



Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de génie électrique

# MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies  
Electrotechnique  
Commande électrique  
Réf. : .....

---

Présenté et soutenu par :  
**Kabrine Takia eddine Mouhamed Islam**  
Le :

## **Commande et gestion d'énergie d'une source hybride (Pile à combustible / super condensateur)**

---

### **Jury :**

<b>Dr. Rezig Mohamed</b>	MCB	Université de Biskra	Président
<b>Dr. Mohammedi Messaoud</b>	MCB	Université de Biskra	Examineur
<b>Dr. Saadi Ramzi</b>	MCA	Université de Biskra	Encadreur

Année universitaire : 2021 - 2022



Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de génie électrique

# MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et  
Technologies  
Electrotechnique  
Commande électrique

---

Présenté et soutenu par :

**Kabrine Takia eddine Mouhamed Islam**

Le :

## **Commande et gestion d'énergie d'une source hybride (Pile à combustible / super condensateur)**

---

Présenté par :  
**Kabrine Takia eddine  
Mouhamed Islam**

Avis favorable de l'encadreur :  
**Dr. Saadi Ramzi**

**Avis favorable du Président du Jury**

Cachet et signature

# DEDICACE

- A ma chère mère, pour ses scarifies depuis qu'elle m'a mise au monde.
- A tous mes frères.
- A mon ami keddad rafik

# REMERCIEMENT

LOUANGE A ALLAH QUI NOUS DONNE LA FOI, LE COURAGE, LA PATIENCE ET LA VOLONTE POUR REALISER CE MODESTE TRAVAIL DANS DES MEILLEURES CIRCONSTANCES ET EN BON ETAT

Ce travail de mémoire a été effectué au Laboratoire d'étude M.S.E du département de Génie électrique, Faculté des sciences et de la technologie, Université Mohammed Khider de Biskra.

- Mes respectueux remerciements s'adressent à mon encadreur de mémoire Docteur **Saadi Ramzi** de l'Université Mohamed Khider Biskra qui a dirigé mes travaux de recherche ainsi que pour leurs disponibilités, leur patience et leurs précieux conseils, leurs encouragements et les efforts qu'il m'a prodigués durant la réalisation de ce travail.
- Meilleurs salutations aux membres du jury de mémoire pour l'honneur qu'ils m'ont fait de participer à l'évaluation de mon travail.
- Je tiens à exprimer encore mes sincères remerciements à ma mère

# SOMMAIRE GENERALE

Liste des tableaux

Liste des figures

## Introduction générale

## Chapitre I : généralité sur les piles à combustibles

<b>I.1. Introduction</b> .....	12
<b>I.2. Principes de fonctionnement</b> .....	12
<b>I.3. Les types de piles a combustible</b> .....	13
▪ <b>I.3.1. Pile à combustible de type PEM (PEMFC : Proton Exchange Membrane Fuel Cell)</b> .....	14
<b>I.4. Hydrogène</b> .....	16
<b>I.5. Construction de pile a combustible de type pem</b> .....	16
▪ <b>I.5.1 Les électrodes</b> .....	17
▪ <b>I.5.2 Electrolyte</b> .....	18
▪ <b>I.5.3 Catalyseur</b> .....	18
– Les catalyseurs du côté anode.....	19
– Les catalyseurs du côté cathode.....	19
▪ <b>I.5.4. Plaque bipolaire</b> .....	19
▪ <b>I.5.5. L'alimentation des piles à combustible</b> .....	19
<b>I.6. Systeme pile a combustible</b> .....	20
▪ <b>I.6.1. Le conditionnement entree-sortie cathode</b> .....	20
▪ <b>I.6.2. Le conditionnement entree-sortie anode</b> .....	20
▪ <b>I.6.3. Le refroidissement et l'humidification</b> .....	20
▪ <b>I.6.4. La conversion et l'exploitation de l'energie electrique</b> .....	20
<b>I.7. Applications des piles à combustible</b> .....	21
▪ <b>I.7.1. Applications portables</b> .....	21
▪ <b>I.7.2. Application automobile</b> .....	22
▪ <b>I.7.3. Applications stationnaires</b> .....	22
▪ <b>I.7.4. Applications embarquées</b> .....	Error! Bookmark not defined.
<b>I.8. Les avantages et les inconvénients des piles à combustible de type pem</b> .....	23
<b>I.9. Conclusion</b> .....	25

## Chapitre II : généralité sur les super condensateurs

<b>II.1. Introduction</b> .....	27
<b>II.2. Principe de fonctionnement</b> .....	27

<b>II.3. Applications courantes des super-condensateurs.....</b>	<b>28</b>
<b>II.4. Type de stockeur d'énergie _.....</b>	<b>29</b>
▪ <b>II.4.1. Stockeur d'énergie fixe _.....</b>	<b>29</b>
▪ <b>II.4.2. Stockeur d'énergie embarque _.....</b>	<b>29</b>
<b>II.5. Comparaison entre les batteries et les super condensateurs _.....</b>	<b>30</b>
<b>II.6. Super condensateurs : avantages, inconvénients.....</b>	<b>32</b>
<b>II.7. Conclusion .....</b>	<b>33</b>

## **Chapitre III : Commande de la source hybride Pile à combustible / super-capacité**

<b>III.1. Introduction .....</b>	<b>35</b>
<b>III.2. Présentation du système globale .....</b>	<b>25</b>
▪ <b>III.2.1. Le schéma de principe d'un hacheur survolteur entrelacé (Convertisseur « BOOST » entrelacé (IBC)) : .....</b>	<b>36</b>
<b>III.3. Commande du système global.....</b>	<b>39</b>
▪ <b>III.3.1 Commande de l'hacheur survolteur _.....</b>	<b>40</b>
– Régulateur de courant par mode glissant : .....	39
▪ <b>III.3.2 Principe de contrôle du convertisseur DC-DC des super condensateurs.....</b>	<b>41</b>
<b>III.4. Simulation de système .....</b>	<b>42</b>
▪ <b>III.4.1. Résultats de simulation de la commande .....</b>	<b>25</b>
▪ <b>III.4.2. Interprétation des résultats .....</b>	<b>47</b>
<b>III.5. Conclusion .....</b>	<b>49</b>

## **Conclusion générale**

## **Références bibliographiques**

## **Résumés du thème**

## **Liste des tableaux :**

**Table.I.1 :** Différents types de pile à combustible (ion traversant l'électrolyte, température de fonctionnement et applications typiques.

**Table.I.2 :** Avantages et inconvénients des piles à combustible de type PEMM.

**Table.II.1 :** comparaison entre les éléments de stockage.

**Table.II.2 :** Avantages et inconvénients des super condensateurs.

**Table.III.1 :** les paramètres associés aux sources hybrides

## Liste des figures:

**Figure.1.1** : Fonctionnement de principe d'une pile à combustible.

**Figure.1.2** : Principe des piles à combustible à électrolyte acide (en haut) ou Alkaline (en bas).

**Figure.1.3** : Différentes couches d'une cellule élémentaire de PEMFC.

**Figure.I.4** : 'Stack' d'une pile à combustible de type PEMFC.

**Figure.I.5** : Structure d'un empilement des cellules PEMFC (Electro En cyclo).

**Figure.1.6** : Membrane Dupont.

**Figure.1.7** : Plaques bipolaire de pile PEM.

**Figure.I.8** : Schéma des PAC fonctionnant à haute température et à reformage interne de l'hydrogène.

**Figure.I.9** : Schéma illustrant les différents éléments d'un système PAC.

**Figure.II.1** : Principe de la couche double électrique.

**Figure.II.2** : Structure interne des super condensateurs à couche double électrique

**Figure.II.3** : Pack de super condensateurs dédié çà la récupération de l'énergie lors du freinage.

**Figure.II.4** : Système MITRAC utilisant les super condensateurs pour le stockage de l'énergie.

**Figure.II.5** : Schéma comparatif.

**Figure.III.1** : Schéma de système hybride.

**Figure.III.2** : Schéma électrique du convertisseur BOOST entrelacé à 2branches.

**Figure.III.3** : Schéma de commande de système hybride.

**Figure.III.4** : Régulation de la tension du bus.

**Figure.III.5** : Régulation de la Courant par mode glissant.

**Figure.III.6** : Contrôle du convertisseur de super-condensateur.

**Figure.III.7** : Model de système sous MATLAB SIMULINK.

**Figure.III.8** : Model de pile à combustible avec IBC sous MATLAB SIMULINK

**Figure.III.9**: le courant de la charge.

**Figure.III.10** : le courant de la pile à combustible.

**Figure.III.11** : Le courant de la super capacité.

**Figure.III.12** : La tension du bus continu et la référence de cette tension.

**Figure.III.13** : La tension du super condensateur.



# **INTRODUCTION GENERALE**

## Introduction générale

Une pile à combustible est une source d'énergie électrique et thermique qui produit une haute densité. Par contre, l'électricité fournie par les super-condensateurs n'est pas générée, mais stockée. Les super-condensateurs ont donc la capacité de produire une forte puissance électrique, mais offrent une densité d'énergie moins favorable que les piles à combustible.

L'hybridation entre les deux sources permet d'élargir le domaine d'opération, améliorer la réponse dynamique du système, ainsi que réduire le coût. Pour assurer un bon fonctionnement d'un système hybride il faut utiliser une stratégie de commande et gestion de l'énergie. Cette stratégie permet la bonne distribution de la demande de puissance entre les deux sources.

Ce mémoire représente une stratégie de contrôle d'une source hybride utilisant un bus continu, convertisseurs, pile à combustible et des super condensateurs. Il est constitué des éléments suivants :

- Une pile à combustible de type PEM comme une alimentation principale.
- Un banc de super condensateurs, utilisé comme une source de puissance et stockage.

Le premier chapitre de ce mémoire a été consacré à la pile à combustible, son principe de fonctionnement, les différents types ainsi que ses avantages et ses inconvénients.

Le deuxième chapitre, présente une généralité sur les super condensateurs ; leurs principes de fonctionnement et ses avantages et ses inconvénients.

Le troisième chapitre décrit la commande de la source hybride. La structure hybride des deux sources : la pile PEMFC avec la super capacité utilisant un régulateur non linéaire glissant.

Enfin une conclusion générale.

# CHAPITRE I

## GENERALITE SUR PILE A COMBUSTIBLE

## I.1. Introduction:

En 1839, la première pile à combustible a été inventée par Sir William Robert Grove, un professeur de philosophie expérimentale à l'Institut Royal de Londres.

Depuis, il est connu comme « le Père de la pile à combustible ». Ses expériences sur l'électrolyse - l'utilisation de l'électricité pour séparer l'eau en hydrogène et oxygène - ont mené à la première mention d'un dispositif qui plus tard se nommera pile à combustible.

Il a pensé qu'il était possible de renverser le procédé d'électrolyse et de produire de l'électricité en faisant réagir de l'oxygène avec de l'hydrogène. Pour vérifier cette théorie il a enfermé deux bandes de platines dans des bouteilles séparées, l'une contenant de l'hydrogène l'autre de l'oxygène. Quand ces récipients ont été immergés dans de l'acide sulfurique dilué un courant a commencé à s'établir entre les deux électrodes et de l'eau s'est formée dans les bouteilles de gaz. Pour augmenter la tension produite, il a placé plusieurs de ces dispositifs en série et a produit ce qu'il a appelé une « batterie à gaz », le précurseur de la pile à combustible moderne [Tho].

La croissance de la consommation énergétique accompagnée d'une augmentation de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère ainsi que l'épuisement inéluctable des ressources fossiles attendues vers la fin de ce siècle sont à la base de l'orientation vers une source ou méthode de production d'énergie renouvelable et écologique (énergie solaire, énergie hydraulique, éolienne, géothermie...). Dans cet intérêt, l'application des piles à combustible s'étend sur plusieurs domaines stationnaires, portables et mobiles. Dans cette dernière catégorie, la pile à combustible est généralement associée à un élément de stockage de l'énergie électrique pour alimenter un moteur électrique dans une structure dite 'hybride'. [Ben05]

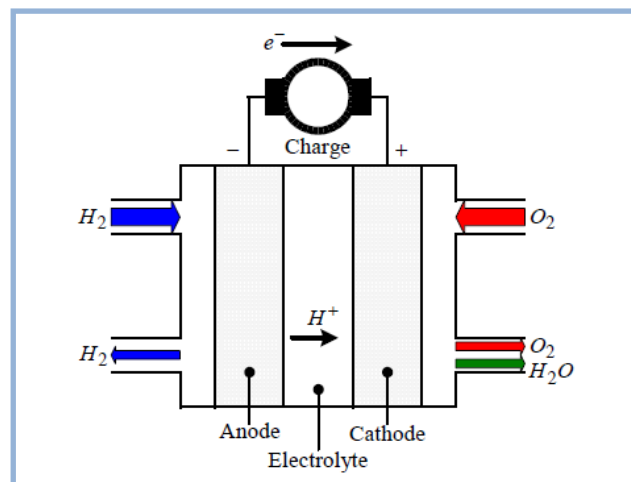
## I.2. Principes de fonctionnement :

Une pile à combustible est un dispositif de conversion d'énergie qui convertit l'énergie chimique directement en énergie électrique sans aucun processus thermique ou mécanique (figure 1.1). L'énergie est produite quand l'hydrogène réagit chimiquement avec l'oxygène de l'air.

