers fournissent une partie de la puissance motrice, et en dévolteur lorsque les SC récupèrent l'énergie de freinage ou lorsqu'ils sont chargés par la PàC. Grâce à cette structure, on peut parfaitement contrôler la puissance de chaque source. Cependant, cette structure présente des désavantages tels que les pertes inévitables liées à chaque convertisseur statique et un coût plus élevé. Plus

## Chapitre 3 : Modélisation de système hybride (PEMFC et SC)

précisément, la source permanente (PàC) perd constamment de la puissance en raison des pertes de son convertisseur.

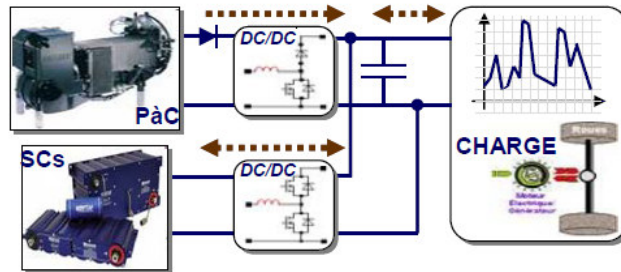


Figure 3.1 : Structure parallèle à deux convertisseurs

### 3.3 Modélisation des convertisseurs statiques

Pour intégrer les sources d'énergie renouvelable telles que la pile à combustible, la batterie dans les systèmes électriques, il est essentiel de les connecter au bus continu de tension. Cependant, cela nécessite souvent d'augmenter leur tension respective, car elles ont généralement une tension inférieure à celle du bus continu.

#### 3.3.1 Convertisseur DC/DC boost

##### 3.3.1.1 Source embarquée utilisant une Pile à combustible [30]

Le schéma de fonctionnement de l'hacheur survolteur est illustré sur la Figure 3.2. Il est employé d'abord pour réguler le niveau de tension et ensuite pour faire fonctionner la pile à combustible à son maximum de puissance.

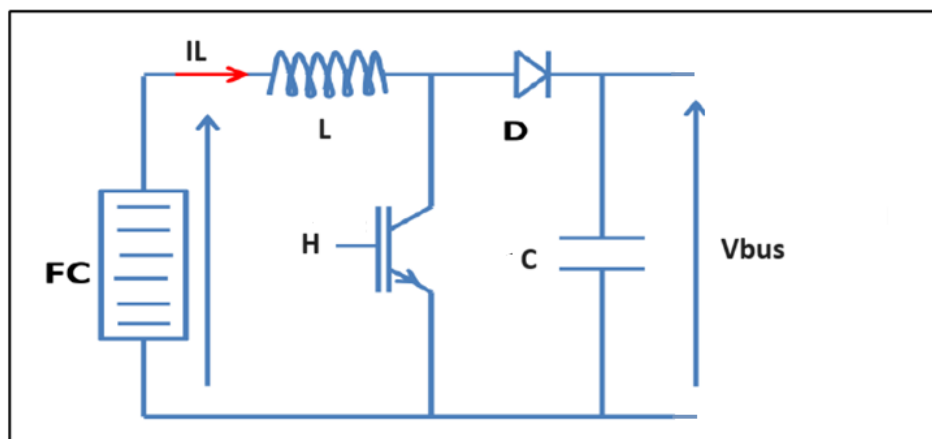
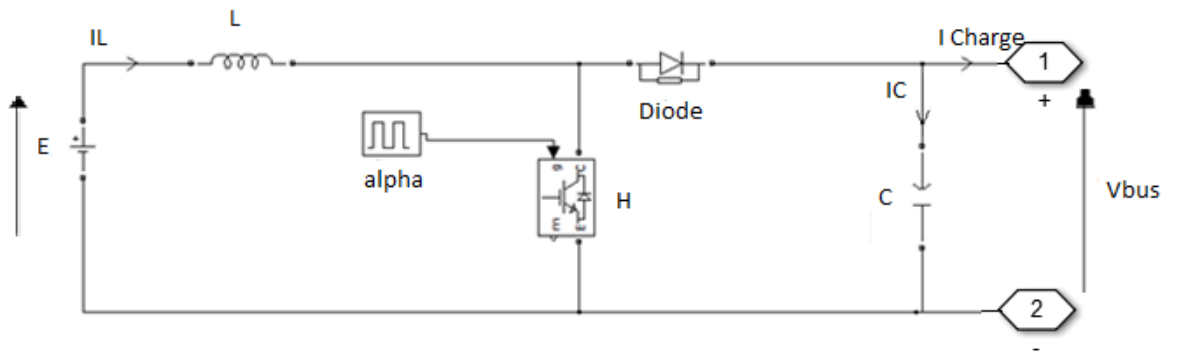


Figure 3.2 : Schéma électrique du convertisseur boost

### Chapitre 3 : Modélisation de système hybride (PEMFC et SC)

La modélisation de ce convertisseur nécessite l'examen des diverses séquences de fonctionnement, lesquelles sont considérées comme ayant une durée déterminée par la commande  $\alpha$ . En raison de la configuration de l'interrupteur H, deux séquences de fonctionnement distinctes se manifestent, chacune pouvant être caractérisée par une équation différentielle spécifique.

Le circuit du convertisseur Boost ou hacheur élévateur est représenté par la **Figure 3.3**



**Figure 3.3 :** Schéma de principe de Convertisseur boost

$$\begin{cases} L \frac{dI_L}{dt} = V_e - V_{bus}(1 - \alpha) \\ C \frac{dV_{bus}}{dt} = I_L(1 - \alpha) - I_{bus} \end{cases} \quad (3.1)$$

$$\begin{cases} \frac{dI_L}{dt} = \frac{1}{L} (V_e - V_{bus}(1 - \alpha)) \\ \frac{dV_{bus}}{dt} = \frac{1}{C} (I_L(1 - \alpha) - I_{bus}) \end{cases} \quad (3.2)$$

$$\begin{cases} \frac{dI_L}{dt} = \frac{1}{L} V_e - \frac{1}{L} V_{bus}(1 - \alpha) \\ \frac{dV_{bus}}{dt} = \frac{1}{C} I_L(1 - \alpha) - \frac{1}{C} I_{bus} \end{cases} \quad (3.3)$$

Soit  $\mathbf{X}_1 = I_L$  et  $\mathbf{X}_2 = V_{bus}$

Alors les équations d'état serrent :

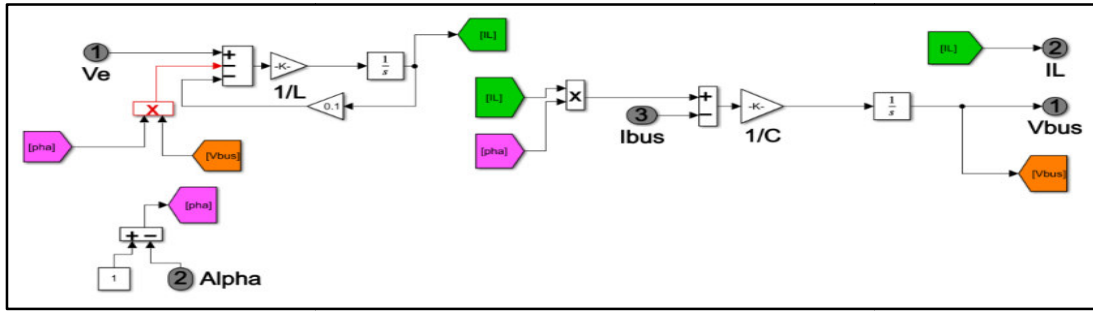
$$\begin{cases} \dot{X}_1 = \frac{1}{L} V_e - \frac{1}{L} X_2(1 - \alpha) \\ \dot{X}_2 = \frac{1}{C} X_1(1 - \alpha) - \frac{1}{C} I_{bus} \end{cases} \quad (3.4)$$

## Chapitre 3 : Modélisation de système hybride (PEMFC et SC)

Alors la représentation classique en espace d'état  $\dot{X} = Ax + Bu + Cy$  de (3.4) se transforme en :

