

**UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA**  
**Faculté des Sciences Appliquées**  
**Département de Génie Électrique**



**Mémoire**  
**MASTER ACADEMIQUE**

Domaine : Sciences et technologies  
Filière : Électrotechnique  
Spécialité : Électrotechnique Industrielle

**Présenté par :**

**Benhakkoum**

**Hidayat Allah**

**Abid**

**Katar Nada**

**Thème :**

**Dimensionnement et Modélisation d'un  
Système Hybride (Pile à combustible et  
Batterie lithium-ion)**

Soumis au jury composé de :

M<sup>r</sup> Benmir Abdelkader

MCB

Président

UKM Ouargla

M<sup>r</sup> Khalifa Moussa

MCA

Encadreur/rapporteur

UKM Ouargla

M<sup>r</sup> Khettache laid

MAA

Examineur

UKM Ouargla

**Année universitaire 2022/2023**



## *Remerciement*

*Avant tout, nous remercions Dieu le tout puissant de nous avoir donné le courage et la patience pour réaliser.*

*Nous dédions ce modeste travail :*

*A nos très chers parents, que Dieu les garde et les protège pour leur soutien moral et financier, pour leurs encouragements et les sacrifices qu'ils ont enduré. A nos frères, sœurs, cousins A nos grands-pères A nos grands-mères Aux chers amis.*

*A nos professeurs. A tous les amis (es) d'études surtout ceux de la 2eme année master électrotechnique industriel.*



## *Dédicace*

*Avant tout, je remercie « ALLAH » qui m'a donné la force, le courage et la patience durant toutes ces années d'études, pour pouvoir achever cet humble travail.*

*Je remercie tout particulièrement mes parents ; pour leur soutien inconditionnel au cours de ces longues années d'étude.*

*Je remercie particulièrement mon encadreur Dr, Khalifa Moussa et Dr, Benaouadj Mahdi pour ses précieuses directives. Je tiens également à remercier les membres de jury pour avoir fait l'honneur d'évaluer mon travail. Je tiens aussi à remercier les membres du jury d'avoir accepté de juger notre travail.*

*Je remercie aussi tous les enseignants et les responsables de Département GENIE ELECTRIQUE de l'université D'OUARGLA  
Leur aide et leurs encouragements.*

## Résumé – Abstract – ملخص

### Résumé :

Les énergies renouvelables (hydraulique, solaire, éolien, géothermie et biomasse) se développent intensément partout dans le monde, portées par la nécessité de lutter contre le réchauffement climatique en réduisant les émissions de gaz à effet de serre. Et l'un des inconvénients de cette énergie est que ses sources peuvent ne pas être disponibles dans certaines circonstances, il a donc été envisagé d'utiliser le système hybride comme la meilleure solution à ce problème.

Dans ce travail, nous avons étudié un système hybride constitué d'une pile à combustible et d'une batterie. Ce système alimente une charge électrique. Nous avons utilisé le management de chaque composant du système afin d'utiliser chacun selon le besoin.

L'étude a été réalisée sous Matlab / Simulink avec l'utilisation des convertisseurs.

**Mots clés :** Pile à combustible, Système hybride, Batterie, La gestion d'énergie.

### ملخص :

تتطور الطاقات المتجددة (الهيدروليكية ، والشمسية ، وطاقة الرياح ، والطاقة الحرارية الأرضية ، والكتلة الحيوية) بشكل مكثف في جميع أنحاء العالم ، مدفوعة بالحاجة إلى مكافحة الاحتباس الحراري عن طريق الحد من انبعاثات غازات الاحتباس الحراري. ومن عيوب هذه الطاقة أن مصادرها قد لا تكون متوفرة في ظروف معينة ، لذلك تم اعتبار استخدام النظام الهجين كأفضل حل لهذه المشكلة. في هذا العمل ، درسنا نظامًا هجينًا يتكون من خلية وقود وبطارية. هذا النظام يشحن حمولة كهربائية. استخدمنا إدارة كل مكون من مكونات النظام من أجل استخدام كل مكون حسب الحاجة.

أجريت الدراسة تحت Matlab / Simulink باستخدام المحولات.

**الكلمات المفتاحية :** خلية وقود ، نظام هجين ، بطارية ، ادارة الطاقة.

### Abstract :

Renewable energies (hydraulic, solar, wind, geothermal and biomass) are developing intensely all over the world, driven by the need to fight against global warming by reducing greenhouse gas emissions. And one of the disadvantages of this energy is that its sources may not be available in certain circumstances, so it was considered to use the hybrid system as the best solution to this problem.

In this work, we studied a hybrid system consisting of a fuel cell and a battery. This system powers an electrical load. We used the management of each component of the system in order to use each one as needed.

The study was carried out under Matlab / Simulink with the use of converters.

**Keywords :** Fuel cell, Hybrid system, Battery, Energy management.

## Listes des symboles

**Npac** : Nombre des cellules de stack montées en série

**Np** : Nombre de cellules de stack mises en parallèle

**Udc** : Tension de bus [V]

**Ecell** : Tension de cellules de la pile [V]

**Cb**: Capacité nominale du stack [Ah]

**Eb** : Energie journalière à stocker dans le stack [Wh/j]

**Aut** : Nombre de jours d'autonomie

**Vbn**: Tension nominale du pack [V]

**Db** : Profondeur de décharge du stack [%]

**Nbap**: Nombre de batterie montée en parallèle

**Nbas**: Nombre de batterie montée en série

**Relem** : Résistance élémentaire [ $\Omega$ ]

**Célem** : Capacité élémentaire [F]

**Velem** : Tension élémentaire [V]

**Iélem** : Courant élémentaire [A]

$\Delta V_{act}$  : Chute de tension due aux pertes d'activation [V]

**A** : Pente de la droite de Tafel qui est de l'ordre de 0.06V

**icell** : Courant délivré par la cellule PEM [ $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ ]

**i0** : Courant d'échange caractérisant à vide les échanges électrode-électrolyte [ $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ ]

**in** : Courant interne permettant de tenir compte d'une éventuelle traversée de gaz et/ou d'électrons à travers l'électrolyte [ $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ ]

$\Delta V_C$  : Chute de tension due aux pertes de concentration [V]

$\Delta V_{ohm}$  : Chute de tension due aux pertes ohmiques [V]

**Rm** : Résistance totale de la pile à combustible [ $\text{k}\Omega\cdot\text{cm}^2$ ]

**vb** : Tension de la batterie lithium-ion [V]

**Eb**: Sa tension à vide [V]

**Ib** : Son courant [A]

**Rb** : Sa résistance [ $\Omega$ ]

**EDCba** : L'état de charge du stack des batteries [%]

# Liste des Figures

<b>Figure.I. 1:</b> schéma de fonctionnement d'une pile à combustible.....	6
<b>Figure.I. 2:</b> Différents types des PACs. ....	7
<b>Figure.I. 3:</b> 'Stack' d'une pile à combustible de type PEMFC. ....	8
<b>Figure.I. 4:</b> Structure d'un empilement des cellules PEMFC (Électro Encyclo). ....	9
<b>Figure.I. 5:</b> Membrane DuPont. ....	10
<b>Figure.I. 6 :</b> Plaque bipolaire.....	11
<b>Figure.I. 7:</b> Représentation d'une PEMFC.....	12
<b>Figure.I. 8:</b> Comparaison de la performance des PAC par rapport aux autres systèmes de production de puissance. ....	14
<b>Figure.I. 9:</b> montre un exemple de vue éclatée d'un accumulateur .....	15
<b>Figure.I. 10:</b> Principe de fonctionnement des accumulateurs .....	16
<b>Figure.I. 11:</b> Positionnement en densités d'énergie massique et volumique des batteries Lithium. ....	20
<b>Figure.I. 12:</b> Principe de fonctionnement des accumulateurs au lithium. ....	21
<b>Figure.I. 13:</b> L'emplacement des batteries par rapport la densité d'énergie massique et la densité d'énergie volumique.....	22
<b>Figure.I. 14:</b> Schéma de fonctionnement de l'insertion / désinsertion des ions lithium au cours de la charge ou de la décharge d'une batterie lithium-ion.....	23
<b>Figure.I. 15 :</b> Caractéristiques de différentes technologies de batterie lithium-ion. ....	24
<b>Figure.I. 16 :</b> Formats cylindrique, prismatique et poche des batteries li-ion.....	26
<b>Figure II. 1 :</b> Profil de consommation .....	29
<b>Figure II. 2:</b> Montage Boost du convertisseur DC-DC connecté au stack de piles à combustible PEM .....	33
<b>Figure II. 3 :</b> Montage Buck/Boost du convertisseur DC-DC lié au stack de batteries lithium ion.....	34
<b>Figure II. 4:</b> Caractéristique densité de courant-tension d'une pile PEM.....	35
<b>Figure II. 5:</b> Caractéristique $Vfc = (ifc)$ du stack de piles à combustible.....	38
<b>Figure II. 6 :</b> Modèle d'une batterie lithium ionAvec :.....	39
<b>Figure III. 1 :</b> Structure du système hybride autonome .....	43
<b>Figure III. 2:</b> Simulation de schéma pile à combustible (Matlab).....	43
<b>Figure III. 3 :</b> Simulation de schéma Batterie lithium-ion (Matlab).....	43
<b>Figure III. 4 :</b> Profil de consommation. ....	45
<b>Figure III. 5:</b> Courbes des puissances.....	46
<b>Figure III. 6:</b> Courants de référence des piles et batteries .....	47
<b>Figure III. 7:</b> Courants des piles .....	48
<b>Figure III. 8:</b> Courants des batteries .....	48
<b>Figure III. 9 :</b> Puissance des piles.....	49
<b>Figure III. 10 :</b> Puissance des batteries .....	49

<b>Figure III. 11:</b> Tension des piles. ....	50
<b>Figure III. 12 :</b> Tension des batteries.....	51
<b>Figure III. 13:</b> État de charge des batteries.....	51

## Liste des Tableaux

<b>Tableau I. 1:</b> Différents types de piles à combustible.....	8
<b>Tableau I. 2 :</b> Caractéristiques des principales technologies d'accumulateurs.....	17
<b>Tableau II. 1 :</b> Consommations électriques journalières de l'habitation considérée.....	30
<b>Tableau II. 2 :</b> Paramètres de la pile à combustible.....	34
<b>Tableau II. 3:</b> Paramètres de la Batterie .....	35
<b>Tableau II. 4 :</b> Paramètres de la cellule PEM utilisée dans. ....	38
<b>Tableau III. 1:</b> Paramètres du système hybride autonome.....	46

