

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrique  
Filière : Electrotechnique  
Option : Machine électrique

Réf:.....

Mémoire de Fin d'Etudes  
En vue de l'obtention du diplôme:

**MASTER**

*Thème*

*Commande d'une source hybride contenant une pile  
à combustible et une batterie*

Présenté par :  
Ahmed ATIG

Proposé et dirigé par :  
Mr. Messaoud MOHAMMEDI

Promotion: Juin 2012

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrique  
Filière : Electrotechnique  
Option : Machine électrique

Mémoire de Fin d'Etudes  
En vue de l'obtention du diplôme:

**MASTER**

*Thème*

*Commande d'une source hybride contenant une pile à combustible et une batterie*

**Présenté par :**

Ahmed ATIG

**Avis favorable de l'encadreur :**

Mr. Messaoud MOHAMMEDI

**Avis favorable du Président du Jury**

**Cachet et signature**



Université Mohamed Khider Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrique  
Filière : Electrotechnique  
Option : Machine électrique

## *Thème :*

### *Commande d'une source hybride contenant une pile à combustible et une batterie*

**Proposé par** : Mr. Messaoud MOHAMMEDI .....

**Dirigé par** : Mr. Messaoud MOHAMMEDI .....

### **RESUME (bilingue)**

Aujourd'hui, la gestion d'énergie devient une nécessité absolue. Pour réduire la consommation des systèmes électriques, l'idée consiste à récupérer l'énergie lorsqu'il est possible, et à réutiliser lorsque le système est dans le besoin. L'énergie peut être emmagasinée dans les organes de stockage comme la batterie. Cette unité de stockage peut stocker ou fournir les pics de puissances.

Ce travail traite la conception des sources d'énergie hybrides utilisant une pile à combustible comme source principale, un bus continu et les batteries comme source de puissance secondaire transitoire. L'ensemble du système est modélisé par un modèle d'équations d'état. La gestion de l'énergie est atteinte en utilisant la commande basée sur la passivité (en anglais : PBC). PBC est une technique très puissante non linéaire traitant les systèmes d'information importante, comme l'énergie totale du système. Preuve de stabilité et des résultats de la simulation sont donnés. Dans ces lois de commande proposées, peu de mesures sont nécessaires.

**Mots clés** : Commande basée sur Passivité, System Hybride, Pile à Combustible, la batterie.



*Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail*

*A ma très chère mère*

*A mon très chère père*

*A mes chères sœurs, frère.*

*A mes tantes et oncles*

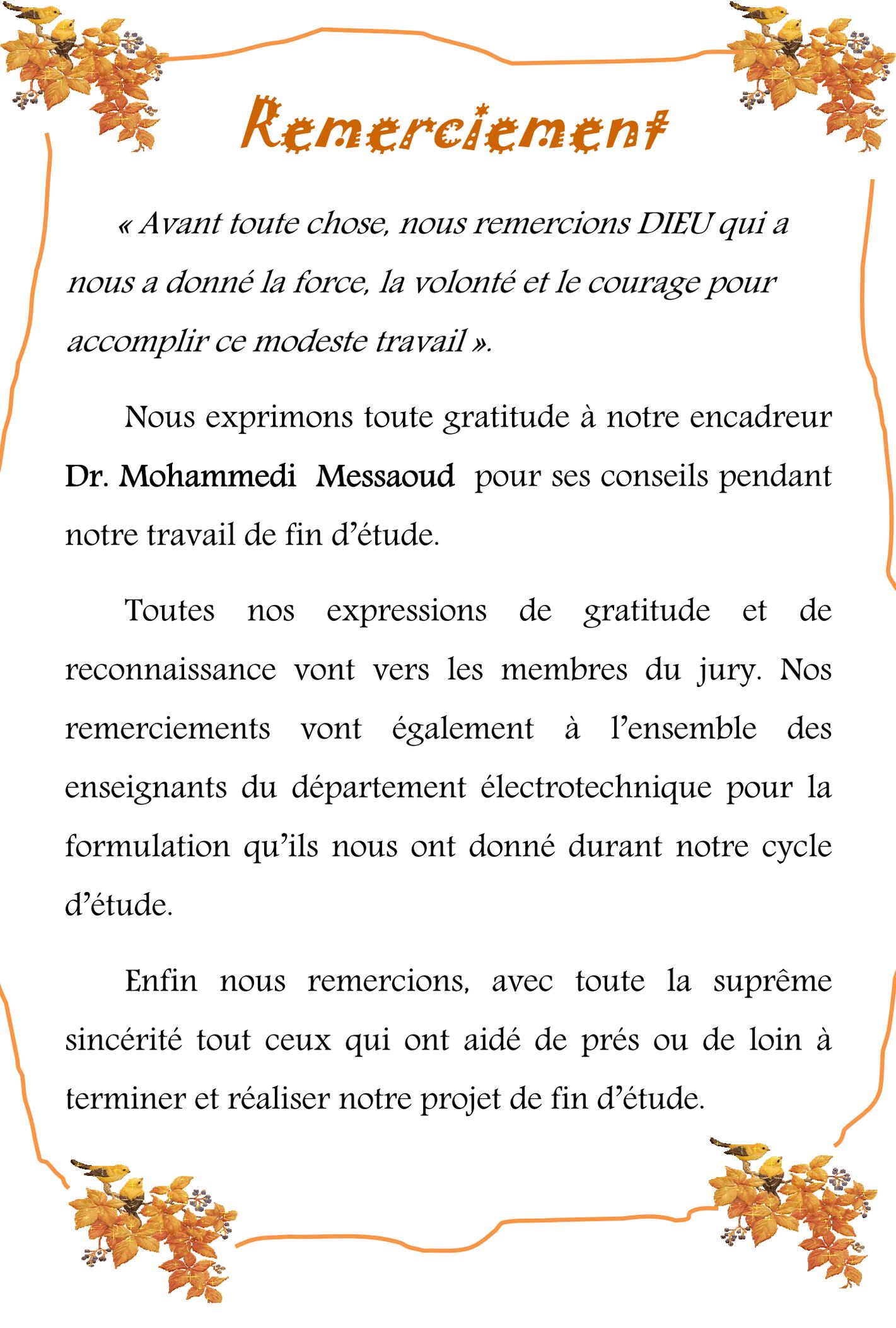
*A toute ma famille*

*A ma chère Souad et sa famille*

*A tous mes amis*

*Ahmed*





# Remerciement

*« Avant toute chose, nous remercions DIEU qui a nous a donné la force, la volonté et le courage pour accomplir ce modeste travail ».*

Nous exprimons toute gratitude à notre encadreur **Dr. Mohammedi Messaoud** pour ses conseils pendant notre travail de fin d'étude.

Toutes nos expressions de gratitude et de reconnaissance vont vers les membres du jury. Nos remerciements vont également à l'ensemble des enseignants du département électrotechnique pour la formulation qu'ils nous ont donné durant notre cycle d'étude.

Enfin nous remercions, avec toute la suprême sincérité tout ceux qui ont aidé de près ou de loin à terminer et réaliser notre projet de fin d'étude.

### Introduction générale

Au cours de ces dernières années, l'utilisation des systèmes hybrides électriques a progressé dans beaucoup de secteurs industriels comme les systèmes embarqués (automobiles, bateaux, avions...), les alimentations électroniques (ordinateurs portables, téléphonies mobiles, lecteurs nomades...) et les centrales de production d'électricité.

Dans un futur proche, l'utilisation des systèmes hybrides électriques deviendra plus importante, ce phénomène s'expliquant par la réduction de la production de pétrole et la demande de réduction des émissions de gaz dangereux. Le plus souvent, les sources électriques diverses comme les systèmes photovoltaïques, les piles à combustibles ou les éoliennes, les organes de stockage comme les batteries ou les supercondensateurs sont présents en nombre dans ce type de système. Parmi toutes les sources d'énergie à disposition, les piles à combustible, les systèmes photovoltaïques et les éoliennes sont celles qui possèdent les énergies spécifiques les plus élevées. Dans ce mémoire, on se propose d'étudier un système hybride électrique constitué d'une source d'énergie une pile à combustible et de organes de stockage la batterie. L'utilisation d'organes de stockage dans le système est rendue nécessaire en raison des contraintes liées aux sources utilisées à savoir l'intermittence de l'alimentation dans le cas des panneaux solaires et les limitations dynamiques imposées par la source électrochimique.

Une pile à combustible est un dispositif qui convertit l'énergie chimique directement en énergie électrique sans aucun processus thermique ou mécanique. Le principe de fonctionnement d'une pile à combustible est décrit par une réaction chimique d'oxydoréduction.

Cette réaction fait réagir l'hydrogène et l'oxygène pour produire de l'électricité, de l'eau et de la chaleur.

Pour connecter les sources électriques principales et auxiliaires d'un système hybride électrique, nous utilisons des convertisseurs statiques qui sont devenus un élément essentiel dans les équipements de conversion d'énergie au cours des dernières décennies. Les convertisseurs permettent d'obtenir une tension fixe ou variable à partir d'une tension quelconque. Grâce à leur rendement de plus en plus élevé, leur encombrement, leur poids et leur coût réduits, les convertisseurs électriques ont remplacé les alimentations classiques linéaires, même pour de faibles niveaux de puissance.

Dans premier chapitre se veut une introductif on aux piles à combustibles. Après un rappel historique de leur évolution depuis leur découverte à ce jour, on présente les différentes filières existantes et les principaux critères qui les différencient. On s'intéresse ensuite tout particulièrement à la filière des piles à membrane échangeuse de protons dites PEMFC. On

présente alors le principe de fonctionnement et les équations thermodynamiques mises en jeu pour obtenir la caractéristique tension-courant sur laquelle on se basera pour justifier la nécessité d'utiliser des convertisseurs statiques.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons les organes de stockage utilisées dans les systèmes hybrides, notamment la batterie. Après une présentation générale de cette source d'énergies, nous exposons leurs principes de fonctionnement et leurs modélisations usuelles. Ce chapitre se termine par une synthèse des avantages et contraintes spécifiques de cette source.

Dans le troisième chapitre donne une introduction de la passivité et de la PBC. Une revue historique est également détaillée. La structure PCH est donnée ainsi que différentes approches de la PBC, telles que la PBC standard, la Balance-d'Énergie et l'IDA-PBC.

Dans le quatrième chapitre donne la structure de la source hybride est l'équation de système est enfin les résultats de simulations est l'interprétation.

Enfin, une conclusion générale permet de faire le bilan des stratégies de contrôle proposées pour le système hybride étudié.

# Chapitre I

## Les piles à combustible

## I.1. Introduction

Une pile à combustible est un dispositif électrochimique qui convertit l'énergie chimique d'une réaction directement en énergie électrique tout en dégageant de la chaleur. Lorsqu'en 1802 Sir Henry David énonce le principe de l'électrolyse inverse, il met en évidence la possibilité de produire de l'électricité et de la chaleur à partir de la réaction chimique entre l'oxygène et l'hydrogène. Partant de ce procédé Sir William Grove expérimenta en 1839 la première pile à combustible produisant de l'électricité, de la chaleur et un produit de réaction, l'eau. Depuis cette découverte, différents types de piles à combustible ont été inventés fonctionnant à des températures pouvant aller de quelques dizaine de degrés Celsius à plus de 1000 °C, selon l'électrolyte utilisé.

À l'instar de toute pile électrochimique ou batterie, la pile à combustible est composée de deux électrodes et d'un électrolyte. Toutefois, bien que les piles à combustibles aient un comportement et des caractéristiques semblables à celles d'une batterie, les deux systèmes diffèrent sur de nombreux points. Une batterie est un dispositif de stockage d'énergie. L'énergie maximum utilisable est déterminée par la quantité de réactant chimique stocké dans la batterie elle-même. La batterie cesse de produire de l'électricité lorsque tout le réactant chimique est consommé, la batterie est alors déchargée. Dans une batterie secondaire, les réactants sont renouvelés par recharge, cela implique de remettre de l'énergie provenant d'une source externe dans la batterie. D'un autre côté, contrairement à ce qui se passe pour les batteries, dans une pile à combustible les électrodes ne sont pas consommées avec le temps et les produits ne sont pas stockés à l'intérieur de la pile. Le combustible et le comburant proviennent d'une source externe et, aussi longtemps qu'ils sont fournis à la pile, l'électricité continue de circuler.

## I.2. Historique

- 1839 : Découverte de combustible l'effet pile à par l'allemand Christian Schönbein.
- 1839-1842 : Réalisation du premier modèle de laboratoire de pile à combustible par William R. Grove.
- 1932 : qui réalisent un premier prototype de 1 kW en 1953, puis 5 kW en 1959. Ce prototype servira de modèle pour les futures piles à combustible utilisées lors des missions spatiales Apollo.
- Le très long laps de temps (plus d'un siècle) qui s'est écoulé entre la réalisation du premier modèle de pile à combustible et les premières utilisations s'explique par le très fort

développement qu'ont connu les autres types de générateurs d'énergie électrique et par le fait que le coût des matériaux utilisés dans la pile à combustible reste encore actuellement élevé. En 2007, il semble que les PAC fonctionnant au méthanol destinées à alimenter l'électronique portable seront commercialisées avant celles destinées à l'industrie automobile.

Ce n'est qu'en 2007, sous l'égide du Japon, qu'un début de réflexion sur des normes, règles et standards de fabrication et de sûreté a commencé, de manière à faciliter l'usage généralisé de ces PAC. Le Japon espère ainsi réduire de 50 % ses émissions de CO<sub>2</sub> liées à la petite électronique, en proposant par ailleurs des batteries dont l'autonomie sera multipliée par trois.

### **I.3. Définition**

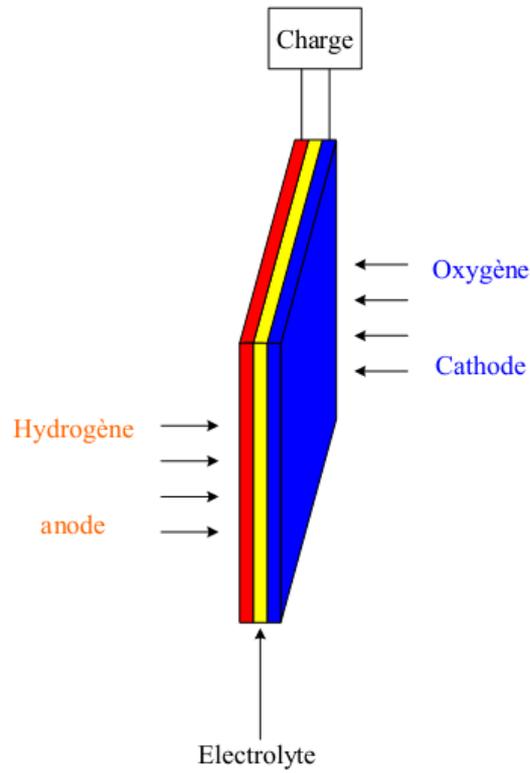
Une pile à combustible est une pile où la production de l'électricité se fait grâce à l'oxydation sur une électrode d'un combustible réducteur (par exemple l'hydrogène) couplée à la réduction sur l'autre électrode d'un oxydant, tel que l'oxygène de l'air. La réaction d'oxydation de l'hydrogène est accélérée par un catalyseur qui est généralement du platine. Si d'autres combinaisons sont possibles, la pile la plus couramment étudiée et utilisée est la pile hydrogène-oxygène.

Une pile à combustible (PAC) est un générateur électrochimique qui permet de convertir directement l'énergie chimique interne d'un combustible en énergie électrique sans passer par l'énergie thermique.

Par conséquent, le rendement des PAC n'est pas limité par l'efficacité de Carnot. Dans les PAC les réactifs sont renouvelés et les produits évacués en permanence, ce qui signifie qu'il y a production d'énergie électrique aussi longtemps que le système est alimenté en gaz réactifs (combustible et comburant).

De même la structure (électrodes, électrolyte et sites réactifs) ne réagit pas et ne se dégrade pas au cours du temps.

Une pile à combustible est constituée d'un empilement d'éléments anode-électrolyte-cathode reliés par l'intermédiaire d'inter connecteurs (ou plaques bipolaires) formant ainsi une « stack » (ou module).

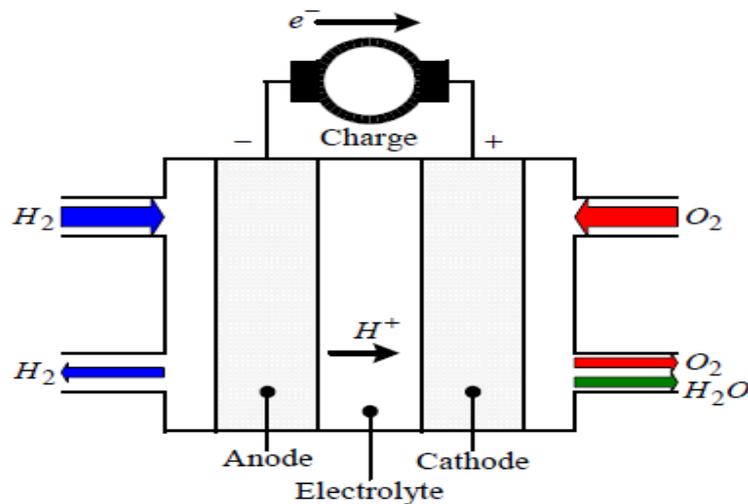


**Figure I.1.** Composition d'une cellule élémentaire d'une pile à combustible. [5]

#### I.4. Principe de fonctionnement [2]

Une pile à combustible est un dispositif de conversion d'énergie qui convertit l'énergie. 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.



**Figure I.2.** Principe de fonctionnement d'une pile à combustible.

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.

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 parce 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.

### **I.5. Les différents types de piles à combustible [5]**

Les piles à combustible sont généralement classifiées par le type d'électrolyte utilisé. Une exception dans cette classification est la pile de type DMFC (Direct Méthanol Fuel Cell) qui est en fait une PEMFC, mais utilisant comme carburant du méthanol qui est directement envoyé à l'anode. Une autre caractéristique utilisée pour classer les piles à combustible est leur température de fonctionnement, on distingue ainsi les piles à basse température et les piles à haute température. Les

piles à basse température sont les piles alcalines ou AFC (Alcaline Fuel Cell), les piles ou DMFC et les piles à acide à membrane échangeuse de protons ou PEMFC, les piles à méthanol direct phosphorique ou PAFC (phosphorique Acide Fuel Cell). Les piles à haute température fonctionnent entre 600 et 1000 °C. Deux types ont été développés, soit les piles à carbonates fondus ou MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell) et les piles à oxyde solide ou SOFC (Solide Oxyde Fuel Cell). Le tableau 1 récapitule les différents types de piles avec leurs caractéristiques respectives.

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

**Tableau I.1.** Les différents types de piles à combustible. [3]

### I.5.1. La pile alcaline (AFC)

Les piles AFC ont l'avantage d'avoir le meilleur rendement de toutes les piles à combustible, mais elles travaillent correctement seulement en utilisant des gaz très purs ce qui est considéré comme un inconvénient majeur pour de nombreuses applications.

Utilisée depuis le début des années 1940, cette pile se retrouve également à bord des vaisseaux spatiaux habités de la NASA depuis les trente dernières années. Fonctionnant à des températures variant de 120 à 150°C, les réactions mises en jeu sont les suivantes:

À l'anode, avec un catalyseur au nickel ou au platine-palladium, on a la réaction:



et à la cathode, avec un catalyseur à l'oxyde de nickel, à argent ou au platine-or, on a la réaction:



Dans ce cas, l'électrolyte utilisé est une solution de KOH (généralement en concentration de 30 à 40%), qui est un électrolyte conducteur d'hydroxyde ( $\text{OH}^-$ ). Comparé aux piles à électrolyte acide, cet électrolyte a l'avantage, d'accélérer la réduction de l'oxygène, ce qui en fait un système intéressant pour certaines applications spécifiques.