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{(1-\alpha)}{L} \\ \frac{(1-\alpha)}{C} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} V_e - \frac{1}{C} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} I_{bus} \quad (3.5)$$

Les paramètres du système sont l'inductance  $L$  en [H], la capacité du condensateur  $C$  en [F]. Les variables d'état c'est le courant dans la bobine  $iL$  et la tension aux bornes de la charge  $V_{bus}$ . le signal de contrôle  $\alpha$  est compris dans le domaine discret de  $\{0; 1\}$  et il indique l'état de l'interrupteur  $H$  : ouvert pour 0 et fermé pour 1. La Figure 3.4 présente la réalisation Simulink de (3.4) :



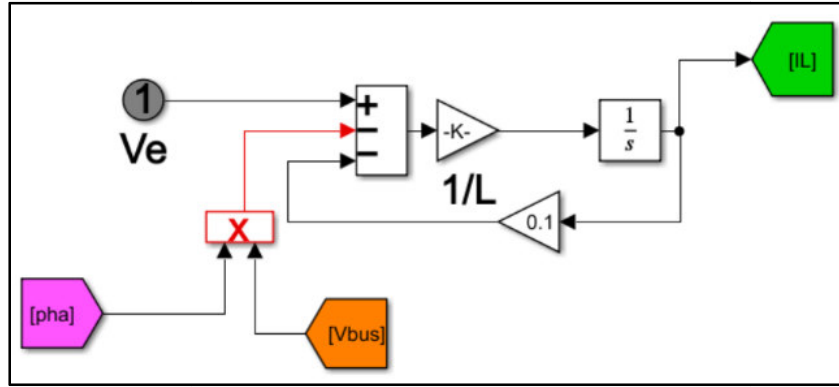
**Figure 3.4** :Schéma bloc du convertisseur élévateur

### 3.3.1.2 Commande du convertisseur DC/DC boost

Dans la régulation de la tension du bus continu, il est couramment préférable que le convertisseur fonctionnant avec une commande de tension produise une puissance minimale qui n'est pas nulle. Il serait plus adéquat d'employer le convertisseur unidirectionnel pour réguler la tension du bus continu, étant donné que le convertisseur réversible de courant est associé à une source bidirectionnelle. La régulation du convertisseur doit être élaborée de manière à stabiliser la tension du bus à son niveau de référence, même en présence de fluctuations de la source et de demandes de puissance sur le bus continu.

#### 1 Boucle de courant

Il faut considérer le schéma bloc ci-dessous **Figure 3.5**, Pour le contrôle du courant :



**Figure 3.5 :** Schéma bloc de la boucle de courant

Pour simplifier la conception d'un correcteur, il est habituel de rendre linéaire le comportement du système en appliquant un modèle inverse en amont de la variable  $\alpha$ . Cette méthode de linéarisation assure un transfert unitaire entre la sortie du régulateur et la tension  $V_L$  (i.e., la tension aux bornes de l'inductance de lissage  $L$ ). Pour parvenir à cet objectif, il faut identifier une formulation adaptée. En d'autres termes, il convient de poser :

$$V_L = V_e - V_{bus}(1 - \alpha) \quad (3.6)$$

$$V_{bus}(1 - \alpha) = V_e - V_L \quad (3.7)$$

$$\alpha = \frac{V_L - V_e}{V_{bus}} + 1 \quad (3.8)$$

$$\alpha = \frac{V_{L\_ref} - V_{e\_mes}}{V_{bus\_mes}} + 1 \quad (3.9)$$

Où :  $V_{L\_ref}$  est une nouvelle grandeur de commande représentant la référence de tension aux bornes de l'inductance.

Ainsi nous obtenons un transfert linéaire entre  $V_{L\_ref}(p)$  et  $iL(p)$ .

$$C_1(p) = \frac{I_L(p)}{V_{L\_ref}(p)} = \frac{I_L(p)}{L \frac{dI_L}{dt}(p)} = \frac{1}{Lp} \quad (3.10)$$

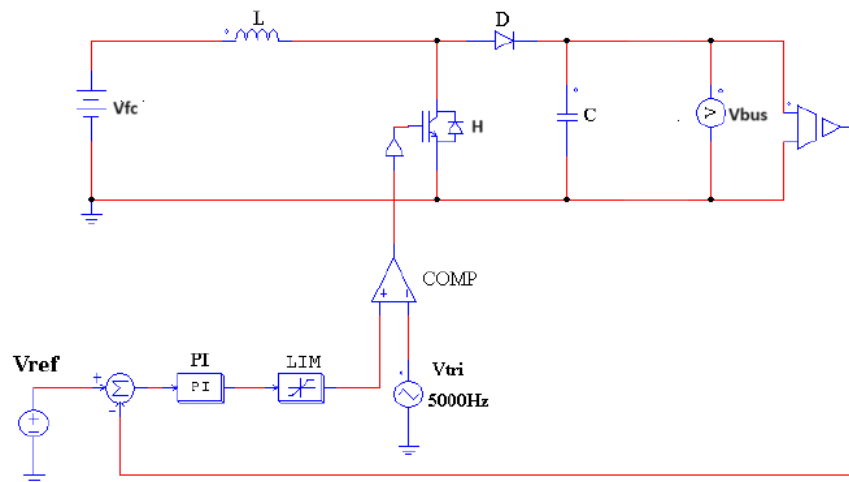
Le régulateur employé dans ce contexte est de type Proportionnel-Intégral (PI). De plus, une saturation est appliquée au rapport cyclique afin de considérer la limite de gain du convertisseur, qui est définie sur l'intervalle  $(0.05 \leq \alpha \leq 0.95)$ . La **Figure 3.6** présente le schéma de la boucle de régulation en courant. Les coefficients  $K_{pi}$  et  $K_{ii}$

## Chapitre 3 : Modélisation de système hybride (PEMFC et SC)

du correcteur sont calculés en appliquant la méthode de contrôle basée sur le modèle interne, comme décrit en détail dans la section sur le dimensionnement.

### 2 Boucle de tension

En se basant sur l'erreur sur la consigne de courant et après avoir été relié à un relais pour atteindre une valeur comprise entre 0 et 1, ce signal est utilisé directement comme commande pour l'interrupteur.



**Figure 3.7 :**Régulation de la tension du bus par hacheur

Pour le contrôle de tension, il faut considérer le schéma bloc suivant

### Chapitre 3 : Modélisation de système hybride (PEMFC et SC)

En supposant une boucle de courant parfaite, la conception du régulateur de tension suppose que le courant circulant dans l'inductance est équivalent à  $i_{L\_ref}$  en termes de valeurs moyennes. Puisque la tension moyenne aux bornes de l'inductance est nulle, cela signifie que la tension aux bornes de l'interrupteur est égale à la tension de la pile  $V_H = V_e$  et que la tension du bus est égale à  $V_H = V_{bus}(1 - \alpha)$ . En tenant compte de ces informations, on peut déduire que  $(1 - \alpha) = V_e / V_{bus}$ .

Nous pouvons linéariser cette boucle en utilisant la même méthode que celle utilisée pour la boucle de courant. À travers la loi des nœuds :

$$I_L(1 - \alpha) = I_c + I_{bus} \quad (3.11)$$

$$I_L \frac{V_e}{V_{bus}} = I_c + I_{bus} \quad (3.12)$$

$$I_L = \frac{V_{bus}}{V_e} (I_c + I_{bus}) \quad (3.13)$$

$$I_{L\_ref} = \frac{V_{bus\_mes}}{V_{e\_mes}} (I_{c\_ref} + I_{bus\_mes}) \quad (3.14)$$

Ainsi nous obtenons une relation linéaire entre  $I_{c\_ref}(p)$  et  $V_{bus}(p)$ .

$$C_2(p) = \frac{V_{bus}(p)}{I_{c\_ref}(p)} = \frac{V_{bus}(p)}{C \frac{dV_{bus}(p)}{dt}} = \frac{1}{Cp} \quad (3.15)$$

Les grandeurs  $V_{bus\_mes}$ ,  $V_{e\_mes}$  et  $I_{bus\_mes}$  représentent les valeurs moyennes des tensions et des courants de bus DC et de la source.