Dans un moteur à combustion interne, lorsque la réaction se produit, l'énergie est relâchée sous forme de chaleur, dont une partie peut effectuer un travail utile en poussant un piston. Dans une pile à combustible, la réaction est électrochimique et produit de l'énergie électrique et de la chaleur. L'énergie électrique peut être employée pour effectuer le travail utile directement tandis que la chaleur est soit gaspillée soit employée par ailleurs. [Tho04d]

Une caractéristique fondamentale des piles à combustible est que la charge électrique détermine le taux de consommation d'hydrogène et d'oxygène. Les gaz sont fournis, à l'anode pour l'hydrogène et à la cathode pour l'oxygène. Ainsi, la structure d'une pile à combustible comporte des arrivées de gaz des deux côtés de l'électrolyte.

Les électrolytes peuvent être liquides ou solides, certains fonctionnent à haute température, d'autres à basse température. Les piles à combustible fonctionnant à basse température tendent à exiger des catalyseurs en métal noble, typiquement du platine, destiné à améliorer les réactions aux électrodes. La plupart des piles à combustible destinées aux applications automobiles emploient un électrolyte solide à basse température qui conduit des ions d'hydrogène. [Tho04d]



**Fig.1.1 : Fonctionnement de principe d'une pile à combustible [Car01].**

En principe, une pile à combustible peut fonctionner en utilisant une variété de carburants et d'oxydants. L'hydrogène a été reconnu comme le carburant le plus efficace par ce qu'il a une plus haute réactivité électrochimique que les autres carburants, tels que les hydrocarbures ou les alcools. Et l'oxygène est l'oxydant par excellence en raison de sa haute réactivité et son abondance dans l'air. [Ben05]

### I.3. Les types de piles à combustible :

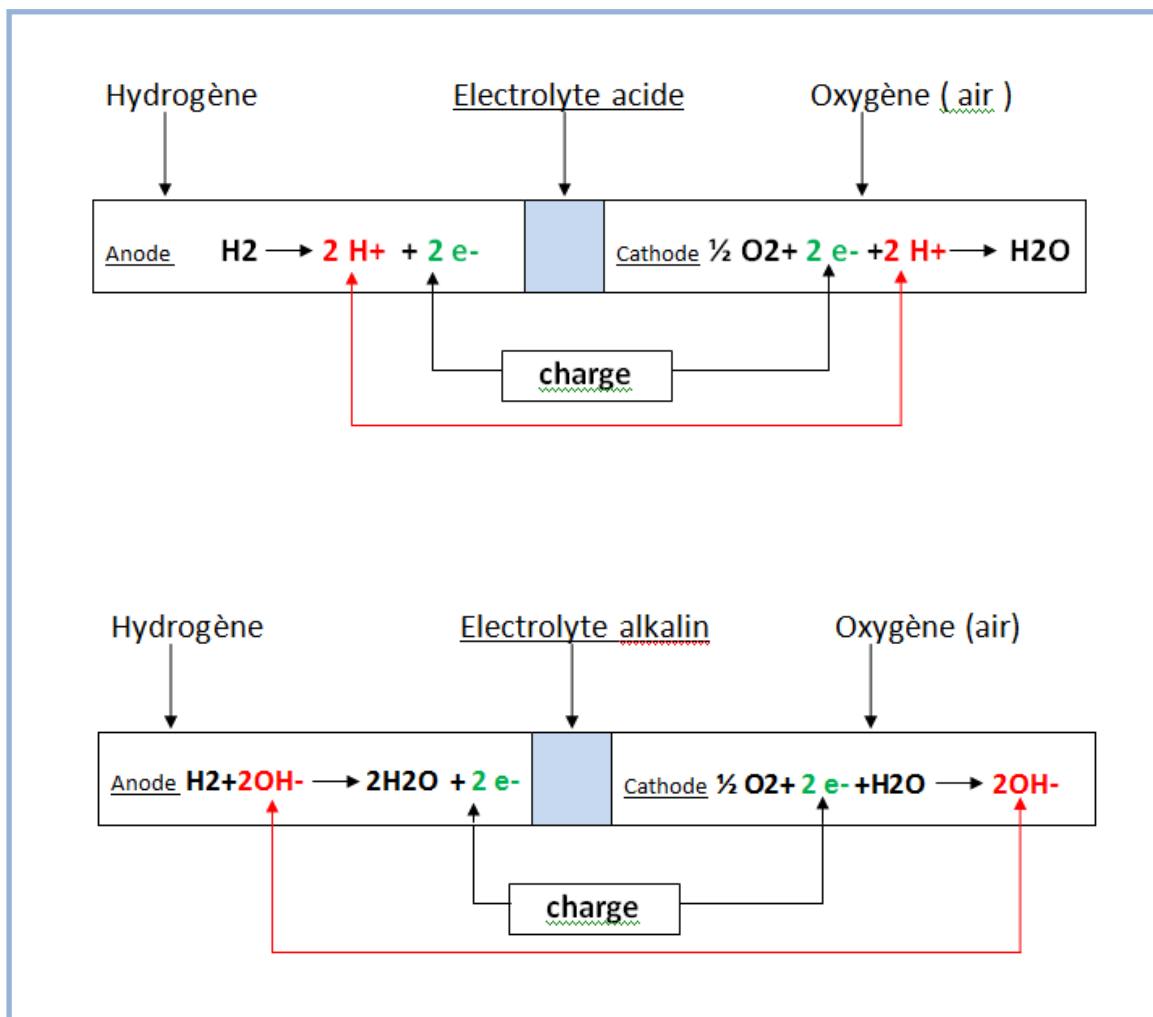
Les types de piles à combustible diffèrent principalement par l'électrolyte utilisé (**figure 1.2**). L'électrolyte qui est traversé par les ions détermine la température de fonctionnement qui varie fortement selon le type de pile à combustible (**table 1**).

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

**I.3.1. Pile à combustible de type PEM (PEMFC : Proton Exchange Membrane Fuel Cell) :**

La pile à combustible de type PEM est actuellement le type le plus prometteur de piles à combustible pour les applications automobiles et a été utilisée dans la majorité des prototypes construits.

La structure d'une cellule de pile à combustible de type PEM est représentée dans la **figure 1.3**. Se déplaçant dans la direction de  $x$ , les gaz viennent de canaux gravés dans des plaques bipolaires (épaisseur 1-5 millimètres). De la vapeur d'eau est ajoutée aux gaz pour humidifier la membrane. Les couches de diffusion (100-500 micromètres) assurent une bonne distribution des gaz aux couches de réaction (5-50 micromètres). Ces couches constituent les électrodes de la cellule où des particules de platine, qui jouent le rôle du catalyseur, ont été déposées dans un support carbone sur la membrane [Fri04].

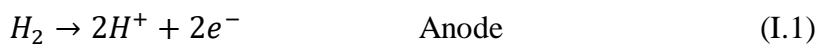


**Fig.1.2 : Principe des piles à combustible à électrolyte acide (en haut) ou Alcaline (en bas) [Tho04d].**

Types de pile à combustible	Ion	T° (°C)	Applications typiques
Pile à combustible alcaline (Alkaline Fuel Cell)	OH <sup>-</sup>	50 200	Apollo, navettespatiale
Pile à combustible à membrane (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)	H <sup>+</sup>	30 100	Véhicule, stationnaire
Piles à combustible au méthanol direct (Direct Methanol Fuel Cell)	H <sup>+</sup>	20 90	Portable
Pile à combustible à acide phosphorique (Phosphoric Acid Fuel Cell)	H <sup>+</sup>	220	Stationnaire
Pile à combustible à carbonate fondu (Molten Carbonate Fuel Cell)	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	650	Stationnaire
Pile à combustible à oxyde solide (Solid Oxide Fuel Cell)	O <sup>2-</sup>	500 1000	Stationnaire, système auxiliaire de puissance (Auxiliary Power Unit)

**Table.I.1 Différents types de pile à combustible (ion traversant l'électrolyte, température de fonctionnement et applications typiques[Lar03]).**

Les réactions d'oxydation de l'hydrogène et de réduction de l'oxygène :



Sont séparées par la membrane (20-200 micromètres) qui conduit les protons de l'anode à la cathode et qui est imperméable aux électrons. Cet écoulement de protons entraîne des molécules d'eau alors que le gradient de l'humidité mène à une diffusion de l'eau selon l'humidité locale de la membrane. Les molécules d'eau peuvent donc aller dans les deux directions à l'intérieur de la membrane selon le côté où les gaz sont humidifiés et selon la densité de courant qui est directement liée aux protons qui traversent la membrane et à l'eau produite du côté de la cathode. Les électrons, qui apparaissent du côté de l'anode, ne peuvent pas traverser la membrane et sont employés dans le circuit électrique externe avant leur retour à la cathode. [Tho04d]

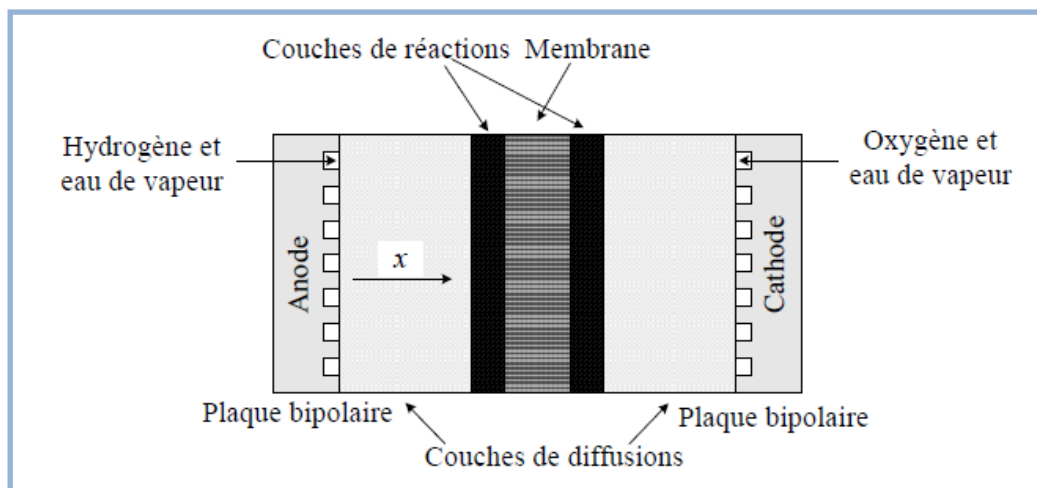


Fig.1.3 : Différentes couches d'une cellule élémentaire de PEMFC [Fri04].

## I.4. Hydrogène:

L'hydrogène (H) est l'élément le plus abondant dans l'univers. Il compose 75% de la masse de toute la matière dans les étoiles et les galaxies. Un atome d'hydrogène a seulement un proton et un électron. Cependant l'hydrogène comme gaz ( $H_2$ ) n'existe pas naturellement sur terre et se présente sous formes composées.

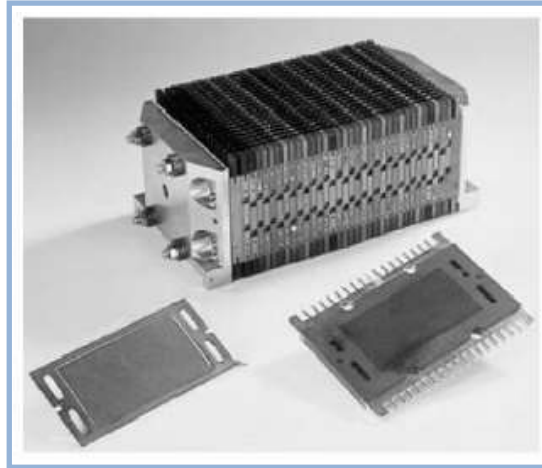
Si l'hydrogène est produit à partir de l'électrolyse de l'eau, l'électrolyseur étant alimenté à partir d'une source d'énergie renouvelable (panneau solaire, éolienne ou turbine hydroélectrique), il n'y aura pas d'émissions de dioxyde de carbone. Le développement des piles à combustible conduira à différents modes de production liés aux méthodes locales de production énergétique. [Cin]

On prévoit que les carburants hydrocarbures seront les carburants dominants pour les applications stationnaires de piles à combustible. Tant que ces carburants sont disponibles à faible coût, le reformage hydrocarbure est la méthode la plus simple et la plus efficace pour produire de l'hydrogène.

## I.5. Construction de pile à combustible de type PEM :

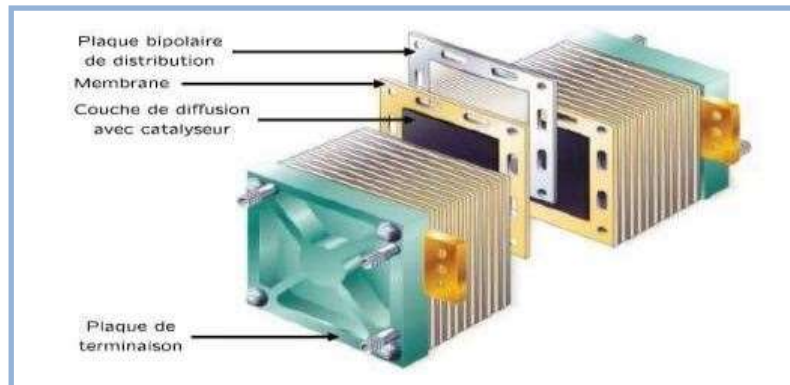
Une pile à combustible est constituée d'un empilement de cellules qui forment un 'stack'. Ces cellules élémentaires sont constituées de l'ensemble électrode-membrane-électrode (EME). [Wah06].





**Fig.I.4: 'Stack' d'une pile à combustible de type PEMFC. [Wah06].**

La figure suivante représente la structure d'une cellule et d'un empilement.



**Fig.I.5: Structure d'un empilement des cellules PEMFC (Electro En cyclo). [Wah06].**

Cette figure met en évidence trois éléments constitutifs d'une cellule: L'électrolyte (la membrane dans le cas de la PEMFC), les électrodes (Anode, Cathode) et les plaques. [Wah06].