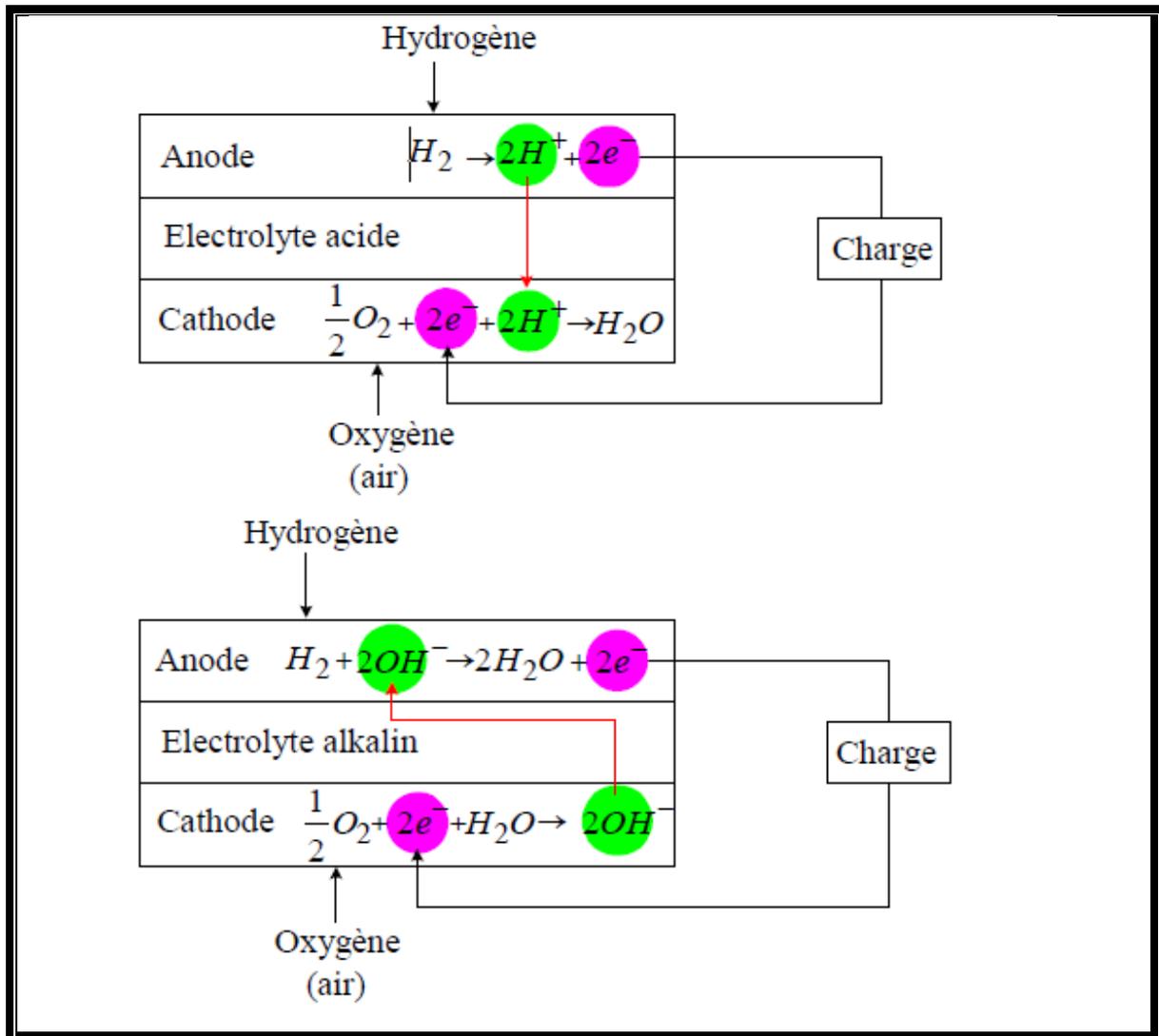
L'électrolyte peut réagir avec le dioxyde de carbone pour former un composé de carbonate, ce qui réduit énormément le rendement de la pile à combustible. En effet, le  $\text{CO}_2$  contenu dans l'air réagit avec l'électrolyte dans la réaction suivante:



Les catalyseurs sont habituellement une combinaison de nickel et d'un métal inactif, comme l'aluminium, permettant ainsi de réduire le coût global du système. Le magnésium métallique ou des composés de graphite sont utilisés pour les plaques bipolaires qui sont les connecteurs permettant de construire un assemblage (ou stack) en reliant plusieurs piles en série.

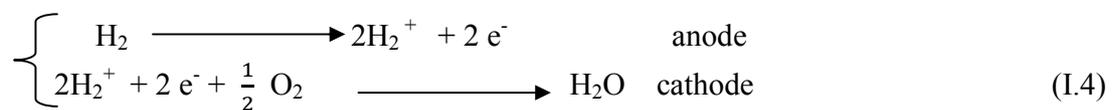
### **I.5.2. Pile à combustible de type PEM (PEMFC : Proton Exchange Membrane Fuel Cell) [2]**

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. Dans cette thèse, nous nous intéressons exclusivement à ce type de pile à combustible. La structure d'une cellule de pile à combustible de type PEM est représentée dans la (figure I-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.



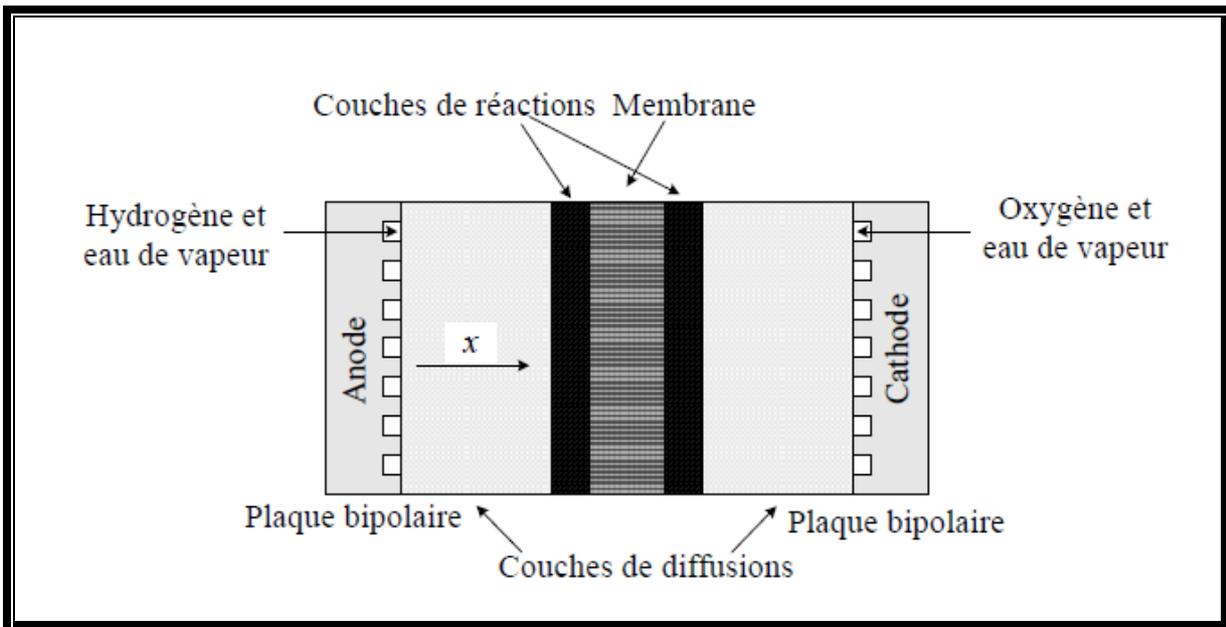
**Figure I.3.** Principe des piles à combustible à électrolyte acide (en haut) ou alcalin (en bas).

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.



**Figure I.4.** Différentes couches d'une cellule élémentaire de PEMFC.

### I.5.3. La pile à acide phosphorique (PAFC)

La pile à combustible à acide phosphorique est le système le plus avancé dans le développement et la commercialisation. Elle est principalement utilisée pour des applications stationnaires, en tant que générateur électrique. Des centrales électriques de type PAFC, avec une puissance fournie comprise entre 5 et 20 MW, ont été installées dans différents endroits dans le monde pour fournir de l'électricité, du chauffage et de l'eau chaude à certains villages, usines ou hôpitaux.

Les avantages des PAFCs sont sa facilité de fabrication, sa stabilité thermique et chimique et la faible volatilité de l'électrolyte aux températures de fonctionnement (entre 150 et 220°C). Ces facteurs ont facilité le développement commercial de ce type de système.

Les réactions qui se produisent dans une PAFC sont les mêmes que dans le cas de la PEMFC, avec des températures de fonctionnement variant de 150 à 220°C, on a donc

à l'anode:



et à la cathode:



Les composants de ces deux dernières piles à combustible (PAFC et PEMFC) sont très semblables, sauf pour ce qui est de l'électrolyte. Dans le cas de la PAFC, l'électrolyte est de l'acide phosphorique (aussi un électrolyte conducteur de protons), un liquide, alors qu'il s'agit d'un polymère solide dans le cas de la PEMFC. Au début du développement des PAFCs, on a utilisé l'acide phosphorique en solution afin de limiter la corrosion de certains constituants de la pile. Mais avec les progrès faits dans les matériaux utilisés pour la construction des piles, la concentration en acide est maintenant de 100%. L'acide est généralement stabilisé dans une matrice à base de SiC. La forte concentration en acide augmente la conductivité de l'électrolyte et réduit la corrosion du support des électrodes en carbone.

Comme dans le cas des PEMFCs, cette pile utilise des électrodes de carbone, avec un catalyseur à base de platine, qui permettent la diffusion des gaz. Les plaques bipolaires sont deux plaques poreuses séparées par une mince feuille de graphite pour former un substrat côtelé dans lequel l'électrolyte peut être stocké. On procède actuellement à l'essai d'autres catalyseurs pour ce type de piles à combustible: fer-cobalt, titane, chrome, zirconium.

#### **I.5.4. La pile à méthanol direct (DMFC)**

Il ne faut pas confondre cette pile avec les piles qui utilisent du méthanol (ou éthanol) comme source d'hydrogène par le reformage externe (la pile à méthanol indirect). La DMFC est une PEMFC utilisant du méthanol comme carburant, le méthanol est alors directement en contact avec l'anode, à laquelle les réactions suivantes se produisent (à des températures de fonctionnement ne dépassant jamais 80°C):

À l'anode on a:



et à la cathode on a:



Il est important de noter que dans une DMFC, ce sont les protons qui se déplacent de l'anode à la cathode et non les molécules de méthanol. Tout comme c'est le cas chez la PEMFC, cette pile à combustible utilise un électrolyte polymérique échangeur d'ions, cependant ces membranes ne sont

pas avantageuses pour bloquer le passage du méthanol. Le mouvement des protons dans la membrane est associé à la teneur en eau de la membrane.

Le méthanol et l'eau ayant des propriétés comparables (moment dipolaire), les molécules de méthanol sont aussi bien transportées vers la cathode que les molécules d'eau par un processus de drag osmotique. A la cathode, le méthanol cause un mélange de potentiels dû à l'interférence entre les réactions d'oxydation du méthanol et de réduction de l'oxygène. Cela a pour effet une baisse des performances de la pile.

La traversée du méthanol à travers la membrane dépend de plusieurs facteurs, les plus importants étant la perméabilité (et donc proportionnel à l'épaisseur) de la membrane, la concentration en méthanol, la température de fonctionnement, et les performances de l'anode elle-même. La membrane est un facteur très important dans le problème de la traversée du méthanol, une membrane fine permet d'avoir une résistance de la pile moins importante, mais elle tend à avoir une plus grande perméabilité au méthanol. Une membrane épaisse est donc avantageuse dans le cas des piles au méthanol.

Comme pour les PEMFCs, les plaques bipolaires sont faites de graphite, de métal ou de matériaux composites. Le catalyseur à l'anode est composé d'un mélange de ruthénium et de platine qui empêche l'empoisonnement par le monoxyde de carbone, qui est l'intermédiaire dans la réaction.

### **I.5.5. La pile à oxyde solide (SOFC)**

Le principe de fonctionnement des SOFCs est basé sur le mécanisme suivant: l'oxygène est dissocié à la cathode en  $O^{2-}$ , puis l'anion migre à travers l'électrolyte conducteur ionique à haute température et va se combiner à l'anode avec l'hydrogène, ou le monoxyde de carbone, pour former de l'eau et libérer des électrons.

Les réactions mises en jeu sont les suivantes:

À l'anode, avec un catalyseur au cermet de zirconium et nickel on a la réaction:



ou:



et à la cathode, dans les deux cas, à l'aide d'un catalyseur au manganite de luthane dopé au strontium, on a la réaction:



La caractéristique principale des SOFCs réside donc dans leur haute température de fonctionnement (600 à 1 000 °C) nécessaire à l'obtention d'une conductivité ionique suffisante de l'électrolyte céramique. Cette température présente un double avantage. Elle permet d'abord l'utilisation directe d'hydrocarbures, qui pourront être facilement reformés en se passant de catalyseur à base de métaux nobles. Elle produit d'autre part une chaleur élevée facilement exploitable en cogénération, le rendement pouvant atteindre ainsi 80%. Mais elle présente également un inconvénient, la mise en température est longue et complique toute utilisation à cycles courts et répétitifs (comme dans le cas des transports).

Pour ces raisons, la technologie SOFC se prête particulièrement bien à la production d'électricité décentralisée et à la cogénération (domaines couvrant des puissances allant de 1 kW à quelques dizaines de MW).

Grâce à son fort rendement et sa capacité potentielle à fonctionner directement avec des hydrocarbures liquides, elle trouvera également un débouché dans la propulsion navale, voire terrestre (trains, camion...).

La mise au point de ce type de pile implique, de par cette haute température de fonctionnement, la résolution de problèmes thermomécaniques de tenue de matériaux assez complexes, ainsi que d'assemblage et d'étanchéité.

Une des particularités de la SOFC est son électrolyte solide, habituellement du Zirconium ( $Zr_2$ ) dopé d'une mole de 8 à 10% d'ytterbium ( $Y^{3+}$ ), laquelle joue le rôle de conducteur pour l'anion oxygène ( $O^{2-}$ ). Les SOFCs peuvent être de conceptions planes, monolithiques et tubulaires, et utiliser de l'acier inoxydable, de l'acier austénitique, des matériaux céramiques selon les températures de fonctionnement et l'électrolyte désiré.

#### **1.5.6. La pile à carbonates fondus (MCFC)**

Le développement des piles à combustible à carbonates fondus a débuté dans le milieu du vingtième siècle.

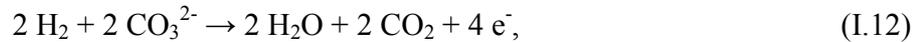
Les avantages et les inconvénients de ce type de pile sont sensiblement les mêmes que dans le cas des SOFCs. La température élevée améliore énormément la cinétique de la réaction de réduction de l'oxygène et rend ainsi inutile l'utilisation de métaux nobles comme catalyseurs.

Les systèmes à base de piles MCFC peuvent atteindre des rendements supérieurs à 50%, voir supérieurs à 70% lorsqu'ils sont combinés à d'autres générateurs. De plus, les MCFCs peuvent utiliser une large gamme de carburant (grâce au reformage interne), et ne sont pas sensibles à la contamination par CO ou CO<sub>2</sub> comme c'est le cas pour les piles à basses températures.

---

Les réactions ayant lieu dans ce type de piles sont les suivantes:

À l'anode, avec un catalyseur fait d'un alliage nickel-chrome / nickel-aluminium, on a la réaction:



et à la cathode, avec un catalyseur d'oxyde de nickel, on a :



Ici, du dioxyde de carbone et de l'oxygène sont consommés la cathode et l'ion de carbonate ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) voyage de la cathode à l'anode.

L'électrolyte est fait d'un mélange de carbonates de métaux alcalins (carbonates de lithium, de potassium et de sodium) retenus par une matrice céramique d'oxyde d'aluminium et de lithium ( $\text{LiAlO}_2$ ). Les plaques bipolaires sont faites d'acier inoxydable recouvert de nickel du côté de l'anode. Le choix des matériaux est extrêmement important, en raison de la nature hautement corrosive de l'électrolyte et de la température de fonctionnement très élevée.

### **I.6. Construction de pile à combustible de type PEM [2]**

Beaucoup de cellules sont reliées électriquement en série pour former le stack. Chaque cellule se compose d'un assemblage membrane-électrodes qui constitue l'anode, la cathode et l'électrolyte serré entre deux plaques en graphite. Les plaques dirigent le carburant et l'air des deux côtés opposés de l'assemblage.

Un système de refroidissement est utilisé pour régler la température de fonctionnement de la pile à combustible. Pour faciliter cela, des circuits de refroidissement par cellule ou par groupe de cellules permettent d'absorber ou de fournir (au démarrage) la chaleur. Les joints entre les plaques en graphite s'assurent que l'oxydant, le carburant et le liquide de refroidissement ne se mélangent jamais dans la pile à combustible.

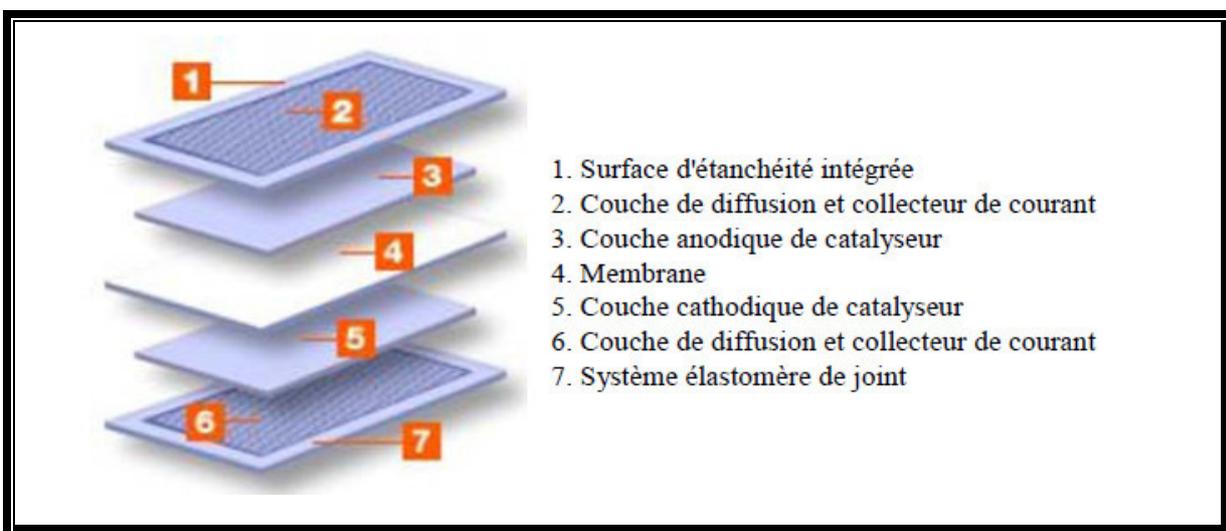
Aux extrémités du stack se trouvent les connexions électriques, les bornes d'alimentation des gaz et de départ des gaz non utilisés et les bornes d'arrivée et de départ du fluide de refroidissement. Soit au total huit bornes où circulent constamment des fluides.

La conception d'une pile à combustible vise à utiliser au mieux la surface de la membrane et joue sur le compromis surface de la membrane-nombre de cellule pour obtenir puissance désirée. Les points critiques sont les joints, les tolérances des circuits de distribution des fluides et l'alignement des cellules. Comme pour tout produit commercial, la conception résultante doit être fiable, simple à fabriquer, économiquement viable et avoir une durée de vie acceptable.

### I.6.1. Assemblage membrane-électrodes

L'assemblage membrane-électrodes est le cœur de la pile à combustible. Il se compose d'une membrane d'électrolyte de polymère solide serrée entre deux électrodes de carbone poreuses. Un catalyseur à base de platine est intégré entre la membrane et les électrodes.

Les électrodes incluent souvent des joints améliorant le contact avec les composants adjacents et évitant les fuites. A titre d'exemple, la figure I.5 présente l'assemblage membrane-électrodes de sept couches de la compagnie 3M.



**Figure I.5.** Assemblage membrane-électrodes de sept couches de la compagnie 3M.

#### I.6.1.1. Electrodes

Les électrodes fournissent l'interface entre les gaz réactifs et l'électrolyte. Elles doivent permettre le passage du gaz humide, fournir une surface de réaction où les gaz entrent en contact avec l'électrolyte, être conductrices aux électrons libres et assurer le passage des ions vers la membrane. Du papier en fibre de carbone est typiquement utilisé pour cet objectif parce qu'il est poreux, hydrophobe (non-mouillable), conducteur et non-corrosif. Le matériau d'électrode est très mince pour faciliter le transport des gaz et de l'eau.

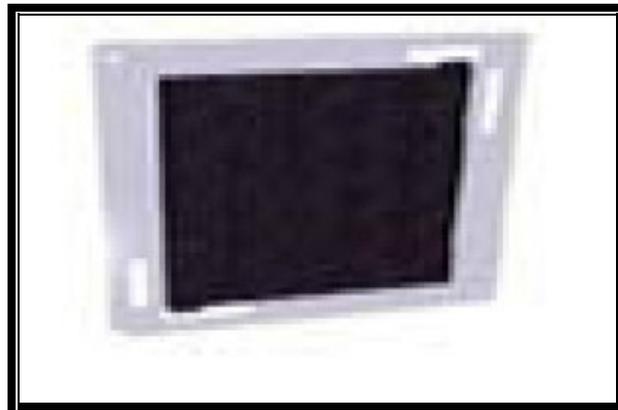
Un catalyseur est ajouté à la surface de chaque électrode où il est en contact de l'électrolyte afin d'augmenter l'efficacité de la réaction chimique. Le catalyseur améliore la réaction chimique en fournissant les sites de réaction mais n'est pas consommé dans le procédé. Le platine est typiquement utilisé en raison de sa haute activité, sa stabilité et sa conductivité électrique. Le platine

était onéreux, la quantité utilisée (exprimée en  $\text{mg.cm}^{-2}$ ) est un facteur significatif dans le coût d'une pile à combustible. Les concepteurs de pile à combustible essaient de minimiser la quantité de platine utilisée tout en maintenant le bon fonctionnement des cellules.

### I.6.1.2. Electrolyte

L'électrolyte en polymère solide est la caractéristique distinctive d'une pile à combustible de type PEM. L'électrolyte est une membrane mince d'une épaisseur de 50 à 175  $\mu\text{m}$ . 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. La proportion d'eau par rapport aux ions d'hydrogène pour obtenir une conductivité efficace est typiquement dans un rapport de 3 pour 1. 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, produit par Dupont (figure I.6). En outre, certains fabricants de piles à combustible comme Ballard ont développé leurs propres membranes.



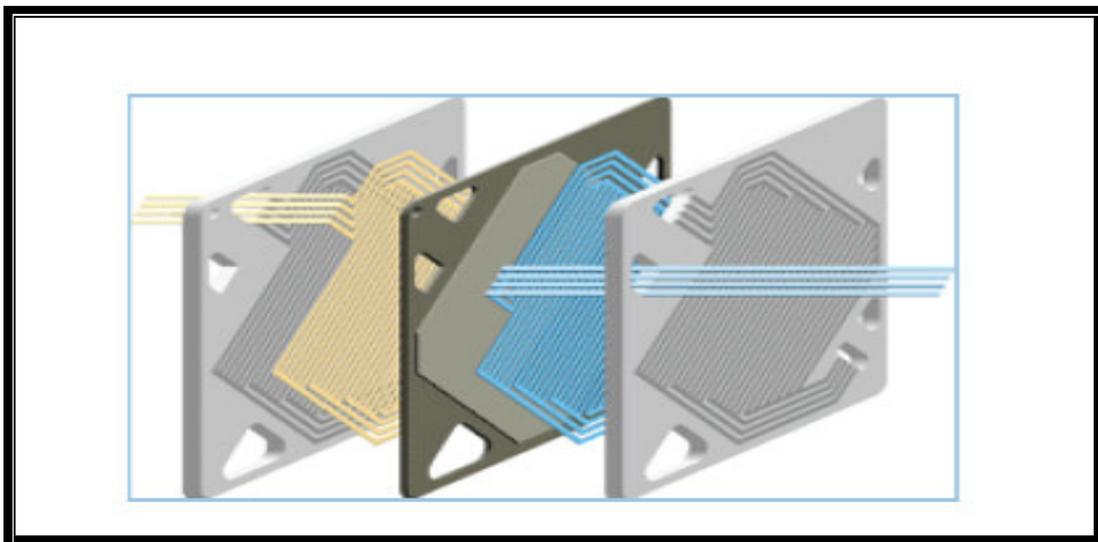
**Figure I.6.** Membrane DuPont.