# Sommaire

<b>Remercîment</b> .....	<b>I</b>
<b>Dédicace</b> .....	<b>II</b>
<b>Résumé</b> .....	<b>III</b>
<b>Listes des symboles</b> .....	<b>IV</b>
<b>Liste des Figures</b> .....	<b>V</b>
<b>Liste des Tableaux</b> .....	<b>VI</b>
<b>Introduction générale</b> .....	<b>10</b>
<b>Chapitre I : Généralités sur la pile à combustible et les batteries</b> .....	<b>4</b>
I.1. Introduction .....	5
I.2. La pile à combustible .....	5
I.2.1 Principe de fonctionnement.....	5
I.2.2. Différents types de piles à combustible .....	7
I.2.3. Constitution d'une pile à combustible de type PEM.....	8
I.3. Applications des piles à combustible [13].....	12
I.3.1 Applications portables .....	12
I.3.2 Applications stationnaires .....	13
I.3.3 Applications embarquées.....	13
I.4. Les rendements de fonctionnement des PAC .....	14
I.5. Les avantages et l'inconvénient des piles à combustible de type PEM .....	14
I.6 Les batteries.....	15
I.6.1 Principe de fonctionnement.....	15
I.6.2 Les différents types d'accumulateurs et leur découverte.....	16
I.6.3 Grandeurs caractéristiques des batteries.....	18
I.7. La batterie au lithium .....	20
I.8 Les batteries lithium-ion.....	22
I.8.1 Pourquoi le Lithium-ion ?.....	22
I.8.2 Principe de fonctionnement.....	22
I.8.3 Évolution de la technologie et chimies du lithium-ion.....	24
I.8.4 Format de la cellule : cylindrique, prismatique, poche.....	25
I.8.5 Les avantages et l'inconvénient du lithium-ion.....	26
I.9 Conclusion.....	27
<b>Chapitre II : Dimensionnement et modélisation de système</b> .....	<b>28</b>
II.1. Introduction .....	29
II-2. Dimensionnement énergétique du système hybride autonome .....	29
II.2.1. Profil de consommation.....	29



II.2.2.	Consommation journalière .....	30
II.2.3.	Dimensionnement du stack de piles à combustible .....	30
II.2.4.	Dimensionnement du stack de batteries lithium-ion .....	31
II.3.	Dimensionnement des convertisseurs DC-DC .....	32
II.3.1.	Convertisseur DC-DC lié aux piles .....	33
II.3.2.	Convertisseur DC-DC lié aux batteries .....	34
II.4.	Modélisation des sources d'énergie.....	35
II.4.1.	Modélisation du comportement du stack de piles à combustible .....	35
II.4.1-1.	Pertes d'activation.....	36
II.4.1.2.	Pertes ohmiques.....	36
II.4.1.3.	Pertes de concentration.....	37
II.4.1.4.	Expression de la tension aux bornes du stack en fonction du courant débité .....	37
II.4.2.	Modélisation d'une batterie lithium ion .....	38
II .5.	Modélisation du fonctionnement des convertisseurs statiques .....	40
II -6.	Conclusion.....	41
<b>Chapitre III : Gestion d'Energie du système hybride .....</b>	<b>42</b>	
III.1.	Introduction .....	43
III.2.	Architecture du système hybride à bord.....	43
III.3.	Schéma de Simulation (MATLAB) : .....	44
III.4.	Principe de la gestion d'énergie .....	45
III.5.	Résultats de simulation et discussion .....	45
III.6.	Conclusion.....	52
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>53</b>	
Conclusion générale .....	54	
<b>Bibliographiques .....</b>	<b>55</b>	



# Introduction générale

# Introduction générale

La consommation énergétique mondiale est en très forte croissance dans toutes les régions du monde, ceci est lié à la croissance de la population mondiale ainsi qu'à l'activité industrielle des pays en voie de développement qui a entraîné une explosion des besoins en énergie. Cette énergie est assurée à l'origine par les fossiles (pétrole, gaz...). La consommation excessive de ces ressources énergétiques limitées conduit à l'épuisement progressif de ces réserves et intensifie les rejets de gaz à effet de serre d'où la pollution de l'atmosphère qui cause un changement climatique. Face à ces conséquences, il est nécessaire de prendre en considération le développement des énergies alternatives dites sources d'énergies renouvelables [1].

L'utilisation des énergies renouvelables comme alternative écologique aux combustibles fossiles et au nucléaire, s'avère une solution très attrayante du fait que celles-ci sont inépuisables, non polluantes, très adaptées à la production décentralisée et les technologies sont actuellement au point pour utiliser ces énergies au quotidien. Leur exploitation pour la production d'électricité est très rentable dans les sites isolés ; là où l'extension du réseau électrique serait un échec financier [2].

Toutes les énergies renouvelables font l'objet de développements, mais ne sont pas toutes au même stade de maturité. Où ces sources d'énergies renouvelables varient en fonction du temps de la journée, de la saison et de l'année. La nature aléatoire de ces sources a conduit les chercheurs à se tourner vers l'hybridation, c'est-à-dire la combinaison de deux ou plusieurs sources d'énergies renouvelables. L'hybridation apporte donc au système une disponibilité accrue et un approvisionnement constant des charges en énergie, il est évident que les systèmes hybrides à énergies renouvelables doivent comprendre au moins un système de stockage d'énergie pour répondre à la demande de charges dès à tout instant. Le système de stockage d'énergie peut être un banc de batteries, un ensemble électrolyseur et pile à combustible, un super condensateur ou la combinaison de ces systèmes de stockage [3].

Le but principal de notre travail est une stratégie de gestion des flux d'énergie entre la source hybride (piles à combustible et batteries) d'une part, et la charge d'autre part (maison isolée) tout en satisfaisant les contraintes énergétiques pouvant être subies pendant le fonctionnement du système.

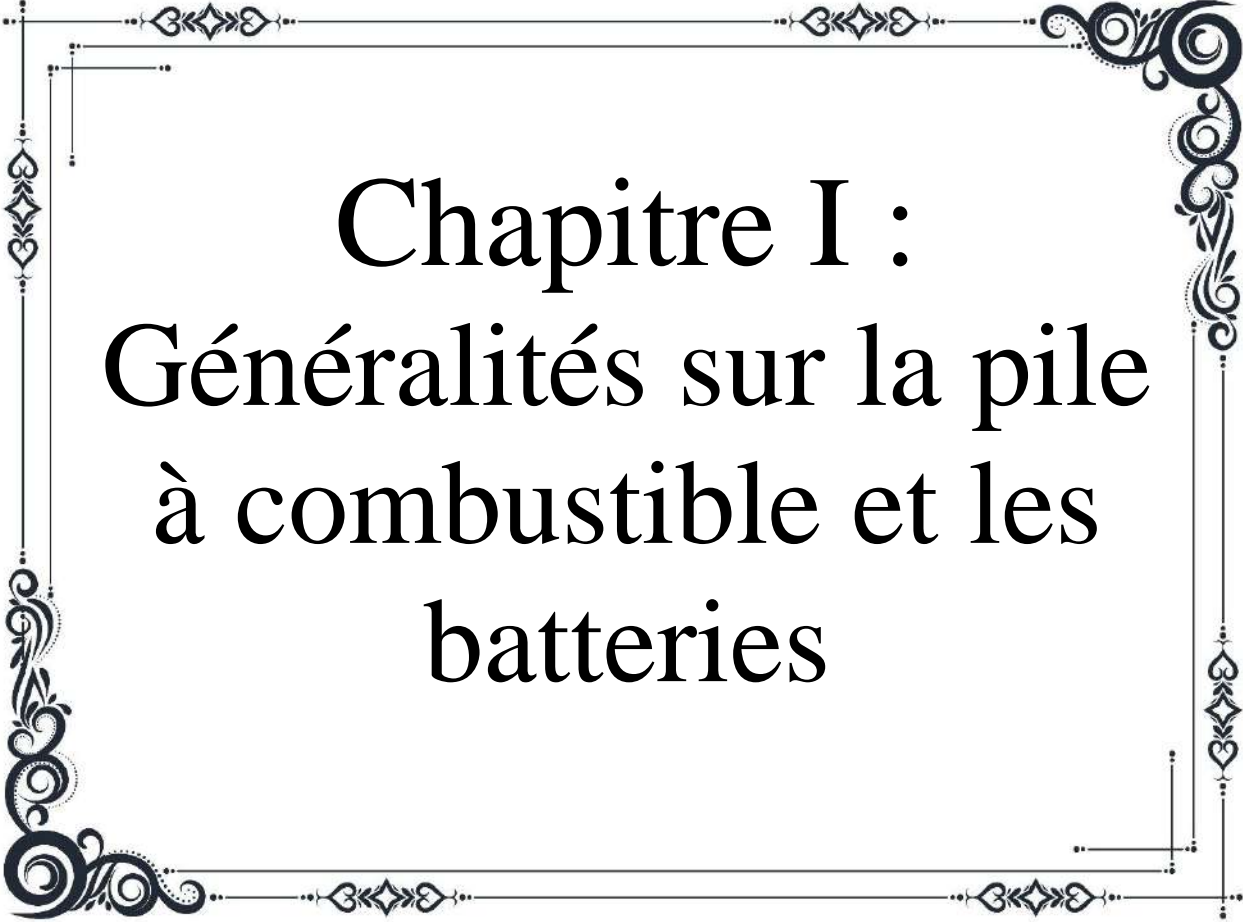
Pour atteindre ces objectifs, ce mémoire s'articule autour de trois chapitres :

Dans le but de choisir les éléments de l'architecture hybride considérée, nous commencerons le premier chapitre par une partie la présentation des généralités sur les piles à combustibles et sur les accumulateurs électrochimiques, notamment les batteries lithium, leurs caractéristiques électriques et chimiques ainsi que les différentes technologies utilisées., dans lesquelles les piles à combustible se qualifient comme une solution écologique d'avenir irréversible par ce qu'elles se présentent, en plus de leur rendement de conversion important, comme un générateur propre d'énergie, modulable et silencieux.

Le deuxième chapitre discutera le dimensionnement et la modélisation des composants de l'architecture hybride d'alimentation. Les éléments concernés sont :

- Un stack de piles à combustible PEM.
- Un stack de batteries aux lithium-ion.
- Convertisseurs y sont connectés.