### **I.5.1 Les électrodes :**

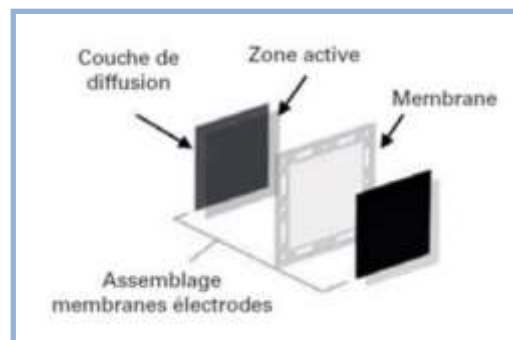
Les électrodes sont le siège des réactions chimiques mettant en jeu des réactifs (hydrogène ou oxygène par exemple) qui sont consommés au fur et à mesure qu'ils diffusent dans l'électrodes, ils ont plusieurs fonctions:

- Supporter le catalyseur finement divisé et permettre son contact avec les gaz.
- Permettre aux espèces protoniques de se déplacer depuis les sites catalytiques d'oxydation de l'hydrogène vers les sites où l'oxygène est réduit grâce à la présence de polymère ionique.
- Evacuer les électrons des sites catalytiques anodiques et redistribuer ces électrons sur les sites catalytiques cathodiques. [Lar03].

## I.5.2 Electrolyte :

L'électrolyte en polymère solide est la caractéristique distinctive d'une pile à combustible de type PEM. L'électrolyte est une fine membrane d'une épaisseur de 50 à 175 $\mu$ m. Tous les électrolytes acides en polymère solide exigent la présence de molécules d'eau pour conduire les ions d'hydrogène, les ions d'hydrogène se déplaçant ainsi que des molécules d'eau pendant la réaction d'échange ionique. Le proportion d'eau par rapport aux ions d'hydrogène pour obtenir une conductivité efficace est typiquement dans un rapport de 3 pour.

Pour cette raison, les gaz en contact avec une membrane doivent être saturés en eau pour Assurer un fonctionnement efficace. Les membranes doivent être conductrices pour les protons, isolantes pour les électrons et imperméables aux gaz. De plus elles doivent avoir une bonne tenue mécanique et être stables. L'intégration dans un assemblage membrane-électrodes leur apporte une structure facilitant leur intégration dans les cellules. Un certain nombre de membranes commerciales sont disponibles comme le Nafion (**figure 1.6**). [Dup].



**Fig.1.6 : Membrane Dupont [Dup].**

## I.5.3 Catalyseur :

Le catalyseur est un métal utilisé pour accélérer la réaction électrochimique au niveau des électrodes et aussi pour résister d'une façon continue la corrosion dans cet environnement chimique très acide. C'est pour cela, le catalyseur le plus utilisé est le platine (métal noble).

### -Les catalyseurs du côté anode:

Pour les piles de basse et moyenne température, on utilise des métaux précieux: platine Pt, rhodium Rh, ruthénium Ru ou palladium Pd; ou du Nickel de Raney. Les métaux précieux sont répartis sur les électrodes en charbon actif à très grande surface spécifique (noir d'acétylène).

Pour les piles de haute température, on peut utiliser des métaux moins chers (Fer, Nickel, Cobalt) et on n'a pas de problème d'empoisonnement au CO. [Zan10].

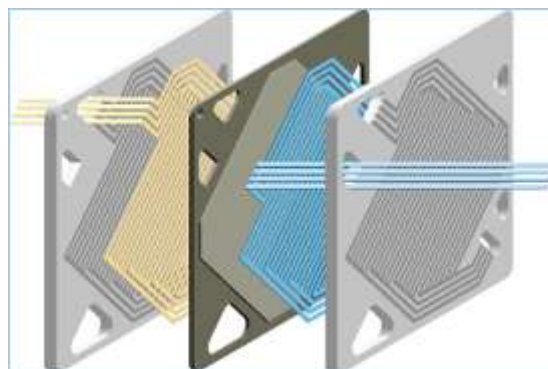
## -Les catalyseurs du côté cathode:

Pour les piles de basse et moyenne température, on utilisera aussi des métaux précieux et certains métaux de transition usuels (Chrome, Nickel), ou bien du charbon actif avec de l'or ou de l'argent. Pour les piles de haute température, on peut utiliser soit du Nickel fritté ou des oxydes mixtes. [Wah06].

### I.5.4. Plaque bipolaire :

Ces plaques sont accolées aux supports d'anode et de cathode. Leurs rôles:

- Canaliser les gaz venant de l'extérieur.
- Collecter les électrons (le courant).
- Gérer les flux d'eau.



**Fig.1.7 : Plaques bipolaire de pile PEM. [Tho].**

Les matériaux des plaques bipolaires doivent donc posséder un niveau de conductivité électrique suffisant (supérieur à 10 siemens/cm), une imperméabilité au gaz supérieure à celle de la membrane échangeuse de protons et une bonne inertie chimique vis-à-vis des fluides présents dans le cœur de pile (eau, acide, oxygène...) [Tho] .

Deux autres types de plaques bipolaires ont été mis au point :

- Les plaques bipolaires à base de composites organiques.
- Les plaques bipolaires à base de métaux et alliages, et particulièrement les aciers inoxydables.

### I.5.5. L'alimentation des piles à combustible :

L'unité de reformage permet de produire un gaz riche en hydrogène à partir d'un composé hydrocarboné (méthanol, éthanol, méthane, essence ...) et d'air et/ou d'eau. On distingue deux systèmes de production de l'hydrogène au sein d'une pile, soit le reformage interne pour les piles fonctionnant à haute température, MCFC et SOFC, soit le reformage externe pour les piles fonctionnant à des basses et moyennes températures, PEMFC et PAFC. [Zan10]

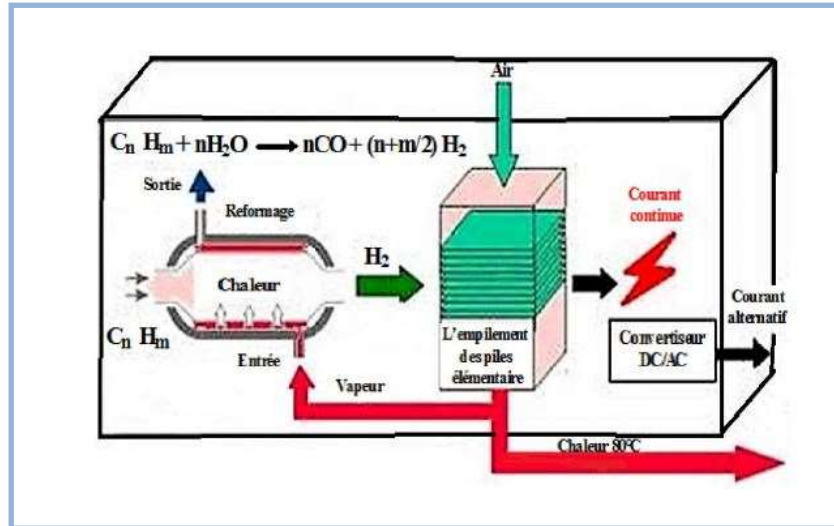


Fig.I.8: Schéma des PAC fonctionnant à haute température et à reformage interne de l'hydrogène[Zan10].

### I.6.Système pile à combustible :

Le système ou générateur PAC se compose donc de la pile et de composants auxiliaires destinés à la faire fonctionner. La figure ci-dessous fait apparaître un exemple de schéma relatif à un système PAC embarqué. [Ben05]

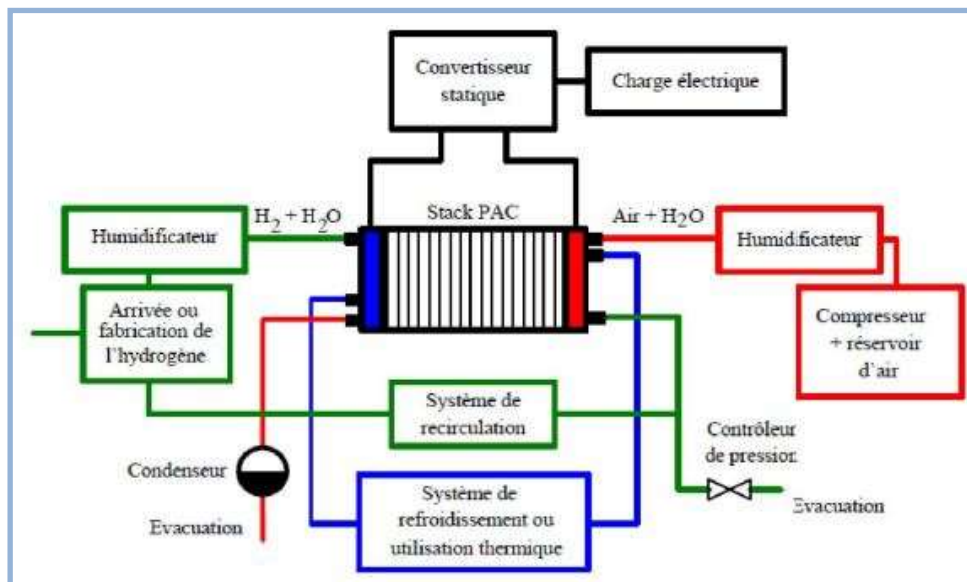


Fig.I.9: Schéma illustrant les différents éléments d'un système PAC[Ben05].

Les auxiliaires assurent notamment l'approvisionnement des réactifs, leur conditionnement, l'évacuation des produits et de la chaleur, la conversion et l'exploitation de l'énergie électrique. Il est ainsi possible de décomposer le système PAC en plusieurs sous-systèmes assurant ces fonctions de base au sein d'un véhicule. [Del02]

### **I.6.1 Le conditionnement entrée-sortie cathode :**

La PAC peut être alimentée soit directement en oxygène pur stocker sous pression dans un réservoir, soit en air. Dans ce cas, l'air est fourni au moyen d'un compresseur ou d'une soufflante. Le choix de la pression de fonctionnement a une influence sur le rendement de la conversion électrochimique, sur le procédé d'humidification des réactifs et sur la consommation en énergie du compresseur. [Del02]

### **I.6.2 Le conditionnement entrée-sortie anode :**

Le combustible utilisé au sein de la pile PEM est l'hydrogène. Il peut être stocké dans un réservoir ou bien produit à partir d'un hydrocarbure, généralement du méthanol, au moyen d'un reformeur. [Sad06]

### **I.6.3 Le refroidissement et l'humidification :**

Dans un générateur PAC, les sources de chaleur sont nombreuses : pertes thermiques de la réaction électrochimique, échauffement de l'air lors du travail de compression, échauffement des organes électriques tels que les moteurs de pompes et les convertisseurs, chaleur libérée par les réactions exothermiques liées au processus de reformage. A contrario, des apports de chaleur sont nécessaires à l'humidification des gaz, aux réactions endothermiques dans le cas du reformage (vapo-reformage). [Lar03].

### **I.6.4 La conversion et l'exploitation de l'énergie électrique :**

L'énergie électrique issue du stack doit en général être conditionnée (adaptation de la tension à l'aide d'un convertisseur électronique élévateur) de manière à pouvoir être utilisée au niveau du groupe moto-propulseur. De plus, la supervision du système PAC doit être assurée par des dispositifs de contrôle électroniques. [Sad06]

## **I.7.Applications des piles à combustible :**

On distingue habituellement les applications des piles à combustible entre applications portables, stationnaires et embarquées.

### **I.7.1. Applications portables :**

Celles-ci incluent le téléphone mobile d'une puissance moyenne de l'ordre de 400 mW et l'ordinateur portable d'une puissance moyenne de 10 W. Ces applications connaissent une très forte croissance et les recherches les plus importantes sont axées sur l'utilisation

d'une pile à combustible chargeant une petite batterie qui assure mieux l'apport d'énergie lors des pics d'émission. [Sam13]

### **I.7.2. Application automobile:**

Pour la traction automobile, seules les PEMFC sont pressenties. Leur température de fonctionnement relativement faible (proche de 80°C) permet d'assurer une plus grande souplesse de fonctionnement. La montée en température de la pile est plus facile et plus rapide pour les piles « basses températures » que pour les piles « hautes températures » nécessitant un système de préchauffe important. Un démarrage rapide « à froid » est alors envisageable. [Tho04d]

Au niveau environnemental, les nuisances sonores sont faibles. Il faut également noter que les produits de réaction des piles sont non polluants.