### I.6.1.3. Plaque bipolaire

Les plaques bipolaires dirigent le carburant et l'oxydant des deux côtés opposés des assemblages membrane-électrodes. Chaque plaque contient des canaux de conception sinueuse qui maximise la répartition des gaz (figure I.7). La forme des canaux de gaz est un paramètre important pour la production uniforme d'électricité, un fonctionnement stable des cellules et la gestion de l'eau. Des conceptions différentes des plaques bipolaires sont adaptées aux diverses applications de pile à combustible.

Chaque plaque doit être électriquement conductrice pour que le courant issu de la réaction électrochimique puisse passer d'une cellule à l'autre, et finalement aux bornes électriques. Les plaques sont typiquement faites de graphite les canaux étaient usinés ou pressés. Le graphite est le matériau préféré en raison de sa conductivité excellente, sa neutralité et son coût relativement bas.

Les plaques de refroidissement placées entre les cellules ou les groupe de cellules sont de conception similaire, les canaux de refroidissement étant conçus pour maximiser les échanges thermiques. Les plaques bipolaires de refroidissement comportent les entrées et sorties de fluides et assurent la liaison avec les plaques voisines. Des joints entre les plaques s'assurent que les flux de carburant, d'oxydant et de liquide de refroidissement ne se mélangent pas.



**Figure I.7.** Plaques bipolaire de pile PEM.

### **I.6.2. Humidificateur**

L'humidification des gaz réactifs est un aspect important du fonctionnement des piles PEM. Sans une bonne humidification de la membrane, la conduction des ions ne peut pas se produire et des dommages de la pile à combustible peuvent résulter. La quantité d'eau qu'un gaz peut absorber dépend fortement de la température d'humidification, en particulier à basse pression. Sur certains stack, des humidificateurs sont intégrés au stack lui-même. Sur d'autres, les humidificateurs sont des composants externes.

### **I.7. Système pile à combustible [2]**

Un système pile à combustible exige du carburant, de l'oxydant et du liquide réfrigérant afin de fonctionner. Les pressions et les débits du carburant et de l'oxydant doivent être réglés.

En outre, les gaz doivent être humidifiés et la température du système doit être contrôlée. Pour atteindre ceci, un stack de pile à combustible doit être entouré d'un système de fourniture du carburant, un système d'alimentation en air, un système de refroidissement du stack et un système d'humidification.

En fonctionnement, l'énergie produite doit être adaptée pour être utilisée par une charge. Des alarmes doivent arrêter le processus en cas de condition de fonctionnement dangereuse. Un système de mesure de la tension des cellules doit surveiller le fonctionnement du stack. Ces fonctions sont assurées par un système de contrôle.

#### **I.7.1. Configuration système**

Les différents constituants d'un système pile à combustible sont représentés dans la (figure I.8). Comme cette figure l'indique, un système pile à combustible se compose de six sous-systèmes fondamentaux, le stack présenté précédemment, la production du carburant, la gestion de l'air, la gestion de l'eau, la gestion thermique et le système de conditionnement de l'énergie électrique produite. La conception de chaque sous-système est une partie de la conception du système complet et est un élément fondamental de la réalisation de systèmes pile à combustible performants.

### I.7.2. Reformeur

Parce que la plupart des piles à combustible utilisent de l'hydrogène comme carburant et que la plupart des sources d'énergie primaires sont des hydrocarbures, un dispositif de production de carburant est parfois nécessaire pour convertir le carburant initial en hydrogène.

La complexité du procédé de reformage dépend du type de système pile à combustible et de la composition du carburant d'origine. Pour les systèmes fonctionnement à basse température comme les piles PEM, ce procédé est relativement complexe et comporte généralement un désulfuriseur, un vaporeformeur ou un réacteur d'oxydation partielle, et un système de filtrage de gaz pour enlever le monoxyde de carbone du gaz d'anode. Le développement d'un reformeur économique et compact permettant de produire un gaz riche en hydrogène pour les piles à combustible basse température, pour les applications du bâtiment ou du transport automobile est un défi actuel.

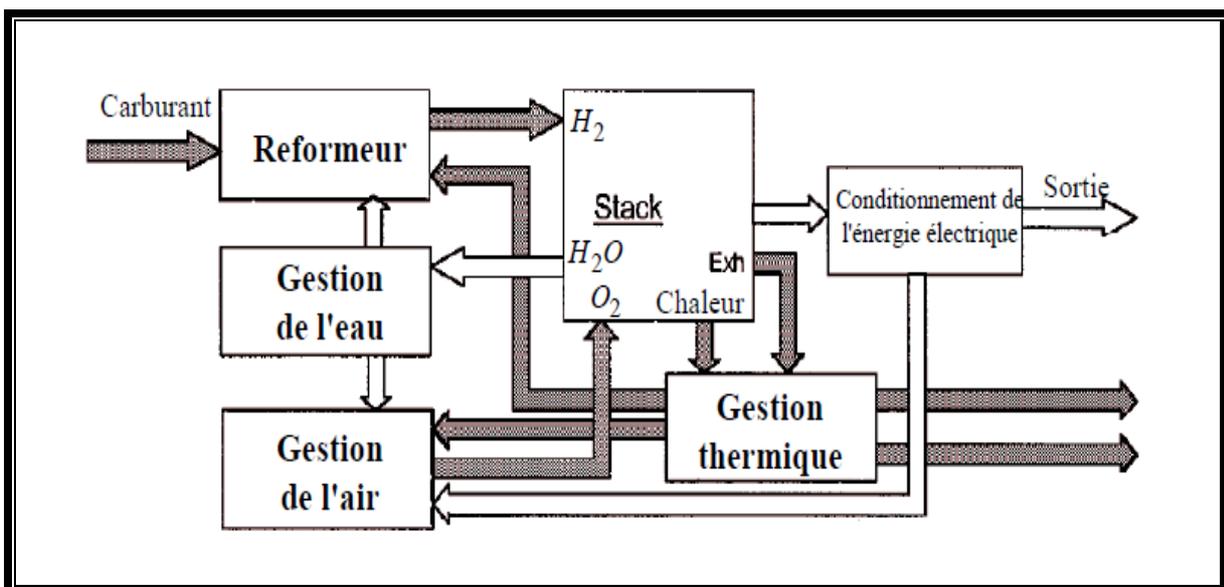


Figure I.8. Différents constituants d'un système pile à combustible.

### **I.7.3. Gestion de l'air**

En plus du carburant, la pile à combustible exige un oxydant, qui est typiquement de l'air. L'air est fourni à la cathode de la pile à combustible à basse pression par un ventilateur ou à haute pression par un compresseur d'air. Le choix entre basse pression et haute pression n'est pas évident. D'une part, l'augmentation de la pression de l'air améliore la cinétique des réactions électrochimiques et mène à une plus grande densité de puissance et à une meilleure utilisation du stack. D'autre part, la puissance exigée pour comprimer l'air réduit la puissance disponible. Une partie de cette énergie peut être récupérée en plaçant une turbine sur la sortie d'air du côté de la cathode. Néanmoins, le compresseur d'air emploie typiquement plus de puissance que n'importe quel autre dispositif auxiliaire dans le système. Actuellement, la plupart des stacks de pile à combustible fonctionnent à une pression comprise entre 1 et 8 atmosphères. Afin d'obtenir des densités de puissance importantes et pour améliorer la gestion de l'eau, la plupart des systèmes développés pour l'automobile à partir de pile PEM fonctionnent à des pressions de 2 à 3 atmosphères.

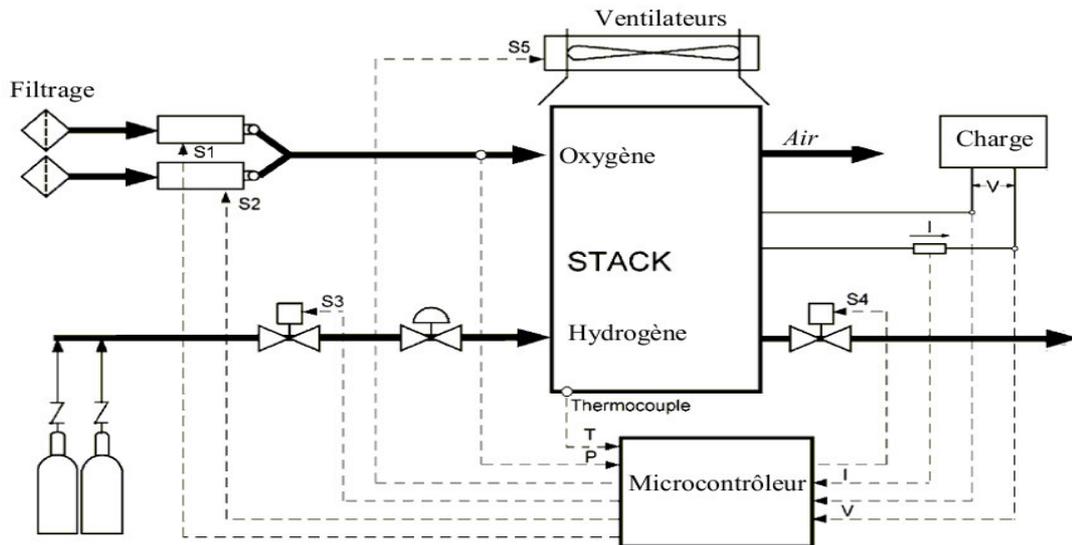
### **I.7.4. Gestion de l'eau**

L'eau est nécessaire à plusieurs endroits dans un procédé de reformage. Dans les systèmes de pile PEM, les gaz réactifs doivent être humidifiés afin d'éviter de dessécher la membrane. Si de l'eau est fournie au niveau de la réaction, celle-ci n'est pas toujours suffisante et l'air (et parfois l'hydrogène) doit être humidifié. Dans des systèmes autonomes, elle peut être récupérée dans les gaz d'échappement.

### **I.7.5. Gestion thermique**

Un stack de pile à combustible de type PEM produit pratiquement autant d'énergie thermique que d'énergie électrique. Cette énergie thermique peut être employée de différentes manières. Elle peut être utilisée pour préchauffer les gaz dans un système de reformage, transférée extérieurement pour satisfaire les besoins thermiques d'une application particulière ou être rejetée dans l'environnement. Pour les systèmes de petite puissance (< 200 W), l'air en excès circulant à la cathode est suffisant pour refroidir le système. Pour des systèmes plus importants la circulation d'air, d'eau ou d'un liquide de refroidissement dans des canaux spécifiques est nécessaire. Avec un liquide de refroidissement, le stack est plus compact. En outre, avec un liquide, il est plus facile de transférer l'énergie thermique vers d'autres applications telles que le chauffage d'espace ou le chauffage d'eau dans des applications de cogénération.

La figure I.9 présente un exemple de système simple de pile à combustible d'une puissance de 300 W. Ce système inclut deux compresseurs (pour l'hydrogène et l'air), deux valves sur le circuit d'hydrogène (une en entrée, une en sortie), quatre ventilateurs pour refroidir le stack et un système de contrôle à base de microcontrôleur.

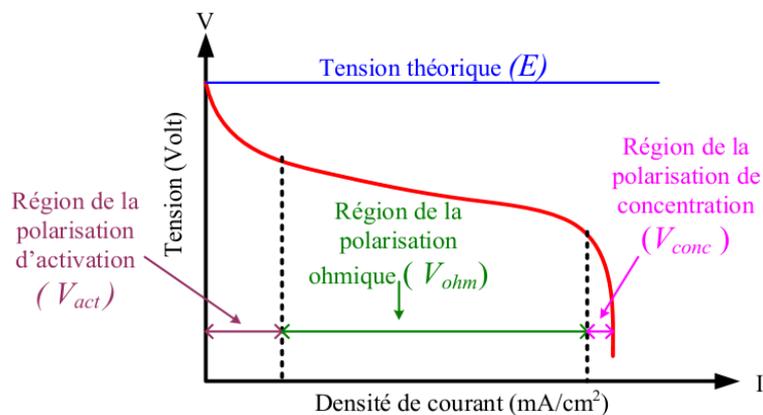


**Figure I.9.** Petit système simple de pile à combustible.

### I.8. Caractéristique et modélisation simple des piles à combustible [1]

La courbe de polarisation de la pile PEM (figure I.10) est généralement décrite comme la somme de quatre termes : la tension théorique à vide  $E$ , la surtension d'activation  $V_{act}$ , la surtension ohmique  $V_{ohm}$  et la surtension de concentration  $V_{conc}$  :

$$V_{pile} = E - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc} \quad (I.14)$$



**Figure I.10.** Caractéristique tension-courant d'une pile à combustible PEM.

Ces différentes surtensions peuvent s'exprimer en fonction du courant délivré par la pile selon les différentes relations suivantes.

Les pertes d'activation sont dues au démarrage des réactions chimiques à l'anode et à la cathode. Une partie de l'énergie disponible est utilisée pour briser et reformer les liaisons chimiques aux électrodes. Si ces pertes interviennent aux deux électrodes, la réaction d'oxydation de l'hydrogène à l'anode est beaucoup plus rapide que la réduction de l'oxygène à la cathode. Il s'ensuit que les pertes d'activation sont essentiellement dues aux réactions cathodiques. La relation entre les pertes d'activation et la densité de courant est donnée par l'équation de Tafel :

$$V_{act} = A * \ln \left( \frac{I_{FC} + i_n}{i_0} \right) \quad (I.15)$$

où  $I_{FC}$  est le courant délivré par la pile à combustible,  $i_0$  le courant d'échange caractérisant à vide les échanges électrode-électrolyte,  $i_n$  le courant interne permettant de tenir compte d'une éventuelle traversée de gaz et/ou d'électrons à travers l'électrolyte et  $A$  la pente de la droite de Tafel.

Les pertes ohmiques sont dues à la résistance qu'oppose les électrodes et les plaques bipolaires à la circulation des électrons et l'électrolyte au passage des protons. La chute de tension correspondante s'écrit :

$$V_{ohm} = R_m \cdot (I_{FC} + i_n) \quad (I.16)$$

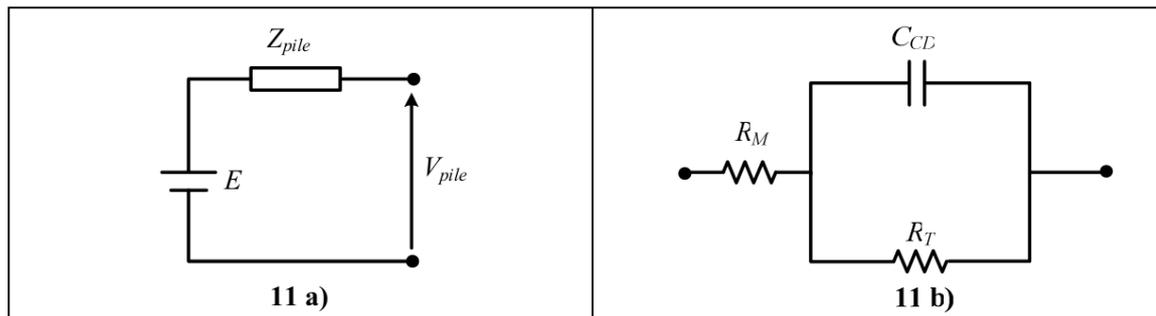
où  $R_m$  est la résistance totale de la pile à combustible.

La consommation des gaz appauvrit les mélanges gazeux et diminue la pression partielle des gaz. Cette réduction de pression dépend du courant délivré et des caractéristiques des circuits de gaz. Cette chute de tension s'exprime en fonction d'un courant limite  $i_L$ , pour lequel tout le combustible étant utilisé, sa pression tomberait à zéro, et d'une constante  $B$  appelée constante de transport ou de transfert de masse :

$$V_{conc} = -B * \ln \left( 1 - \frac{I_{FC} + i_n}{i_L} \right) \quad (I.17)$$

Pour une pile à combustible, plusieurs modèles peuvent être développés selon l'objectif recherché. L'intégration d'une pile à combustible dans un environnement électrique nécessite la connaissance de son modèle électrique. Le modèle doit être simple, précis et doit permettre de prédire le comportement électrique tant en régime statique qu'en régime dynamique. Le modèle le plus simple, peut être un modèle de type entrée-sortie (circuit équivalent, par exemple) qui permettrait la

description du comportement de la pile à combustible dans son environnement. La plus simple représentation de la pile à combustible sous la forme d'un modèle électrique consiste à mettre une source de tension continue en série avec une impédance électrique (figure 11-a). Cette impédance électrique est donnée sur la (figure 11-b) et contient une capacité de double couche  $C_{CD}$  et une résistance  $R_T$  qui caractérise les phénomènes de transfert de charges aux électrodes. La résistance  $R_M$  représente la membrane et les différentes résistances de contact. Dans ce cas, les phénomènes de diffusion sont négligés.



**Figure I.11.** Modèle simple de pile à combustible.

- a) Représentation d'une pile à combustible par une source de tension associée à son impédance électrique.
- b) Impédance simple d'une cellule.

### I.8.1. Avantages et inconvénients des piles à combustible de type PEM

Les avantages et inconvénients des piles à combustible dépendent bien entendu du type de pile considéré et donc de l'application envisagée. Nous nous intéressons principalement ici à la pile PEM même si certaines des qualités et des défauts de cette pile se retrouvent sur d'autres types de pile.

#### I.8.1.1. Avantages des piles à combustible de type PEM

Les avantages généralement cités sont :

- un rendement de conversion important ; grâce à la conversion directe 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.
- un générateur propre ; les piles à combustible ne rejettent pratiquement pas de gaz nocifs ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ) au niveau du coeur de pile.

- un système modulable ; les piles à combustible sont modulables dans le sens où la taille d'une pile à combustible peut facilement être augmentée ou réduite et le rendement électrique est relativement indépendant de cette taille.
- un système relativement silencieux ; comme elle ne comporte pas de partie mobile au niveau du coeur, 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.

### **I.8.1.2. Inconvénients des piles à combustible de type PEM**

Elles présentent aussi quelques inconvénients :

- un fonctionnement à basse température imposé par les membranes actuellement utilisées. Il s'ensuit la nécessité d'utiliser d'une part comme catalyseur du platine et d'autre part d'alimenter le coeur de pile par de l'hydrogène pur ce qui nécessite soit l'utilisation de bouteille soit un mode de reformage performant ;
- une technologie qui est encore au stade artisanal ce qui induit des coûts de fabrication élevé, bien que la structure du coeur de pile soit assez simple ;
- une durée de vie encore faible en particulier si le courant délivré subit des variations importantes et répétées.

## **I.9. Les applications [5]**

Les marchés potentiels des piles à combustible apparaissent aujourd'hui multiples, ils sont généralement classés en trois grandes familles d'application: portables, stationnaires et transport.

### **I.9.1. Les applications portables**

Cette famille inclut essentiellement le téléphone mobile (qui consomme une puissance moyenne de l'ordre de 400 mW, 50 mW en veille et quelques watts en conversation) et l'ordinateur portable (qui consomme en moyenne 10 W). Ces deux applications connaissent une très forte croissance, mais sont de plus en plus handicapées par l'autonomie de leur batterie, même la plus performante comme la batterie lithium-ion. Cette dernière atteint aujourd'hui une énergie spécifique de l'ordre de 160 Wh/kg qui laisse généralement quelques jours d'autonomie à un téléphone portable et environ 3 heures à un ordinateur portable. Or les clients demandent aujourd'hui 3 à 5 fois mieux alors que la batterie électrochimique est proche de ses limites. Pour donner une idée de l'enjeu, il suffit de considérer le marché des «portables»: 300 millions d'unités vendues pour les téléphones mobiles fin 1999 dans le monde et 640 millions prévus en 2005; 18 millions d'ordinateurs portables vendus en 1999 et 40 millions prévus en 2005.

La solution qui fait l'objet de recherches importantes, essentiellement aux États-Unis, est une pile à combustible chargeant une petite batterie qui assure mieux l'apport d'énergie lors des pics d'émission. L'autonomie ne sera alors limitée que par la taille du réservoir d'hydrogène ou de méthanol. L'utilisateur rechargera son portable comme on recharge un briquet ou un stylo à encre, en quelques secondes, et chaque recharge donnera 3 à 5 fois plus d'autonomie qu'une batterie actuelle, pour le même encombrement.

Des prototypes existent déjà et les premiers produits commerciaux sont prévus d'ici trois à quatre ans. La technologie qui sera utilisée est la PEMFC du fait de sa basse température de fonctionnement et de sa technologie tout solide, alimentée soit directement en hydrogène, soit Méthanol dans sa version méthanol direct. En terme de coût, la référence est celle de la meilleure batterie actuelle, soit environ 0,80 \$/Wh.

En ce qui concerne les applications portables, les critères économiques seront probablement d'une importance moindre que pour les autres domaines, car la qualité du nouveau service rendu justifiés dans un premier temps, un surcoût par rapport à la solution actuelle.

### **I.9.2. Les applications stationnaires**

Compte tenu de la déréglementation du secteur électrique et des tendances vers la décentralisation de la production d'énergie électrique, ce secteur commence à intéresser de nombreux industriels, en particulier aux États-Unis. L'activité est centrée sur deux grands domaines d'applications: la production collective (les puissances mises en jeu sont dans la gamme 200 kW à quelques MW) et la production individuelle ou domestique (les puissances mises en jeu sont dans la gamme 2 à 7 kW).