Le correcteur présente la même structure que celle utilisée précédemment pour la boucle de courant.

De manière similaire, les gains  $K_p$  et  $K_i$  sont calculés en utilisant la méthode expliquée dans la section sur le dimensionnement. De plus, une fonction d'anti-saturation est mise en place.

La figure suivante illustre le schéma bloc du convertisseur intégrant les divers blocs mentionnés précédemment. Ce schéma facilite la mise en œuvre du contrôle global du convertisseur DC/DC boost.

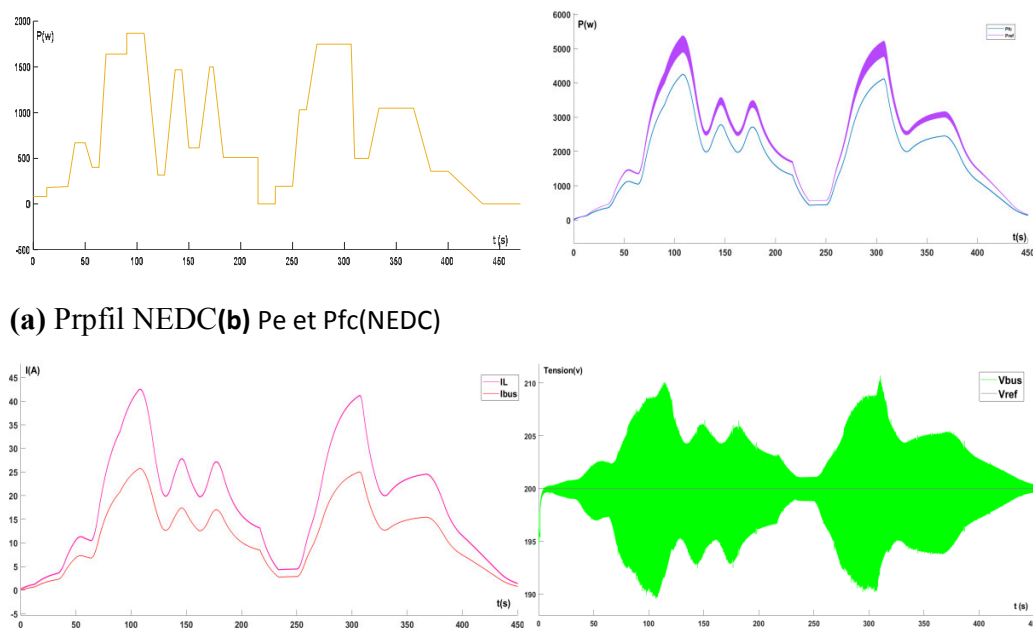
### 3.3.1.3 Résultat de simulation de convertisseur DC/DC boost

La **figure 3.11(a)** illustre le profil NEDC de puissance de véhicule choisie pour faire la simulation de la pile à combustible seul.

La **figure 3.11(b)** illustre la puissance de la pile à combustible ( $P_{fc}$ ) qui suit en approche la trajectoire de puissance de référence d'entre ( $P_e$ ), qui conformes parfaitement au profil NEDC de puissance.

La **figure 3.11(c)** illustre le courant de la bobine ( $IL$ ) qui suit la même trajectoire par rapport à ça référence ( $I_{bus}$ ), même si les valeur de  $IL$  est presque le double de  $I_{bus}$ , qui conformes aussi parfaitement au profil NEDC de puissance.

La **figure 3.11(d)** illustre la tension résultant de la pile a combustible ( $V_{fc}$ ) qui suit la même trajectoire par rapport à ça tension de référence ( $V_e$ )



(a) Prpfil NEDC(b)  $P_e$  et  $P_{fc}$ (NEDC)

(c)  $I_{bus}$  et  $IL$  (NEDC)(d)  $V_{fc}$  et  $V_{ref}$  (NEDC)

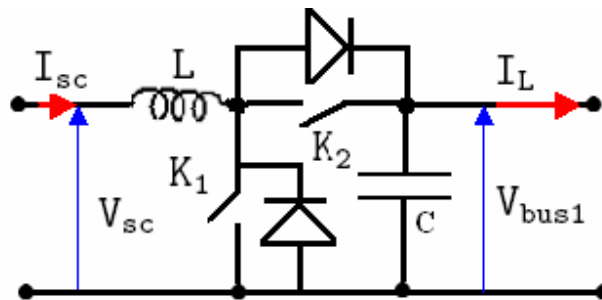
**Figure 3.11 :** Allures des puissances, tensions et des courants obtenues par simulation pour le profil NEDC de puissance



### 3.3.2 Convertisseur DC/DC bidirectionnel en courant

#### 3.3.2.1 Source embarquée utilisant un supercondensateur

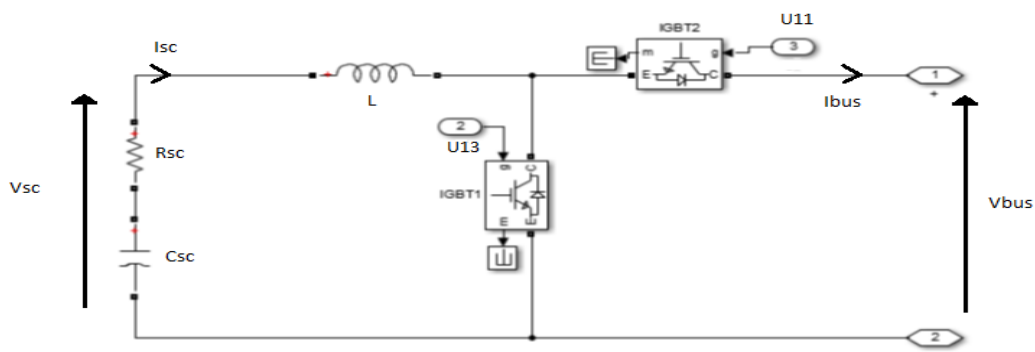
Le fonctionnement du convertisseur dévolteur-survolteur dépend du courant continu circulant dans l'inductance de lissage  $L$ , et il ne s'annule pas pendant la période. Seul le mode de conduction continu est traité dans le cadre de notre étude.



**Figure 3.12 :** Schéma électrique du convertisseur buck-boost

La connexion des éléments de stockage au bus continu nécessite l'utilisation d'un convertisseur statique réversible en courant. L'importance de cette disposition réside dans le fait que cette source d'énergie bidirectionnelle peut être chargée ou déchargée.

Le modèle de supercondensateur utilisé dans cet exemple est caractérisé par une capacité constante  $C_{sc}$  et une résistance  $R_{sc}$  placée en série. On présente cette disposition sous forme de schéma afin de faciliter sa visualisation et sa compréhension.



**Figure 3.13 :** Schéma électrique du convertisseur bidirectionnel

### 3.3.2.2 Modélisation du convertisseur DC/DC bidirectionnel en courant

La modélisation mathématique de ce convertisseur révèle deux modes de fonctionnement distincts : Un mode de réduction est utilisé lorsque le supercondensateur reçoit de l'énergie provenant du bus DC, tandis qu'un mode d'élévation est utilisé lorsque le supercondensateur fournit de l'énergie sur le bus DC. Afin d'accomplir cela, nous employons une méthode de modélisation similaire à celle utilisée pour le convertisseur DC/DC boost, en définissant les variables binaires  $u_{11}$  et  $u_{13}$  afin de représenter l'état de conduction des interrupteurs.