### **I.7.3. Applications stationnaires:**

Compte tenu des tendances vers la décentralisation de la production d'énergie électrique, ce secteur intéresse de nombreux industriels. L'activité est centrée sur deux grands domaines d'applications : la production collective (les puissances sont dans la gamme de 200 kW à quelques MW) et la production domestique (les puissances sont dans la gamme de 2 à 7 kW). [Sam13]

**I.8. Les avantages et les inconvénients des piles à combustible de type PEM :**

<b>I.8.1. Les Avantages:</b>	<b>I.8.2. Les inconvénients :</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Un rendement de conversion important : grâce à la conversion de l'enthalpie libre de la réaction chimique en énergie électrique, les pertes dues normalement à la combustion du combustible, puis à la conversion de cette chaleur de combustion en énergie mécanique et enfin de l'énergie mécanique en électrique sont évitées.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Un fonctionnement à basse température imposé par la membrane actuellement utilisées. Il s'ensuit la nécessité d'utiliser d'une part comme catalyseur du platine et d'autre part d'alimenter le cœur de pile par de l'hydrogène par ce qui nécessite soit l'utilisation de bouteille soit un mode de reformage performant.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Un générateur propre : les piles à combustible ne rejettent pratiquement pas de gaz nocifs (O<sub>2</sub>, NO) au niveau du cœur de pile.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Une technologie qui est encore au stade artisanal ce qui induit des couts de fabrications élevées. Bien que la structure du cœur de pile soit assez simple. Une durée de vie encore faible en particulier si le courant délivré subit des variations importantes et répétées</li> </ul>

<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Un système modulable : les piles à combustible sont modulables dans le sens où la taille d'une pile à combustibles peut facilement être augmentée ou réduite et le rendement électrique est relativement indépendant de cette taille.</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Un système relativement silencieux ; comme elle ne comporte pas la partie mobile au niveau du cœur, le fonctionnement des piles se fait sans nuisances sonores importantes. De ce fait, les piles à combustible peuvent être placées à proximité de quartiers résidentiels.</li> </ul>	

**Table.I.2 Avantages et inconvénients des piles à combustible de type PEMM. [Teg]**



### **I.9. Conclusion :**

Ce chapitre s'est intéressé aux piles à combustible et principalement aux piles PEMFC. On a abordé l'historique du développement des piles à combustible, leur principe de fonctionnement et l'architecture de ses systèmes.

Un intérêt majeur est porté aux cellules des piles à combustible, ce qui fait que des travaux importants sont encore nécessaires au niveau de la cellule. En effet, tous les éléments d'une cellule élémentaire sont encore perfectibles.

Que ce soit le catalyseur (amélioration de l'existant et recherche de nouveaux catalyseurs), la membrane (membrane fonctionnant à plus hautes températures) ou la structure elle-même de la cellule (forme géométrique, matériau des plaques bipolaires, modes de refroidissement).

# CHAPITRE II

## **GENERALITE SUR LES SUPER-CONDENSATEURS**

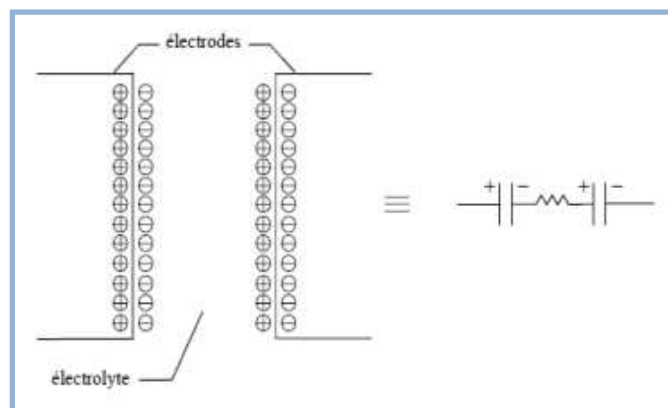
## II.Introduction:

Les récents développements dans le domaine électrochimique ont donnés naissance à un nouvel élément de stockage de l'énergie électrique c'est le super-condensateur. Il se montre aujourd'hui comme une bonne alternative permettant une amélioration de la puissance des systèmes. Par exemple, il peut être introduit en parallèle avec la pile à combustible et ainsi répondre aux demandes de fortes puissances en régime transitoire (accélération, récupération de l'énergie de freinage). Une bonne gestion de l'énergie disponible permet d'optimiser la consommation énergétique des systèmes et ainsi d'améliorer le rendement. Pour assurer le bon fonctionnement de ces éléments, une caractérisation des super-condensateurs en fonction des contraintes auxquels seront soumis est obligatoire. Ces contraintes sont : la température du milieu, la fréquence d'utilisation et la tension de charge.

### II.2. Principe de fonctionnement :

Ce faisant Helmholtz découvrait le principe de base des super-condensateurs, à savoir les propriétés capacitives de l'interface entre un conducteur électronique solide et un conducteur ionique liquide.

Le stockage d'énergie s'effectue par distribution des ions de l'électrolyte au voisinage de la surface de chaque électrode, sous l'influence électrostatique de la tension appliquée. Il se crée ainsi aux interfaces une zone de charge d'espace, appelée couche double électrique, d'épaisseur limitée à quelques nanomètres, et dans laquelle règne un champ électrique, relativement intense, de l'ordre de  $10 \text{ kV} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ . Un super-condensateur peut donc être schématisé, comme **figure II.1**, par deux capacités représentatives des charges stockées, et connectées en série par le biais d'une résistance associée à l'électrolyte. [M.Y. A04]



**Fig.II.1 Principe de la couche double électrique [M.Y. A04].**

Les super-condensateurs sont donc, pour la plupart des dispositifs commercialisés (en l'occurrence ceux qui nous intéressent ici, c'est-à-dire ceux dits à couche double électrique), des capacités à part entière. Le stockage d'énergie est, de fait, d'origine électrostatique, et non pas électrochimique comme dans le cas des accumulateurs, ce qui leur confère une puissance spécifique potentiellement élevée.

Leur différence fondamentale avec ces derniers réside dans l'absence apparente de couche diélectrique, la fonction diélectrique du dispositif étant assurée par les molécules du solvant. Il en résulte des capacités surfaciques élevées.

Pour exploiter au mieux les potentialités de cette couche double électrique en termes d'énergie spécifique et de capacité volumique, il convient d'accroître la surface de contact entre électrode et électrolyte sans augmenter outre mesure le volume total de l'ensemble (Fig. II.2). [F.be01]

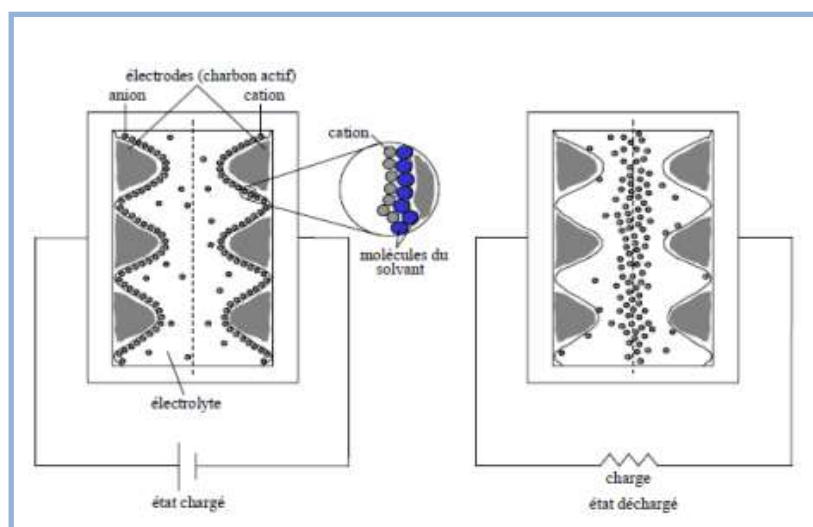


Fig. II.2 : Structure interne des super condensateurs à couche double électrique[F.be01]

### II.3. Applications courantes des super-condensateurs :

Les super-condensateurs sont utilisés dans les applications du domaine du transport, pour la conception des véhicules électriques et hybrides, dans le but de diminuer l'émission de gaz à effet de serre et de la pollution acoustique, en améliorant l'efficacité énergétique et en minimisant le coût de transport grâce à la récupération d'énergie notamment.

Deux exemples d'applications couramment envisagées sont :

- De permettre le démarrage fréquent des moteurs thermiques par des super condensateurs, en remplacement des batteries (systèmes Stop & Start...).
- La traction électrique autonome entre deux stations du transport urbain, basée sur le principe du biberon nage en station pendant l'arrêt. [Cin]

### II.4. Type de stockeur d'énergie :

#### II.4.1. Stockeur d'énergie fixe :

Les autorités de quelques villes européennes ont décidé d'introduire des systèmes de stockage à base de super-condensateurs pour récupérer l'énergie de freinage dans le domaine du transport ferroviaire urbain. Le système développé par les ingénieurs. Le principal intérêt réside dans la stabilisation du réseau d'alimentation électrique. [H.GU]

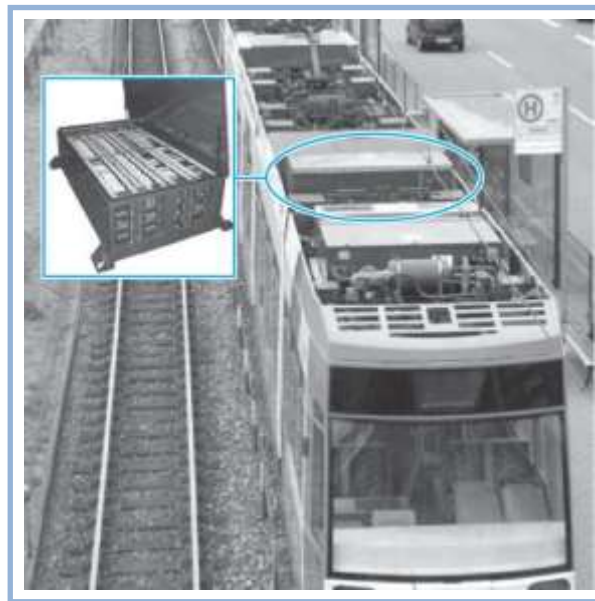


**Fig. II.3 : Pack de super condensateurs dédié à la récupération de l'énergie lors du freinage [H.GU] .**

#### II.4.2. Stockeur d'énergie embarqué :

Lorsqu'il est question d'économie d'énergie de freinage de système de transport léger ou de réduction de l'intensité des pics de puissance dans un réseau, les ingénieurs se trouvent

devant le choix, soit de placer le stockeur d'énergie à bord du véhicule, soit de le laisser fixer dans une sous-station du réseau.



**Fig.II.4 : Système MITRAC utilisant les super condensateurs pour le stockage de l'énergie [Sam13].**

### **II.5. Comparaison entre les batteries et les super condensateurs :**

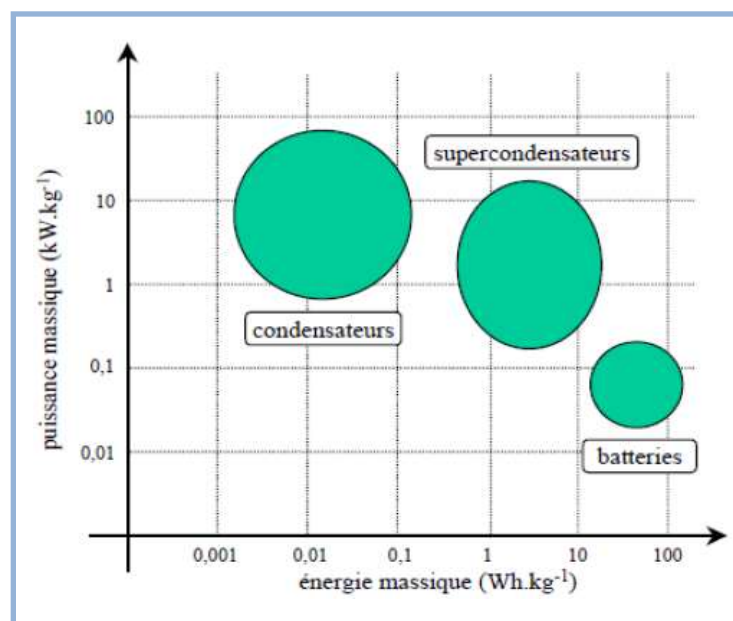
Le super-condensateur possède une puissance instantanée plus importante que celle des batteries et une énergie plus grande que celle des condensateurs classiques. Sa durée de vie est plus élevée que celle des batteries (environ 10 ans). Sur le diagramme de Ragone (**Fig. II.5**), nous avons représenté les différents systèmes de stockage d'énergie électrique dans le plan puissance spécifique-énergie spécifique. Ce diagramme montre que les condensateurs Electrochimiques possèdent une très grande densité de puissance mais une très faible énergie spécifique. Ils sont utilisés généralement pour des constantes de temps inférieures à quelques centaines de ms. Les batteries ont une densité de puissance très faible et une énergie spécifique élevée. Elles peuvent être utilisées avec une constante de temps supérieure à la mn. En ce qui concerne la pile à combustible c'est un convertisseur d'énergie et non pas un élément de stockage. Entre les batteries et les condensateurs électrochimiques se trouvent les Super condensateurs qui sont utilisés pour stocker l'énergie avec une constante de temps inférieure à quelques dizaines de secondes. Le tableau ci-dessous résume les performances des trois éléments de stockage présentés ci-dessus [**Man**].

	Condensateur électrolytique	supercondensateurs	Batterie
Temps de charge t	$\mu s < t < ms$	$1s < t < 30s$	1heure < t < 5heures
Temps de décharge	$\mu s < t < ms$	$1s < t < 30s$	0.3 heures < t < 3 heures
Rendement (charge /décharge)	>95%	Entre 85% et 98%	Entre 70% et 85%
Densité de puissance (W/Kg)	$>10^6$	$10^4$	$<10^3$
Densité d'énergie (Wh/Kg)	Entre 10 et 100	Entre 1 et 10	Entre 10 et 100
Durée de vie nombre de cycles	$10^{10}$	$10^6$	$10^3$

**Tab.II.1 : Comparaison entre les éléments de stockage [Sam13].**

D'après les données du tableau ci-dessus, il est clair que le super condensateur est un élément potentiel pour le stockage de l'énergie embarquée comme source pour la demande de fortes puissances pendant quelques secondes. Son utilisation permet dans le domaine de l'automobile de diminuer la pollution liée aux gaz d'échappement. Des études réalisées dans ce domaine ont démontrées que l'utilisation des super condensateurs dans le véhicule permet de réduire d'environ 15% sa consommation, et jusqu'à 20% celle des bus pour le transport collectif. [H.GU]

**Fig.II.5: Schéma comparatif [Sam13].**



**II.6. Super condensateurs : avantages, inconvénients :**

II.6.1 Les avantages	II.6.2 Les inconvénients
- Cycle de vie charge / décharge important comparé aux batteries chimiques sans dégradation des caractéristiques.	- Basse énergie spécifique (10 Wh/kg) .
- Densité de puissance élevée (2000-4000W/kg) correspondant à 10 fois celles des batteries de lithium-ion de puissance élevée et 100 fois celles des condensateurs classiques.	- Plage de tension limitée
- Capacité de capture d'énergie (freinage rétroactif) à cadence élevée : des batteries sont souvent endommagées par les charges rapides.	- Technologie moins mûre que celle des batteries .
- Capacité élevée (énergie élevée qui peut être déchargée rapidement) .	- Prix plus élevé par rapport aux batteries d'acides de plomb qui sont assez peu coûteuses aujourd'hui et économiques .
- ESR (résistance série) très basse .	- Energie spécifique plus faible que celle des batteries .
- Courant de fuite très faible (peut maintenir une charge sur une longue durée)	- Coût.
- Energie stockée supérieure à celle d'un condensateur conventionnel .	
- Charge très rapide.	