Le troisième chapitre concerne la gestion des flux d'énergie entre la source hybride et notre charge tout en utilisant Matlab pour implémenter le résultat obtenu.



# Chapitre I : Généralités sur la pile à combustible et les batteries

## I.1.Introduction

Le rôle de la pile à combustible en tant que source d'énergie propre devient de plus en plus important car de très grandes quantités de polluants sont ajoutées à l'environnement chaque année, et aujourd'hui les piles à combustible sont utilisées dans de nombreuses applications telles que les automobiles, les engins spatiaux, les communications.... L'avantage d'une pile à combustible est que son efficacité n'est pas soumise à la loi de Carnot, c'est-à-dire qu'elle est indépendante de la température du réservoir. Elle a un rendement plus élevé à charge partielle par rapport aux moteurs à combustion interne. Elles sont classées soit par le type d'électrolyte utilisé, soit par le type de combustible. Dans ce chapitre nous allons essayer de couvrir les concepts les plus importants, qui sont leur histoire, le carburant, l'infrastructure, le principe de fonctionnement, les types, les applications, les avantages et les inconvénients pour chacun d'eux [4].

L'accumulateur, ou batterie rechargeable, est le système Utilisé pour stocker l'énergie électrique sous différentes formes. Ils reposent sur une Technologie de conversion d'énergie réversible. La batterie est l'un des principaux mécanismes d'alimentation de l'appareil autonomie. Ils se caractérisent par l'effet de stockage d'énergie électrique apporté par la réaction chimique afin de les réutiliser sous forme d'électricité [5].

Dans ce premier chapitre nous focalisons la présentation des généralités sur les piles à combustibles et sur les accumulateurs électrochimiques, nous présentons d'une façon plus détaillée les principaux composants de notre système constitué par les éléments : piles à combustible, batterie.

## I.2. La pile à combustible

La pile à combustible est un convertisseur d'énergie chimique en énergies électrique et thermique. L'énergie chimique est contenue dans un composé, dit combustible, stocké extérieurement au système pile à combustible (l'hydrogène dans le cas des piles à membranes échangeuses de protons) [6].

### I.2.1 Principe de fonctionnement

La pile à combustible est un générateur fonctionnant grâce à l'oxydation de l'hydrogène sur une électrode associée à la réduction de l'oxygène sur l'autre électrode. La pile à combustible elle besoin seulement à l'hydrogène et l'oxygène pour son fonctionnement. Dans le coté de l'anode l'hydrogéné ce décompose selon la demi réaction (l'oxydation de l'hydrogéné) [7].



Il y a libération de deux électrons qui vont circuler dans l'électrode vers la charge extérieure. Les ions hydrogène  $H^+$  ou proton vont migrer vers la cathode à travers l'électrolyte. Les électrons passent ensuite par le circuit extérieur et arrivent à la cathode.

Dans le côté de la cathode l'oxygène se décompose selon la demi réaction (la réduction de l'oxygène) :



On sépare ces deux demi réactions par un électrolyte non conducteur d'électrons. Les électrons libérés par la décomposition de l'hydrogène passent par le circuit extérieur, par contre les ions  $H^+$  (les protons) peuvent traverser l'électrolyte.

Le bilan global de la réaction se produit dans une pile à combustible est [7] :



L'eau formé est un liquide dans les conditions normal de température et pression ( $0C^\circ$  et 1 ATM ou 273k et 1013 Pa) [7].

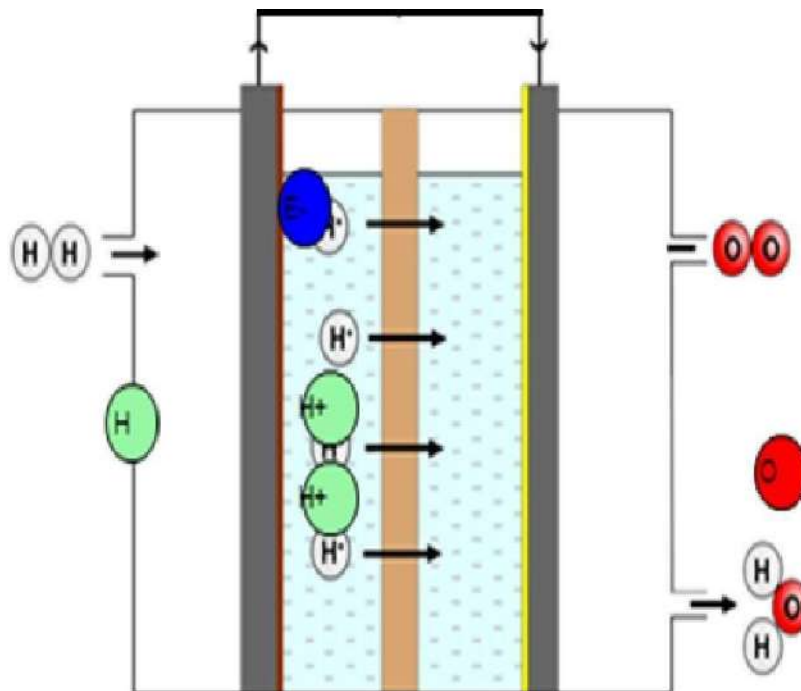


Figure.I. 1: schéma de fonctionnement d'une pile à combustible.[8]

Les électrolytes peuvent être liquides ou solides, certains fonctionnent à haute température et d'autres à basse température tendent à exiger des catalyseurs en métal noble, typiquement du platine, destiné à améliorer les réactions aux électrodes.

En principe, pour le fonctionnement de la pile à combustible on utilise un assortiment de carburants et d'oxydants.

L'hydrogène a été reconnu comme le carburant le plus efficace parce qu'il a la plus haute réactivité électrochimique que les autres carburants, tels que les hydrocarbures ou les alcools.

L'oxygène est le meilleur oxydant grâce à sa haute réactivité et son abondance dans l'air.[3]

### I.2.2. Différents types de piles à combustible

On distingue plusieurs types de piles à combustible et on les classifie selon la nature de l'électrolyte utilisé. Celui-ci détermine en même temps la température de fonctionnement.

- ✚ AFC: Pile alcaline (Alkaline Fuel Cell)
- ✚ MCFC: Pile à carbonate de fondu (Molten Carbonate Fuel Cell)
- ✚ SOFC: Pile à oxyde solide (Solid Oxide Fuel Cell)
- ✚ PAFC: Pile à acide phosphorique (Phosphoric Acid Fuel Cell)
- ✚ PEMFC: Pile à membrane polymère échangeuse de protons (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)
- ✚ DMFC: Pile alimentée directement par méthanol (Direct Méthanol Fuel Cell) [9]

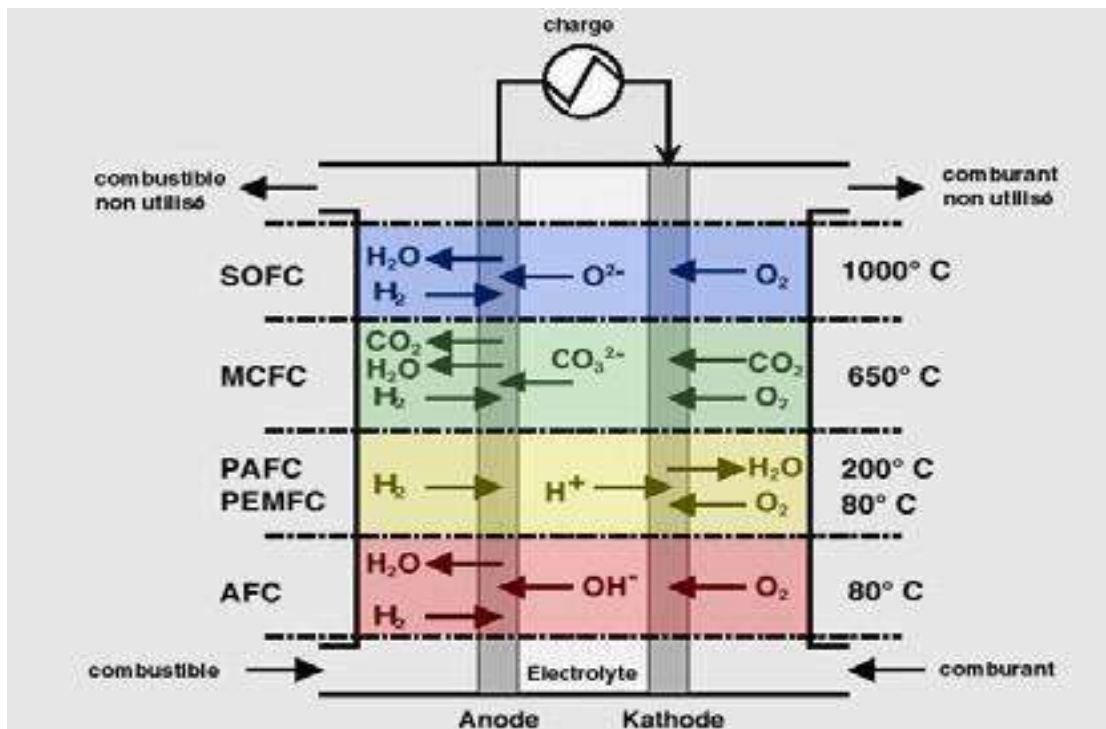


Figure.I. 2: Différents types des PACs. [9]



Tableau I. 1: Différents types de piles à combustible.