#### 1 Fonctionnement réducteur de tension

$$\begin{cases} \frac{dI_{sc}}{dt} = -\frac{R_{sc}}{L} I_{sc} + \frac{1}{L} V_c - \frac{1}{L} V_{bus} u_{11} \\ \frac{dV_c}{dt} = -\frac{I_{sc}}{C_{sc}} \end{cases} \quad (3.16)$$

#### 2 Fonctionnement élévateur de tension

$$\begin{cases} \frac{dI_{sc}}{dt} = -\frac{R_{sc}}{L} I_{sc} + \frac{1}{L} V_c - \frac{1}{L} V_{bus} (1 - u_{13}) \\ \frac{dV_c}{dt} = -\frac{I_{sc}}{C_{sc}} \end{cases} \quad (3.17)$$

En substituant la variable  $u_3$  par  $(1 - u_{13})$ , les deux modèles mathématiques deviennent identiques. Ce changement sera effectué dans la stratégie de commande pour n'utiliser qu'un seul régulateur. Ainsi, on peut représenter le système en utilisant la valeur  $u$  pour traduire la valeur moyenne de la commande  $u_3$ , de la manière suivante :

$$\begin{cases} \frac{dI_{sc}}{dt} = -\frac{R_{sc}}{L} I_{sc} + \frac{1}{L} V_c - \frac{1}{L} V_{bus} u \\ V_c = \frac{d(-\frac{I_{sc}}{C_{sc}})}{dt} \end{cases} \quad (3.18)$$

Et :

$$V_{sc} = V_c - R_{sc}I_{sc} \quad (3.19)$$

Alors :

$$\begin{cases} \frac{dI_{sc}}{dt} = \frac{1}{L} V_{sc} - \frac{1}{L} V_{bus}u \\ V_{sc} = \frac{d(-\frac{I_{sc}}{C_{sc}})}{dt} - R_{sc}I_{sc} \end{cases} \quad (3.20)$$

Le schéma du convertisseur bidirectionnel peut être directement déduit du modèle précédent :

La variable Buck/Boost permet de prendre en compte les deux types de comportement dévolteur ou survolteur du montage de manière unifiée.

Parce que les deux modes de fonctionnement sont strictement indépendants, il est envisageable de produire un seul ordre de commande  $u$  pour le convertisseur.

Afin d'accomplir cela, il vous suffit de changer la commande entre l'un des deux modes de fonctionnement en fonction du signe du courant. Il n'y a donc qu'un seul modulateur MLI et une entrée de commande basée sur la variable binaire Buck/Boost qui détermine le mode de fonctionnement. Un relais est utilisé pour calculer cette variable en comparant la référence de puissance (courant) du supercondensateur à une constante égale à zéro.

#### 3.3.2.3 Commande du convertisseur

Ce convertisseur est muni d'un système de commande pour contrôler les flux d'énergie entre le bus DC et l'élément de stockage. Le courant de référence est déterminé en prenant en compte la puissance requise sur le bus DC et la tension aux bornes du supercondensateur. Afin de réguler la puissance du convertisseur, on établit une boucle de courant. Lors de la synthèse des régulateurs, le courant de supercondensateur doit suivre le courant de référence, ce qui entraîne une contrainte de poursuite.

La commande de ce convertisseur est effectuée à l'aide d'une Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) pour garantir une fréquence constante de commande des IGBT. Cette méthode permet de limiter les pertes d'énergie dans les interrupteurs.

#### 1 Contrôle du courant de supercondensateur

### Chapitre 3 : Modélisation de système hybride (PEMFC et SC)

Afin de faciliter la conception du correcteur, nous avons décidé de rendre le comportement du système linéaire en utilisant un modèle inverse en amont de la variable de commande  $u$ . Afin de rendre la conception du correcteur plus facile, nous avons opté pour une linéarisation du comportement du système en utilisant un modèle inverse en amont de la variable de commande  $u$ . Dans cette situation, on suppose que la tension  $V_{bus}$  reste constante car le convertisseur DC/DC élévateur est responsable de la régulation de la tension du bus DC. Afin d'établir un rapport unitaire entre la sortie du régulateur et la tension  $V_L$ , il est nécessaire de trouver une expression adéquate. Grâce à ce processus de linéarisation, la conception du correcteur est simplifiée en simplifiant le modèle mathématique du système.

$$u = \frac{V_{sc\_mes} - V_{L\_ref}}{V_{bus\_mes}} \quad (3.21)$$

$V_{L\_ref}$  Est une nouvelle grandeur de commande qui représente la référence de tension aux bornes de l'inductance.

Ainsi nous obtenons une fonction de transfert linéaire entre  $V_{L\_ref}(p)$  et  $IL(p)$  comme l'équation (3.10).

#### **2 Mise en place du correcteur**

Le système de correction utilisé est de type Proportionnel/Intégral, et une mesure anti-saturation a été mise en place pour éviter toute saturation du signal. La configuration de régulation adoptée est la suivante :

La fonction de changement de mode est donnée comme suit :

$$u = u(\text{buck|boost}) + (1 - u)\overline{(\text{buck|boost})} \quad (3.22)$$

Un switch effectue le changement de mode en comparant le courant de référence à une constante nulle.

Le changement de mode est réalisé dans le bloc de linéarisation.

La figure ci-dessous illustre le schéma de bloc du convertisseur qui est lié aux différents blocs précédemment exposés. Ce diagramme facilite la mise en place du contrôle en courant du convertisseur.

## Chapitre 3 : Modélisation de système hybride (PEMFC et SC)

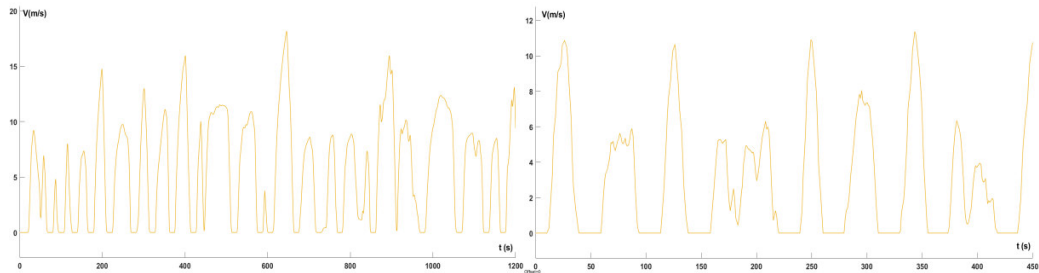
### 3.4 Résultat de simulation

Les figures 3.19 (a, b) illustrent deux profils différent de conduite (Orange bus et Manhattan bus).

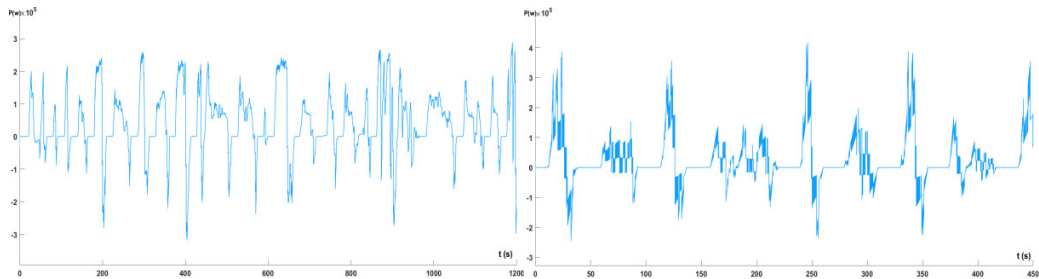
Les figures 3.19 (c, d) illustrent les puissances d'association de PEMFC et SC. Les grandeurs produites par cette association ont la même forme d'onde que les puissances de bus.

En remarque dans les figures 3.19 (c, d, e, f) que les grandeurs produites par les puissances sont parfaitement conformes à sa référence.

Les figure 3.19 (g, h) illustrent les tensions d'association de PEMFC et SC ( $V_{bus}$ ).