**Table.II.2 Avantages et inconvénients des super condensateurs. [Bou]**



## II.7. Conclusion :

Les super condensateurs montrent des propriétés intéressantes pour les applications de grande puissance de courte durée, et possèdent des durées de vie élevées par rapport aux accumulateurs. Le domaine d'application des super condensateurs est vaste (transport, industrie, électronique domotique, véhicule électrique...).

Les super condensateurs sont utilisés dans notre application, comme moyen fiable de stockage et d'échange d'énergie à forte puissance et courte durée, via un hacheur. Ils peuvent être représentés dans notre étude par une association en série (condensateur  $C_{sc}$ , résistance  $R_{sc}$ ).

Donc il a été question des principes de stockage d'énergie dans les super condensateurs à Couche double électrique, principes qui débouchent sur deux propriétés fondamentales de la capacité de stockage de ce type de dispositifs :

- non-linéarité, conséquence de la nature même de la couche double électrique,
- distribution spatiale, conséquence de la structure poreuse des électrodes.

# **Chapitre III :**

**Commande de la source hybride  
Pile à combustible / super-capacité**

### III.1. Introduction :

Ce chapitre va présenter la commande et simulation de système à base de piles à combustible de type PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell), associées avec des super condensateurs à travers un bus continu de tension à réguler utilisant la commande par PI et mode glissant. La régulation des niveaux de tension entre les deux sources et la charge sera assurée par l'utilisation de deux convertisseurs DC-DC, l'un Boost entrelacé connecté aux piles à combustible, les autres de type Buck/Boost connectés aux super condensateurs, permettant le maintien constant de la tension aux bornes du bus continu.

### III.2. Présentation du système globale :

Le système hybride sur lequel porte cette étude est composé de piles à combustible PEM connectées sur un bus capacitif (de tension variable) par l'intermédiaire d'un convertisseur statique DC-DC non isolé noté : Boost entrelacé, et d'un système de stockage d'énergie de type « super condensateurs » connecté sur le même bus par l'intermédiaire d'un convertisseurs statiques DC-DC non isolés notés : CVS Buck/Boost. À l'extrémité du bus sont connectées des charges RLE.

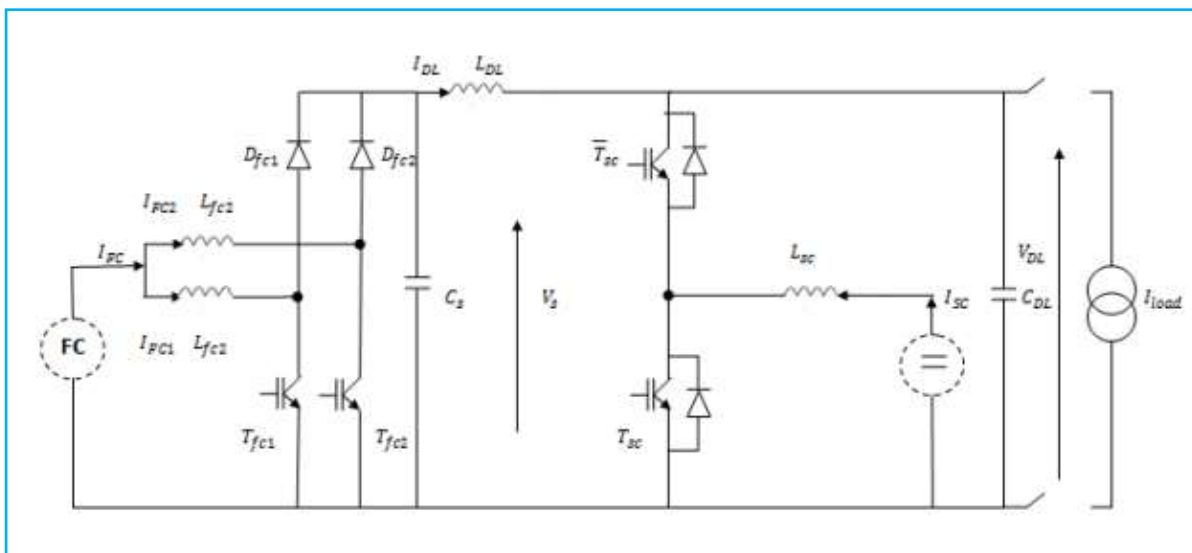
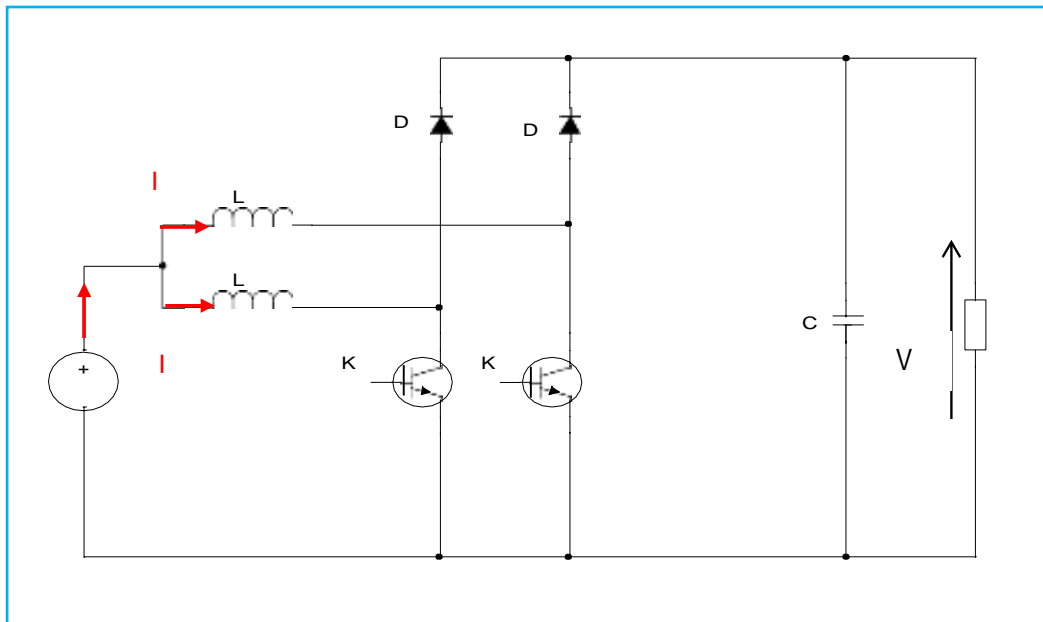


Fig.III.1 : Schéma de système hybride

**III.2.1. Le schéma de principe d'un hacheur survolteur entrelacé (Convertisseur « BOOST » entrelacé (IBC)) :**

Le schéma de principe d'hacheur survolteur entrelacé est montré sur la **Fig.III.2**. Il est utilisé premièrement pour adopté le niveau de tension et deuxièmement pour faire fonctionner la pile à combustible au point de puissance maximale.

L'entrelacement consiste en la mise en parallèle de cellules « BOOST » dont les commandes sont régulièrement décalées entre elles. L'analyse sera faite sur le « BOOST » entrelacé à 2 branches, mais les résultats sont valables pour les autres structures entrelacées. Le principe d'entrelacement est la réduction du courant dans chaque branche et augmenter la fréquence apparente en entrée et en sortie. [Saa15]



**Fig.III.2: Schéma électrique du convertisseur BOOST entrelacé à 2 branches. [Saa15]**

Nous distinguons deux cas de fonctionnement correspondant avec  $D > 0,5$  et  $D < 0,5$ .

Le rapport cyclique  $D$  et le gain en tension sont :

$$\left\{ \begin{array}{l} D = 1 - \frac{V_e}{V_s} \\ \frac{V_s}{V_e} = \frac{1}{1-D} \end{array} \right. \quad (III.1)$$

Tant que la valeur des inductances des deux convertisseurs élémentaires sont identiques, les courants dans les inductances sont de la même forme, mais sont décalés d'une demi période entre eux. Les ondulations de courant dans chaque inductance sont toujours égales à :

$$\Delta i_L = \Delta i_1 = \Delta i_2 = \frac{D.V_e}{L.f} \quad (III.2)$$

Pour un rapport cyclique D inférieur à 0,5, l'ondulation du courant d'entrée et l'ondulation de la tension de sortie sont :

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta i_{pac} = \frac{1-2.D}{1-D} \cdot \frac{D.V_e}{L.f} = \frac{1-2.D}{1-D} \cdot \Delta i_L \\ \Delta V_s = \frac{I_s - (0.5-D)}{C.f} = \frac{V_e \cdot (0.5-D)}{(1-D) \cdot R \cdot C.f} \end{array} \right. \quad (III.3)$$

Et pour un rapport cyclique D supérieur à 0,5, l'ondulation du courant d'entrée et l'ondulation de la tension de sortie sont :

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta i_{pac} = \frac{2.D-1}{D} \cdot \frac{D.V_e}{L.f} = \frac{2.D-1}{D} \cdot \Delta i_L \\ \Delta V_s = \frac{I_s - (D-0.5)}{C.f} = \frac{V_e \cdot (D-0.5)}{(1-D) \cdot R \cdot C.f} \end{array} \right. \quad (III.4)$$

Le courant moyen qui traverse les interrupteurs et les diodes est :

$$I_{K_{moy}} = D \cdot \frac{I_{pac}}{2} \quad (III.5)$$

$$I_{D_{moy}} = (1-D) \cdot \frac{I_{pac}}{2} \quad (III.6)$$

On remarque que les courants dans les interrupteurs et les diodes sont divisés par deux.

Pour la capacité, la fréquence de l'ondulation du courant de sortie est doublée donc la capacité de sortie peut être divisée par deux par rapport au cas du « BOOST » à une branche :

$$C_s = \frac{D.V_e}{2 \cdot (1-D) \cdot R \cdot \Delta V_s \cdot f} = \frac{D.V_s}{2 \cdot R \cdot \Delta V_s \cdot f} \quad (III.7)$$

Cette structure entrelacée est une solution efficace pour augmenter le niveau de puissance, car elle permet le partage du courant entre les phases. Cette structure permet de minimiser l'ondulation du courant et la taille des composants passifs. Mais, les contraintes de tension sur l'interrupteurs et diodes sont encore importantes, ce qui conduit à l'efficacité limitée en raison de pertes de commutation dans les applications à haute puissance. De plus, le convertisseur entrelacé souffre du gain en tension limité, ce qui est identique à celui de « BOOST » conventionnel. [Saa15]

### III.3. Commande du système global :

L'objectif principale de ce système hybride est de satisfaire la puissance demandée par la charge. Dans le cas d'un système à base de piles à combustible, cet objectif est soumis à plusieurs contraintes : il s'agit de minimiser la consommation d'hydrogène en réalisant une répartition optimale de puissance entre les diverses sources avec prise en compte des contraintes énergétiques que peuvent subir les différents organes, telles que la puissance limitée des piles, l'état de charge des éléments de stockage, la figure ci-dessus représente le schéma de commande de système global pour la source principal on a utilisé une commande à base de deux boucle : boucle principale de tension utilisant un régulateur PI et boucle intérieure de courant utilisant un régulateur non linéaire glissant .