Fuel Cell	PEMFC	DMFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC
Température (°C)	80	60-100	65-220	200	600-700	650-1000
Electrolyte	Proton Exchange Polymer	Proton Exchange Polymer	Potassium Hydroxide	Phosphoric Acid	Liquid Molten Carbonate	Ion Conducting Ceramic
Charge Drainée	H <sup>+</sup>	H <sup>+</sup>	OH <sup>-</sup>	H <sup>+</sup>	CO <sup>-</sup>	O <sup>-</sup>
Combustibles Possible	Hydrogène	Méthanol	Hydrogène Gaz Nat	Hydrogène Gaz Nat	Hydrogène Gaz Nat	Hydrogène Gaz Nat
Gamme de Puissance	1W-10MW	1W-10KW	200KW-10MW	1W-100KW	1KW-10MW	500KW-10MW
Rendement Electrique	30%-45%	30%-45%	35%-45%	55%-60%	50%-55%	50%-60%
Applications	Multiple	Transport	Stationnaire	Spatial	Stationnaire	Stationnaire

### I.2.3. Constitution d'une pile à combustible de type PEM

Une pile à combustible est constituée d'un empilement de cellules qui forment un 'stack'. Ces cellules élémentaires sont constituées de l'ensemble électrode-membrane-électrode (EME) (figure I.3). [11]

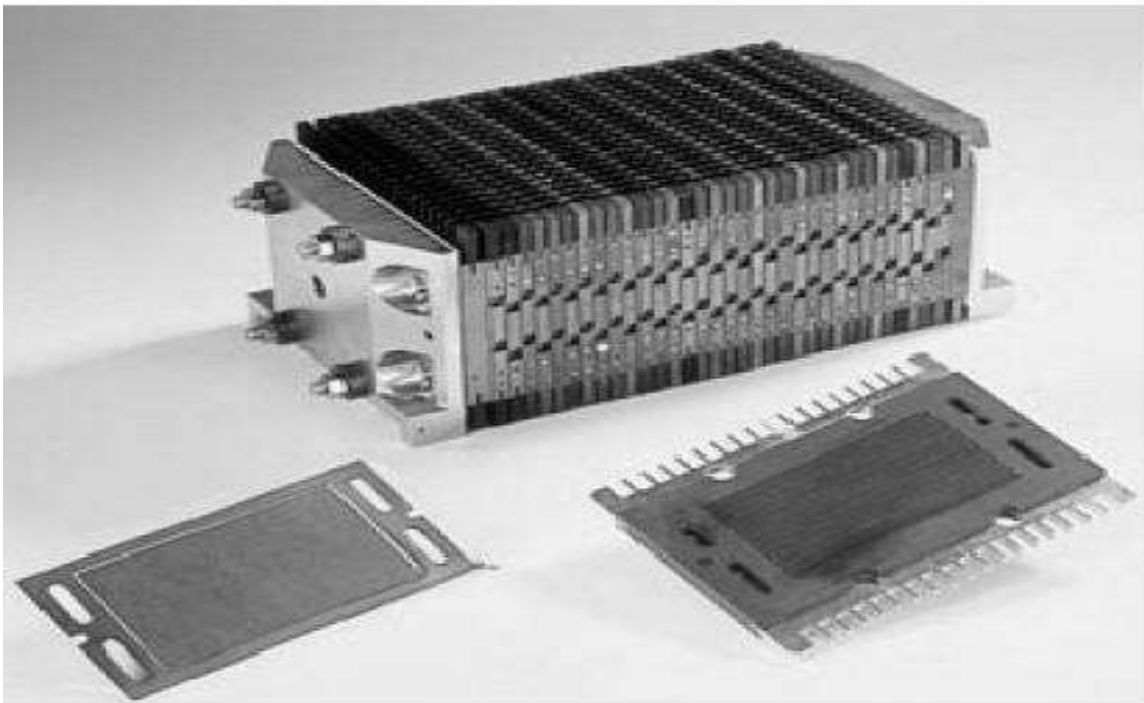
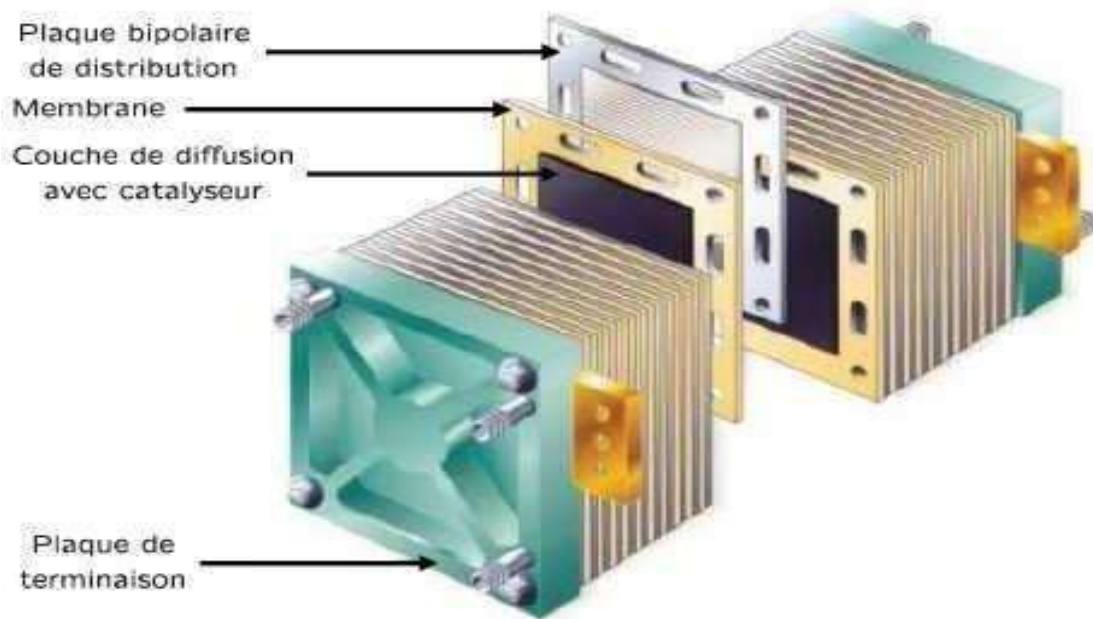


Figure.I. 3: 'Stack' d'une pile à combustible de type PEMFC. [11]

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



**Figure.I. 4:** Structure d'un empilement des cellules PEMFC (Électro Encyclo). [11]

Cette figure met en évidence trois éléments constitutifs d'une cellule : L'électrolyte (la membrane dans le cas de la PEMFC), les électrodes (Anode, Cathode) et les plaques. [11]

#### • Les électrodes

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

- ✓ Supporter le catalyseur finement divisé et permettre son contact avec les gaz.
- ✓ Permettre aux espèces protoniques de se déplacer depuis les sites catalytiques d'oxydation de l'hydrogène vers les sites où l'oxygène est réduit grâce à la présence de polymère ionique.
- ✓ Évacuer les électrons des sites catalytiques anodiques et redistribuer ces électrons sur les sites catalytiques cathodiques. [11]

#### • Électrolyte

L'électrolyte en polymère solide est la caractéristique distinctive d'une pile à combustible de type PEM. L'électrolyte est une fine membrane d'une épaisseur de 50 à 175 $\mu$ m. Tous les électrolytes acides en polymère solide exigent la présence de molécules d'eau pour conduire les ions d'hydrogène, les ions d'hydrogène se déplaçant ainsi que des molécules d'eau pendant la réaction d'échange ionique. 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.5).



Figure.I. 5: Membrane DuPont.[12]

En outre, certains fabricants de piles à combustible comme Ballard ont développé leurs propres membranes. [12]

- **Catalyseur :**

Le catalyseur est un métal utilisé pour accélérer la réaction électrochimique au niveau des électrodes et aussi pour résister d'une façon continue la corrosion dans cet environnement chimique très acide. C'est pour cela, le catalyseur le plus utilisé est le platine (métal noble). [11]

- **Les catalyseurs du côté anode :**

Pour les piles de basse et moyenne température, on utilise des métaux précieux : platine Pt, rhodium Rh, ruthénium Ru ou palladium Pd ; ou du Nickel de Raney. Les métaux précieux sont répartis sur les électrodes en charbon actif à très grande surface spécifique (noir d'acétylène). Actuellement on utilise surtout du platine : celui-ci est réparti sous forme des particules de faible taille (2 nm). La réaction de dissociation de l'hydrogène est assez complexe.

Ces électrodes sont très sensibles au CO (elles ne supportent pas plus de 100 ppm) et au soufre, ce qui constitue un vrai problème si on utilise de l'hydrogène issu du reformage : on assiste alors à une diminution de la densité de courant surfacique et donc de la puissance.

De nombreux travaux portent actuellement sur le remplacement du platine jugé trop cher ou la diminution de la quantité nécessaire : alliages de platine (Pt/Ru, Pt/Mb, Pt/Sn), terres rares... Pour les piles de haute température, on peut utiliser des métaux moins chers (Fer, Nickel, Cobalt) et on n'a pas de problème d'empoisonnement au CO. [11]

➤ **Les catalyseurs du côté cathode :**

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

Ces électrodes sont assemblées puis collées de part et d'autre de la membrane par pressage à chaud. L'ensemble électrode membrane électrode (EME) a une épaisseur inférieure au millimètre. Cet ensemble EME est intégré entre deux plaques bipolaires. [11]

• **Plaque bipolaire**

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

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

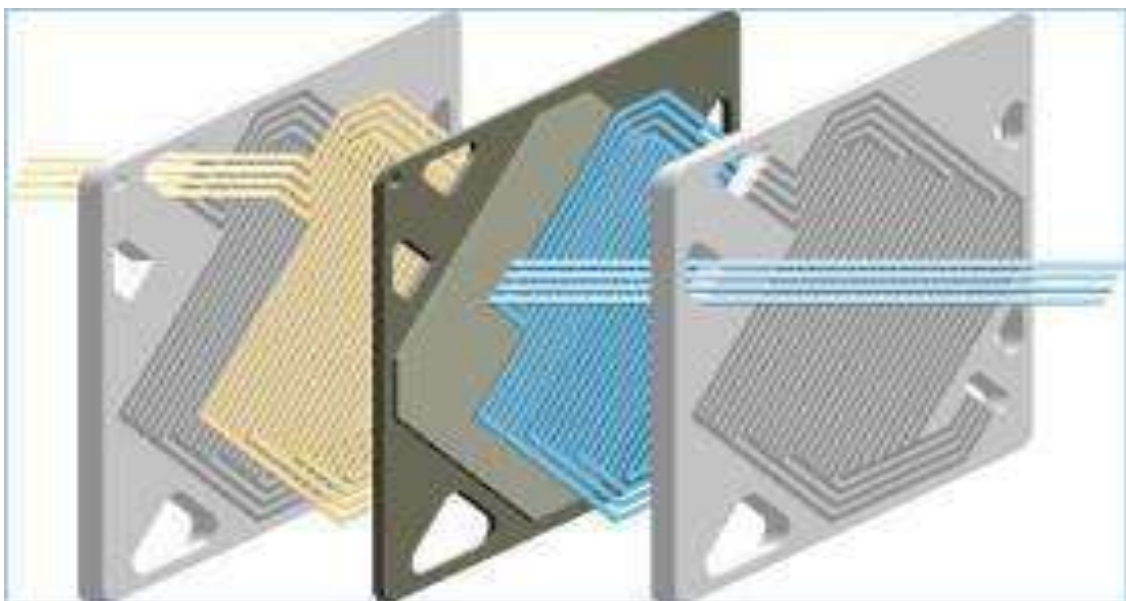


Figure.I. 6 : Plaque bipolaire. [11]

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

Les plaques les plus courantes sont réalisées en graphite et les canaux de distribution des gaz sont obtenus par usinage. Ces plaques, sont disponibles commercialement mais à des prix très élevés, essentiellement dus à la phase d'usinage, ne permettent pas d'envisager une utilisation industrielle [11].