De nombreux projets et démonstrations existent déjà dans le premier domaine. Ils sont généralement basés autour de la technologie PEMFC, même si d'autres technologies (MCFC et SOFC) font également l'objet de tests, mais ne sont pas encore au stade d'une commercialisation proche.

Dans le domaine de la production individuelle (habitat), plusieurs projets sont également en cours de réalisation. Des tests sont actuellement réalisés avec plusieurs prototypes en situation réelle et la première commercialisation est prévue pour 2002, avec un coût annoncé autour de 0,10 \$/kWh électrique. Ces appareils basés sur une technologie de type PEMFC fournissent électricité et chaleur à 60°C (chauffage et eau chaude). Ils sont alimentés par des combustibles classiques: un reformeur transforme le combustible hydrocarbure (généralement du gaz naturel) en hydrogène.

Le marché mondial potentiel des piles à combustible, pour le seul stationnaire, est estimé à près de 60 milliards de dollars à l'horizon 2030. Quant au coût objectif, il se situe autour de 1300 \$/kWh installé pour le système complet. Il correspond au niveau actuel de développement de cette technologie ce qui explique les délais proches (à partir de 2002) généralement annoncés par les divers constructeurs (essentiellement américains jusqu'à maintenant) déjà engagés sur ce marché. Ce sera probablement le premier marché de masse à être occupé par la technologie pile à combustible.

### **I.9.3. Les applications transport**

Le transport est le domaine d'application à l'origine du développement de la pile à combustible à partir du début des années 90. Compte tenu de la contrainte de coût, particulièrement forte dans ce secteur, et de la concurrence de la technologie traditionnelle (moteur thermique), il faut distinguer deux sous-familles assez différentes dans leurs besoins, suivant qu'il s'agit d'équiper un véhicule léger ou un véhicule lourd. Il est demandé au véhicule léger quelque 3 000 h de fonctionnement pour une dizaine d'années de durée de vie alors qu'un véhicule lourd (transport de passagers ou de marchandises) exige une durée de fonctionnement 100 fois plus longue. Il est évident que la technologie et la durée d'amortissement (donc les coûts admissibles) ne seront pas du tous les mêmes.

#### **I.9.3.1. Les véhicules légers**

Dans le domaine des véhicules légers, de nombreux prototypes ont vu le jour depuis 1993. Tous les constructeurs, américains, japonais ou européens ont en effet déjà sorti des prototypes et prévoient des préséries à partir de 2004-2005.

Malgré l'existence de plusieurs modèles présentés avec de l'hydrogène stocké à bord (sous forme liquide, gazeuse ou absorbée dans un hydrure), le combustible utilisé dans une première phase sera très probablement, pour des raisons de sûreté, de réglementation et de logistique de distribution, un combustible hydrogéné (méthanol ou gaz naturel) alimentant un reformeur embarqué. Au cours de la période 2005 -2010, les constructeurs vendront probablement à perte pour ouvrir le marché et acquérir de l'expérience, comme aujourd'hui Toyota avec le véhicule hybride thermique Prius. La technologie ne devrait devenir financièrement rentable qu'à partir de 2010. Dans cette période 2005-2010, DaimlerChrysler prévoit de construire entre 50 000 et 100 000 véhicules à pile à combustible. À l'horizon 2030, ce sera le marché mondial qui sera visé, avec une production annuelle supérieure à 50 millions de véhicules, soit 10% du marché global.

La technologie utilisée dans ces applications sera essentiellement de type PEMFC, même si quelques expériences utilisent l'AFC ou la PAFC. Le coût objectif de cette filière est d'environ 130 \$/ kW pour l'ensemble de la chaîne de traction, dont un tiers pour la pile seule.



**Figure I.12** : Piles à combustible de UTC à Central Park New York. [1]

### **I.9.3.2. Les véhicules lourds**

Plusieurs prototypes de bus ont été construits à partir de 1993. La compagnie canadienne Ballard Power Systems a fait office de pionnier avec six autobus (pile PEMFC), qui ont aujourd'hui achevé leurs tests en service régulier à Vancouver et à Chicago, et qui annoncent une commercialisation dès cette année. La compagnie allemande DaimlerChrysler, sur la base de la même technologie que Ballard, a annoncé le lancement d'une présérie de 30 bus pour 2003, en vue d'une mise en service dans plusieurs villes d'Europe. Compte tenu de la durée attendue, la situation économique de cette application est la même que pour les applications stationnaires, donc commercialement viable dès maintenant.

À côté de ces applications routières, certains constructeurs pensent à un tramway propre et sans caténaire, utilisant une pile à combustible.

Il faut enfin noter un intérêt croissant de constructeurs de navires pour la pile SOFC, au niveau du MW ou plus, pour une propulsion plus propre, plus efficace et plus discrète, en particulier pour des applications militaires.



**Figure I.13** : Autobus à pile à combustible. [1]

### **I.10. Conclusion**

Ce chapitre s'est intéressé aux piles à combustible et principalement aux piles PEMFC. Les différents points abordés ont concerné quelques rappels historiques du développement des piles à combustible, leur principe de fonctionnement, l'architecture des systèmes, les principaux fabricants actuels en Europe et en Amérique du Nord. Enfin, la caractéristique statique d'une pile PEM a été rappelée.

De nombreux laboratoires et entreprises industrielles s'intéressent aux piles à combustible. Outre l'intégration dans des systèmes qui demande le développement d'auxiliaires simples et performants, 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).

Les piles à combustible sont à un stade de pré-industrialisation dans de nombreux domaines avec le développement de multiples essais en situation réelle de fonctionnement.

# Chapitre II

## Les batteries

## II.1. Introduction

Ce chapitre introductif sur les batteries poursuit plusieurs objectifs. On effectue tout d'abord un rappel chronologique de l'évolution des batteries depuis leur découverte jusqu'à nos jours. On présente ensuite les différentes technologies de piles existantes et on explique leur principe de fonctionnement tout en introduisant progressivement le vocabulaire de la thermodynamique. On déduit alors la caractéristique statique de la batterie qui nous intéresse tout particulièrement puisqu'elle est indispensable à la conception des convertisseurs statiques placés en aval de celle-ci. On présente enfin les avancées technologiques réalisées sur les batteries et les applications où elles devraient

## II.2. Batteries électrochimiques [1]

### II.2.1. Généralités

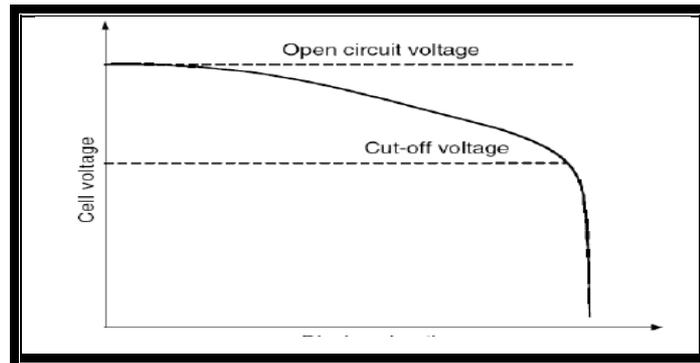
Les batteries sont des sources électrochimiques qui convertissent l'énergie électrique en énergie chimique pendant le chargement, et l'énergie chimique en énergie électrique au cours du déchargement. Les batteries peuvent être classées en batteries primaires ou secondaires.

Les batteries primaires (les piles) sont utilisées une seule fois parce que les réactions chimiques qui fournissent le courant électrique sont irréversibles. Les batteries secondaires (les accumulateurs), les seules qui nous intéressent dans ce mémoire, sont réutilisables. Dans ces batteries, les réactions chimiques qui fournissent le courant électrique sont réversibles.

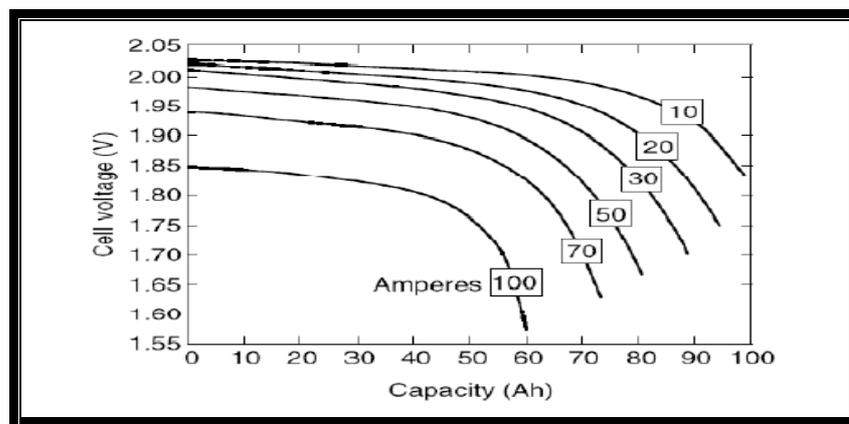
Les batteries sont généralement composées de plusieurs cellules empilées ensemble, la tension d'une cellule élémentaire étant faible (de l'ordre au maximum de quelques volts). Une cellule est une unité complète qui possède toutes les propriétés électrochimiques.

Fondamentalement, une cellule de batterie est constituée de trois éléments : deux électrodes (positive et négative) immergées dans un électrolyte.

Les batteries sont normalement spécifiées par une capacité exprimée en ampères-heures (Ah). Cette valeur est définie comme l'énergie délivrée lorsque la batterie passe d'un état de charge à un état où la tension à ses bornes chute brutalement, tension dite de "cut-off" (figure II.1). Notons que la valeur de la capacité dépend du courant délivré (figure II.2). On peut remarquer sur cette figure que la capacité est plus faible si le courant de décharge est important.



**Figure II.1.** Tension de « cut-off » d'une batterie.



**Figure II.2.** Caractéristique de décharge d'une batterie au plomb.

Un autre paramètre important de la batterie est l'état de charge (state of charge, en anglais, SOC). Une batterie entièrement chargée à un SOC de 100% et une batterie complètement déchargée à un SOC de 0%.

Enfin, deux autres grandeurs permettent de comparer des batteries, l'énergie massique et la puissance massique. L'énergie massique est définie comme la capacité d'énergie par rapport au poids de la batterie (Wh/kg). L'énergie massique théorique est l'énergie maximale qui peut être produite par la masse totale des cellules réactives. De son côté, la puissance massique est définie comme la puissance maximale que peut produire la batterie sur une période courte par rapport au poids de batterie. Cette puissance massique est un paramètre important dans les applications embarquées comme les véhicules électriques et conduit les recherches sur la réduction du poids de la batterie et l'engouement actuel pour les batteries à base de lithium.

### II.2.2. Modélisation des batteries

Le modèle le plus simple d'une batterie est représenté sur la (figure II.3) Il est constitué d'une source de tension correspondant à la tension de circuit ouvert  $V_0$  en série avec une résistance ( $r_s = R_{ohm} + R_{int}$ ) constituée de deux termes.  $R_{int}$  (résistance interne) terme variable

représente la réaction chimique et correspond aux chutes de tension dues à une réaction d'activation et à la concentration d'électrolytes.  $R_{ohm}$  (résistance ohmique) est constante et correspond à la résistance des conducteurs.

La détermination analytique exacte de la résistance ou de la chute de tension de la batterie est difficile et est généralement obtenue par des essais expérimentaux. La chute de tension augmente avec une augmentation du courant de décharge et une diminution de l'énergie stockée.

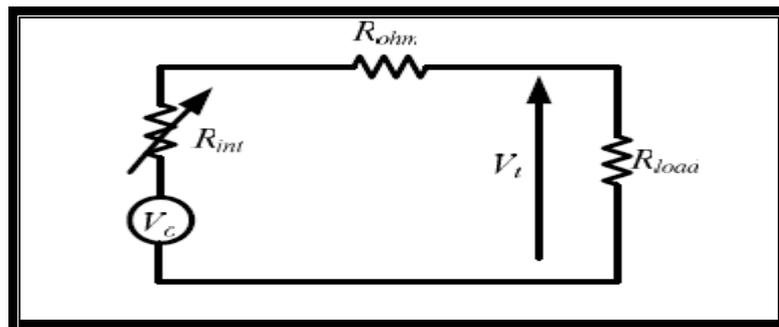


Figure II.3. Modèle simple d'une batterie.

La tension de sortie ( $V_t = V_o - r_s$ ) est régie par la loi classique des générateurs de tension non idéaux. Ce modèle de base est particulièrement simple à mettre en application, mais il ne tient pas compte des variations d'impédance interne de la batterie en fonction de l'état de charge, de la concentration en électrolyte, de la température ou encore du nombre de cycles qu'a déjà subi la batterie. Ce modèle ne permet donc pas d'obtenir un modèle précis de comportement dynamique, mais il peut être suffisant lors d'un premier dimensionnement d'équipement d'électronique de puissance.

Ce modèle permet en particulier de montrer l'importance de la résistance interne dans le calcul de la puissance massique d'une batterie. En effet avec ce modèle, la puissance maximale qui peut être délivrée a pour valeur :

$$P_{\max} = \frac{V_0^2}{4(R_{ohm} + R_{int})} \quad (\text{II.1})$$

### II.2.3. Différentes technologies

Les technologies de batteries sont variées et nous présentons dans les pages suivantes les familles les plus utilisées dans les systèmes hybrides à savoir celles basées sur le plomb, le lithium et le nickel.

Pour chacune de ces familles, nous donnons leur principe, les technologies utilisées et des éléments de modélisation et nous comparons leurs principales propriétés.

### II.2.3.1. Les accumulateurs au plomb [4]

L'accumulateur au plomb reste actuellement l'accumulateur le plus répandu. Inventé en 1859 par Gaston Plante, ses premières applications pratiques remontent déjà à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle, et son usage s'étend du démarrage des moteurs à combustion interne aux batteries de secours dans les hôpitaux. Sa technologie est bien maîtrisée et elle est presque entièrement recyclable. Elle présente l'avantage non négligeable de présenter le prix de revient le plus faible parmi tous les types de batteries connus. Malgré son grand âge, il n'existe à l'heure actuelle aucun modèle chimique véritablement satisfaisant, ou électrique permettant de reproduire assez précisément son fonctionnement dans divers cas de figure. Les seuls modèles disponibles sont, soit seulement utilisables dans certaines conditions bien précises, soit généraux mais très peu fidèles.

#### II.2.3.1.1. Principe

À la différence des PAC, il n'y a pas d'apport extérieur de combustible. L'énergie est stockée dans l'accumulateur : il y a transfert de matière d'une électrode à l'autre suivant qu'il s'agit de la charge ou de la décharge de l'accumulateur.

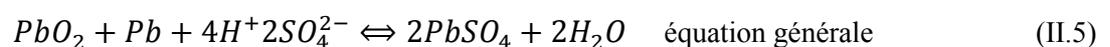
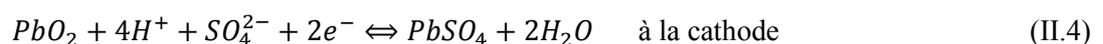
Ces accumulateurs exploitant une oxydoréduction du plomb sont constitués de deux électrodes, qui plongent dans un électrolyte acide qui réalise la conduction ionique entre elles et participe à la réaction. Chacune des électrodes est constituée d'un élément apparaissant sous sa forme réduite et sous sa forme oxydée :

Cathode forme oxydée  $PbO_2$  et forme réduite  $PbSO_4$

Anode forme oxydée  $PbSO_4$  et forme réduite  $Pb$

Il se produit au cours de la décharge, une oxydation à l'anode et une réduction à la cathode. Ces deux réactions sont inversées lors de la recharge.

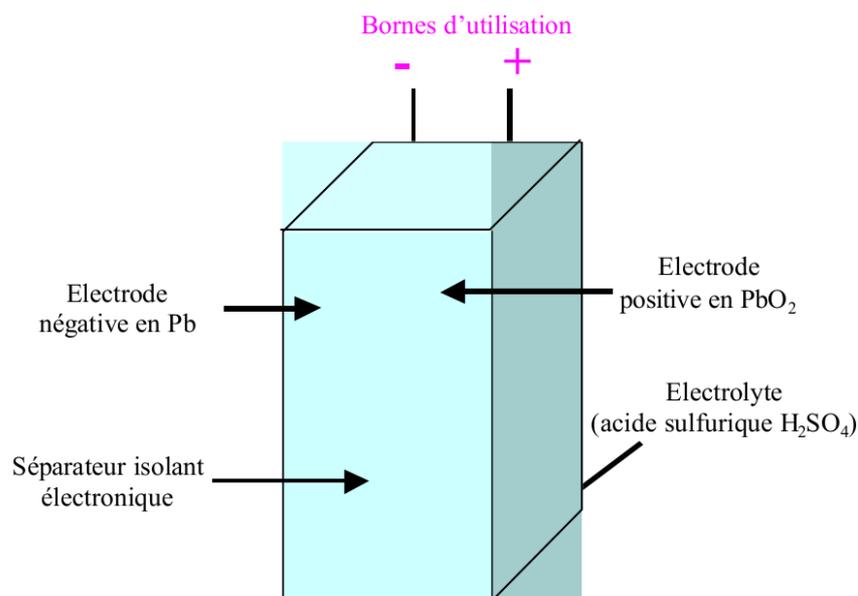
Les réactions d'oxydoréduction entre les deux couples redox en jeu pour une dissociation totale sont :



$PbO_2$  est donc l'électrode positive (pôle +) et  $Pb$  l'électrode négative (pôle -), tant en charge qu'en décharge.

### II.2.3.1.2. Eléments technologiques

Comme pour les piles à combustible, les batteries sont réalisées par l'association de cellules élémentaires. Afin d'obtenir la tension désirée, plusieurs cellules sont connectées en série à l'intérieur du module ; par contre, si l'on désire augmenter la capacité et le courant, il faut connecter ces cellules en parallèle ou augmenter la surface de réaction. La densité théorique d'énergie que l'on peut retirer de ce type de couple chimique est de  $170 \text{ Wh.kg}^{-1}$ . Cependant, le sulfate de plomb produit par les réactions aux deux électrodes est insoluble et non conducteur. Son accumulation sur les électrodes et, dans une moindre mesure, dans l'électrolyte limite par conséquent fortement l'énergie qui peut être extraite de cette batterie. De plus, les concentrations et les quantités de masses actives sont inférieures à celles conduisant à cette valeur. En pratique, on n'arrive qu'à des densités proches de  $40 \text{ Wh.kg}^{-1}$ , soit quatre fois moins que le maximum théorique.



**Figure II.4.** Structure d'un accumulateur acide/plomb à plaques planes

Si la charge se poursuit trop longtemps, soit au-dessus de 2,4 V (la tension nominale d'une cellule chargée étant d'environ 2,1 V), un autre phénomène apparaît : le gassing. Il s'agit tout simplement d'une électrolyse de l'eau au niveau des électrodes due au fait que l'oxygène et l'hydrogène ne pouvant plus réagir avec le plomb ou l'acide, passent directement sous forme gazeuse.

À ce niveau, deux types de batteries au plomb existent, détaillées dans les deux paragraphes suivants.