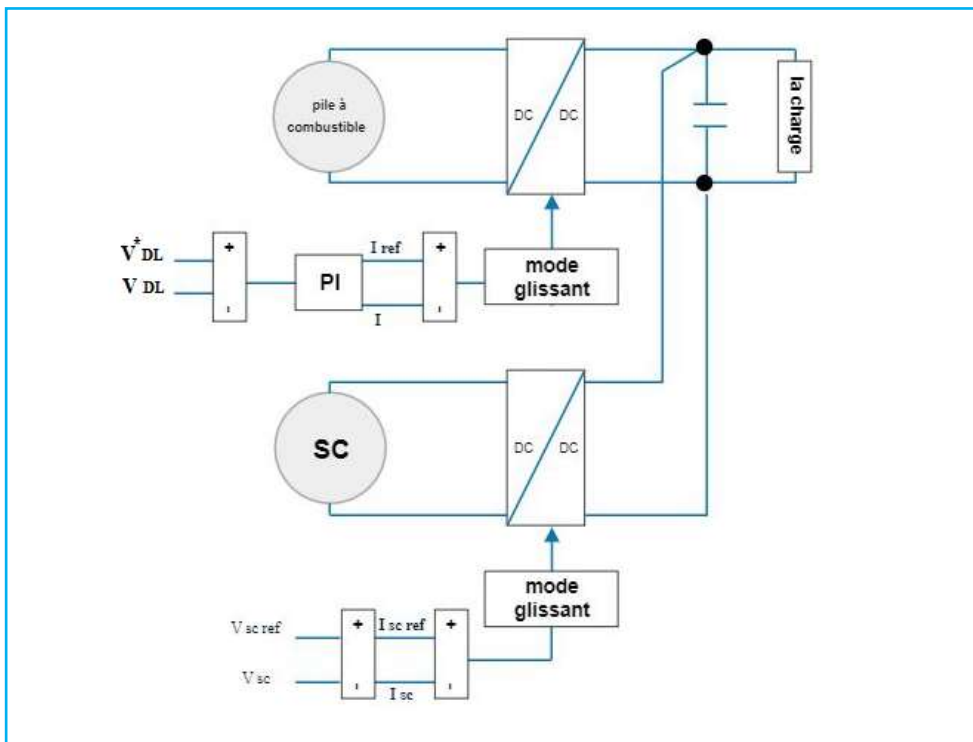
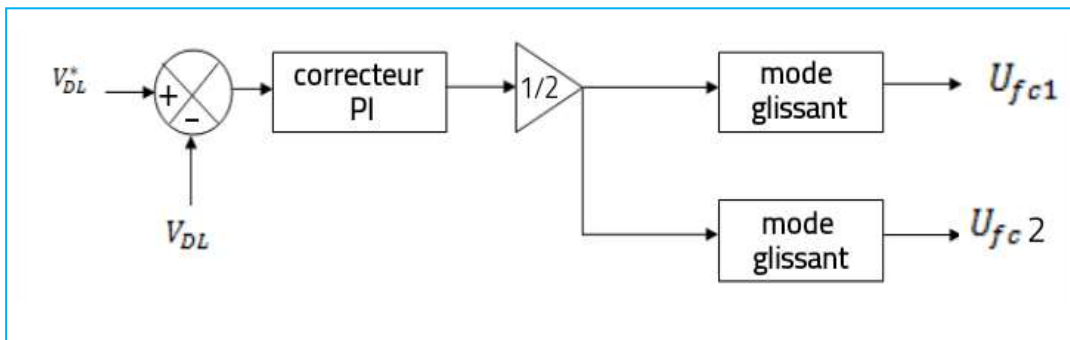


Fig.III.3 : Schéma de commande de système hybride.

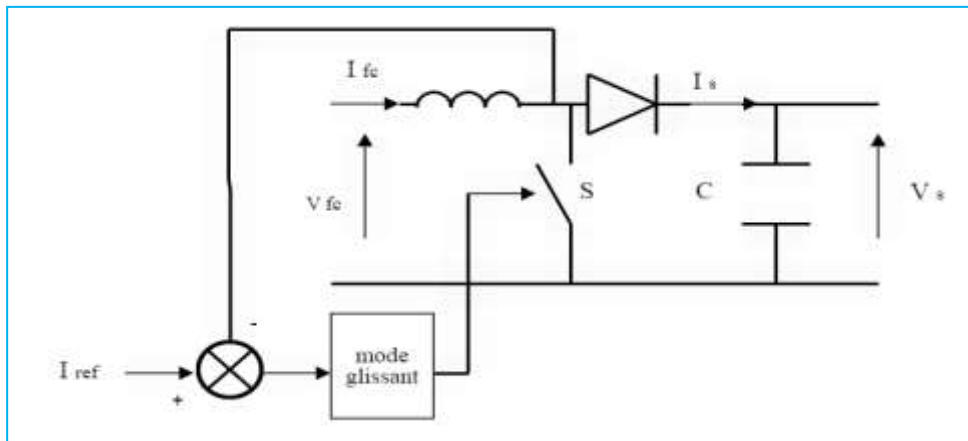
**III.3.1 Commande d’hacheur survolteur :**

Le convertisseur boost entrelacé connecté avec la pile est commandé par deux boucles qui contiennent une boucle externe utilisant un régulateur linéaire de type proportionnel intégrateur PI (ou boucle de tension), qui compare la référence de tension de bus continue avec la tension de sortie mesurée. Ensuite, la boucle interne (boucle de courant) permet d’obtenir les rapports cycliques à partir d’un régulateur non linéaire de type mode glissant.



**Fig.III.4: Régulation de la tension du bus continue.**

**Régulateur de courant par mode glissant :**



**Fig.III.5: Régulation de la Courant par mode glissant.**

Pour commander le courant inductif de chaque phase du convertisseur entrelacé, un régulateur par mode glissant, conçu sur la base du modèle « moyen » du convertisseur est utilisé. Les équations suivantes définissent respectivement le modèle moyen de l'IBC.

$$\begin{cases} \mathbf{L}_{11} \cdot \frac{d\mathbf{I}_{L11}}{dt} = \mathbf{V}_{fc} - (\mathbf{1} - \mathbf{D}_1) \cdot \mathbf{V}_{DL}(\mathbf{t}) - \mathbf{r}_{L11} \cdot \mathbf{I}_{L11} \\ \mathbf{L}_{12} \cdot \frac{d\mathbf{I}_{L12}}{dt} = \mathbf{V}_{fc} - (\mathbf{1} - \mathbf{D}_2) \cdot \mathbf{V}_{DL}(\mathbf{t}) - \mathbf{r}_{L12} \cdot \mathbf{I}_{L12} \\ \mathbf{C}_{DL} \cdot \frac{d\mathbf{V}_{DL}}{dt} = -\mathbf{I}_2 + (\mathbf{1} - \mathbf{D}_1) \cdot \mathbf{I}_{L11} + (\mathbf{1} - \mathbf{D}_2) \cdot \mathbf{I}_{L12} \end{cases} \quad (\text{III.8})$$

Les surfaces de glissement d'IBC peuvent être définis par les expressions suivantes :

$$\dot{\mathbf{S}} = (\dot{\mathbf{I}}_L - \dot{\mathbf{I}}_{Lref}) + \mathbf{K}_L(\mathbf{I}_L - \mathbf{I}_{Lref}) \quad (\text{III.9})$$

Avec  $i = [1, 2]$ . Le coefficient  $K_{iL}$  définit la dynamique avec laquelle l'erreur statique converge vers zéro.

$$\dot{\mathbf{I}}_L = \dot{\mathbf{S}} + \dot{\mathbf{I}}_{Lref} - \mathbf{K}_L(\mathbf{I}_L - \mathbf{I}_{Lref})$$

La dynamique de convergence des surfaces de glissement à zéro est défini comme suit :

$$\dot{\mathbf{I}}_L = -\lambda_L \mathbf{S}_L + \dot{\mathbf{I}}_{ref} - \mathbf{K}_L(\mathbf{I}_L - \mathbf{I}_{Lref}) \quad (\text{III.10})$$

Où  $\lambda_{iL_1}$  est un nombre réels positifs appelé les facteurs de convergence. Sans oublier que les surfaces tendent vers zéro uniquement lorsqu'on connaît les paramètres exacts du système.

A l'aide des relations (III.8), (III.9) et (III.10) pour le IBC on peut exprimer les rapports cycliques ( $D_1, D_2$ ) comme suit:

$$\mathbf{D}_{1,2} = \mathbf{1} - \frac{\mathbf{V}_e}{\mathbf{V}_{DL}} \quad (\text{III.11})$$

### III.3.2 Principe de contrôle du convertisseur DC-DC des super condensateurs :

Afin d'assurer le bon fonctionnement des trois modes, nous avons utilisé une stratégie de commande par mode glissant du convertisseur DC-DC. Ici, on définit une surface de glissement  $S$  en fonction du courant de bus continue. Le courant de charge, la tension  $SC$   $V_{sc}$  et sa référence  $V_{sc}$ . Et le courant  $SC$   $I_{sc}$  :



$$S = K_1 \cdot (V_{DL}^* + V_{DL}) + K_2 (I_{sc}^* - I) \quad (III.12)$$

$$S = 0 \rightarrow I_{sc}^* = I + \frac{K_1 \cdot (V_{DL}^* + V_{DL})}{K_2} \quad (III.13)$$

$$\text{Avec } I = K_{ps} \cdot (V_{sc} - V_{sc}^*) + K_s \cdot \int_0^t (V_{sc} - V_{sc}^*) dt \quad (III.14)$$

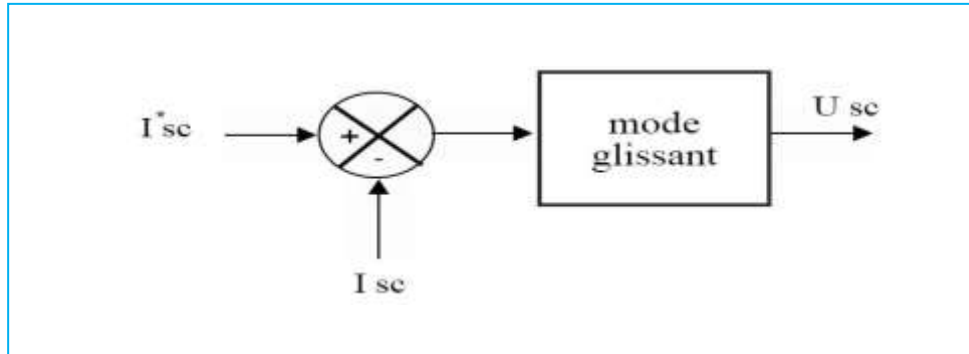


Fig.III.6. Contrôle du convertisseur de super-condensateur.

### III.4. Simulation de système:

L'ensemble du système a été implémenté dans le logiciel Matlab - Simulink avec les paramètres suivants associés aux sources hybrides :

Table.III.1. les paramètres associés aux sources hybrides .

Capacité De Sortie Boost	C <sub>s</sub> =8800 μF
Capacité Bus Continue	C <sub>DC</sub> = 3000 μF
Inductance Câblage Lissage Pile – SC	L <sub>DC</sub> =10 μH
Résistance Enroulement De Câblage Pile -SC	r <sub>DC</sub> =1
Inductance Boost/Buck	L <sub>SC</sub> =100 μH
Tension De Référence Bus Continue	V <sub>DLref</sub> = 36 V
Largeur d’hystérésis	eps = 2

Paramètres de la charge	
Puissance de la charge	$P_0 = 500 \text{ w}$
Inductance Câblage Lissage Pile - SC	$L_{CH} = 10 \mu\text{H}$
Capacité de filtrage de la charge	$C_{CH} = 1000 \mu\text{F}$
La résistance de la charge	$r_{ch} = V^2 c_0 \text{ref} / P_0$

Paramètres de la Pile	
Inductance Série Avec La Pile :	$L_p = 0.2 \text{ mH}$
Résistance Série Avec La Pile :	$r_p = 0.04 \Omega$
Tension Pile á Vide :	$E_p = 24 \text{ V}$