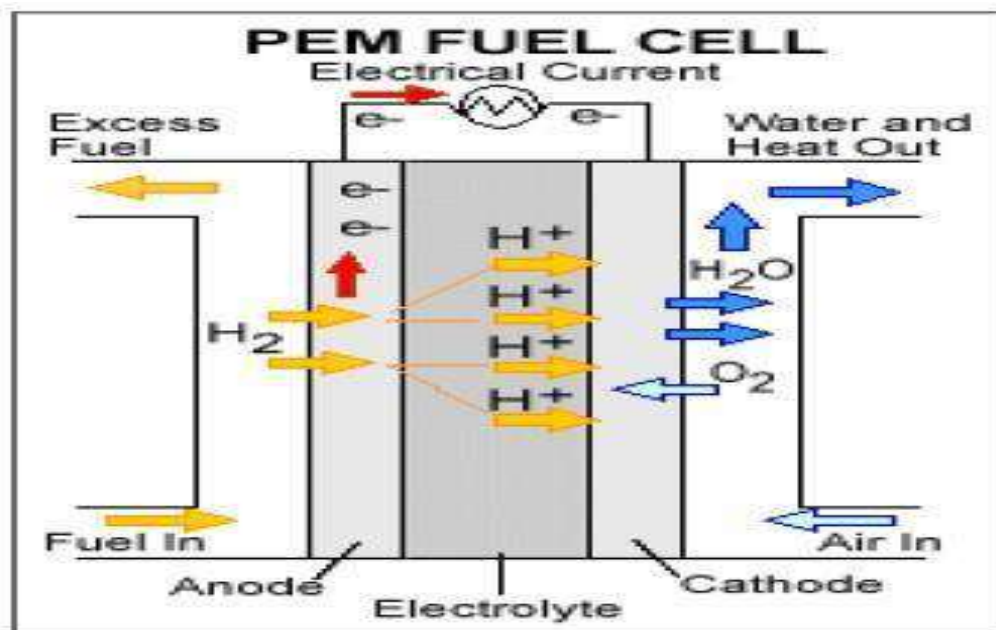


Figure.I. 7: Représentation d'une PEMFC

### I.3. Applications des piles à combustible [13]

On distingue trois types d'applications des piles à combustible (applications portables, stationnaires et embarquées).

#### I.3.1 Applications portables

Celles-ci incluent le téléphone mobile d'une puissance moyenne de l'ordre de 400 mW et l'ordinateur portable d'une puissance moyenne de 10W. Ces applications connaissent une très forte croissance et les recherches les plus importantes sont axées sur l'utilisation d'une pile à combustible chargeant une petite batterie qui assure mieux l'apport d'énergie lors des pics d'émission. L'autonomie n'est alors limitée que par la taille du réservoir d'hydrogène ou de méthanol. L'utilisateur recharge son portable comme on recharge un briquet ou un stylo à encre, en quelques secondes et chaque recharge donne 3 à 5 fois plus d'autonomie qu'une batterie actuelle

Pour le même encombrement. La technologie qui est utilisée est la pile PEM du fait de sa basse température de fonctionnement et de sa technologie tout solide alimentée soit directement en hydrogène, soit avec du méthanol. En termes de coût, la référence est celle de la meilleure batterie actuelle soit environ 0,80 €/Wh. [13]

### **I.3.2 Applications stationnaires**

Compte tenu des tendances vers la décentralisation de la production d'énergie électrique, ce secteur intéresse de nombreux industriels. L'activité est centrée sur deux grands domaines d'applications : la production collective (les puissances sont dans la gamme de 200 kW à quelques MW) et la production domestique (les puissances sont dans la gamme de 2 à 7 kW). 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, SOFC) font également l'objet de tests mais ne sont pas encore au stade d'une commercialisation. Dans le deuxième domaine, plusieurs projets sont également en cours de réalisation. Des tests sont actuellement réalisés avec plusieurs prototypes en situation réelle. Ces appareils basés sur une technologie de type PEMFC fournissent l'électricité et la chaleur (chauffage et eau chaude).

Ils sont alimentés par des combustibles classiques : un reformeur transforme le combustible hydrocarbure (généralement du gaz naturel) en hydrogène. Ce sera probablement le premier marché de masse à être occupé par la technologie pile à combustible.

### **I.3.3 Applications embarquées**

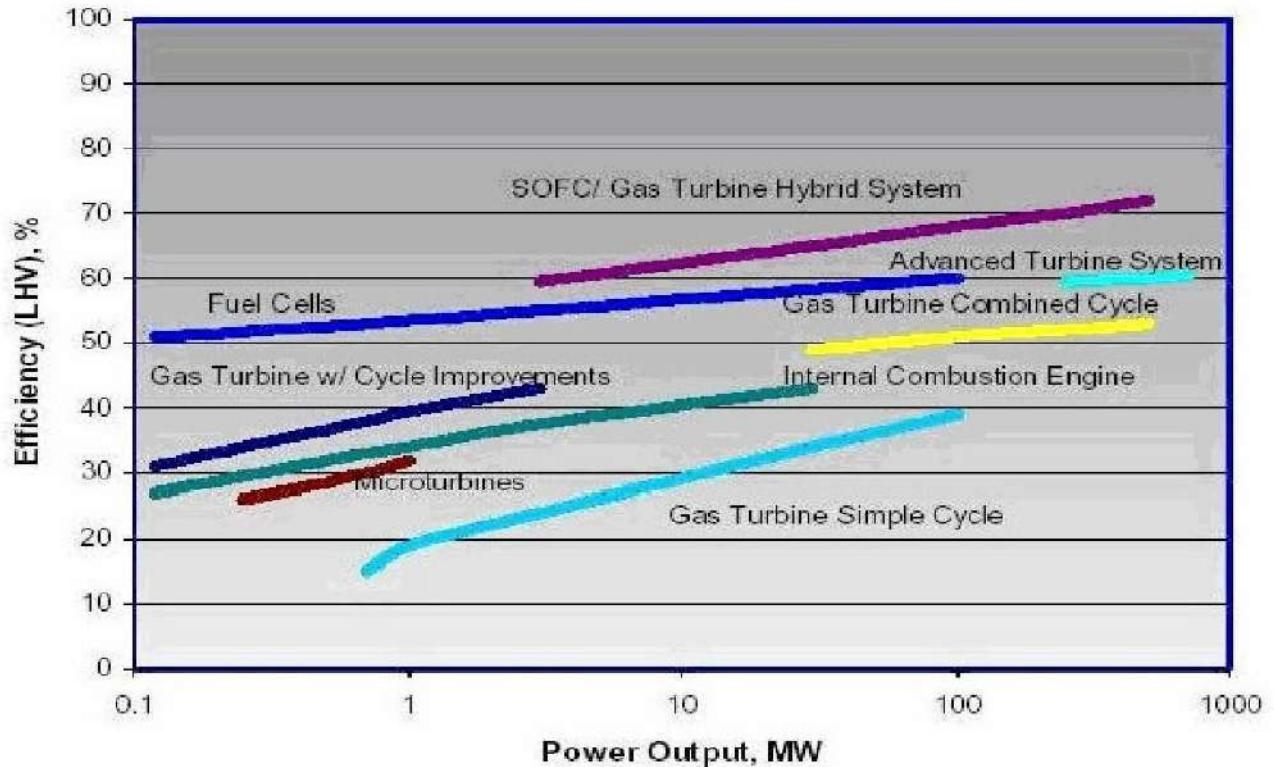
Le transport est le domaine d'application à l'origine du développement de la pile à combustible vers le début des années 90. Compte tenu de la contrainte de coût, particulièrement forte dans ce secteur, et de la concurrence de la technologie traditionnelle (moteur thermique), il faut distinguer deux sous-familles assez différentes suivant qu'il s'agit d'équiper un véhicule léger ou un véhicule lourd.

Il est demandé au véhicule léger quelque 3000 h de fonctionnement pour une dizaine d'années de durée de vie alors qu'un véhicule lourd (transport de passagers ou marchandises) exige une durée de fonctionnement bien plus importante. [13]



#### I.4. Les rendements de fonctionnement des PAC

En comparaison avec les moteurs à combustion interne et les autres systèmes de production de puissance (turbine à gaz, etc.), les piles à combustible ont un rendement énergétique très élevé. La (figure I.8) présente une comparaison des performances des différents systèmes de production de puissance. [14]



**Figure.I. 8:** Comparaison de la performance des PAC par rapport aux autres systèmes de production de puissance. [14]

Les PAC (Fuels Cells dans la figure) en général et les piles à électrolyte solide (SOFC) en particulier, couvrent tous les domaines de production de puissance présentés dans la (figure I.12), de moins d'un MW à des centaines de MW. Leurs rendements en électricité varient de 50% à 60% et dépassent 70% pour les SOFC lorsque ce type de piles fonctionne en cycle combiné.[14]

#### I.5. Les avantages et l'inconvénient des piles à combustible de type PEM

On a plusieurs avantages et inconvénients à propos des piles à combustible et ces derniers dépendent du type de pile elle-même, donc de l'application envisagée. Nous sommes intéressés principalement ici à la pile PEM. [14]

- **Les avantages**

Les avantages sont :

- ✓ Elles prennent un petit espace.

- ✓ Elles peuvent fonctionner facilement à basse température.
- ✓ Elles ne délivrent pas le son.
- ✓ Elles produisent un très bon rendement énergétique.
- ✓ Elles ne nécessitent pas beaucoup d'entretien.