### A. Batteries « classiques » ou ouvertes

Pour ce type de batteries, la cellule n'est pas fermée. Elle perd donc de l'électrolyte (compose typiquement de 65% d'eau et 35% d'acide sulfurique) en cas de gassing, ce qui nécessite une maintenance contraignante. En effet, si cette maintenance n'est pas effectuée, une partie de la matière active peut perdre le contact avec la grille et engendrer une diminution de la durée de vie. Par ailleurs, lors de la charge se manifeste la stratification, l'acide concentré plus lourd se situant au bas de l'accumulateur. On y remédie en prolongeant la charge de l'accumulateur. Enfin, ces batteries doivent se trouver dans un emplacement suffisamment ventilé car l'espace situé au-dessus de l'électrolyte est alors rempli d'un mélange d'hydrogène et d'oxygène qui peut être explosif. Ce type de batterie, utilisé par exemple dans les installations photovoltaïques pour le stockage, en constitue aujourd'hui le maillon le plus contraignant. Un éclaté d'une batterie de ce type est fourni sur la Figure II.5



**Figure II.5.** Structure interne d'une batterie Pb classique (électrodes planes)

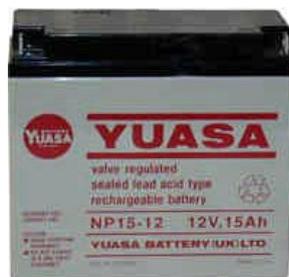
Sur la Figure II.5, on distingue les éléments constitutifs suivants :

1	<p><b>Les séparateurs microporeux</b> : ces séparateurs présentent une porosité uniforme et permettent une bonne circulation des ions tout en garantissant l'isolation électronique entre électrodes positives et négatives.</p>
2-7	<p><b>Les électrodes</b> : celles-ci sont dessinées afin de présenter la plus grande surface de contact possible avec l'électrolyte. Cela permet de maximiser la puissance dérivable par la batterie.</p> <p>La structure à plaques planes est classique (procède Faure) : la matière active est préparée sous forme d'une pâte constituée principalement d'oxyde plomb, d'acide sulfurique et d'eau. Cette pâte est ensuite déposée sur une grille constituée d'un alliage de plomb, puis transformée électriquement pour obtenir du dioxyde de plomb (plaque positive) et du plomb spongieux (plaque négative).</p> <p>La structure à plaques positives tubulaires est de construction identique avec celle des éléments à plaques planes. La principale différence réside dans les électrodes positives réalisées sous forme de tubes. Ce qui apporte une amélioration de la durée de vie grâce à une diminution des chutes de matières actives. Mais, la résistance interne est plus élevée que pour la technologie à plaques planes, d'où un courant maximal exploitable plus faible. Par ailleurs, dans les deux structures, pour réaliser des éléments durables, la quantité de matière active doit représenter au moins deux fois la masse des matières réellement utilisées.</p>
3	<p><b>Le séparateur en fibres de verre</b> : celui-ci est combiné avec le séparateur microporeux afin d'homogénéiser les différentes concentrations dans l'électrolyte et d'augmenter l'isolation entre électrodes. En effet, les plaques positives et négatives sont isolées les unes des autres par des séparateurs non conducteurs aux propriétés spécifiques : une bonne résistance mécanique pour supporter les contraintes dues aux variations de volume des matières actives pendant les cycles de charge et de décharge, une résistance chimique suffisante (en effet la présence d'acide est très contraignante), une structure microporeuse avec une porosité d'au moins 50% pour permettre la diffusion de l'électrolyte, une faible résistance interne pour permettre des décharges à régimes élevés, un rayon de pore très faible (<math>\mu\text{m}</math>) pour éviter les transports de matière d'une électrode à l'autre et éviter ainsi des courts-circuits.</p>

4	<p><b>Les collecteurs positif et négatif</b> : ce sont des barres qui collectent le courant provenant des électrodes et qui acheminent celui-ci vers les connecteurs externes. Leur design doit être réalisé de telle façon que le flux de courant provenant de chaque électrode soit le plus homogène possible ; la grille métallique ne sert pas seulement de support mécanique pour la matière active, mais aussi de collecteur du courant. Le Plomb est à peu près le seul métal envisageable pour la grille au regard des conditions hautement corrosives (acide sulfurique) mais n'a pas la tenue mécanique nécessaire. Pour améliorer la rigidité, on rajoute de l'antimoine (Sb) entre 6 et 7%. Cet alliage représente un bon compromis entre la tenue mécanique, la conductivité électrique, et une bonne adhérence entre la grille et la matière active.</p>
5	<p><b>L'orifice d'accès</b> : celui-ci permet d'introduire un pèse-acide permettant de mesurer la densité de l'électrolyte, afin de connaître l'état interne de la batterie et de réaliser la mise à niveau de l'électrolyte.</p>
6	<p><b>L'orifice d'évacuation des gaz ou soupape de sécurité</b> : cet orifice permet l'évacuation des gaz produits durant le phénomène de gassing. Il doit également empêcher une étincelle externe ou des flammes d'atteindre l'intérieur de la batterie afin d'éviter tout risque d'explosion des gaz dégagés par l'électrolyte.</p>
8	<p><b>Les indicateurs de niveau d'électrolyte</b> : ces lignes indiquent les niveaux minimum et maximum d'électrolyte afin d'assurer un fonctionnement correct. L'utilisateur doit veiller à vérifier régulièrement ce niveau.</p>

### B. Batteries étanches

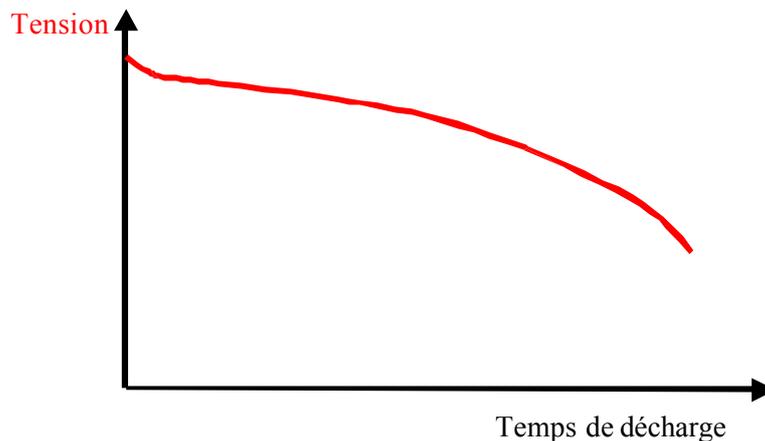
Ces batteries sont aussi appelées batteries « sans entretien » car la cellule est fermée. L'électrolyte de ces batteries est immobilisé sous forme de gel (ajout de silice à haute surface spécifique), ou encore retenu dans un séparateur en fibre de verre à haut pouvoir capillaire (AGM, Absorbent Glass Mat). Les gaz produits durant le gassing restent donc « prisonniers » dans le gel et sont recombinés durant la décharge. La consommation d'eau et l'émission de gaz sont donc extrêmement faibles et ces batteries sont beaucoup moins sensibles à la stratification.



**Figure II.6.** Batterie étanche utilisée dans le véhicule solaire du chapitre

### II.2.3.1.3. Grandeurs générales

La grandeur caractéristique pour un accumulateur est sa capacité de stockage généralement définie en A.h. Cette grandeur décrit la quantité d'énergie stockée dans l'accumulateur dans la mesure où l'on connaît la tension. Or la tension de l'accumulateur varie généralement avec la capacité. C'est pourquoi on trace généralement la caractéristique suivante (tension-temps de décharge) :



**Figure II.7.** Evolution temporelle de la tension d'un accumulateur au plomb.

Le Tableau II-1 résume les autres caractéristiques principales d'un accumulateur plomb-acide.

- L'énergie massique théorique est l'énergie théorique maximale dérivable par un accumulateur au plomb.
- La densité d'énergie est l'énergie massique réelle fournie par un accumulateur quand

On rajoute la connectique.

- DOD : Depth of Décharge est la profondeur de décharge de l'accumulateur.
- SOC : State of Charge est l'état de charge d'un accumulateur.
- Le coefficient de surcharge est le coefficient de surcharge en tension de l'accumulateur.
- Le rendement énergétique est le rendement entre l'énergie utile pour charger l'accumulateur et l'énergie récupérée lors de la décharge.

Couple	Pb / PbO <sub>2</sub>	
Température de fonctionnement	-40 à 60	[°C]
Energie massique théorique	170	[Wh/kg]
Densité d'énergie	30 à 40	[Wh/kg]
Puissance massique (à 80% DOD)	60 à 130	[W/kg]
Coefficient de surcharge admissible	5 à 20	[%]
Rendement énergétique	65 à 85	[%]
Tension par cellule chargée	2,1	[V]

**Tableau II-1:** Caractéristiques des batteries au plomb

Comme nous pouvons le constater, les données de ce tableau ne présentent pas ce type de batteries avantageusement. De plus, en pratique, la durée de vie ainsi que les performances d'une batterie au plomb, dépendent fortement de la technologie et de l'utilisation que l'on en fait. Avec une structure à plaques planes, la durée de vie est de l'ordre de 800 ou 900 cycles, alors qu'elle peut atteindre jusqu'à 1200 ou 1500 cycles pour des structures à électrodes positives tubulaires.

Pourtant cette technologie éprouvée reste la plus utilisée, et sans doute pour quelques temps encore. Dans un futur proche, on estime pouvoir arriver aux caractéristiques suivantes : 50 Wh.kg<sup>-1</sup> d'énergie spécifique, 1000 cycles de durée de vie et un prix inférieur à 200 Euros. Le développement des accumulateurs au plomb suppose que l'on atteigne ces résultats rapidement, et également qu'ils puissent supporter des recharges rapides. Le temps de recharge des accumulateurs est le verrou principal à leur utilisation dans la traction automobile. De plus, pendant les cycles de charge et décharge, l'antimoine de la grille positive a tendance à passer en solution dans l'électrolyte et à venir se redéposer sur l'électrode négative, ce qui provoque un dégagement d'hydrogène gazeux. Il en résulte une « décharge de l'électrode négative » (même en circuit ouvert) cause principale de la perte de capacité au repos des accumulateurs plomb-acide (phénomène d'auto-décharge).

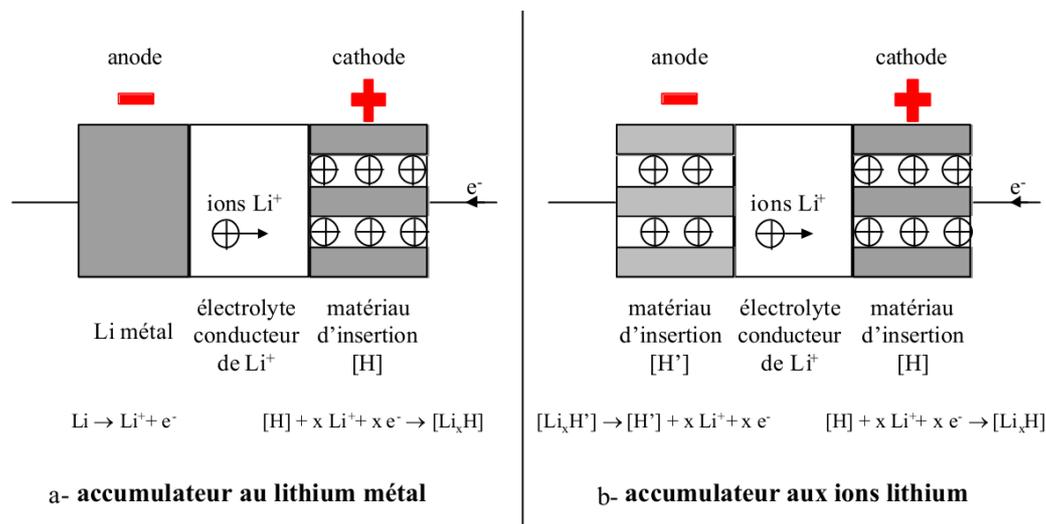
### II.2.3.2. Les accumulateurs Lithium-Ion [4]

Ces accumulateurs font partie des nouveaux types diffusés depuis 10 ans et fort prometteurs. Leur énergie et puissance massique sont très élevées par comparaison au Plomb-Acide, respectivement 150 Wh.kg<sup>-1</sup> et 300 W.kg<sup>-1</sup>. Le lithium est en effet le plus léger des métaux et possède un potentiel électrochimique élevé, ce qui en fait le métal le plus attractif pour constituer l'électrode négative d'un accumulateur.

### II.2.3.2.1. Principe

Il existe deux types d'accumulateur au lithium. Les accumulateurs « Lithium Carbone » ou « Lithium-Ion » et les accumulateurs « Lithium-Métal ». Mais, le principe de fonctionnement d'un accumulateur au lithium est le même selon qu'est utilisée une électrode négative de lithium métallique ou a base de carbone.

En cours d'utilisation, donc lors de la décharge de l'accumulateur, le lithium relâché par l'électrode négative sous forme ionique  $\text{Li}^+$  migre a travers l'électrolyte conducteur ionique et vient s'intercaler dans le réseau cristallin du matériau actif de l'électrode positive (compose d'insertion du lithium de type oxyde métallique). Le passage de chaque ion  $\text{Li}^+$  dans le circuit interne de l'accumulateur est exactement compense par le passage d'un électron dans le circuit externe, générant ainsi un courant électrique. La (Figure II.7a) montre le fonctionnement d'un accumulateur Lithium métal. L'électrode métallique libère un ion qui vient s'insérer dans l'électrode positive. Dans le cas du Lithium-Ion (Figure II.7b), appelé ainsi car le lithium n'est jamais sous forme métallique dans l'accumulateur, le lithium fait « le va-et-vient » entre les deux composes d'insertion du lithium contenus dans les électrodes positive et négative a chaque charge ou décharge de l'accumulateur. Pendant la recharge, des ions lithium viennent s'insérer dans la structure de l'électrode négative en carbone graphite, d'où le nom donne a ce type d'accumulateurs. Lors de la décharge, la structure en carbone de l'anode libère alors ces ions qui viennent se replacer dans la structure de la cathode.



**Figure II.8.** Principe de fonctionnement des l'accumulateur au lithium

La réaction générale mise en jeu dans un accumulateur Lithium-Ion a oxyde  $\text{LiNiO}_2$  est la suivante :



### II.2.3.2.2. Eléments technologiques



**Figure II.9.** Accumulateur au Lithium-Ion de SAFT

**L'électrode positive :** composée de structures en couches est constituée d'un oxyde du type  $\text{LiMO}_2$  (M pour métal) pour les accumulateurs Lithium-Ion. Actuellement, trois oxydes sont utilisables :  $\text{LiCoO}_2$ ,  $\text{LiNiO}_2$  et  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ . Vu le coût très élevé de l'oxyde de cobalt allié au lithium, seuls les deux autres oxydes sont utilisés. Pour une électrode positive composée de structures spinelles, on utilise des dérivés de  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ,  $\text{LiM}_n\text{O}_2$  et de  $\text{LiFeO}_2$ . Enfin, pour des accumulateurs « lithium-métal », ce sont l'oxyde de vanadium, l'oxyde de manganèse ou des polymères conducteurs qui sont utilisés.

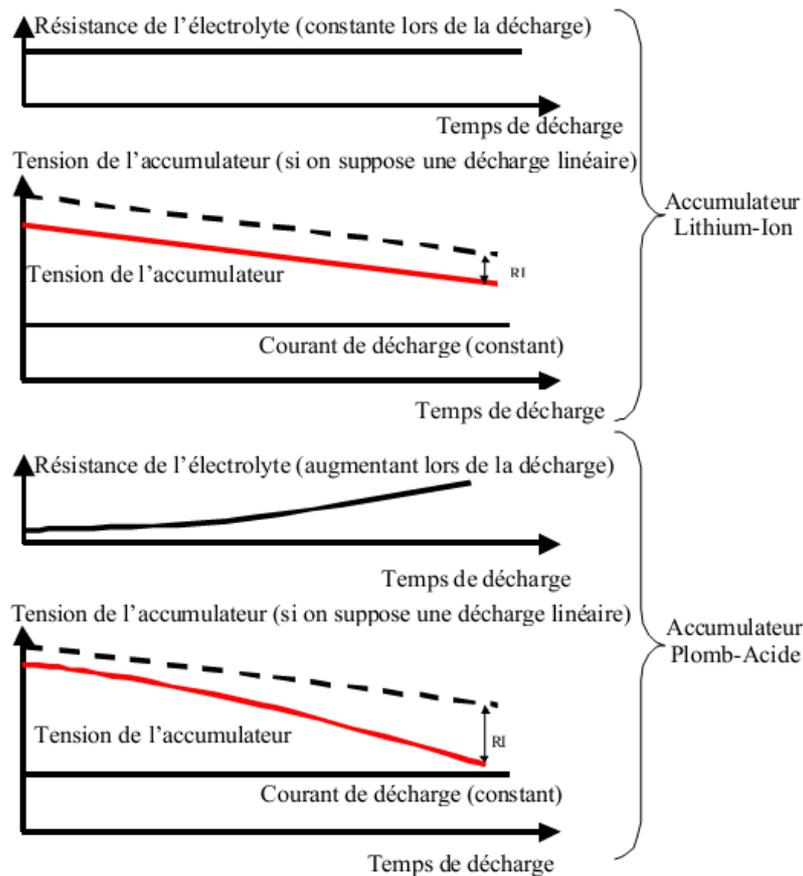
**L'électrode négative :** est réalisée en composés carbonés : graphite, carbones hydrogènes, carbones durs, oxydes mixtes de vanadium amorphes, oxydes mixtes à base d'étain ou d'oxydes mixtes à base de titane. Elle sert de matériau d'insertion, elle n'est donc pas modifiée lors de la réaction.

**Le séparateur :** est constitué d'une membrane polymère microporeuse qui reprend les mêmes propriétés que celles des accumulateurs au plomb.

**L'électrolyte :** est une solution de  $\text{LiPF}_6$  dans un mélange de solvants organiques. Il se trouve soit sous forme liquide, soit sous forme solide (polymère sec, polymère gélifié ou composé organique vitreux). Sa nature fixe la tension maximale d'utilisation de l'accumulateur. Pour un polymère sec, la tension maximale ne peut excéder 3.5V, alors qu'elle peut atteindre 4.8V pour un liquide ou un gel. De plus, le transport des ions ne modifiant pas l'électrolyte, la résistance interne est pratiquement indépendante de l'état de charge et ne varie notablement qu'avec la température.

### II.2.3.2.3. Mise en œuvre

Comme les pertes dans l'électrolyte sont indépendantes de l'état de charge, contrairement à l'accumulateur au plomb, la tension de cet accumulateur varie quasiment linéairement avec l'état de charge (Figure II.9) et constitue un bon indicateur de cet état de charge. Suivant les cahiers des charges des applications la grandeur dimensionnante peut être soit le plus souvent l'énergie qui détermine l'autonomie, soit la puissance dans le cas de cycles très variables.



**Figure II.10.** Caractéristique de décharge d’un accumulateur Lithium-Ion a courant constant. Comparaison avec l’accumulateur Plomb-Acide.

Le tableau suivant résume les autres caractéristiques principales d’un accumulateur Lithium- Ion:

Couple	Li/LiMO <sub>2</sub>	
Température de fonctionnement	-25°C a 60°C	[°C]
Energie massique théorique	275	[Wh/kg]
Densité d’énergie	90 à 150	[Wh/kg]
Puissance massique (a 80% DOD)	150 à 300	[W/kg]
Coefficient de surcharge admissible	1 à 2	[%]
Rendement énergétique	85 à 95	[%]
Tension par cellule chargée	3.2	[V]

**Tableau II.2.** Caractéristiques des batteries Lithium-Ion.

Les performances de cet accumulateur sont bien meilleures que celle d’un accumulateur au plomb. Mais son prix est beaucoup plus élevé et sa mise en œuvre pose encore plusieurs problèmes, particulièrement pour exploiter la modularité.

En effet, une surcharge peut causer un emballement thermique et une destruction de l’enceinte totalement étanche de l’accumulateur. Or le lithium étant effectivement très réactif avec l’eau,

cette rupture peut avoir des conséquences catastrophiques (explosion !).

Dans le cas d'une mise en série, il est donc fortement recommandé de contrôler la tension de chaque cellule élémentaire de façon précise.

De plus, ces batteries supportent assez mal les surcharges, car la structure des électrodes peut être modifiée dans ce cas, et la création d'un dépôt de lithium risque de nuire à l'accumulateur. L'insertion du lithium se fait trop vite et de façon non réversible ce qui diminue la durée de vie de l'accumulateur.

Le domaine de température d'utilisation dépend de la stabilité et de la conductivité de l'électrolyte typiquement autour de la température ambiante, exception faite des polymères secs qui n'ont une conductivité suffisante qu'autour de 60°C.

Par ailleurs, la tension varie de manière assez linéaire avec la profondeur de décharge et est relativement peu influencée par la température ainsi que la puissance de décharge. Cette caractéristique peut être mise à profit pour l'estimation de l'état de charge.

Ces batteries sont encore sujettes à bien des améliorations et on pense pouvoir porter leur énergie massique à une valeur de 170 Wh/kg dans les prochaines années.

#### II.2.3.2.4. Avantages et inconvénients des batteries Li-Ion [1]

Grâce aux propriétés physiques du lithium, les batteries Li-Ion ont une haute densité d'énergie ( $> 120 \text{ Wh.kg}^{-1}$ ). Ce type de batteries est donc très utilisé dans le domaine des systèmes électriques hybrides. Les batteries Li-Ion ont les autres avantages suivants :

- **tension de fonctionnement élevée** ( $> 3,5 \text{ V}$ ) permettant la réduction du nombre d'éléments pour une tension donnée ;
- **énergie volumique élevée** ( $> 250 \text{ Wh.l}^{-1}$ ) conduisant à une réduction du poids pour une puissance donnée ;
- **faible autodécharge**, les batteries Li-Ion ont une aptitude au stockage bien meilleure grâce à leur très faible autodécharge ;
- **large plage d'utilisation en température**, ce type de batterie a une plage de température de fonctionnement importante (de  $-30 \text{ °C}$  à  $60 \text{ °C}$ ) ;
- **pas de maintenance**, les batteries Li-Ion n'ont pas d'entretien à la différence d'autres sources d'énergie ;
- **longue durée de vie en cyclage** : la durée de vie de ce type de batterie est élevée ( $> 1000$  cycles).

L'inconvénient majeur des batteries Li-Ion apparaît lors de leur fabrication. La réactivité du lithium, de l'oxygène et de l'azote en présence d'eau est telle qu'il est nécessaire de les

fabriquer dans des conditions adaptées afin d'obtenir les performances voulues. Notamment, leur fabrication en salle sèche est presque obligatoire. Cette contrainte conduit à des investissements bien supérieurs à ceux effectués pour des batteries au plomb. Par contre, l'accroissement des volumes fabriqués tant à réduire les coûts.

### **II.2.3.3. Batteries au Nickel [1]**

Il existe plusieurs types de batteries au Nickel, avec chaque fois un type d'électrode différent, l'autre étant réalisée en nickel. L'électrolyte est constitué d'une base forte (soude ou potasse caustique, NaOH ou KOH). Nous introduisons brièvement quatre types de batteries au Nickel, les deux premiers, le Nickel-Cadmium et le Nickel-Hydrure métallique, étant actuellement les plus utilisés.

#### **II.2.3.3.1. Batteries Nickel Cadmium (Ni-Cd)**

L'électrode positive est à base de nickel et l'électrode négative à base de cadmium. L'électrolyte est quant à lui constitué d'une solution d'hydroxyde de potassium contenant de l'hydroxyde de lithium. Cette technologie se démarque par une puissance spécifique élevée et une cyclabilité importante. De plus, sa tenue en température autorise une utilisation sur une grande plage thermique (-40°C à +85°C). Cette caractéristique constitue un avantage indéniable dans le cadre d'une application transport. Cependant, cette technologie souffre d'un coût élevé, d'une tension de cellule relativement faible et d'un impact environnemental important. De surcroît, le conditionnement du module doit présenter une fiabilité irréprochable en raison de la haute cancérogénicité du cadmium.

#### **II.2.3.3.2. Batteries Nickel-Hydrure métallique (Ni-MH)**

Les batteries Ni-MH diffèrent des Ni-Cd de par la constitution de l'électrode négative, ici basée sur de l'hydrogène adsorbé dans un métal. Cette technologie apporte des améliorations intéressantes par rapport au Ni-Cd. Tout d'abord, l'énergie spécifique est plus élevée. Ensuite, l'absence de cadmium rend le retraitement de l'accumulateur en fin de vie beaucoup plus aisé et une éventuelle rupture de la cuve moins problématique. Le coût de ce type de batterie reste malheureusement élevé.