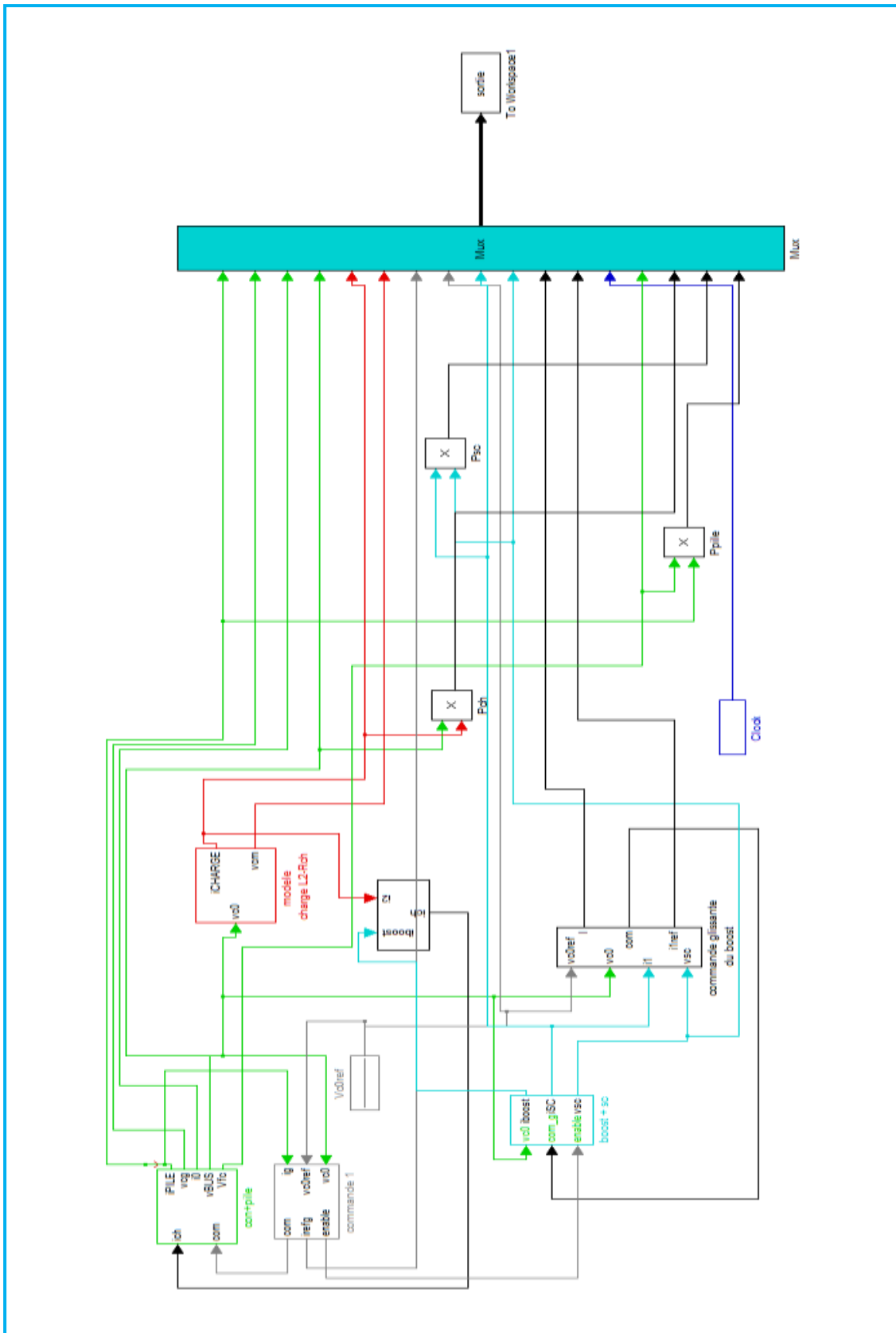


Fig.III.7. Model de système sous MATLAB SIMULINK

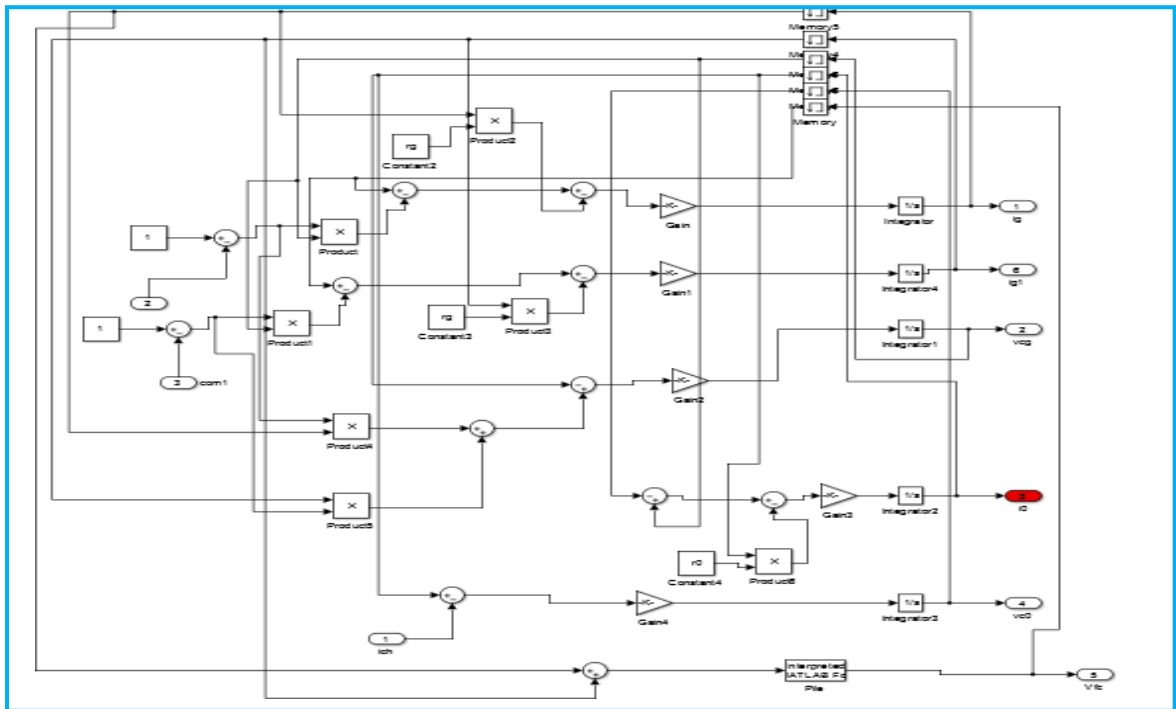


Fig.III.8. Model de pile à combustible avec IBC sous MATLAB SIMULINK

III.4.1. Résultats de simulation de la commande :

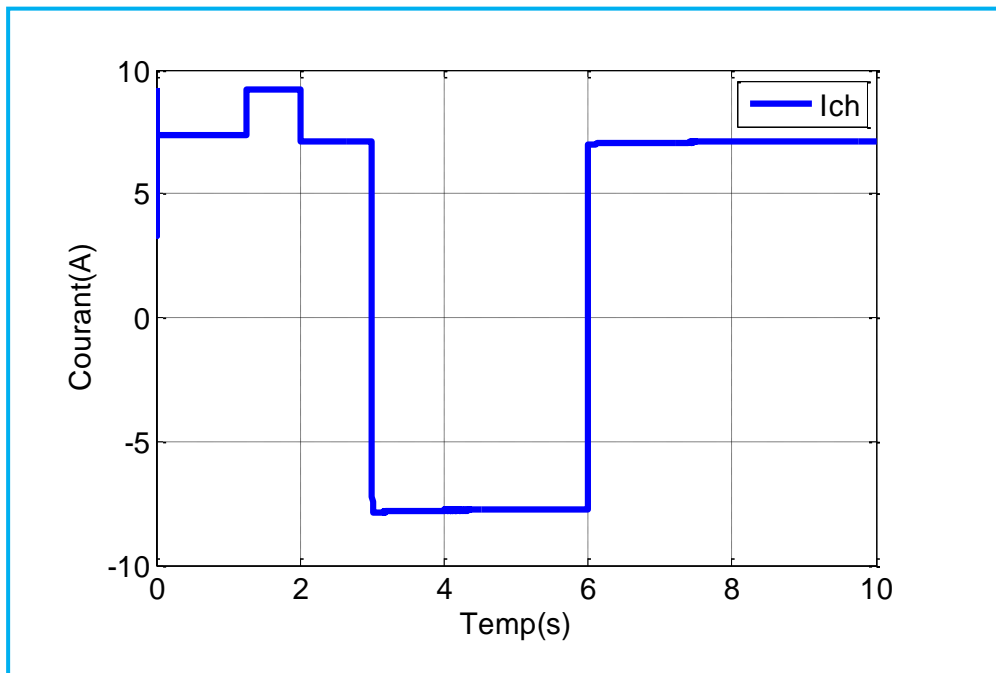
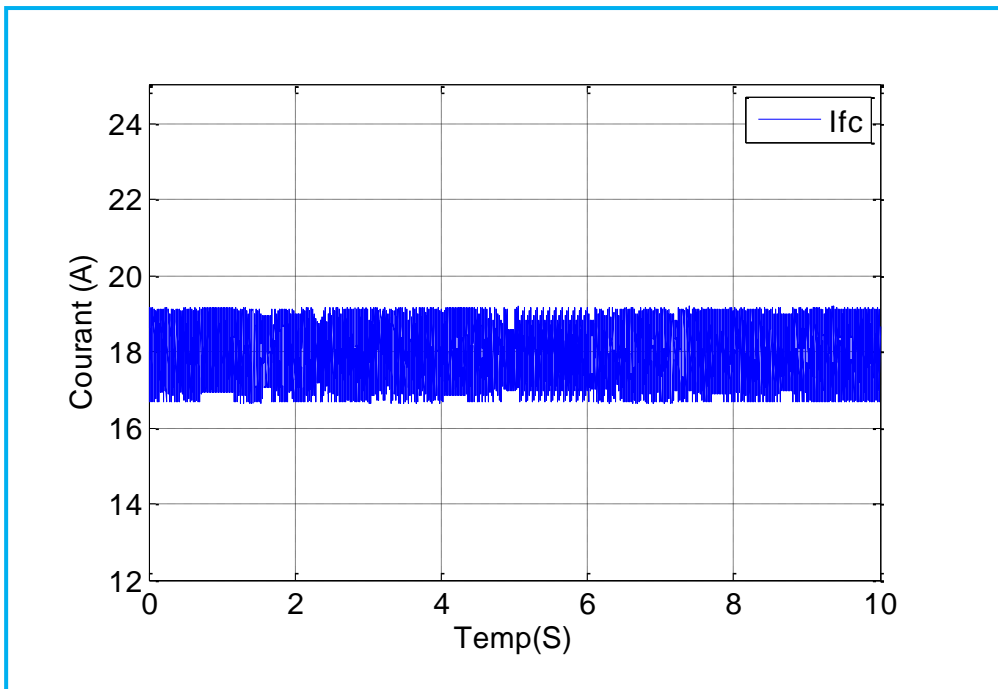
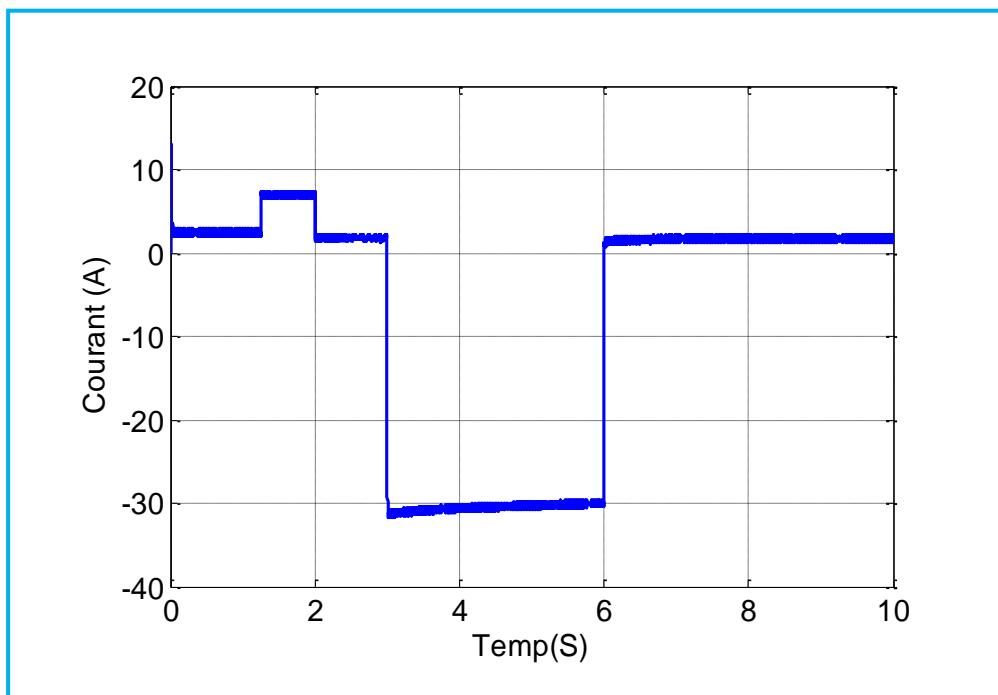


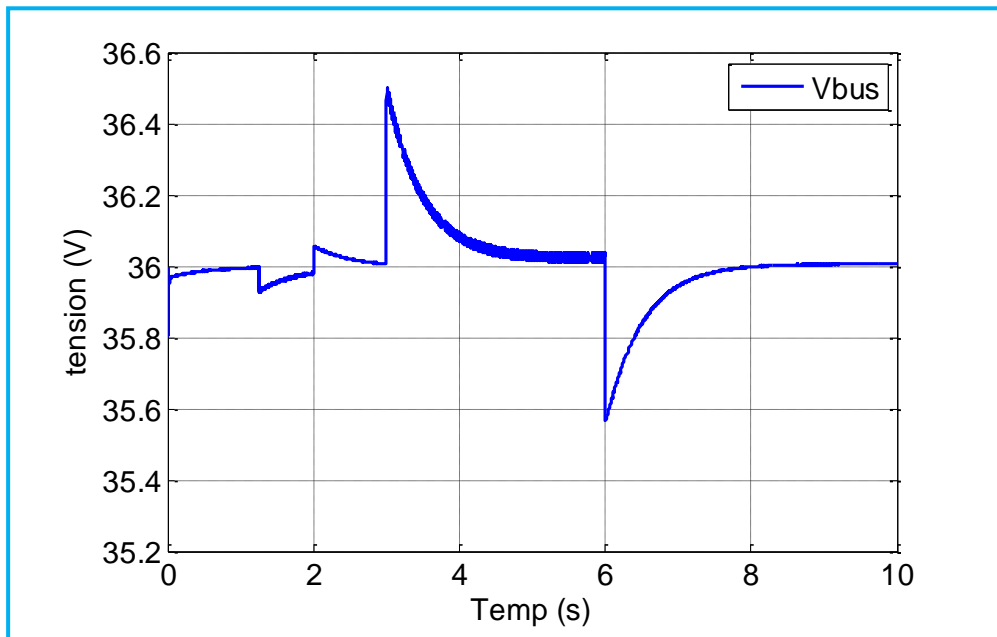
Fig. III.9 : le courant de la charge



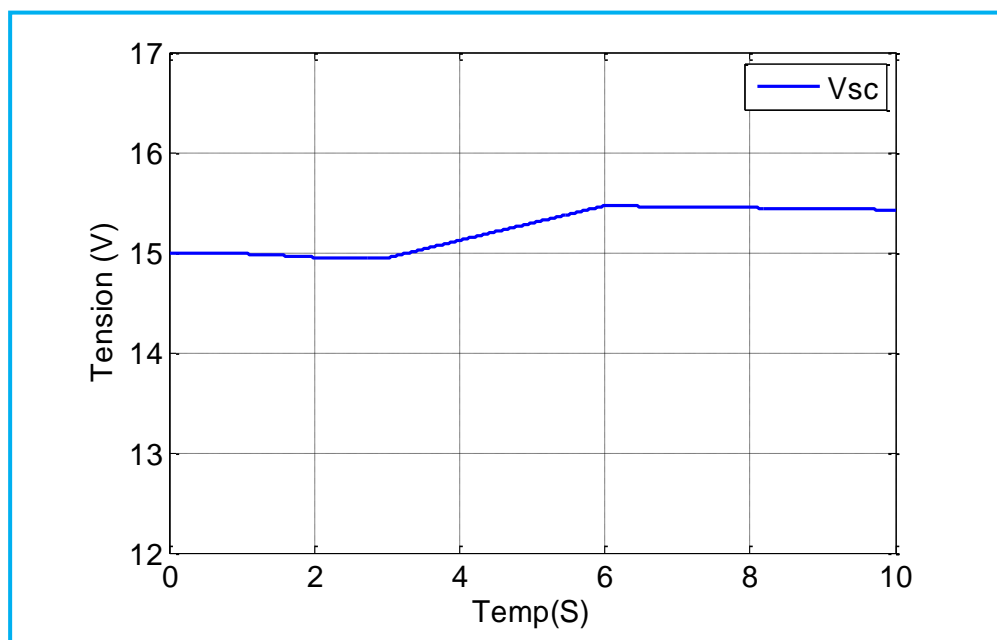
**Fig. III.10 : le courant de la pile à combustible**



**Fig. III.11: Le courant de la super capacité**



**Fig. III.12: La tension du bus continu et la référence de cette tension**



**Fig. III.13: La tension du super condensateur**

### III.4.2. Interprétation des résultats :

La figure III.9, est présentée la variation de courant de la charge pour différent scénario, pour les trois modes :  $P_{charge}=P_{pile}$  ;  $P_{charge}>P_{pile}$  ;  $P_{charge}<P_{pile}$ .