- **Les inconvénients**

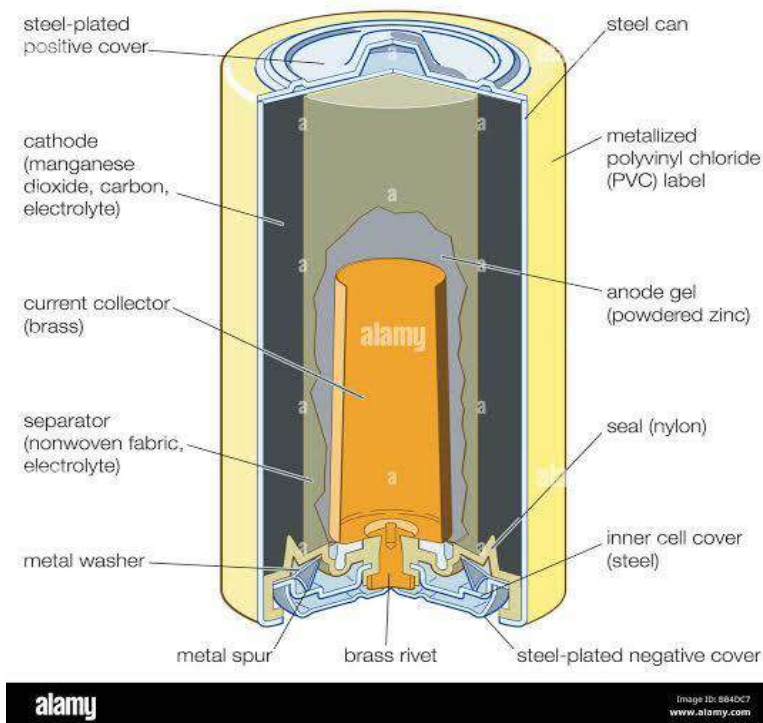
Les inconvénients sont :

- ✓ Elles ont besoin d'un gros budget.
- ✓ Elles ne vivent pas pour une grande période.
- ✓ La disponibilité des combustibles de qualité adéquate.

## I.6 Les batteries

### I.6.1 Principe de fonctionnement

De manière générale, un accumulateur est composé d'une électrode positive (ou cathode en convention générateur), d'une électrode négative (ou anode en convention générateur), d'un séparateur et d'un électrolyte dans lequel sont immergés l'électrode positive, l'électrode négative et le séparateur.

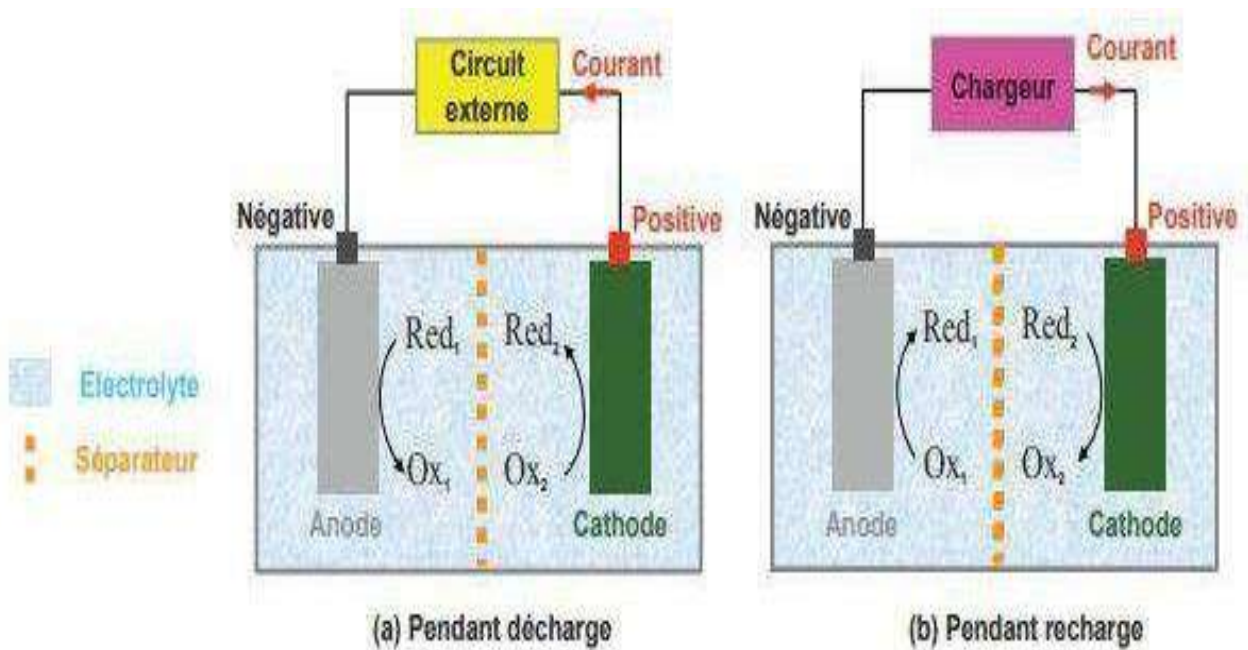


**Figure.I. 9:** montre un exemple de vue éclatée d'un accumulateur

Le principe de fonctionnement de la batterie est basé sur l'utilisation de deux paires redox,  $Ox_1/Red_1$  et  $Ox_2/Red_2$ , qui se produisent respectivement à deux électrodes différentes.



La (Figure I.10) résume le principe de fonctionnement des accumulateurs sous la forme d'un schéma simplifié [15].



**Figure.I. 10:** Principe de fonctionnement des accumulateurs

Il existe de nombreuses technologies d'accumulateur, nous en apprendrons plus sur elles et leur histoire dans le paragraphe suivant.

### I.6.2 Les différents types d'accumulateurs et leur découverte

L'histoire des premières batteries a commencé en 1800 quand l'Italien Alessandro Volta a découvert un flux d'électrons qui se produit après que deux métaux réagissent électrochimiquement avec une solution. C'est la cellule primaire non rechargeable couramment appelé pile.

En 1859, le physicien français Gaston Plante a inventé la première batterie rechargeable, également connue sous le nom de batterie secondaire, ce dernier a mis en évidence les réactions réversibles chimiques/électriques suite à l'inversion du sens de flux de courant. La technique, toujours utilisée aujourd'hui, consiste en deux électrodes de plomb trempées dans une solution d'acide sulfurique.

Quelques années plus tard, en 1899, le Suédois Waldemar Junger a inventé la première batterie rechargeable au nickel-cadmium (Ni-Cd) utilisant une électrode de nickel, une autre électrode de cadmium et une solution d'hydroxyde de potassium (KOH) comme électrolyte. Avec Ni-Cd on peut regretter le fort effet mémoire même avec un gain de densité important par rapport au plomb.

Viennent ensuite les batteries Ni-MH (Nickel Hydrure Métallique). Commercialisée en 1990, cette technologie a permis d’augmenter la densité d’énergie de 30 à 40% comparées aux anciennes technologies et de s’affranchir des problèmes liés à la toxicité du cadmium, maintenant majoritairement interdit. Cette technologie présente un certain nombre d’atouts comme sa densité d’énergie volumique (Wh/l) élevée, un fonctionnement possible à basse température, un faible coût et une bonne sureté de fonctionnement. Elle équipe par exemple la Toyota Prius standard. Toutefois, par exemple dans le cas de l’électrification des véhicules et vue la croissance de l’électronique embarquée, elle n’est plus à même de répondre au besoin demander vue son énergie spécifique appelée aussi densité d’énergie massique (Wh/kg) très modérée. Pour cette raison, les constructeurs ont opté de plus en plus pour l’utilisation des batteries lithium-ion tel est le cas de la Toyota Prius rechargeable.

La première batterie rechargeable à base de lithium a été commercialisée en 1991 par le constructeur japonais Sony. Cette technologie a vite supplanté les autres technologies compte tenue de ses meilleures caractéristiques.

Le (tableau I.2) récapitule les principales technologies d’accumulateurs avec quelques-unes de leurs spécificités [16].

**Tableau I. 2 :** Caractéristiques des principales technologies d'accumulateurs.

	<b>Li-ion</b>	<b>Ni-MH</b>	<b>Ni-Cd</b>	<b>Pb-Acide</b>
<b>Tension nomina</b>	3.7	1.2	1.2	2
<b>Densité d’énergie volumique (Wh/l)</b>	200-600	140-435	60-150	50-80
<b>Densité d’énergie massique (W/Kg)</b>	100-500	250-2000	150-230	75-300
<b>Cycle de vie</b>	1000-10000	200-1500	1000-2500	500-1200
<b>Coût (€/kWh)</b>	600-2500		800-1500	200-400

### I.6.3 Grandeurs caractéristiques des batteries

#### a) Régime de décharge

C'est une grandeur qui caractérise le taux de charge et de décharge de la batterie et donc le courant qui la parcourt. Pour une batterie de 10Ah, si la batterie fonctionne à 1C elle se charge/décharge en une heure avec un courant de 10A. Maintenant si le taux-C est 0.5C la batterie se charge/se décharge en deux heures avec la moitié du courant (c.-à-d. 5A). Généralement pour les batteries li-ion par exemple, rarement qu'on dépasse 1C soit pour la charge ou la décharge car cela diminue leur capacité lors du cycle. Dans la plupart des cas les fournisseurs des batteries fournissent la capacité nominale obtenue à un courant de décharge nominal et pour une température donnée en respectant les conditions de fonctionnements de la batterie. [17]

#### b) Capacité

La capacité de la batterie est la quantité maximale d'électricité qu'elle peut débiter, elle correspond aussi au nombre des d'ampères-heures (Ah) disponible lorsque la batterie est déchargée à un certain niveau à partir de 100% d'état de charge (SOC) jusqu'à atteindre la tension d'arrêt. Elle dépend aussi de la température ainsi que du régime de décharge/charge. Elle est à sa valeur maximum quand la batterie est neuve mais elle commence à se dégrader avec le nombre de cycle d'utilisation. [17].

Généralement, la capacité est calculée en multipliant le courant débité par unité du temps selon la relation :

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

Dans la suite, la « capacité nominale » désigne celle fournie par le constructeur pour une batterie neuve.