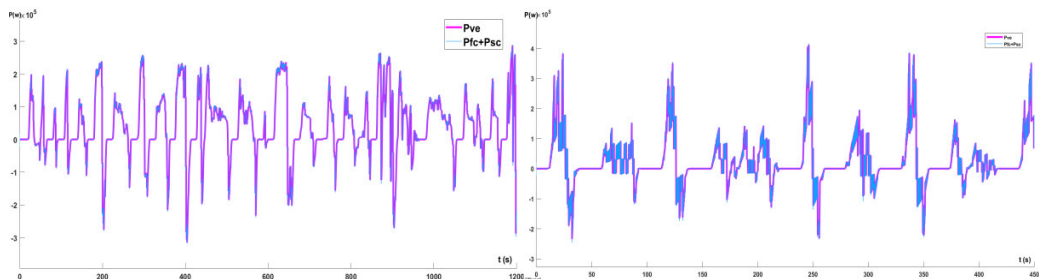


(a) Profile Orange bus (Ob) (b) Profile Manhattan bus (Mb)



(c) Psc+Pfc (Ob)

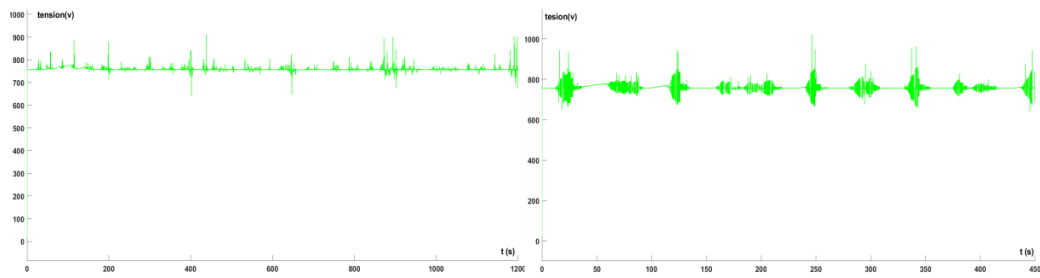
(d) Psc+Pfc (Mb)



(e) Pve et Psc+Pfc (Ob)

(f) Pve et Psc+Pfc (Mb)

### Chapitre 3 : Modélisation de système hybride (PEMFC et SC)



(g)  $V_{bus}$  (Ob)

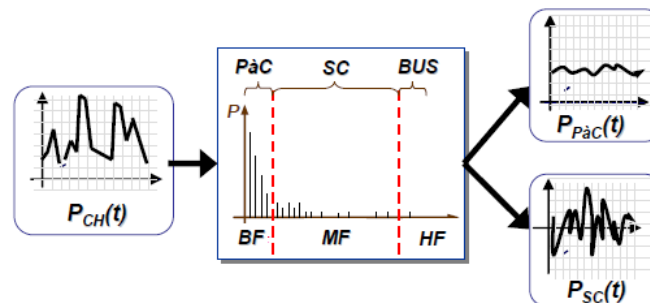
(h)  $V_{bus}$  (Mb)

**Figure 3.19 :** Allures des puissances de tensions obtenues par simulation pour les deux profils de Conduite (Orange bus et Manhattan bus)

### 3.5 Gestion d'énergie

Le principe de la gestion d'énergie consiste à répondre de manière optimale aux besoins énergétiques d'un système en répartissant efficacement la puissance entre les différentes sources disponibles. Cette gestion vise à garantir une alimentation continue et fiable en puissance requise par la charge, tout en tenant compte des contraintes opérationnelles spécifiques. Parmi ces contraintes figurent les limites de puissance des différentes sources, comme les piles à combustible, et les niveaux de charge des dispositifs de stockage, tels que les supercondensateurs.

Dans cette architecture **Figure 3.1** semble parfaitement satisfaire aux exigences évoquées. À hautes fréquences (HF, > kHz), le supercondensateur gère les pics de puissance et les fluctuations rapides de la demande énergétique, fréquences moyennes (MF) : Utilisation du supercondensateur avec des convertisseurs adaptés pour répondre aux besoins énergétiques et à basses Fréquences (BF, inférieures à Hz) : La pile à combustible assure une puissance continue et stable, répondant aux besoins énergétiques constants et à long terme.



**Figure 3.20 :** Principe de base de la décomposition fréquentielle

Le supercondensateur est essentiel pour la gestion de l'énergie excédentaire et la récupération d'énergie. Lorsque la demande est faible, l'énergie excédentaire produite par la pile à combustible est stockée dans le supercondensateur. De plus, lors de processus comme le freinage régénératif, l'énergie récupérée est également stockée dans le supercondensateur pour être utilisée ultérieurement pendant les pics de demande. Ainsi, le supercondensateur optimise l'utilisation et la récupération de l'énergie.

#### **3.6 Résultat de simulation**

Nous avons effectué une étude, une modélisation et une simulation complète du système hybride dans l'environnement Matlab/Simulink. Dans le but de réaliser la simulation, nous avons utilisé deux cycles de conduite. Ainsi, l'étude se concentrera principalement la réponse transitoire du système PAC/SC.

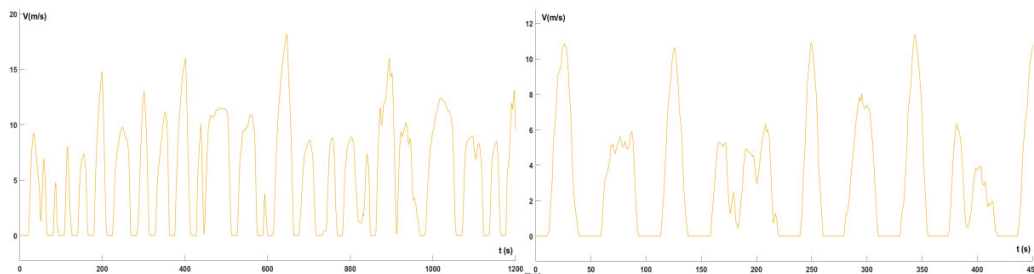
La réponse du système hybride pour les deux cycles de conduite est illustrée par les **Figures (3.22, 3.23 et 3.24)**. Les grandeurs produites par chaque partie du système (courants et puissances) sont parfaitement conformes à sa référence, même lors des pics de puissance importants, que ce soit en mode de traction (puissance positive) ou en mode de freinage par récupération (puissance négative). Chaque fois qu'il y a une phase changement positive de la puissance, on constate une augmentation lente de la puissance/courant de la pile à combustible. Cela est rendu possible grâce à la présence du supercondensateur qui s'adapte immédiatement aux variations soudaines de puissance. Effectivement, ces changements de puissance/courant du supercondensateur offrent la possibilité de changer la puissance nécessaire au système de traction (**Figures 3.22(e-f) et Figures 3.23(c-d)**). Ainsi, la transmission d'énergie du supercondensateur vers le bus DC fonctionne de manière



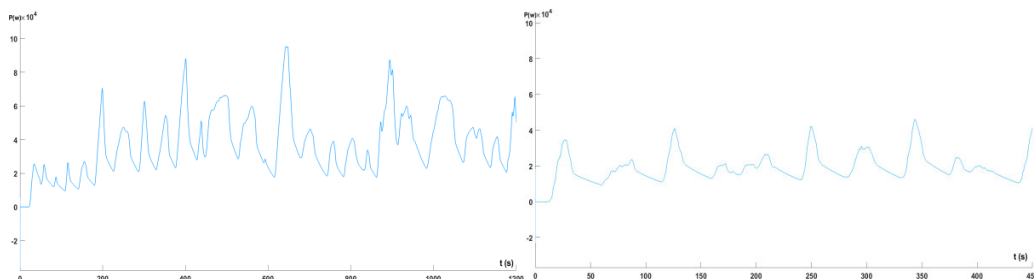
### Chapitre 3 : Modélisation de système hybride (PEMFC et SC)

optimale et permet de compenser le manque d'énergie causé par la lenteur de la dynamique de la pile à combustible (**Figures 3.22(c-d)** et **Figures 3.23(a-b)**). Ce phénomène peut être également observé les phases transitoires négatives. En d'autres mots, le supercondensateur absorbe toutes les puissances : la puissance fournie par le système de traction et celle fournie par la pile à combustible. Par la suite, cette puissance sera utilisée Pour satisfaire le manque de puissance du véhicule causé par Ce processus de la Pile à combustible pendant les périodes de traction.