Dans la figure **III.10**, est présentée le courant de la pile à combustible, qui est constant dans l'intervalle du courant  $17\text{ A} < i < 19\text{ A}$  quel que soit les variations du la charge.

Dans la figure **III.11**, est présenté le courant de la super capacité ; On remarque que dans L'intervalle du temps  $1,5\text{s} < t < 2\text{s}$  la puissance de la charge devient supérieure à la puissance du générateur, ceci est dû à la décharge de la super capacité supposée déjà chargée (à  $t=0$   $V_{sc}=12\text{V}$ ); afin de maintenir constante la tension du bus contenu. Et dans l'intervalle du temps  $4\text{s} < t < 6\text{s}$  la différence entre la puissance de la charge et celle du générateur est récupérée pour recharger la super capacité. Dans l'intervalle où les deux puissances sont égales la valeur du courant est très petite 5.

Dans la figure **III.12**, sont présentées la tension du bus continu et sa référence, on observe que la tension du bus continu suit sa référence qui est égale à  $36\text{V}$  quel que soit les variations de la charge. Toute perturbation de la charge entraine une perturbation de la tension, mais ce dernier est insignifiant. La tension du bus continu reprend le chemin de la référence juste après la perturbation.

Dans la figure **III.13**, est présentée la tension du la super capacité ; à  $t=0\text{s}$  la tension est constant et égale à  $15\text{V}$ , c'est le phénomène inverse du courant du la super capacité. On remarque que la tension commence à diminuer légèrement dans l'intervalle du temps  $1,5\text{s} < t < 3\text{s}$  , à partir de ce moment de  $3\text{s}$  débute le chargement de la super capacité et la tension commence à augmenter jusqu'à  $t=6\text{s}$  la tension est maximale et égale à  $15,5\text{V}$ , puis diminuer mais d'une manière légère jusqu'à  $t=10\text{s}$  ; Il est à noter que durant les intervalles  $[1,5 - 3]\text{s}$  ;  $[6 - 10]\text{s}$  , la puissance du générateur est égale à la puissance de la charge, et la tension de la super capacité diminue légèrement.

### **III.5. Conclusion :**

Dans ce chapitre on a étudié la commande d'une source hybride composée d'une pile à combustible connecté par un hacheur boost entrelacé et ainsi une super capacité commandé par un autre hacheur back-boost, le premier hacheur connecté avec la pile à combustible a été commandé par deux boucle en cascade : régulateur simple PI et un régulateur basée sur la commande par mode glissants. Pour la deuxième source et vu que la dynamique de la super capacité est très rapide pour cela en utilise une commande robuste et rapide à base d'un régulateur non linéaire glissant. Les résultats obtenus de la commande utilisé présentent des résultats intéressants, soit au niveau de la régulation de tension sur le bus continu, où bien concernant la gestion de l'énergie produite par les deux sources.



# **CONCLUSION GENERALE**

## Conclusion générale

Ce mémoire présente la commande et simulation d'une alimentation hybride, composé de deux sources connecté avec le bus continu avec deux convertisseur DC DC . La source principale est une pile à combustible, la source secondaire est un super condensateur. Le but principal de ce mémoire et le contrôle de cette source hybride, en utilisant une commande robuste non linéaire afin de maintenir une tension constante au niveau de bus continu quelle que soit la perturbation de la charge et la dynamique rapide du super condensateur.

Nous avons réalisé une simulation globale de système sous MATLAB SIMULINK, à savoir pile à combustible avec le BOOST entrelacé et le super condensateur avec son hacheur « Buck-boost », via une commande non linéaire basée sur le principe du mode glissant pour les deux. Les simulations présentés dans ce mémoire permis de montrer efficacité, stabilité et la robustesse de cette commande.

## Bibliographie:

- [Fri04] W. Friede, S. Raëlet B. Davat, "Mathematical model and characterization of the transient behavior of a PEM fuel cell," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol.19, n° 5, September 2004, pp. 1234-1241.
- [Tho] S. Thomas et M. Zalbowitz, *Fuel Cells – Green Power*, prepared for the U.S.Department of Energy, under contract W-7405- ENG-36.
- [Tho04d] P. Thounthong, S. Raëlet B. Davat, "A PEM fuel cell converter for automotive electrical system," in *Proc. 27th Electrical Engineering Conf. (EECON)*, Khonkaen (Thaïlande), 11-12 novembre 2004, pp. 481-484.
- [Cin] CindaLuzSandoval Torres / Contrôle d'une source d'énergie hybride : Pile à combustible-Super condensateur/ HAL Id: tel-01513109 <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-01513109> Submitted on 24 APR 2017.
- [Riv] Rivas L., Sanchez-Cortes S., García-Ramos .V. Morcillo G., Growth of silver colloidal particles obtained by citrate reduction to increase the raman enhancement factor", *Langmuir*, 2001.
- [F.be01] F. BELHACHEMI, « Modélisation et caractérisation des super condensateurs à couche double électrique utilisés en électronique de puissance », thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine,2001.
- [Cro04] M. A. J. Cropper, S. Geiger et D. M. Jollie, "Fuel cells: a survey of current développements," *Journal of Power Sources*, vol. 131, n° 1-2, mai 2004, pp. 57-61.
- [Sai04] R. SAISSET, « Contribution à l'étude systémique de dispositifs énergétiques à composants électrochimique. Formalisme Bond Graph appliqué aux piles à combustible, accumulateurs Lithium-Ion, Véhicule Solaire », thèse de doctorat, L'institut National Polytechnique de Toulouse ,2004.
- [Ben05] R. Benchrifa, D. Zejli, A. Bennouna; "Piles à combustible, mode efficace et propre de production d'électricité", *International Congress on the Renewable Energies and the Environment*, Sousse, Tunisia, March 2005.
- [Wah06] B. WAHDAME, « Analyse et optimization du fonctionnement de piles à combustible par la méthode des plans d'expériences », thèse de doctorat, université de technologie de belfortmontbeliard et de l'université de France – Comté, 2006.
- [Dup] DuPont Company, *PEM Conductive Plates*, <http://www.dupont.com/fuelcells/products/plates.html>.

- [Zan10]** M. ZANDI, « contribution Au Pilotage des sources Hybrides d'énergie électrique », thèse de doctorat, Université NANCY Institut National Polytechnique de LORRAINE, 2010.
- [Ben05]** R. Benchrifa, D. Zejli, A. Bennouna; "Piles à combustible, mode efficace et propre de production d'électricité", International Congress on the Renewable Energies and the Environment, Sousse, Tunisia, March 2005.
- [Sad06]** I. SADLI; « modélisation par impédance d'une pile à combustible PEM pour utilisation en électronique de puissance »; thèse de doctorat, l'institut national polytechnique de lorraine; 2006.
- [Del02]** S.DELPERT, « Evaluation de stratégies de commande pour véhicules hybrides parallèle », doctorat de l'Université de Valenciennes et de Hainaut Cambresis ,2002.
- [Rou08]** G. ROUSSEAU, « Véhicule hybride et commande optimale », L'école National Supérieure des Mines De Paris, 2008.
- [Bou]** D. BOUQUAIN, A.MIRAOUI, « LES SUPERCONDENSATEURS PRINCIPE, MODELISATION ET APLICATIONS.UTBM, Belfort Cedex France.
- [Car01]** L. Carrette, K.A.Friedrichet U. Stimming, *Fuel Cells - Fundamentals and Applications*, Fuel Cells: 1 (2001) 5-39. [http://www.prophysik.de/Phy/pdfs/NEWS, PDF\\_GER\\_758.pdf](http://www.prophysik.de/Phy/pdfs/NEWS, PDF_GER_758.pdf).
- [Lar03]** J. Larminieet A. Dicks, *Fuel Cell Systems Explained* John Wiley and Sons, Inc., New York, 2003.
- [H.GU]** H. GUALOUS, R.GALLAY, A.BERTHON, « Utilisation des super condensateurs pour les stockages de l'énergie embarquée : applications transport »,CH1728 Rossens,Suisse.
- [M.Y.A04]** M.Y.AYAD, « Mise en œuvre des super condensateurs dans les sources hybrides continues », Institut National Polytechnique De Lorraine, 2004.
- [Sam13]** Samah SAKER / univ. Biskra / Electricité Industrielle Modélisation et Contrôle du système, Pile à Combustible, Convertisseurs et Supercondensateur.2013.

- [Rmo]** R. Saadi, M. Benaouadj, O. Kraa, M. Becherif, M. Ayad, A. Aboubou, M. Bahri, and A. Haddi, "Energy management of fuel cell/supercapacitor hybrid power sources based.
- [Saa15]** SAADI, Ramzi (2015) *Convertisseurs Basse Tension (42V, 540V); Application Source Hybride Utilisant Une Pile à Combustible.* , Université Mohamed Khider - Biskra.
- [UV]** UV Automatique ASI 3 / Correction des systèmes linéaires continus asservis.
- [Dub]** D. DUBOIS / Correcteur Proportionnel Intégral (P.I).
- [MCS]** M.C. SOUSE ALAOUI, « Commande et observateur par modes glissants d'un système de pompage et d'un bras manipulateur », thèse de doctorat, 08 Juliet 2009.
- [Vbr]** V. BREGEAULT, « Quelques contributions à la théorie de la commande par Modes glissants », thèse de Doctorale, Ecole Centrale de Nantes, 3 Décembre 2010.
- [Asa]** Amar si Amour, Contribution de la commande par modes glissants d'ordre fractionnaire, Thèse de Doctorat, Université Mouloud Mammeri. Tizi-Ouzou, 2011.
- [Akj]** Åström K.J., Wittenmark. B, Adaptive control, NewYork: Addison-Wesley publishing company, 1995.
- [Aud]** Aurélien D, "Étude de systèmes différentiels fractionnaires," Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy 1, 2010.
- [Abh]** UNIVERSITÉ FERHAT ABBAS -SETIF-1UFAS1 (ALGERIE)/ABDERREZEK Hadjer/THEME/Contribution à la commande robuste des systèmes non linéaires/2014.

- [Shk]** Université Mouloud MAMMERY, Tizi-Ouzou/SAIBI Hayat-KASSOURI Dalila/Commande par mode glissant d'ordre fractionnaire d'un réseau électrique/2018.
- [Bnrh]** UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA/BELFAR Nouredine & RAHLI Ammar/Amélioration des performances d'une commande à base de mode glissant d'une machine asynchrone double Etoile.2020/2021.
- [HcBs]** UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA/Haithem Chouiref- Bekhti Sid ali /Commande en vitesse par mode glissant d'un moteur synchrone à aimant permanent/2017.
- [Teg]** Ilyes TEGANI/Optimisation et contrôle d'un micro smart grid utilisant une pile à combustible, des super condensateurs, des batteries, une éolienne et une source photovoltaïque/Université Mohamed Khider – Biskra/2017.
- [Man]** MANATSARA Marcellin Alise Christophe /université d'antananarivo ecole supérieur polytechnique / les différentes applications des supercondensateurs. 2016

## RESUMES DU THÈME

### Résumé :

Ce mémoire présente une stratégie de commande utilisée pour contrôler une source hybride composée d'une pile à combustible comme source d'énergie principale et banc de super-capacité comme une source de puissance et stockage. Les deux sources sont reliées avec le bus continu utilisant deux convertisseurs DC/DC : BOOST ENTRELACE et BACK-BOOST.

La commande utilisée est basée sur la notion de d'une commande non linéaire glissante. Les résultats de simulation présentent les hautes performances de la commande utilisée.

- **Mots clés** : pile à combustible, super-condensateur, convertisseur, système hybride, contrôle par mode glissant, hacheur « boost entrelace », hacheur « Buck-boost », bus continu.

### - تلخيص :

تقدم هذه الأطروحة استراتيجية تحكم مستخدمة للتحكم في مصدر هجين مكون من خلية وقود كمصدر رئيسي للطاقة وبنك مكثف فائق كمصدر للطاقة والتخزين. يتصل المصدران بـ BUS CONTINU باستخدام محولين DC/DC : BOOST ENTRELACE و BACK-BOOST..

يعتمد التحكم المستخدم على فكرة التحكم غير الخطي المنزلق. تظهر نتائج المحاكاة الأداء العالي لعنصر التحكم المستخدم.

- **الكلمات الرئيسية** : خلية الوقود ، مكثف فائق ، محول ، التحكم في وضع الانزلاق ، قاطع متناوب.