#### c) Résistance interne

La résistance interne d'une batterie est en relation direct avec les matériaux qui constituent la batterie ainsi que les réactions chimiques qui déroulent au sein de celle-ci. Sa valeur n'est pas constante mais elle dépend de plusieurs facteurs comme la température, l'état de charge, l'état de santé et le régime de charge et décharge. La résistance interne et la capacité de la batterie sont

deux grandeurs liées à l'état de fonction (SOF). En effet, la résistance interne représente la puissance maximale disponible dans la batterie et la capacité reflète l'énergie maximale qui peut être exploitée. Elles sont aussi utilisées pour quantifier l'état de santé. [17]

#### d) Tension en circuit ouvert

La tension mesurée à vide ou en circuit ouvert (open circuit voltage) correspond à la tension mesurée entre les bornes de la batterie (cathode et l'anode) quand celle-ci est au repos c'est-à-dire en équilibre chimique (aucune charge n'est appliquée à ces bornes). Cette grandeur dépend de plusieurs facteurs comme l'état de charge et de la température. [17]

#### e) État de charge

L'état de charge SOC (State of Charge) représente le pourcentage de la capacité disponible à un instant donné dans la batterie par rapport à sa capacité maximale (équation 1.2), elle est à sa valeur 100% quand la batterie est pleinement chargée et 0% quand elle est totalement vide. Elle dépend des conditions d'utilisations (température, courant de décharge, ...).[17]

Le calcul de cette valeur est obtenue en suivant l'évolution temporelle du courant de charge/décharge comme l'indique l'équation (I. 6).

$$\text{SoC}(\%) = \frac{\text{Capacité actuelle(Ah)}}{\text{Capacité nominale(Ah)}} \times 100 \quad (\text{I. 5})$$

$$\text{SoC} = \text{SoC}(t_0) - \frac{1}{\text{Capacité nominale(Ah)}} \int_{t_0}^t i_b(t) dt \quad (\text{I. 6})$$

#### f) État de santé :

L'état de santé SoH (State of Health) d'une batterie est un paramètre qui indique sa capacité à fournir les mêmes performances par rapport à une batterie neuve. Cependant, il faut prendre en considération l'augmentation de la résistance interne durant les cycles d'utilisation pour avoir une évolution correcte de l'état de santé surtout dans le cas des modes de décharge importants. [17]

On peut exprimer sa valeur en pourcentage par le rapport entre sa capacité réelle à un état de vieillissement donnée et sa capacité nominale :

$$SoH(\%) = \frac{\text{Capacité max dans l'état de vieillissement actuelle (Ah)}}{\text{Capacité nominale (Ah)}} \times 100 \quad (I.7)$$

### 1.7. La batterie au lithium

Les batteries lithium représentent une solution attractive pour les systèmes de stockage d'énergie en termes de performances, notamment d'énergie spécifique et de densité d'énergie. En effet, puisque ce type de batterie possède la tension de fonctionnement la plus élevée (3.7V) et est en même temps, selon la classification périodique des éléments, le métal le plus léger avec une masse molaire atomique de 6,94 g. La (figure 1.11) montre le positionnement avantageux des batteries lithium par rapport aux autres technologies relativement aux densités d'énergie massique et volumique. Ceci explique sa pénétration actuelle des marchés dans les différents domaines (électronique portable, aéronautique, transport terrestre, électronique domestique.).

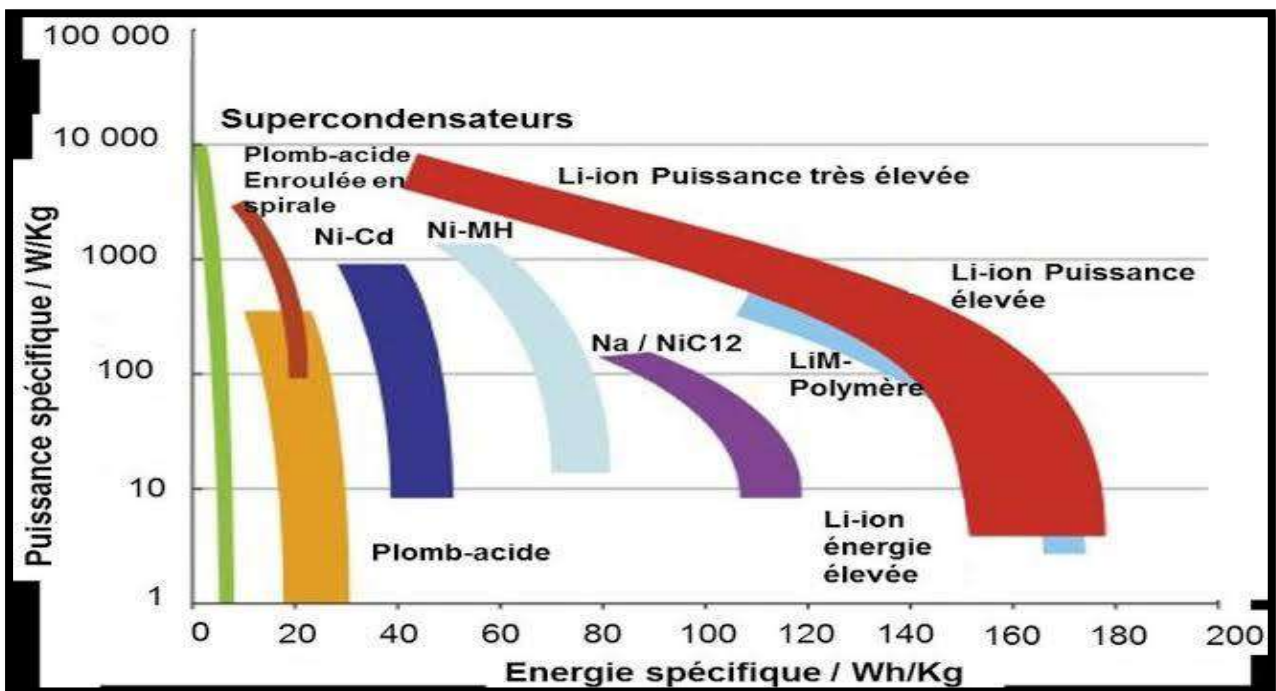


Figure.I. 11: Positionnement en densités d'énergie massique et volumique des batteries Lithium. [18]

#### I.7.1 Principe de fonctionnement

Deux grandes familles d'accumulateurs au lithium existent :

- 1) Les accumulateurs au « Lithium-Carbone » ou « Lithium-Ion »,
- 2) Les accumulateurs au « Lithium-Métal ».

Leur principe de fonctionnement est identique et diffère selon l'utilisation d'une électrode négative à base de carbone graphite ou de lithium métallique.

En cours de son utilisation, et pendant la phase de décharge de l'accumulateur, le lithium relâché par l'électrode négative sous forme d'ions  $\text{Li}^+$  migre à travers l'électrolyte conducteur ionique et vient s'intercaler dans le réseau cristallin du matériau actif de l'électrode positive (composé d'insertion du lithium de type oxyde métallique). Le passage de chaque ion  $\text{Li}^+$  dans le circuit interne de l'accumulateur est exactement compensé par le passage d'un électron dans le circuit externe, générant ainsi un courant électrique. (La figure I.12). a montre le fonctionnement d'un accumulateur au Lithium-Métal où l'électrode métallique (anode) libère un ion  $\text{Li}^+$  qui vient s'insérer dans l'électrode positive (cathode). Dans le cas de l'accumulateur au lithium-ion (figure I.12), les ions  $\text{Li}^+$  font un « va-et-vient » entre les deux matériaux d'insertion contenus dans les électrodes positive et négative à chaque phase de charge ou décharge de l'accumulateur.

Pendant la période de charge, les ions  $\text{Li}^+$  viennent s'insérer dans la structure de l'électrode négative en carbone graphite. Lors de la période de décharge, la structure en carbone graphite de l'anode libère des ions  $\text{Li}^+$  qui viennent se replacer dans la structure de la cathode. [19]

• **Remarque :** A l'intention des électriciens, électroniciens et électrotechniciens de métier, on notera que la dénomination des électrodes n'est, en électrochimie, aucunement rattachée à leur polarité, et qu'en conséquence une anode (respectivement cathode) n'est pas nécessairement une électrode positive (respectivement négative). Par définition, l'anode est le siège d'une réaction d'oxydation, et la cathode le siège d'une réaction de réduction. Leur nature change donc au rythme des cycles de charge et décharge.