La pile à combustible génère une tension relativement constante, par contre les supercondensateurs ont une tension nominale plus basse que les piles à combustible. La tension de la PEMFC peut varier légèrement en fonction de la charge, mais elle reste principalement stable sur une période de fonctionnement donnée. Contrairement sur les supercondensateurs peuvent absorber des variations de tension plus importantes et sont capables de se charger et se décharger rapidement. Le supercondensateur agit souvent comme un accumulateur intermédiaire entre la pile à combustible et les systèmes électriques du véhicule. Il aide à stabiliser la tension fournie aux composants du véhicule en lissant les variations de tension provenant de la pile à combustible.

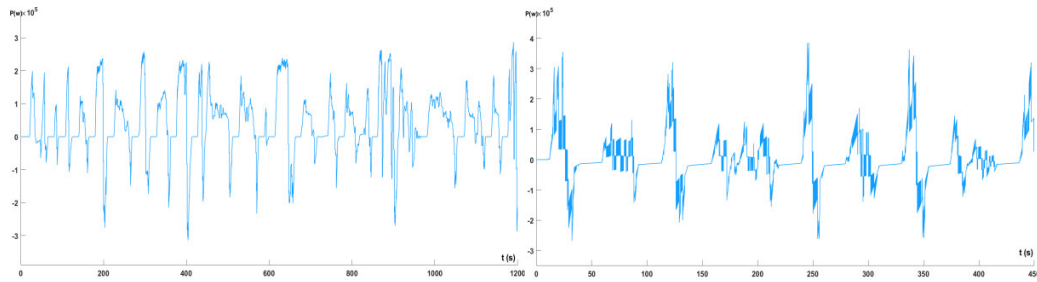


**(a)** Profile Orange bus(Ob)**(b)**Profile Manhattan bus(Mb)

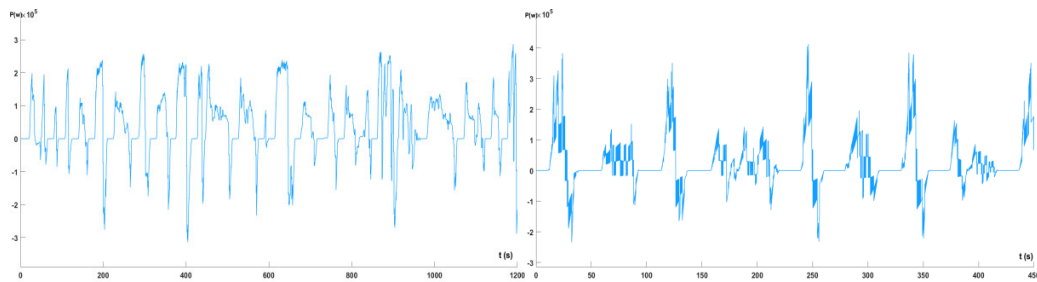


**(c)**Puissance PEMFC(Ob)**(d)**Puissance PEMFC (Mb)

### Chapitre 3 : Modélisation de système hybride (PEMFC et SC)

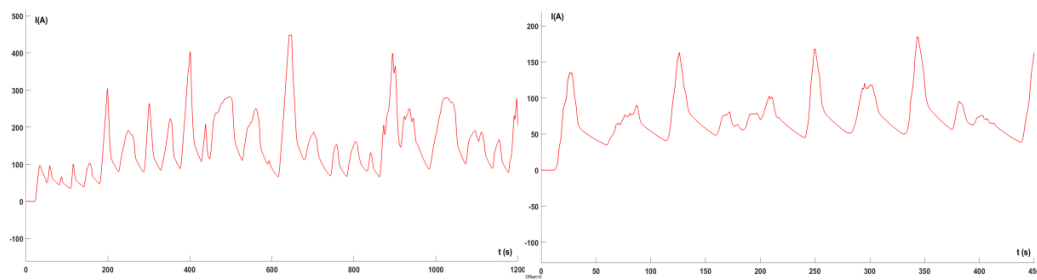


(e) Puissance sc (Ob) (f) Puissance sc (Mb)

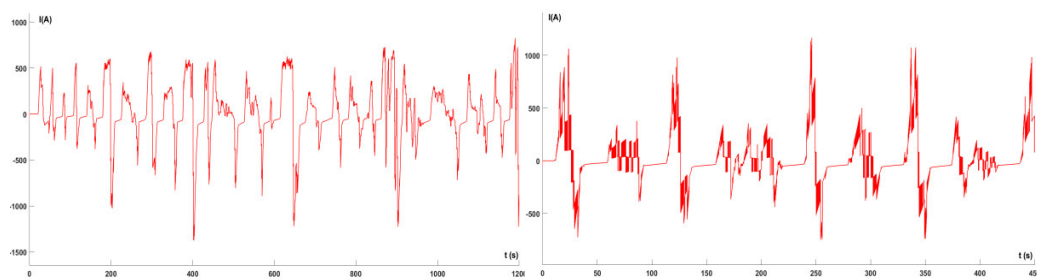


(g) puissance de véhicule électrique (Ob) (h) puissance de véhicule électrique (Mb)

**Figure 3.22 :** Allures des puissances obtenues par simulation pour les deux profils de Conduite (Orange bus et Manhattan bus)

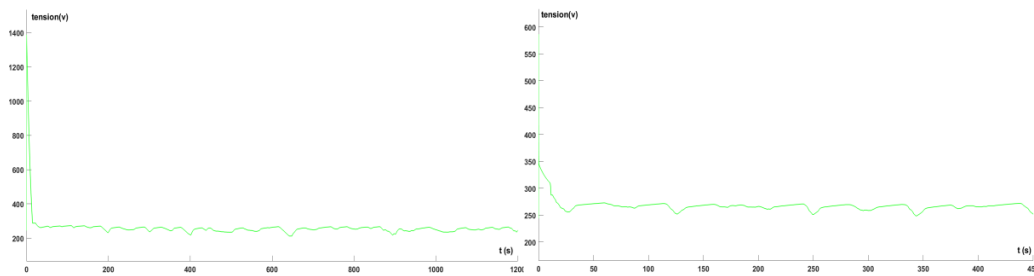


(a) Courant PEMFC (Ob) (b) Courant PEMFC (Mb)

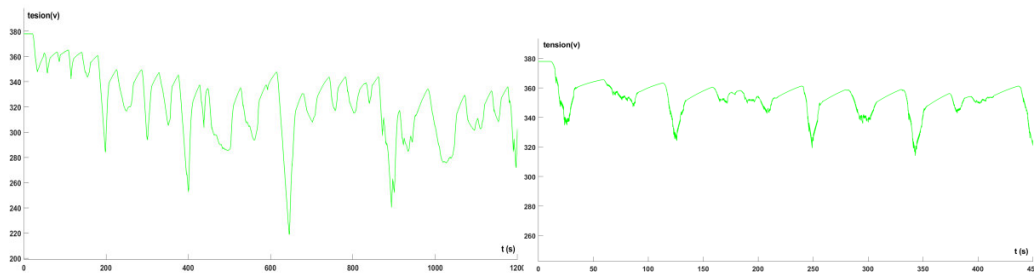


(c) Courant sc (Ob) (d) Courant sc (Mb)

**Figure 3.23 :** Allures des Courants obtenues par simulation pour les deux profils de conduite (Orange bus et Manhattan bus)



**(a)Tension PEMFC(Ob)(b)Tension PEMFC 2(Mb)**



**(c)Tension sc (Ob)(d)Tension sc (Mb)**

**Figure 3.24 : Allures des tensions obtenues par simulation pour les deux profils de Conduite (Orange bus et Manhattan bus)**

### 3.7 Conclusion

Dans le but de commander le système hybride global, Tout d'abord, nous avons mis en place des lois de régulation de la tension et du courant pour les convertisseurs statiques. Grâce à cela, nous avons pu définir des valeurs constantes pour certaines variables d'état, comme la tension du bus, ou établir des trajectoires de référence pour les courants provenant des sources. Ensuite, les courants seront déduits des trajectoires de référence en utilisant les puissances de référence calculées par la stratégie de gestion de l'énergie du système. Cette approche de gestion de l'énergie assure la gestion des flux d'énergie entre toutes les sources et le bus DC, tout en garantissant une gestion optimale de l'énergie stockée dans les systèmes de stockage.