#### **II.2.3.3.3. Batteries Nickel-Fer (Ni-Fe)**

Ce type de batterie est beaucoup moins coûteux à construire que les batteries Nickel-Cadmium. La batterie Nickel-Fer est utilisée avec un électrolyte liquide KOH. Ce sont des batteries pratiquement indestructibles. La longévité de ces batteries est due au fait que les métaux

des électrodes sont stables. Cette stabilité fait aussi que ces batteries ne peuvent pas fournir un courant très important et ne conviennent pas au démarrage de systèmes (véhicules...).

#### II.2.3.3.4. Batteries Nickel-Zinc (Ni-Zn)

Les batteries Nickel-Zinc utilisent une électrode au zinc. Ces batteries peuvent fournir un courant très important, mais ont une durée de vie réduite en nombre de cycles, environ 200 cycles, au lieu de 1000 cycles pour les batteries Ni-MH.

#### II.2.4. Comparaison des différents types de batteries au Nickel et au Plomb [1]

Le tableau II.3 compare les différents types de batteries au plomb et au Nickel et reprend certaines indications déjà données au cours de ce chapitre. On peut remarquer qu'aucune batterie ne l'emporte sur tous les paramètres et qu'en termes de coût, la batterie au plomb est encore la meilleure.

Système	Energie spécifique (Wh/kg)	Puissance maximale	Rendement énergétique (%)	Cycle de vie	Auto-décharge (%) par 48 h
Plomb/Acide	35 ~ 50	150 ~ 400	>80	500 ~ 1000	0,6
Nickel/Cadmium	50 ~ 60	80 ~ 150	75	800	1
Nickel/Fer	50 ~ 60	80 ~ 150	75	1500 ~ 2000	3
Nickel/Zinc	55 ~ 75	170 ~ 260	65	300	1.6
Nickel/Métallique	70 ~ 95	200 ~ 300	70	750 ~ 1200+	6

**Tableau II.3.** Caractéristiques des batteries au Nickel et au Plomb.

De plus, si on se limite aux quatre types de batteries les plus utilisés actuellement, Plomb, Li-Ion, Ni-Cd et Ni-MH, on a sur le tableau II.4 leurs principaux avantages et inconvénients déjà évoqués.

Technologie	Avantages	Inconvénients
Plomb	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Economique</li> <li>- Recharge facile</li> <li>- Stockage de longue durée (autodécharge faible)</li> <li>- Recyclage simple</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sensible aux décharges trop profondes</li> <li>- Capacité massique faible</li> <li>- Risque de sulfatation irréversible</li> <li>- Durée de vie faible</li> <li>- Pollution par le plomb en cas de destruction</li> </ul>
Li-Ion	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pas d'effet mémoire</li> <li>- Faible auto-décharge (1 % par mois, quelques pourcents par an)</li> <li>- Ne nécessite pas de maintenance</li> <li>- Possède une haute densité d'énergie pour un poids faible</li> <li>- Accepte une charge rapide</li> <li>- Peu de pollution et recyclable</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Coût élevé de production</li> <li>- Problèmes de densité thermique</li> <li>- Sensible aux chocs</li> <li>- Recharge sous haute surveillance, risque d'explosion</li> <li>- Recyclage très technique</li> </ul>
Ni-Cd	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Charge simple et rapide même après une longue période de stockage</li> <li>- Recharge facile même à basse température</li> <li>- Grande durée de vie</li> <li>- Bonnes performances à basse température</li> <li>- Résistance interne très faible et faible coût</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Faible densité énergétique.</li> <li>- Auto-décharge assez rapide (20% par mois)</li> <li>- Sensibilité à l'effet mémoire</li> <li>- Assez polluant à cause du cadmium</li> </ul>
Ni-MH	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Contient beaucoup plus d'énergie que le Nickel-Cadmium</li> <li>- Peu d'effet mémoire</li> <li>- Simple à stocker et à transporter</li> <li>- Ne pollue pas comme le Ni-Cd</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ne supporte pas le dépassement de charge</li> <li>- Détection de fin de charge difficile</li> <li>- Durée de vie plus faible que le Ni-Cd en nombre de cycles</li> <li>- Coût élevé</li> <li>- Tension faible</li> </ul>

**Tableau II.4.** Comparaison entre les différentes technologies de batteries.

### II.3. Conclusion

La définition des principes de fonctionnement et la modélisation des sources d'énergie sont nécessaires pour évaluer le comportement d'un système hybride électrique. C'est pourquoi dans ce chapitre, nous avons présenté sources d'énergie électrique pour utilisées dans la réalisation de source hybride électrique les batteries électrochimiques

Les batteries électrochimiques peuvent être utilisés comme sources auxiliaires dédiées au stockage de l'énergie afin d'améliorer le comportement des systèmes hybrides électriques en régime transitoire.

Dans les batteries, la tension à vide, est principalement déterminée par le potentiel chimique des réactifs, elle varie donc relativement peu en première approximation tant qu'il reste des réactifs.

Chapitre III  
Commande basé sur  
La passivité

### III.1. Introduction

La dénomination "commande basée sur la passivité" (*PBC, Passivity-Based Control*) a été introduite pour définir une méthodologie de conception de commandes qui assurent la stabilité des systèmes en les rendant passif. Un système de la forme :

$$\begin{aligned}\dot{x} &= f(x) + g(x)u ; & x \in \mathbb{R}^n ; & u \in \mathbb{R}^m \\ y &= h(x); & & y \in \mathbb{R}^m\end{aligned}$$

est dit passif par rapport à la fonction de cadence d'approvisionnement (supply rate)  $s(u, y) = u^T y$ , s'il existe une fonction non négative  $C^0$ , appelée fonction de stockage,  $H: x \rightarrow \mathbb{R}$ , vérifiant  $H(0) = 0$ , et telle que pour toutes conditions initiales  $x_0$ , pour tout  $t > 0$  et toute entrée de commande  $u(\cdot)$ , l'inégalité suivante est vérifiée :

$$H(x(t)) - H(x_0) \leq \int_0^t u^T(s) y(s) ds \quad (\text{III.1})$$

"La quantité d'énergie stockée dans un intervalle de temps n'est jamais supérieure à l'énergie totale fournie durant cette période".

Le système est dit sans pertes si l'inégalité (III.1) devient une égalité :

$$H(x(t)) - H(x_0) = \int_0^t u^T(s) y(s) ds$$

### III.2. Conséquences immédiates de la passivité [6]

De l'inégalité (III.1), si :

$$\ll u = 0 \gg \quad \text{ou} \quad \ll y = 0 \gg$$

Ceci implique que  $H$  est décroissant.

- Les systèmes passifs avec une fonction de stockage  $H$  définie positive sont stables au sens de 'Lyapunov'.
- Les systèmes passifs avec une fonction de stockage  $H$  définie positive ont une dynamique des zéros stable au sens de 'Lyapunov'. Ainsi, ils sont à phase minimale.

La PBC fut couronnée de succès pour la commande de systèmes physiques, tels que les systèmes mécaniques, électriques et électromécaniques, en particulier ceux décrits par les équations du mouvement d'Euler-Lagrange

La PBC trouve ses racines dans les travaux fondamentaux de Takegaki et Arimoto sur la régulation par retour d'état d'un robot manipulateur totalement actionné. La méthodologie de la PBC suit deux étapes principales.

- Premièrement, procéder au façonnement de l'énergie où l'énergie totale du système est modifiée de façon à ce que la nouvelle fonction d'énergie ait un minimum unique à l'équilibre désiré.
- Deuxièmement, une étape d'ajout d'amortissement au système, où l'on modifie la fonction de dissipation d'énergie afin d'imposer une stabilité asymptotique du système commandé.

Un avantage important de cette technique est que les dynamiques du système en boucle fermée définissent un système passif. Cette caractéristique amène quatre avantages majeurs qui, dans une large mesure, expliquent le succès pratique de la commande basée sur la passivité.

1. L'action de la commande s'interprète clairement comme une interconnexion entre le système et son environnement. En particulier, la stabilisation peut être interprétée en termes d'équilibres d'énergie.

2. Les systèmes passifs sont robustes vis-à-vis des incertitudes paramétriques et des dynamiques non modélisées.

3. Dans certains cas, il est possible de donner une interprétation physique claire au réglage des paramètres de la commande, par exemple, des Amortisseurs ou des ressorts. Cette propriété peut être d'une grande importance dans les applications industrielles.

4. Contrairement aux méthodes telles que la commande par retour linéarisation qui résultent uniquement de considérations Mathématiques la PBC a été développée à partir de propriétés physiques comme la conservation de l'énergie et la passivité. La conception Est donc cohérente avec les contraintes physiques, sans annuler des dynamiques, ni introduire des singularités dans la commande.

Dans ce travail, on montrera comment la passivité peut être appliquée à la commande de quelques systèmes électromécaniques. Tout d'abord, afin de fournir au lecteur un ensemble convenable de références sur la PBC des machines électriques, un bref historique de ses développements est présenté dans la Section qui suit.

### III.3. Système Hamiltonien Commandé par Port [6]

La modélisation des systèmes est une étape cruciale qui peut, le cas échéant, considérablement simplifier ou compliquer l'élaboration de la commande.

Ainsi, une modélisation basée sur des principes physiques tels que la notion d'énergie peut faciliter la résolution de quelques problèmes en théorie de la commande.

L'énergie est l'un des concepts fondamentaux dans toutes les branches de la science. Son importance dans la modélisation des systèmes est largement illustrée par les méthodes Lagrangienne et Hamiltonienne.

Durant la dernière décennie, une nouvelle structure de modélisation est apparue, appelée structure Hamiltonienne Commandée par Port (PCH : Port Controlled Hamiltonian). Laquelle incorpore les concepts d'énergie et de flux d'énergie et englobe un ensemble plus large de systèmes que les modèles Lagrangiens et Hamiltoniens.

La structure de ces modèles permet d'identifier des caractéristiques intéressantes des systèmes physiques qui peuvent être exploitées dans la synthèse de la commande.

Considérons le système non linéaire affiné en la commande suivant :

$$\dot{x} = f(x) + g(x) u \quad (\text{III.2})$$

Où  $x \in \mathbb{R}^n$  est le vecteur d'état,  $f(x)$  et  $g(x)$  sont des fonctions localement Lipschitz et  $u \in \mathbb{R}^m$  est l'entrée de commande.

L'approche PCH consiste, tout d'abord, à identifier la fonction d'énergie naturelle du système que l'on nommera  $H(x)$ , puis de réécrire le système non linéaire (III.2) en fonction du gradient de la fonction d'énergie

$$\nabla H(x) = \left[ \frac{\partial H}{\partial x_1}(x) \quad \frac{\partial H}{\partial x_2}(x) \quad \dots \quad \frac{\partial H}{\partial x_n}(x) \right]^T$$

Ainsi, la forme PCH du système initial (III.2) est

$$\begin{aligned} \dot{x} &= [\mathfrak{J}(x) - \mathfrak{R}(x)]\nabla H(x) + g(x) u \\ y &= g^T(x)\nabla H(x) \end{aligned} \quad (\text{III.3})$$

Avec  $y$  est la sortie considérée,  $\mathfrak{J}(x)$  est une matrice antisymétrique de dimension  $n * n$  représentant les interconnexions entre les états, et  $\mathfrak{R}(x)$  est une matrice symétrique semi-définie positive représentant l'amortissement naturel du système.

Il est évident de l'équation (III.3) que la structure PCH procure des renseignements énergétiques qui sont d'une importance certaine lors de l'élaboration de la commande. Ainsi, la matrice d'interconnexion  $\mathfrak{J}(x)$  donne d'ores et déjà une indication sur l'échange ou la balance d'énergie entre les variables, quant à l'amortissement  $\mathfrak{R}(x)$  du fait que la matrice soit semi définie positive révèle que les termes appartenant à cette matrice sont des termes associés à la dissipation.

### III.4. Différentes approches de la PBC [6]

La PBC définit une méthode de synthèse d'un contrôleur qui stabilise le système étudié en le rendant passif. Ceci en prenant une fonction d'énergie désirée ayant un minimum à l'équilibre souhaité en injectant de l'amortissement Dans le système.

Bien qu'il y ait beaucoup de variantes à cette idée fondamentale, la PBC peut être largement classifiée dans deux grands groupes, la PBC "classique" où nous choisissons à priori la fonction de stockage pour être assignée (en général Quadratique) puis concevons le contrôleur qui rendra la fonction de stockage non croissante. Malheureusement, pour assigner une fonction de stockage donnée qui n'est pas nécessairement interprétée comme fonction d'énergie totale cette approche utilise l'inversion du modèle le long des trajectoires de références, ce qui a pour effet de détruire la structure Lagrangienne et impose des conditions non naturelles d'inversion stable du modèle.

Dans la seconde classe de PBC la fonction de stockage de la boucle fermée est laissée libre, mais nous choisissons à la place la structure désirée du système en boucle fermée, par exemple Lagrangienne ou Hamiltonienne commandée par port (PCH), et l'on caractérise alors toutes les fonctions d'énergie assignables compatibles avec cette structure. Cette caractérisation est donnée en termes de solutions d'équations différentielles partielles (EDP). Les exemples les plus notables de cette approche sont les systèmes Lagrangiens commandés, et l'Assignment d'Interconnexions et d'Amortissements (IDA : Interconnexion and Dumping Assignment). Depuis l'introduction de l'IDA-PBC plusieurs extensions théoriques et applications pratiques de cette méthodologie de synthèse de contrôleurs ont été reportées dans la littérature. Parmi les applications de l'IDA-PBC, on peut citer : le pendule, les moteurs électriques, la lévitation magnétique, les systèmes de puissances, les convertisseurs de puissance, les véhicules sous-marins, un module spatial et les systèmes mécaniques.

#### III.4.1. La Passivité et la Balance d'Énergie

Pour la synthèse d'une commande, le concept d'énergie est naturellement introduit par le concept de passivité. Les systèmes physiques interconnectés à l'environnement externe à travers les variables de ports conjuguées  $u \in \mathbb{R}^m$  et  $y \in \mathbb{R}^m$  (dont le produit a une unité de puissance) satisfont l'Équation de Balance d'Énergie (EBE) suivante :

$$H(x(t)) - H(x(0)) = \int_0^t u^T(s) y(s) ds - d(t) \quad (\text{III.4})$$

Ainsi, les systèmes satisfaisant l'Équation de Balance d'Énergie, avec  $H(x)$  fonction définie positive, sont passifs.  $y$  est alors appelée sortie passive.

### III.4.1.1. Propriétés

- Si  $u = 0$ , nous avons  $H(x(t)) \leq H(x(0))$ . Le système s'arrête sur un point d'équilibre d'énergie minimum.
- La commande  $u$  est introduite afin de stabiliser le système autour d'un point d'équilibre désirée  $x^*$ .
- Le taux de convergence vers le point d'équilibre peut être augmenté par l'extraction d'énergie en posant  $u = -K_{Amort} y$  Avec  $K_{Amort} = K_{Amort}^T > 0$ .
- $\left(-\int_0^t u^T(s) y(s) ds\right) \leq H(x(0)) < \infty \Leftrightarrow$  la quantité d'énergie qui peut être extraite du système passif est bornée.
- $d(t)$  en fonction de  $t$  est non décroissant.

### III.4.1.2. Formulation de la PBC standard

Considérons le système non linéaire (III.2) et prenons, par exemple, pour signal de commande  $u = \beta(x) + v$  tel que :

$$H_d(x(t)) - H_d(x(0)) = \int_0^t v^T(s) z(s) ds - d_d(t) \quad (\text{III.5})$$

Avec :

- $H_d(x)$  la fonction d'énergie désirée ayant son minimum au point d'équilibre  $x^*$ .
- $d_d(t) \geq 0$  l'amortissement désiré.
- $z$  (qui peut être égal à  $y$ ) la nouvelle sortie passive.

Ainsi la PBC représente la Balance d'énergie + ajout d'Amortissement

### III.4.1.3. Stabilisation via la Balance d'Énergie

Pour une classe de systèmes passifs, incluant les systèmes mécaniques, la stabilisation est relativement simple, pour cela il suffit de trouver  $\beta(x)$  telle que l'énergie apportée par la commande soit fonction des variables d'états.

En effet, si :

$$-\int_0^t \beta^T(x(s)) y(s) ds = H_a(x(t)) + \mathcal{K} \quad (\text{III.6})$$

Pour une fonction  $H_d(x)$  donnée et  $\mathcal{K}$  est une constante, alors  $u = \beta(x) + v$  assure que  $v \rightarrow y$  est passive avec la nouvelle fonction d'énergie désirée

$$H_d(x) \triangleq \underbrace{H(x)}_{\text{emmagasinée}} + \underbrace{H_a(x)}_{\text{ajoutée}} \quad (\text{III.7})$$

#### III.4.1.4. Obstacle de dissipation pour la PBC-BE

Les systèmes mécaniques mis à part, l'application de la PBC-BE est considérablement limitée par la dissipation naturelle du système.

En effet, si  $\dot{x} = 0 \Rightarrow \bar{x}$  est un point d'équilibre pour (III.2) ainsi

$$f(\bar{x}) + g(\bar{x}) \beta(\bar{x}) = 0 \Rightarrow h^T(\bar{x}) \beta(\bar{x}) = 0 \quad (III.8)$$

La partie droite de (III.8) donne :

$$\beta^T(\bar{x}) h(\bar{x}) = 0 = u^T y|_{\bar{x}} \quad (III.9)$$

Ainsi à l'équilibre la puissance extraite ( $= h^T B$ ) doit être nulle, La PBC-BE est donc applicable uniquement aux systèmes dont la dissipation est finie.

La méthode IDA-PBC pallie parfaitement à cette limitation.

#### III.4.2. Méthodologie d'Assignment d'Interconnexion et d'Amortissement IDA-PBC

L'IDA-PBC a été introduite dans comme étant une procédure pour la commande de systèmes physiques décrit sous la forme PCH suivante :

$$\begin{cases} \dot{x} = [\mathfrak{J}(x) - \mathfrak{R}(x)] \nabla H(x) + g(x) u \\ y = g^T(x) \nabla H \end{cases} \quad (III.10)$$

Où  $x \in \mathbb{R}^n$  est le vecteur d'état,  $u, y \in \mathbb{R}^m$ , avec  $m < n$ , sont les vecteurs d'entrée de commande et de sortie,  $H : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^+$  est l'énergie totale stockée,

$\mathfrak{J}(x) = -\mathfrak{J}^T(x)$ ,  $\mathfrak{R}(x) = \mathfrak{R}^T(x) \geq 0$  sont respectivement, la matrice d'interconnexion naturelle et la matrice d'amortissement.  $u, y$  sont les variables conjuguées dont le produit a une unité de puissance.

**Proposition 1.** Soit le système non linéaire décrit par (III.2), que l'on veut stabiliser autour d'un point d'équilibre  $x^* \in \mathbb{R}^n$ . Supposons l'existence des matrices suivantes :

$$g^\perp(x) \text{ est telle que : } g^\perp(x).g(x) = 0, \mathfrak{J}_d(x) = -\mathfrak{J}_d^T(x), \mathfrak{R}_d(x) = \mathfrak{R}_d^T(x) \geq 0$$

Comme étant les matrices d'interconnexion et d'amortissement désirées ainsi que la fonction d'énergie désirée  $H_d : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^+$  qui a son minimum au point d'équilibre désiré, ainsi

$$x^* = \operatorname{argmin} H_d$$

Le système (III.2) en boucle fermée avec la commande  $u$ , telle que :

$$u = [g^T(x).g(x)]^{-1} g^T(x) \{ [\mathfrak{J}_d(x) - \mathfrak{R}_d(x)] \nabla H_d - f(x) \} \quad (III.11)$$

À la forme PCH suivante :

$$\begin{aligned}\dot{x} &= [\mathfrak{S}_d(x) - \mathfrak{R}_d(x)] \nabla H_d \\ y &= g^T(x) \nabla H_d\end{aligned}\quad (III.12)$$

$x_*$  est un équilibre (localement) stable. Il est asymptotiquement stable si, de plus, on vérifie la condition suivante :

Le plus grand ensemble invariant du système en boucle fermée (III.12) contenu dans :

$$\{x \in \mathbb{R}^n \mid \dot{H}_d = 0\} \quad (III.13)$$

est égal à  $\{x_*\}$ . La stabilité est globale si  $H_d$  est radialement non bornée Démonstration.

en identifiant les parties droites de (III.2) et (III.12), l'équation suivante est obtenue :

$$f(x) + g(x)u = [\mathfrak{S}_d(x) - \mathfrak{R}_d(x)] \nabla H_d \quad (III.14)$$

En multipliant (III.13) à gauche par  $g^T(x)$ , on obtient :

$$g^T(x) f(x) = g^T(x) [\mathfrak{S}_d(x) - \mathfrak{R}_d(x)] \nabla H_d \quad (III.15)$$

L'expression de la commande est obtenue en multipliant (III.14) à gauche par le pseudo inverse de  $g(x)$ . Le fait d'écrire le système (III.2) en boucle fermée sous la forme (III.12) avec  $\mathfrak{S}_d(x)$  et  $\mathfrak{R}_d(x)$  ayant les propriétés décrites précédemment suffit pour prouver la stabilité autour du point  $x_*$ . En effet,

$$\begin{aligned}\dot{H}_d &= \nabla H_d^T \dot{x} \\ &= \nabla H_d^T [\mathfrak{S}_d(x) - \mathfrak{R}_d(x)] \nabla H_d \\ &= -\nabla H_d^T \mathfrak{R}_d(x) \nabla H_d \leq 0\end{aligned}\quad (III.16)$$

Ainsi,  $H_d$  joue le rôle de la fonction de Lyapunov. La stabilité asymptotique suit immédiatement en utilisant le principe d'invariance de LaSalle et la condition (III.13).

La procédure de synthèse du contrôleur IDA-PBC est récapitulée dans les étapes suivantes.

### Étapes :

On désire trouver la commande  $u$  qui permet d'écrire le système non linéaire affine en la commande (III.2) sous la forme PCH (III.12). Il est clair que (III.12) dispose de deux inconnues : la matrice désirée  $[\mathfrak{S}_d(x), \mathfrak{R}_d(x)]$  qui a les propriétés décrites dans la Proposition (III.1) et la fonction d'énergie désirée  $H_d$  qui intervient dans (III.12) par le biais de son gradient. Ainsi, deux approches existent :

1. Fixer la matrice d'interconnexions et d'amortissements désirée  $[\mathfrak{S}_d(x), \mathfrak{R}_d(x)]$  et laisser libre la fonction d'énergie désirée.

Dans ce cas, la procédure IDA-PBC consiste à résoudre des équations aux dérivées partielles où l'inconnue est la fonction d'énergie désirée  $H_d$  qui est soumise à la contrainte que son minimum est atteint aux points d'équilibres désirés et où le degré de liberté est la commande  $u$ .

2. Fixer la fonction d'énergie désirée  $H_d$  et par conséquent  $\nabla H_d$  et laisser libre la matrice désirée  $[\mathfrak{J}_d(x), \mathfrak{R}_d(x)]$ .

Dans ce cas, la procédure IDA-PBC consiste à résoudre des équations algébriques où l'inconnue est la matrice désirée  $[\mathfrak{J}_d(x), \mathfrak{R}_d(x)]$  qui doit avoir les propriétés décrites dans la Proposition (III.1) et où le degré de liberté est la commande  $u$ .

La méthode IDA-PBC est une procédure très intéressante pour la commande des systèmes physiques. Néanmoins, le fait de vouloir trouver une commande  $u$  qui permet d'écrire le système (III.2) en boucle fermée sous la forme PCH (III.12) peut donner lieu à des contrôleurs complexes et qui, éventuellement, ont besoin de la mesure complète de l'état. Afin de simplifier la complexité du contrôleur, une variante à cette méthode est proposée dans ce qui suit en introduisant un terme de perturbation à la forme PCH, ainsi appelée forme PCH perturbée (DPCH : Disturbed PCH). Mais tout d'abord un exemple d'application de l'IDA-PBC est donné.

**Remarque 1.** Dans l'approche IDA-PBC, le fait d'écrire le système initial sous la forme (III.10) permet d'identifier des propriétés physiques importantes. Cependant, tous les systèmes physiques ne sont pas facilement mis sous la forme (III.10). Ainsi, on peut considérer le système non linéaire (III.2) comme modèle de départ puis on applique la méthodologie IDA-PBC décrite en III.4.2.

**Remarque 2.** A ce stade de la recherche, la procédure IDA-PBC peut être utilisée pour la stabilisation d'un point d'équilibre et non pour la poursuite de trajectoire. Il existe cependant deux alternatives pour appliquer l'IDA-PBC pour la poursuite de trajectoire :

- Trouver un changement de repère dans lequel les trajectoires d'équilibre deviennent des points d'équilibre.
- Réécrire le modèle du système en termes d'équations d'erreur de poursuite, ainsi on stabilisera l'erreur de poursuite vers un point d'équilibre au lieu de stabiliser l'état vers une trajectoire d'équilibre.

### III.5. Conclusion

Dans ce chapitre une brève introduction de la notion de Passivité et de la Commande-Basée sur la Passivité (PBC) est donnée. Une commande récente est la PBC par Assignment d'Interconnexions et d'Amortissements (IDA-PBC). Dans l'approche IDA-PBC, qui définit d'abord les interconnexions et amortissements à assigner puis trouve les fonctions de stockage associées, on est confronté à la résolution d'équations aux dérivées partielles.

Chapitre IV  
Simulation  
interprétation des  
Résultats

### IV.1. Introduction

Nous présentons dans ce travail une conception d'une source d'alimentation hybride DC en utilisant une pile à combustible de type (PEMFC) comme source d'énergie principale et une batterie comme unité de stockage auxiliaire.

La gestion d'énergie veut dire que la commande, au lieu de stabiliser le système vers son équilibre, est suffisamment futée pour décider, à chaque moment et selon la demande de la charge électrique, quelle source doit assurer ou absorber l'énergie et par la suite définir le taux de l'utilisation de différentes sources en même temps.

### IV.2. Structure de la source d'énergie hybride

Suivant la figure IV.1, la source d'énergie hybride étudiée incluent un bus continu « DC Link » alimenté par une pile à combustible (FC) via un convertisseur élévateur DC/DC, ce qui met à jour la tension  $V_{DL}$  à sa valeur de référence  $V_d$ , et une batterie comme source secondaire, qui est connecté au bus continu par un convertisseur bidirectionnel DC/DC.

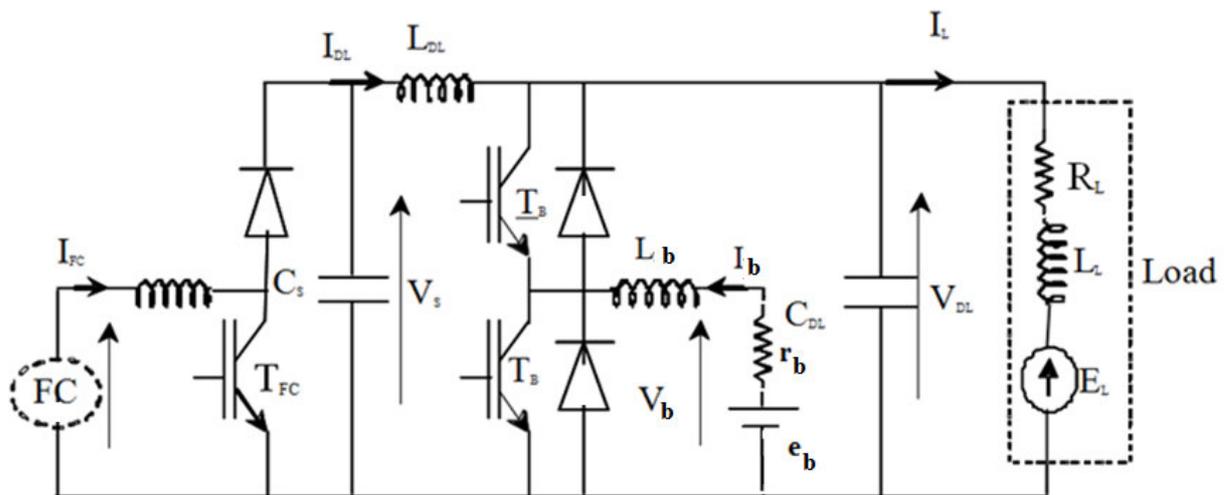


Figure IV.1 : Structure de la source hybride.

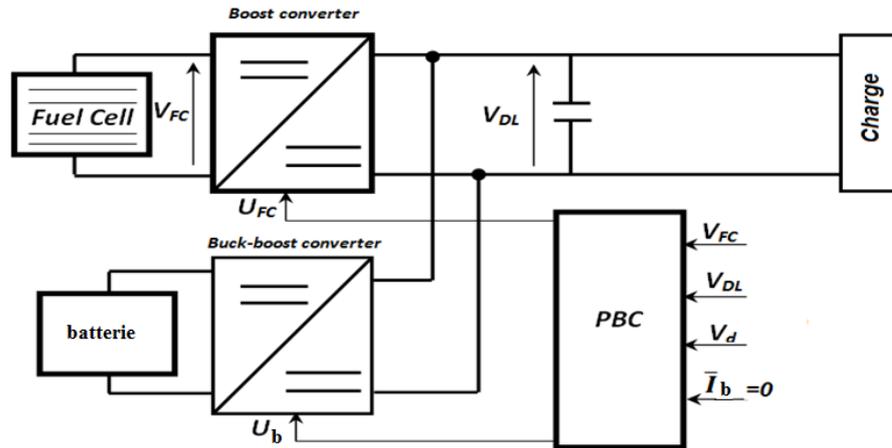


Figure IV.2. Schéma block de la commande.

Le rôle de la pile à combustible est d'assurer l'alimentation de la charge, tandis que la batterie est utilisée comme source auxiliaire pour assurer l'alimentation de la charge pendant l'accélération et le freinage.

### IV.3. Commande basée sur la passivité

#### IV.3.1. Système hamiltonien contrôlé gauche

Les systèmes de PCH ont été introduits par van der Schaft et Maschke dans les années '90 tôt et depuis avaient tiré beaucoup d'attention dans les systèmes électriques, mécaniques et électromécaniques.

Certains des avantages d'exprimer des systèmes sous la formule de PCH sont le fait qu'ils couvrent un grand ensemble de systèmes physiques et capturent les propriétés structurales importantes. Considérons le système non linéaire donné par

$$\dot{x} = f(x) + A(x) \quad (\text{IV.1})$$

Où  $x \in \mathbb{R}^n$  est le vecteur d'état,  $f(x)$  et  $A(x)$  sont localement des fonctions de Lipchitz et  $u \in \mathbb{R}^m$  est l'entrée de commande. Une formule de du PCH système (IV.1) EST donné par:

$$\dot{x} = [\mathfrak{S}(x) - \mathfrak{R}(x)]\nabla H(x) + A(x) \quad (\text{IV.2})$$

$\mathfrak{S}(x) = -\mathfrak{S}^T(x)$  est une matrice antisymétrique de dimension  $n * n$  représentant les interconnexions entre les états, et  $\mathfrak{R}(x)$  est une matrice symétrique semi-définie positive représentant l'amortissement naturel du système et  $\nabla H(x)$  est le vecteur de gradient de la fonction d'énergie  $H(x)$  du système (IV.1).

### IV.3.1.1. Équations du système

Selon la structure de la source hybride de la figure IV.1, le modèle global du système hybride est écrit dans un modèle de variable d'état en choisissant le vecteur suivant de variable d'état:

$$x = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6]^T = [V_s, I_{FC}, V_{DL}, I_{DL}, I_b, I_L]^T \quad (IV.3)$$

$$\begin{cases} \frac{dI_{FC}}{dt} = \frac{1}{L_{FC}} [V_{FC} - (1 - U_{FC})V_s] \\ \frac{dV_s}{dt} = \frac{1}{C_s} [(1 - V_{FC})I_{FC} - I_{DL}] \\ \frac{dI_{DL}}{dt} = \frac{1}{L_{DL}} [V_s - V_{DL}] \\ \frac{dV_{DL}}{dt} = \frac{1}{C_{DL}} [I_{DL} + (1 - U_b)I_b - I_L] \\ \frac{dI_b}{dt} = \frac{1}{L_b} [e_b - r_b I_b - (1 - U_b)V_{DL}] \\ \frac{dI_L}{dt} = \frac{1}{L_L} [V_{DL} - R_L I_L - E_L] \end{cases} \quad (IV.4)$$

$U_{FC}$  : La commande du convertisseur élévateur de FC

$U_b$  : La commande du convertisseur bidirectionnel de la batterie.

Alors le vecteur de commande est :

$$\mu = [\mu_1, \mu_2]^T = [(1 - U_{FC}) (1 - U_b)]^T \quad (IV.5)$$

Le modèle global de variable d'état d'ordre six est alors :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{1}{C_s} [(1 - U_{FC})x_2 - x_4] \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{L_{FC}} [-(1 - U_{FC})x_1 + V_{FC}] \\ \dot{x}_3 = \frac{1}{C_{DL}} [x_4 + (1 - U_b)x_5 - x_6] \\ \dot{x}_4 = \frac{1}{L_{DL}} [x_1 - x_3] \\ \dot{x}_5 = \frac{1}{L_b} [-(1 - U_b)x_3 - r_b x_5 + e_b] \\ \dot{x}_6 = \frac{1}{L_L} [x_3 - R_L x_6 - E_L] \end{cases} \quad (IV.6)$$

Le modèle statique de la pile PEMFC est donné comme suit :

$$V_{FC} = E_0 - A \log\left(\frac{I_{FC} + i_n}{i_0}\right) - \left\{ R_m (I_{FC} + i_n) + B \log\left(1 - \frac{I_{FC} + i_n}{i_{LIM}}\right) \right\} \quad (IV.7)$$

Avec :  $V_{FC} = f(x_2)$

$E_0$  est la tension mesurée en circuit ouvert,  $I_{FC}$  est le courant fourni,  $i_0$  est le courant d'échange,  $A$  est la pente de la ligne de Tafel,  $i_{LIM}$  est le courant de limite,  $B$  est la constante du

transfert de masse,  $i_n$  est de le courant interne et  $R_m$  est la résistance de membrane et de contacts.

Dans la suite,  $V_{FC}$  sera considéré comme perturbation mesurée, et de la considération physique,  $V_{FC} \in [0; V_d]$ , où  $V_d$  est la tension désirée du bus continu.

### IV.3.1.2. Système à l'équilibre

Le système à l'équilibre devient :

$$\bar{x} = [\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3, \bar{x}_4, \bar{x}_5, \bar{x}_6] \quad (IV.8)$$

$$\begin{cases} \dot{\bar{x}}_1 = \frac{1}{C_S} [(1 - \bar{U}_{FC})\bar{x}_2 - \bar{x}_4] \\ \dot{\bar{x}}_2 = \frac{1}{L_{FC}} [-(1 - \bar{U}_{FC})\bar{x}_1 + V_{FC}] \\ \dot{\bar{x}}_3 = \frac{1}{C_{DL}} [\bar{x}_4 + (1 - \bar{U}_b)\bar{x}_5 - \bar{x}_6] \\ \dot{\bar{x}}_4 = \frac{1}{L_{DL}} [\bar{x}_1 - \bar{x}_3] \\ \dot{\bar{x}}_5 = \frac{1}{L_b} [-(1 - \bar{U}_b)\bar{x}_3 - r_b\bar{x}_5 + e_b] \\ \dot{\bar{x}}_6 = \frac{1}{L_L} [\bar{x}_3 - R_L\bar{x}_6 - E_L] \end{cases} \quad (IV.9)$$

Après quelques calculs simples, le vecteur d'équilibre peut être exprimé par :

$$\bar{x} = \left[ V_d; \frac{(V_d - E_L)V_d}{R_L V_{FC}}; V_d; \frac{V_d - E_L}{R_L}; 0; \frac{V_d - E_L}{R_L} \right]^T \quad (IV.10)$$

Où  $V_d$  est la tension désirée du bus continu. Un but implicite de la structure proposée est de récupérer l'énergie pour charger la batterie.

Par conséquent, la commande désirée :

$$\bar{\mu} = [\bar{\mu}_1, \bar{\mu}_2]^T = [(1 - \bar{U}_{FC}) (1 - \bar{U}_b)]^T \quad (IV.11)$$

Où :

$$\bar{U} = [\bar{U}_{FC}, \bar{U}_b] = \left[ 1 - \frac{V_{FC}}{V_d}, 1 - \frac{e_b}{V_d} \right] \quad (IV.12)$$

La fonction naturelle d'énergie du système est :

$$H = \frac{1}{2} x^T Q x \quad (IV.13)$$

Où  $Q = \text{diag}\{C_S; L_{FC}; C_{DL}; L_{DL}; L_b; L_L\}$  est une matrice diagonale.

### IV.3.1.3. Formulation de problème

Après la modélisation de système, les points d'équilibre sont calculés afin d'assurer le comportement désiré du système. Si équilibré est atteint, la charge doit être alimentée seulement par la source principale.

Ainsi la commande doit mettre à jour la tension du bus continu à une valeur constante et le courant de batterie doit être annulé.

À l'équilibre, la batterie doit être chargée et le courant doit être égal à zéro. Dans la prochaine section, la commande sera développée et la stabilité du système sera étudiée.

### IV.3.1.4. Présentation de la commande hamiltonienne 'PCH' du système

Dans le suivant, une représentation en boucle bloquée de PCH est donnée.

La fonction en boucle bloquée désirée d'énergie est :

$$H_d = \frac{1}{2} \tilde{x}^T Q \tilde{x} \quad (\text{IV.14})$$

Où le  $\tilde{x} = x - \bar{x}$  est le nouveau variable d'état définissant l'erreur entre l'état  $x$  et sa valeur d'équilibre  $\bar{x}$ .

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}}_1 = \frac{1}{C_S} [\mu_1 \tilde{x}_2 - \tilde{x}_4] + \frac{1}{C_S} [(\mu_1 - \bar{\mu}_1) \bar{x}_2] \\ \dot{\tilde{x}}_2 = \frac{1}{L_{FC}} [-\mu_1 \tilde{x}_1] + \frac{1}{L_{FC}} [(\bar{\mu}_1 - \mu_1) \bar{x}_1] \\ \dot{\tilde{x}}_3 = \frac{1}{C_{DL}} [\tilde{x}_4 + \mu_2 \tilde{x}_5 - \tilde{x}_6] \\ \dot{\tilde{x}}_4 = \frac{1}{L_{DL}} [\tilde{x}_1 - \tilde{x}_3] \\ \dot{\tilde{x}}_5 = \frac{1}{L_b} [-\mu_2 \tilde{x}_3 - r_b \tilde{x}_5] + \frac{1}{L_b} [(\bar{\mu}_2 - \mu_2) \bar{x}_3] \\ \dot{\tilde{x}}_6 = \frac{1}{L_L} [\tilde{x}_3 - R_L \tilde{x}_6] \end{cases} \quad (\text{IV.15})$$

La représentation (IV.15) en fonction du gradient de l'énergie désirée (IV.14) peut être écrite comme suit :

$$\dot{\tilde{x}} = [\mathfrak{S} - \mathfrak{R}] \nabla H_d + A \quad (\text{IV.16})$$

Avec

$$\nabla H_d = [C_S \tilde{x}_1, L_{FC} \tilde{x}_2, C_{DL} \tilde{x}_3, L_{DL} \tilde{x}_4, L_b \tilde{x}_5, L_L \tilde{x}_6]^T \quad (\text{IV.17})$$

et :

$$[\mathfrak{S} - \mathfrak{R}] = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\mu_1}{C_s L_{FC}} & 0 & \frac{-1}{C_s L_{DL}} & 0 & 0 \\ \frac{-\mu_1}{L_{FC} C_s} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_{DL} L_{DL}} & \frac{\mu_2}{C_{DL} L_b} & \frac{-1}{C_{DL} L_L} \\ \frac{1}{L_{DL} C_s} & 0 & \frac{-1}{L_{DL} C_{DL}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-\mu_2}{L_b C_{DL}} & 0 & \frac{-r_b}{L_b^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L_L C_{DL}} & 0 & 0 & \frac{-R_L}{L_L^2} \end{bmatrix} \quad (IV.18)$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{1}{C_s} [(\mu_1 - \bar{\mu}_1) \bar{x}_2] \\ \frac{1}{L_{FC}} [(\bar{\mu}_1 - \mu_1) \bar{x}_1] \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L_b} [(\bar{\mu}_2 - \mu_2) \bar{x}_3] \\ 0 \end{bmatrix} \quad (IV.19)$$

On propose les lois de commande suivantes:

$$\begin{cases} U_{FC} = \bar{U}_{FC} \\ U_b = \bar{U}_b - r \tilde{x}_5 \end{cases} \quad (IV.20)$$

Où  $r$  est un paramètre de réglage positif qui laisse augmenter l'atténuation du système. Une grande valeur de  $r$  augmentera considérablement l'atténuation au détriment de la rapidité de système. Un compromis devrait être fait pour le bon choix de ce paramètre.

La représentation du système (IV.15) et avec les de commande proposées (IV.20) devient :

$$\dot{\tilde{x}} = [\mathfrak{S} - \mathfrak{R}'] \nabla H_d = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\mu_1}{C_s L_{FC}} & 0 & \frac{-1}{C_s L_{DL}} & 0 & 0 \\ \frac{-\mu_1}{L_{FC} C_s} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_{DL} L_{DL}} & \frac{\mu_2}{C_{DL} L_b} & \frac{-1}{C_{DL} L_L} \\ \frac{1}{L_{DL} C_s} & 0 & \frac{-1}{L_{DL} C_{DL}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-\mu_2}{L_b C_{DL}} & 0 & \frac{-(r_b + r V_d)}{L_b^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L_L C_{DL}} & 0 & 0 & \frac{-R_L}{L_L^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_s \tilde{x}_1 \\ L_{FC} \tilde{x}_2 \\ C_{DL} \tilde{x}_3 \\ L_{DL} \tilde{x}_4 \\ L_b \tilde{x}_5 \\ L_L \tilde{x}_6 \end{bmatrix} \quad (IV.21)$$

L'origine du système PCH en boucle fermé (IV.16), avec les lois de commande (IV.20), (IV.12) et la fonction d'énergie désirée (IV.14), est globalement asymptotiquement stable.

La dynamique du système en boucle fermée (IV.16) avec les lois (IV.20), (IV.12) et la fonction d'énergie désirée (IV.14) est :

$$\dot{\hat{x}} = [\mathfrak{S} - \mathfrak{R}'] \nabla H_d \quad (\text{IV.22})$$

Où

$$\mathfrak{R}' = \text{diag} \left\{ 0; 0; 0; 0; \frac{(r_b + rV_d)}{L_b^2}; \frac{R_L}{L_L^2} \right\} = \mathfrak{R}'^T \geq 0 \quad (\text{IV.23})$$

Le dérivé de la fonction désirée d'énergie (IV.14) le long de la trajectoire de (IV.22) est :

$$\begin{aligned} \dot{H}_d = \nabla H_d^T \dot{\hat{x}} &= \nabla H_d^T [\mathfrak{S} - \mathfrak{R}'] \nabla H_d \leq 0 \\ &= \nabla H_d^T \mathfrak{S} \nabla H_d - \nabla H_d^T \mathfrak{R}' \nabla H_d \leq 0 \\ &= -\nabla H_d^T \mathfrak{R}' \nabla H_d \leq 0 \end{aligned} \quad (\text{IV.24})$$

$\dot{H}_d \leq 0 \Rightarrow$  Le système est globalement asymptotiquement stable.