## **Conclusion générale**

Cette étude porte sur l'étude d'une alimentation hybride pour la traction d'un voiture hybride, constitué de deux sources et de deux convertisseur DC-DC. Une pile à combustible est la principale source, tandis qu'un supercondensateur est la source auxiliaire. Notre but principal est de conformes parfaitement la puissance à sa référence, même lors des pics de puissance importants, que ce soit en mode de traction (puissance positive) ou en mode de freinage par récupération (puissance négative). À chaque changement de puissance positive, on observe une augmentation lente de la puissance de la pile à combustible. La présence du supercondensateur permet cela, car il s'ajuste immédiatement aux variations soudaines de puissance. Ces modifications de puissance du supercondensateur permettent de modifier de manière optimale la transmission d'énergie du supercondensateur vers le bus DC, ce qui permet de compenser le manque d'énergie du fait de la lenteur de la dynamique de la pile à combustible.

Dans le chapitre 3 nous abordent le sujet de modélisation des convertisseurs utilisés dans la pile à combustible (convertisseur DC/DC boost) et l'autre convertisseur bidirectionnel utilise pour le supercondensateur. La pile à combustible produit une tension assez stable, En revanche, la tension nominale des supercondensateurs est inférieure à celle des piles à combustible. En fonction de la charge, la tension de la PEMFC peut légèrement varier, mais elle reste principalement stable pendant une période de fonctionnement spécifique. Les supercondensateurs, en revanche, peuvent supporter des variations de tension plus importantes et se chargent et se déchargent rapidement.

Le supercondensateur joue souvent le rôle d'un intermédiaire entre la pile à combustible et les systèmes électriques du véhicule. Il contribue à stabiliser la tension fournie aux composants du véhicule en réduisant les variations de tension provenant de la pile à combustible. Toutes les puissances sont absorbées par le supercondensateur : la puissance du système de traction et celle de la pile à combustible. Cette puissance sera ensuite employée afin de compenser le manque de puissance du véhicule causé par cette opération de la pile à combustible pendant les périodes de traction.

## Bibliographique

### **Bibliographie**

- [1] H.MAKER, « Optimisation et gestion d'énergie pour un système hybride : Association Pile à Combustible et supercondensateurs », thèse de doctorat, Université de Technologie Belfort Montbéliard, 2008
- [2] B. SAMIR, "Contribution à la commande d'un système pile à combustible /super Condensateur. Application au véhicule électrique", mémoire de master, Réseaux électriques, Université Mouloud Mammeri, Tizi Ouzou, Algérie, 2015.
- [3] AFHYPAC – Th. Alleau - C. Lamy - P. Malbrunot. 1/14. **Mémento de l'Hydrogène. FICHE 5.2.1. LES PILES A COMBUSTIBLE(PAC)**, 2018.
- [4] J. LACHAIZE, "Etude des stratégies et des structures de commande pour le pilotage des systèmes énergétiques à Pile à Combustible (PAC) destinés à la traction," thèse doctorat ,2004.
- [5] A. Z KOUACHE, L. RAHOUMA "Contribution à la modélisation optimale des piles à combustible de type PEM par utilisation des méthodes méta-heuristiques", Mémoire de Master 2, Université Kasdi Merbah d'Ouargla, 2020.
- [6] Y. Manoharan et al, "Hydrogen fuel cell vehicles; current status and future prospect," vol. 9, no. 11, p. 2296, 2019.
- [7] Halim, A. Z. Z. I. "'Etude et modélisation d'une pile à combustible'". Mémoire de Magister, Université de Bejaia 9 (2016).
- [8] Amrouche, F., Mahmah, B., Belhamel, M., & Benmoussa, H. Modélisation d'une pile à combustible PEMFC alimentée directement en hydrogène-oxygène et validation expérimentale. Journal of Renewable Energies, 8(2), 109-121. Alger, (2005).
- [9]. S. Pique, "Stationary fuelcell: international and national regulatory and standard context, potential risks. Study report," 2017.
- [10] Mémento de l'hydrogène, Fiche 5.2.1, Les piles à combustible (PAC), AFHYPAC, 07/2016.
- [11] An Li « Analyse expérimentale et modélisation d'éléments de batterie et de leurs assemblages – Application aux véhicules électriques et hybrides » L'UNIVERSITE CLAUDE BERNARD LYON 1 en 2013.

## Références Bibliographiques

- [12] B. E. Conway, Electrochemical supercapacitors: Scientific fundamentals and technological applications, Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, 1999.
- [13] R. Kötz et M. Carlen, "Principles and applications of electrochemical capacitors," Electrochimica Acta, vol. 45, n° 15-16, 3 mai 2000, pp. 2483-2498.
- [14] R. Kötz, S. Müller, M. Bäertschi, B. Schnyder, P. Dietrich, F. N. Büchi, A. Tsukada, G. G. Scherer, P. Rodatz, O. Garcia1, P. Barrade, V. Hermann et R. Gallay, "Supercapacitors for peak-power demand in fuel-cell-driven cars," ECS Proceedings, vol. PV 2001-21, pp. 564, The Electrochemical Society, Inc., Pennington, NJ (2003).
- [15] M. Endo, T. Takeda, Y. J. Kim, K. Koshiba et K. Ishii, "High power electric double layer capacitor (EDLC's); from operating principle to pore size control in advanced activated carbons.," Carbon Science, vol. 1, n° 3-4, 2001, pp. 117-128.
- [16] NEC TOKIN Corp., SuperCapacitor, <http://www.nec-tokin.com/english/product/supercapacitor/outline01.html>
- [17] A. Nishino, "Capacitors: operating principles, current market and technical trends," Journal of Power Sources, vol. 60, n° 2, juin 1996, pp. 137-147.
- [18] A. PAYMAN, « Contribution à la Gestion de l'Energie dans les Systèmes Hybrides Multi-sources Multi-charges », thèse de doctorat, Université de Téhéran, Téhéran, IRAN, 2009
- [19] P. THOUNTHONG, « CONCEPTION D'UNE SOURCE HYBRIDE UTILISANT UNE PILE A COMBUSTIBLE ET DES SUPERCONDENSATEURS », thèse de doctorat, L'Institut National Polytechnique de Lorraine, France, 2005
- [20] B. E. Conway, Electrochemical supercapacitors: Scientific fundamentals and technological applications, Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, 1999.
- [21] I. VALERO EXPOSITO, « Interfaçage et contrôle commande de pile a combustible pour applications stationnaire et transport », Thèse de doctorat, Université JOSEPHFOURIER, 2004



## **ANNEXE**

ANNEXE 1 : Dimensionnement des convertisseurs

ANNEXE 2 : Synthèse des régulateurs

## ANNEXE 1 : Dimensionnement des convertisseurs

## 1.1 Calcul de l'inductance de lissage du convertisseur élévateur

Afin de calculer l'oscillation du courant dans l'inductance, on tient compte de la tension de sortie continue, ce qui signifie que l'oscillation de tension par rapport à la valeur moyenne est ignorée.

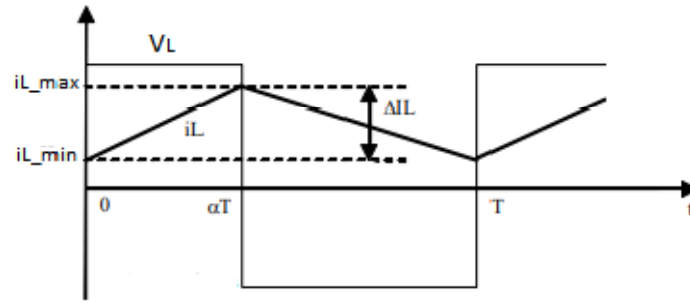


Figure 4.1 : Ondulation du courant

Pour  $0 \leq t \leq \alpha T$  :

$$i_L(t) = \frac{V_e}{L}t + I_{L\_min} \quad (4.1)$$

En  $t = \alpha T$  :

$$i_L(\alpha T) = \frac{V_e}{L}\alpha T + I_{L\_min} \quad (4.2)$$

$$\Delta I_L = I_{L\_max} - I_{L\_min} = \frac{V_e}{Lf}\alpha \quad (4.3)$$

$$\Delta I_L = \frac{(1-\alpha)V_{bus}}{Lf}\alpha \quad (4.4)$$

**T**: Période de découpage du signal de commande de l'interrupteur **T=1/f**.

**$\Delta I_L$** : Ondulation de courant dans l'inductance (A).

En utilisant le rapport cyclique  **$\alpha=1/2$** , on peut obtenir une ondulation maximale. On obtient le rapport  **$\alpha=1/2$**  lorsque  $\frac{d\Delta I_L}{dt} = 0$ . De cette manière, on calcule l'inductance en se basant sur l'ondulation maximale de courant désirée.

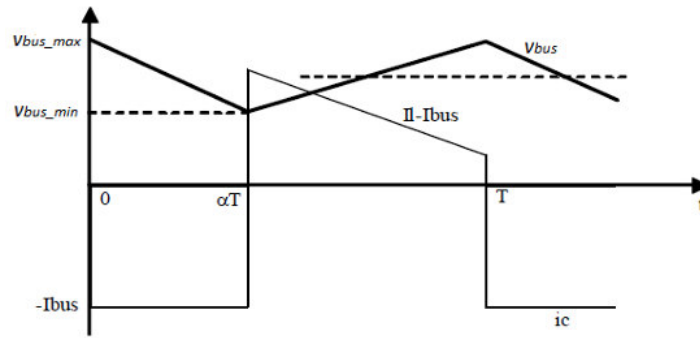
$$\Delta I_{L\_max} = \frac{V_{bus}}{4Lf} \quad (4.5)$$

Donc, on obtient le calcul de l'inductance minimale pour un convertisseur DC/DC élévateur en utilisant la formule suivante :

$$L = \frac{V_{bus}}{4f\Delta I_{L\_max}} \quad (4.6)$$

### 1.2 Calcul du condensateur de filtrage du bus DC

Il est essentiel que le condensateur puisse supporter le courant requis lors des pics de puissance. En outre, la variation de tension en sortie est due à la circulation du courant alternatif dans le condensateur.



**Figure 4.2 : Ondulation de tension**

Pour :  $0 \leq t \leq uT$  :

$$V_{bus}(t) = -\frac{I_{bus}}{C}t + V_{bus\_max} \quad (4.7)$$

En  $t = uT$ :

$$V_{bus}(uT) = V_{bus\_max} - \frac{I_{bus}}{C}uT = V_{bus\_min} \quad (4.8)$$

$$\Delta V_{bus} = V_{bus\_max} - V_{bus\_min} = \frac{I_{bus}}{Cf}u \quad (4.9)$$

$$\Delta V_{bus} = \frac{(1-u)I_L}{Cf}u \quad (4.10)$$

L'ondulation de tension maximale est obtenue pour un courant maximal et un rapport cyclique de 0.5 Soit :

$$\Delta V_{bus\_max} = \frac{I_L}{4Cf}$$

(4.11)

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

$$C = \frac{I_L}{4f\Delta V_{bus\_max}}$$

(4.12)

### **1.3 Calcul de l'inductance de lissage du convertisseur bidirectionnel**

Le calcul de l'inductance de lissage se fait comme auparavant, à l'exception que ce convertisseur a deux modes de fonctionnement différents, soit comme abaisseur, soit comme élévateur. Ainsi, on obtient la même représentation de l'ondulation de courant. En utilisant le rapport cyclique de 1/2, on peut obtenir l'ondulation maximale, qui est de la forme suivante :

$$L = \frac{V_{bus}}{4f\Delta I_{sc\_max}}$$

(4.13)

## ANNEXE 2 : Synthèse des régulateurs

### 2.1 Contrôle par modèle interne (CMI)

Le CMI est une approche de conception de contrôleur qui consiste à paramétrer directement le contrôleur résultant en fonction des paramètres du modèle du système et de la bande passante de boucle fermée désirée. Par exemple, le contrôleur aura la fonction de transfert suivante :

$$C(p) = \frac{a^n}{(p+a)^n - a^n} H^{-1}(p) \quad (4.14)$$

Où :  $a$  est la bande passante d'un filtre passe-bas,  $H$  est la fonction de transfert du système, et  $n$  est l'ordre de  $H$ .

### 2.2 Calcul des paramètres des régulateurs de courant

Les convertisseurs présentent des boucles de courant qui se distinguent par une fonction de transfert linéaire entre  $V_{L_{ref}}(p)$  et  $I_L(p)$ , telle que définie par les Équations (3.10). Pour rendre les calculs plus simples, une résistance interne de la bobine est ajoutée de la manière suivante :

$$H_1(p) = \frac{I_L(p)}{V_{L_{ref}}(p)} = \frac{1}{Lp + R} \quad (4.15)$$

Étant donné que la fonction de transfert est de premier ordre, on ajoute un contrôleur PI de la forme suivante :

$$C(p) = K_{pi} + \frac{K_{ii}}{p} \quad (4.16)$$

En utilisant la méthode CMI de l'équation (4.14), nous pouvons formuler :

$$C(p) = \frac{a_i}{p} H_1^{-1}(p) = \frac{a_i}{p} (R + Lp) = a_i L + \frac{a_i R}{p} \quad (4.17)$$

Donc :

$$\begin{cases} k_{pi} = a_i L \\ k_{ii} = a_i R \end{cases} \quad (4.18)$$

La valeur de bande passante  $a_i$  de la boucle de régulation interne de courant doit être inférieure d'au moins une décade à la fréquence d'échantillonnage ( $F$  [Hz]).

$$\begin{cases} a_i = 2\pi \frac{F}{10} \\ k_{pi} = 0.65 \\ k_{ii} = 10 \end{cases} \quad (4.20)$$

### 2.3 Calcul des paramètres du régulateur de tension

La boucle de tension du convertisseur DC/DC élévateur est caractérisée par une fonction de transfert linéaire reliant  $I_{c\_ref}(p)$  et  $V_{bus}(p)$ , donnée par l'Equation (4.21).

$$H_2(p) = \frac{V_{bus}(p)}{I_{c\_ref}(p)} = \frac{1}{Cp} \quad (4.21)$$

Le contrôleur de courant est défini de la même façon que le régulateur de tension, sous la forme suivante :

$$C(p) = k_{pv} \frac{k_{iv}}{p} \quad (4.22)$$

En se basant également sur l'Equation (4.14), nous pouvons écrire :

$$C(p) = \frac{a_v}{p} H_2^{-1}(p) = \frac{a_v}{p} Cp = a_v C \quad (4.23)$$

Le contrôleur actuel ne comporte pas de module complet. Toutefois, il est possible d'intégrer la partie intégrale avec une faible valeur de gain  $k_{iv}$  (par exemple  $k_{iv} = 0.01$ ) dans notre contrôleur.

Finalement :

$$\begin{cases} k_{pv} = a_v C \\ k_{iv} = 0.01 \end{cases} \quad (4.24)$$

Nous sélectionnerons un  $a_v$  inférieur d'au moins une décade à la bande passante de contrôle de courant.

$$a_v = \frac{a_i}{10} \quad (4.25)$$

$$\begin{cases} k_{pv} = 0.65 \\ k_{iv} = 0.01 \end{cases} \quad (4.26)$$