#### IV.4. Résultats de simulation de la commande de la source hybride

Les différents paramètres de simulation sont :

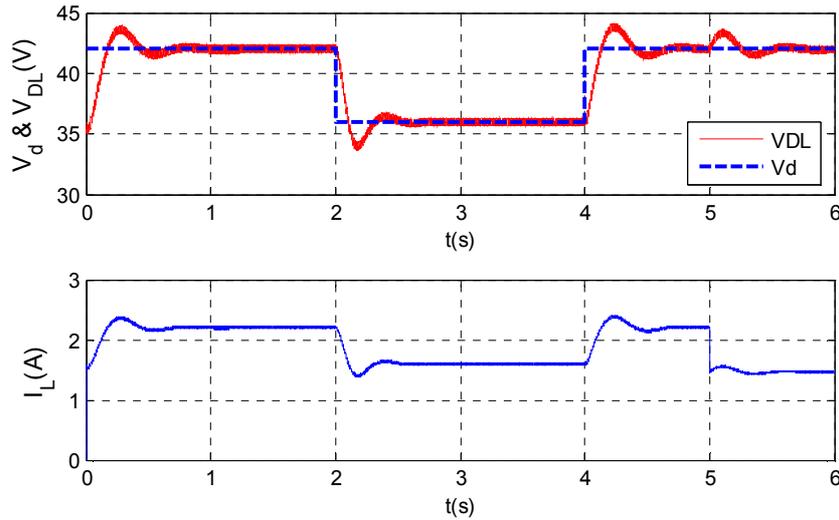
Les paramètres de la charge et la commande			
$E_L (V)$	$R_L (\Omega)$	$L_L (mH)$	$r$
20	10	10	0.01
Les paramètres de la batterie et du bus continu			
$C_S (\mu F)$	$C_{DL} (F)$	$e_b (V)$	$r_b (\Omega)$
300	$30.10^{-3}$	12	$50.10^{-3}$

##### IV.4.1. La charge fonctionne comme récepteur

Les simulations suivantes présentent la réaction et la commande de système obtenu avec les lois proposées de commande (IV.21). Dans ce cas-ci, la charge est considérée comme réceptrice seulement de puissance électrique.

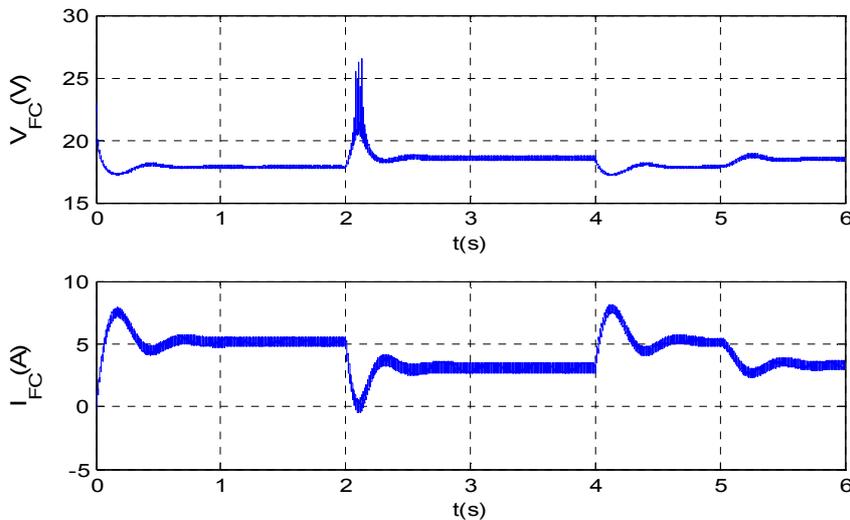
Pour illustrer l'efficacité de commande, la référence de tension de bus continu et la résistance sont modifiées (voir les figures IV.3 et IV.7) où la tension de bus continue est initialisée à 36 V et la référence de tension de bus continue est fixée à 42 V au début.

Fig.IV.3 présente la réponse de la tension  $V_{DL}$  et le courant de la charge  $I_L$  aux changements de la référence de tension de bus continu ( $V_d$ ) et la charge ( $R_L$ ). La tension du bus continu suit bien la référence, un léger dépassement et une petite erreur statique est observée.



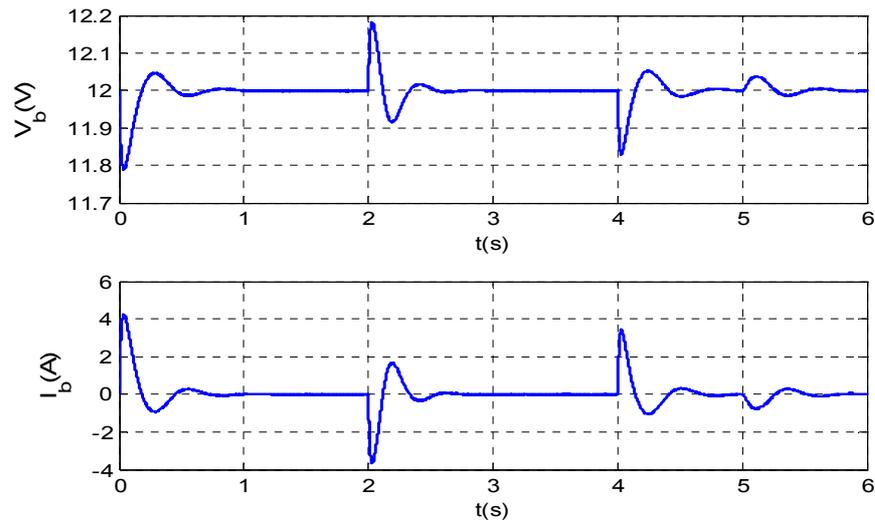
**Figure. IV.3 :** Tension de bus continu et sa référence, courant de charge

Fig. IV.4 montre la tension ( $V_{FC}$ ) et le courant ( $I_{FC}$ ). Dans notre modélisation, nous supposons que la source de FC est idéale. On observe un comportement lisse du courant concernant les changements de  $V_d$  et de  $R_L$ , parce que la batterie fournit la puissance transitoire.



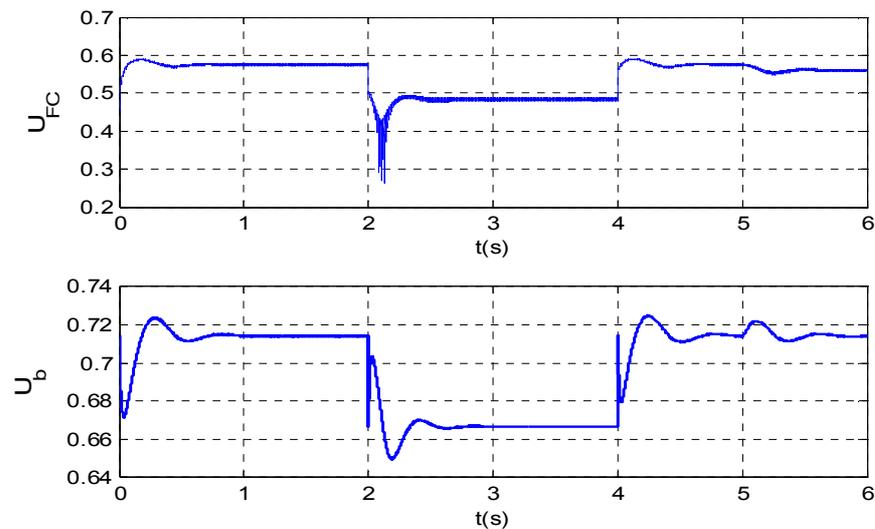
**Figure IV.4.** Tension et courant de la pile à combustible.

Fig. IV.5 montre les réponses de la tension et du courant de la batterie. La batterie fournit la puissance vers la charge pendant les transitoires et en régime permanent aucune puissance est extraite quand  $I_b = 0$ . La valeur positive de  $I_b$  signifie que la batterie fournit la puissance à la charge et une valeur négative correspond à la récupération de l'énergie par la batterie. À l'instant  $t = 2\text{ s}$ , la batterie absorbe le pic du courant et à l'instant  $4\text{ s}$  alimente la charge, aussi rapide que le changement rapide de la référence de bus continu.

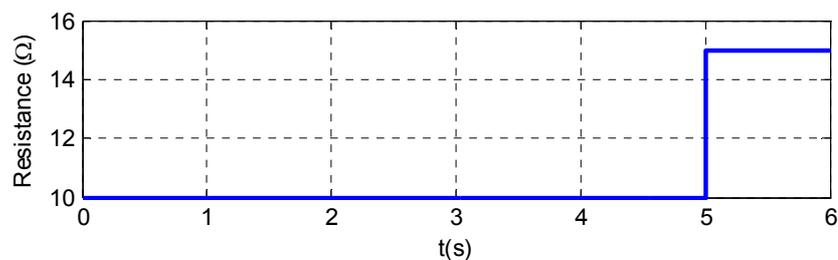


**Figure. IV.5.** tension et courant la batterie

Fig.IV.6 présente la commande de convertisseur élévateur de la pile à combustible et le la commande du convertisseur bidirectionnel de batterie, le changement de la résistance  $R_L$  de la charge Fig.IV.7 à l'instant  $t=5s$  de 10 à 15 ( $\Omega$ ).  $U_{FC}$  et  $U_b$  sont dans l'intervalle [0, 1].

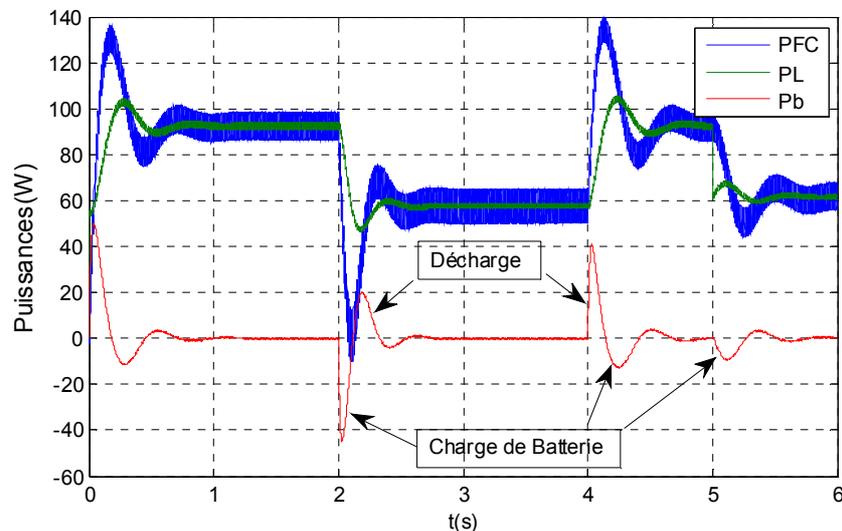


**Figure. IV.6.** Commande de pile à combustible, commande de batterie.



**Figure. IV.7.** Résistance de charge

Fig.IV.8 présente le transfert des puissances dans le système. Les pics de puissance sont absorbés ou fournis par la batterie, ainsi une puissance douce est fournie par la pile à combustible.



**Figure. IV.8.** Transfert de puissances

#### IV.5.Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons modélisé un système de sources hybrides composé d'une pile à combustible comme source d'énergie et une batterie comme unité de stockage.

La structure de PCH du système global est donnée présentant les propriétés physiques importantes en termes d'interconnexion variable et atténuation du système.

Le problème de la commande de bus continu « DC Link » est résolu en utilisant la commande linéaire simple basée sur la passivité.

La preuve globale de stabilité est donnée et encourageant la simulation des résultats a été obtenue.

## Liste de la figure

### Chapitre I. Les piles à combustible

<b>Figure I.1.</b> Composition d'une cellule élémentaire d'une pile à combustible.....	5
<b>Figure I.2.</b> Principe de fonctionnement d'une pile à combustible.....	6
<b>Figure I.3.</b> Principe des piles à combustible à électrolyte acide (en haut) ou alcalin (en bas).....	9
<b>Figure I.4.</b> Différentes couches d'une cellule élémentaire de PEMFC.....	10
<b>Figure I.5.</b> Assemblage membrane-électrodes de sept couches de la compagnie 3M.....	15
<b>Figure I.6.</b> Membrane DuPont.....	16
<b>Figure I.7.</b> Plaques bipolaire de pile PEM.....	17
<b>Figure I.8.</b> Différents constituants d'un système pile à combustible.....	19
<b>Figure I.9.</b> Système pile à combustible (à gauche, photo GREEN ; à droite, pile industrielle)...	21
<b>Figure I.10.</b> Caractéristique tension-courant d'une pile à combustible PEM.....	21
<b>Figure I.11.</b> Modèle simple de pile à combustible.....	23
<b>Figure I.12 :</b> Piles à combustible de UTC à Central Park New York.....	27
<b>Figure I.13 :</b> Autobus à pile à combustible.....	28

### Chapitre II. Les batteries

<b>Figure II.1.</b> Tension de « cut-off » d'une batterie.....	30
<b>Figure II.2.</b> Caractéristique de décharge d'une batterie au plomb.....	30
<b>Figure II.3.</b> Modèle simple d'une batterie.....	31
<b>Figure II.4.</b> Structure d'un accumulateur acide/plomb a plaques planes.....	33
<b>Figure II.5.</b> Structure interne d'une batterie Pb classique (électrodes planes).....	34
<b>Figure II.6.</b> Batterie étanche utilisée dans le véhicule solaire du chapitre .....	36
<b>Figure II.7.</b> Evolution temporelle de la tension d'un accumulateur au plomb.....	37
<b>Figure II.8.</b> Principe de fonctionnement des l'accumulateur au lithium.....	39
<b>Figure II.9.</b> Accumulateur au Lithium-Ion de SAFT.....	40
<b>Figure II.10.</b> Caractéristique de décharge d'un accumulateur Lithium-Ion a courant constant.....	41

---

**Chapitre IV. Simulation et interprétation des résultats**

<b>Figure IV.1</b> : Structure de la source hybride.....	55
<b>Figure IV.2.</b> Schéma block de la commande.....	56
<b>Figure IV.3</b> : Tension de bus continu et sa référence, courant de charge.....	62
<b>Figure IV.4.</b> Tension et courant de la pile à combustible.....	62
<b>Figure. IV.5.</b> Tension et courant de la batterie.....	63
<b>Figure. IV.6.</b> Commande de pile à combustible, commande de batterie.....	63
<b>Figure. IV.7.</b> Résistance de charge.....	63
<b>Figure. IV.8.</b> Transfert de puissances.....	64

---

## Liste des tableaux

<b>Tableau I.1.</b> Les différents types de piles à combustible.....	7
<b>Tableau II-1:</b> Caractéristiques des batteries au plomb.....	38
<b>Tableau II.2.</b> Caractéristiques des batteries Lithium-Ion.....	41
<b>Tableau II.3.</b> Caractéristiques des batteries au Nickel et au Plomb.....	44
<b>Tableau II.4.</b> Comparaison entre les différentes technologies de batteries.....	45

---

### **Conclusion générale**

La définition des principes de fonctionnement et la modélisation des sources d'énergie sont nécessaires pour évaluer le comportement d'un système hybride électrique. C'est pourquoi dans ce travail, nous avons présenté les sources d'énergie électrique pour utilisées dans la réalisation de source hybride électrique les pile à combustible et la batterie électrochimiques. Cette étude, a mis en évidence dans ce type d'application, l'utilisation de la technologie PEMFC pour la pile à combustible et la batterie pour le système de stockage d'énergie.

Le premier et le deuxième chapitre présent l'état de l'art des piles à combustible et des systèmes de stockage d'énergie. Ceci est utile pour choisir le type de pile à combustible et de système de stockage d'énergie, de présenter la structure du système pile et du système de stockage d'énergie.

Le troisième chapitre présent la stratégie de commande utilisée dans ce système hybride la commande basée sur la passivité.

Le quatrième chapitre présent la structure de ce système hybride et les équations de système est l'interprétation de résultat obtenu.

## Sommaire

---

Introduction générale.....	1
<b>Chapitre I. Les piles à combustible</b>	
I.1. Introduction.....	3
I.2. Historique.....	3
I.3. Définition.....	4
I.4. Principe de fonctionnement.....	5
I.5. Les différents types de piles à combustible.....	6
I.5.1. La pile alcaline (AFC).....	7
I.5.2. Pile à combustible de type(PEMFC).....	8
I.5.3. La pile à acide phosphorique (PAFC).....	10
I.5.4. La pile à méthanol direct (DMFC).....	11
I.5.5. La pile à oxyde solide (SOFC).....	12
I.5.6. La pile à carbonates fondus (MCFC).....	13
I.6. Construction de pile à combustible de type PEM.....	14
I.6.1. Assemblage membrane-électrodes.....	15
I.6.1.1. Electrodes.....	15
I.6.1.2. Electrolyte.....	16
I.6.1.3. Plaque bipolaire.....	17
I.6.2. Humidificateur.....	18
I.7. Système pile à combustible.....	18
I.7.1. Configuration système.....	18
I.7.2. Reformeur.....	19
I.7.3. Gestion de l'air.....	20
I.7.4. Gestion de l'eau.....	20
I.7.5. Gestion thermique.....	20
I.8. Caractéristique et modélisation simple des piles à combustible.....	21
I.8.1. Avantages et inconvénients des piles à combustible de type PEM.....	23
I.8.1.1. Avantages des piles à combustible de type PEM.....	23
I.8.1.2. Inconvénients des piles à combustible de type PEM.....	24
I.9. Les applications.....	24
I.9.1. Les applications portables.....	24
I.9.2. Les applications stationnaires.....	25

---

---

I.9.3. Les applications transport.....	26
I.9.3.1. Les véhicules légers.....	26
I.9.3.2. Les véhicules lourds .....	27
I.10. Conclusion .....	28

## Chapitre II. Les batteries

II.1. Introduction .....	29
II.2. Batteries électrochimiques .....	29
II.2.1. Généralités .....	29
II.2.2. Modélisation des batteries.....	30
II.2.3. Différentes technologies .....	31
II.2.3.1. Les accumulateurs au plomb .....	32
II.2.3.1.1. Principe .....	32
II.2.3.1.2. Eléments technologiques.....	33
A. Batteries « classiques » ou ouvertes .....	34
B. Batteries étanches.....	36
II.2.3.1.3. Grandeurs générales .....	37
II.2.3.2. Les accumulateurs Lithium-Ion .....	38
II.2.3.2.1. Principe .....	39
II.2.3.2.2. Eléments technologiques.....	40
II.2.3.2.3. Mise en ouvre .....	40
II.2.3.2.4. Avantages et inconvénients des batteries Li-Ion .....	42
II.2.3.3. Batteries au Nickel .....	43
II.2.3.3.1. Batteries Nickel Cadmium (Ni-Cd).....	43
II.2.3.3.2. Batteries Nickel-Hydrure métallique (Ni-MH) .....	43
II.2.3.3.3. Batteries Nickel-Fer (Ni-Fe).....	44
II.2.3.3.4. Batteries Nickel-Zinc (Ni-Zn) .....	44
II.2.4. Comparaison des différents types de batteries au Nickel et au Plomb .....	44
II.3. Conclusion .....	46

## Chapitre III. Commande basé sur la passivité

III.1. Introduction .....	47
III.2. Conséquences immédiates de la passivité .....	47
III.3. Système Hamiltonien Commandé par Port .....	48
III.4. Différentes approches de la PBC .....	50

---

---

III.4.1. La Passivité et la Balance d'Énergie .....	50
III.4.1.1. Propriétés .....	51
III.4.1.2. Formulation de la PBC standard .....	51
III.4.1.3. Stabilisation via la Balance d'Énergie .....	51
III.4.1.4. Obstacle de dissipation pour la PBC-BE .....	52
III.4.2. Méthodologie d'Assignation d'Interconnexion et d'Amortissement IDA-PBC .....	52
III.5. Conclusion .....	54

### **Chapitre IV. Simulation et interprétation des résultats**

IV.1. Introduction .....	55
IV.2. Structure de la source d'énergie hybride .....	55
IV.3. Commande basée sur la passivité .....	56
IV.3.1. Système hamiltonien contrôlé gauche .....	56
IV.3.1.1. Équations du système .....	57
IV.3.1.2. Système à l'équilibre .....	58
IV.3.1.3. Formulation de problème .....	59
IV.3.1.4. Présentation de la commande hamiltonienne 'PCH' du système .....	59
IV.4. Résultats de simulation de la commande de la source hybride .....	61
IV.4.1. La charge fonctionne comme récepteur .....	61
IV.5. Conclusion .....	64
Conclusion générale .....	65
Bibliographie .....	66

---

## Bibliographie

[1] : **Majid ZANDI**, CONTRIBUTION AU PILOTAGE DES SOURCES HYBRIDES D'ENERGIE ELECTRIQUE. NANCY Université - Institut National Polytechnique de Lorraine.2010

[2] : **Phatiphat THOUNTHONG**, CONCEPTION D'UNE SOURCE HYBRIDE UTILISANT UNE PILE A COMBUSTIBLE ET DES SUPERCONDENSATEURS. L'Institut National Polytechnique de Lorraine.2005

[3] : **Jérôme LACHAIZE**, Etude des stratégies et des structures de commande pour le pilotage des systèmes énergétiques à Pile à Combustible (PAC) destinés à la traction. L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE.2004

[4] : **Rémi SAISSET**, Contribution à l'étude systémique de dispositifs énergétiques à composants électrochimiques. Formalisme Bond Graph appliqué aux piles à combustible, accumulateurs Lithium-Ion, Véhicule Solaire. L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE.2004

[5] : **Amel LACHICHI**, Modélisation et stabilité d'un régulateur hybride de courant Application aux convertisseurs pour pile à combustible. Université de Franche-Comté.2005

[6] : **Mohamed Badreddine BECHERIF**, Contribution aux techniques de façonnement d'énergie: Application à la commande des systèmes électromécaniques. UNIVERSITÉ PARIS XI ORSAY.2004