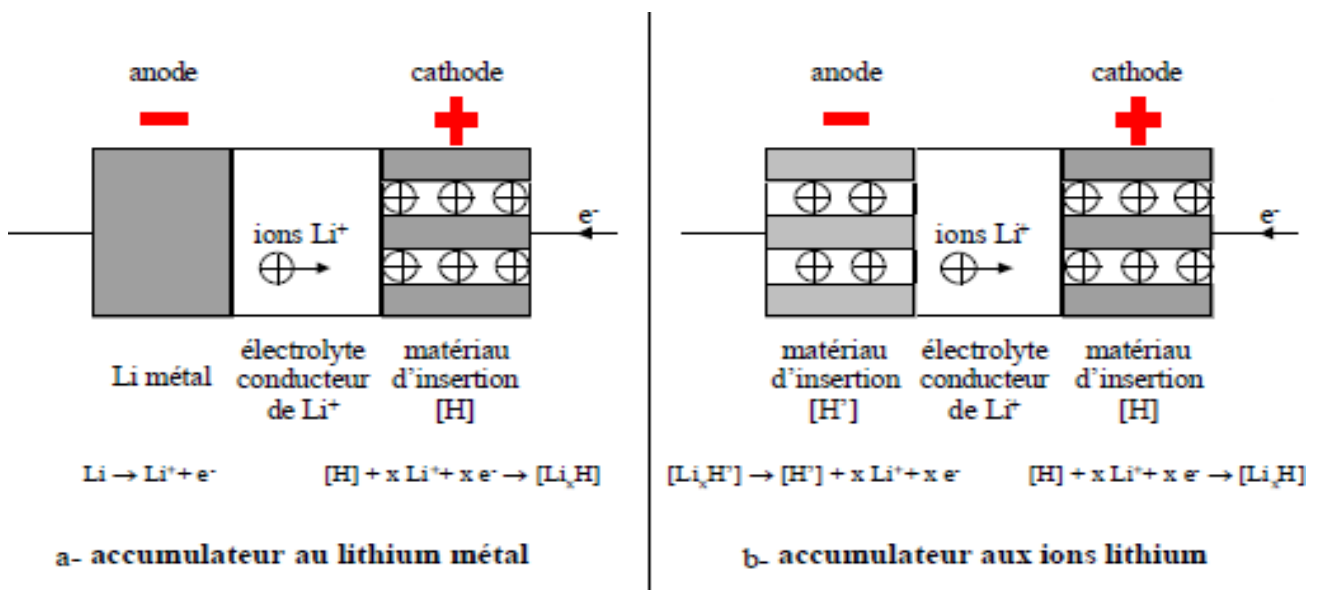


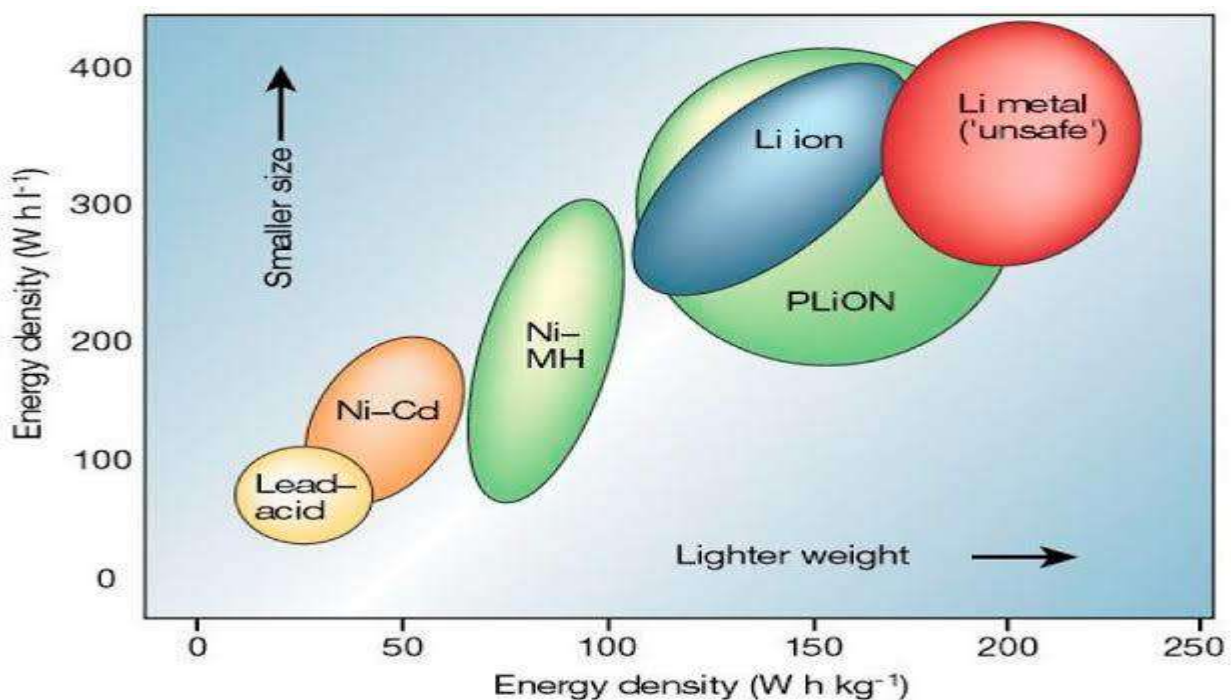
Figure.I. 12: Principe de fonctionnement des accumulateurs au lithium. [19]



## I.8 Les batteries lithium-ion

### I.8.1 Pourquoi le Lithium-ion ?

Les batteries lithium représentent une solution attractive pour les systèmes de stockage d'énergie en termes de performances, notamment d'énergie spécifique et de densité d'énergie. En effet, puisque ce type de batterie a la tension de fonctionnement la plus élevée (3,7V), c'est aussi le métal le plus léger avec une masse molaire atomique de 6,94 g selon le classement périodique des éléments. Cela explique sa pénétration actuelle du marché dans divers secteurs (électronique portable, aviation, transport terrestre, électronique domestique, etc.). La (figure I.13) montre l'emplacement avantageux des batteries lithium par rapport aux autres technologies relativement aux densités d'énergie massique et volumique.



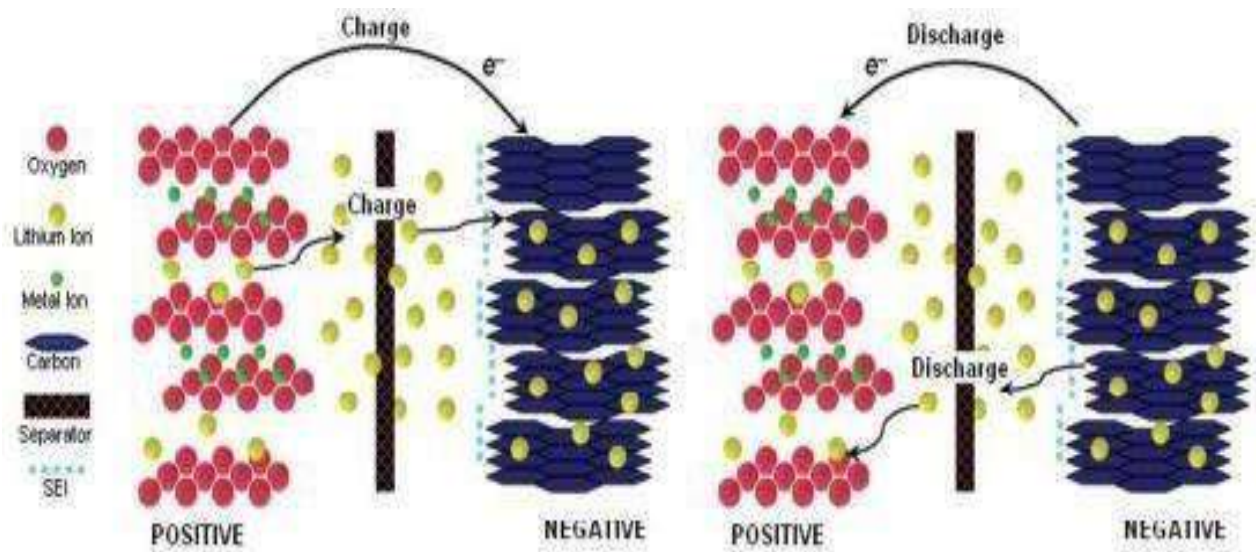
**Figure.I. 13:** L'emplacement des batteries par rapport la densité d'énergie massique et la densité d'énergie volumique

Il à noter que les batteries lithium actuelles sont de plus en plus sécurisantes en comparaison des premières batteries à électrodes en lithium métal. Ces dernières, à cause de la réaction violente du lithium métal en présence d'oxygène, induisent le problème de la formation de dendrites qui provoque une instabilité thermique conduisant parfois à l'enflamment et même à l'explosion de la batterie [16].

### I.8.2 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement d'un accumulateur lithium-ion (Li-ion) repose sur l'échange réversible des ions  $Li^+$  entre les électrodes positive et négative, tout au long des cycles de charge ou de décharge. Chacune des électrodes est donc composée de matériaux pouvant insérer ou dés insérer le lithium de leur structure cristalline, on parle de « matériaux actifs ».

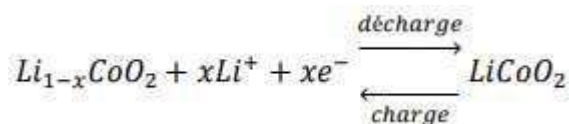
Lors de la décharge, le lithium contenu dans l'électrode négative, se désinsère de la structure cristalline du matériau, migre et diffuse, sous forme ionique, à travers l'électrolyte, et vient s'insérer dans le réseau cristallin du matériau de l'électrode positive. Le transfert d'un ion  $Li^+$  dans le circuit interne de l'accumulateur est compensé exactement par le passage d'un électron dans le circuit électrique externe, générant ainsi un courant électrique. Lors de la charge, le processus inverse est enclenché par l'apport d'un courant extérieur et les ions  $Li^+$  vont venir se réinsérer dans la structure hôte du matériau de l'électrode négative. Ces réactions sont résumées sur la (Figure I.14) ci-dessous :



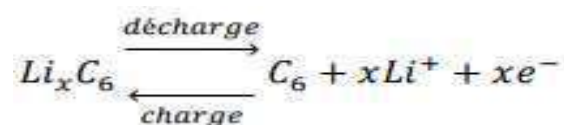
**Figure.I. 14:** Schéma de fonctionnement de l'insertion / désinsertion des ions lithium au cours de la charge ou de la décharge d'une batterie lithium-ion.

Pour les technologies les plus largement utilisées aujourd'hui, l'électrode positive est constituée en général d'un oxyde et l'électrode négative de graphite. Si l'on prend l'exemple du  $LiCoO_2$  et du graphite, en tant que matériaux actifs, les réactions électrochimiques au sein de la batterie sont :

- À l'électrode positive :

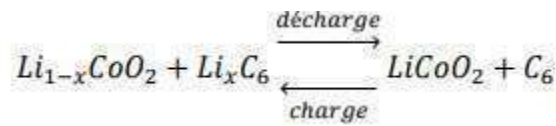


- À l'électrode négative :





- L'équation bilan de fonctionnement de la batterie :



Il ne faut pas confondre un accumulateur lithium-ion et un accumulateur lithium : en effet, pour ce dernier, le lithium est présent sous forme métallique. Ce système a le défaut, au fil des charges et décharges, de produire des dendrites métalliques à la surface de l'électrode négative qui peuvent mener à des courts-circuits internes et des explosions. C'est pourquoi, après une suite d'incidents, ce type de batterie n'est guère plus utilisé au profit des systèmes lithium-ion. Ces dernières ont l'avantage d'utiliser le lithium sous forme uniquement ionique et ne peut donc pas créer de dendrites, ce qui réduit les risques de courts-circuits internes [20].

### I.8.3 Évolution de la technologie et chimies du lithium-ion

Idéalement, on recherche des batteries moins chères, plus sécuritaires, de meilleure autonomie, avec une durée de vie plus longue et également hautement recyclables. Malheureusement, cette batterie idéale n'existe pas encore. En pratique, les technologies lithium se différenciant par leur chimie, notamment leur électrode positive, selon le cahier des charges de l'application visée, une chimie particulière conviendra mieux qu'une autre.

La (figure 1.15) montre une comparaison entre les plus importantes chimies de batterie lithium-ion présentes dans les véhicules électriques et hybrides. La comparaison est faite sur la base des principales caractéristiques suivantes : énergie spécifique, puissance spécifique, sécurité, performance, durée de vie et coût. Selon cette représentation, la batterie idéale aura une surface hexagonale dont le périmètre passera par le maximum de chaque axe.

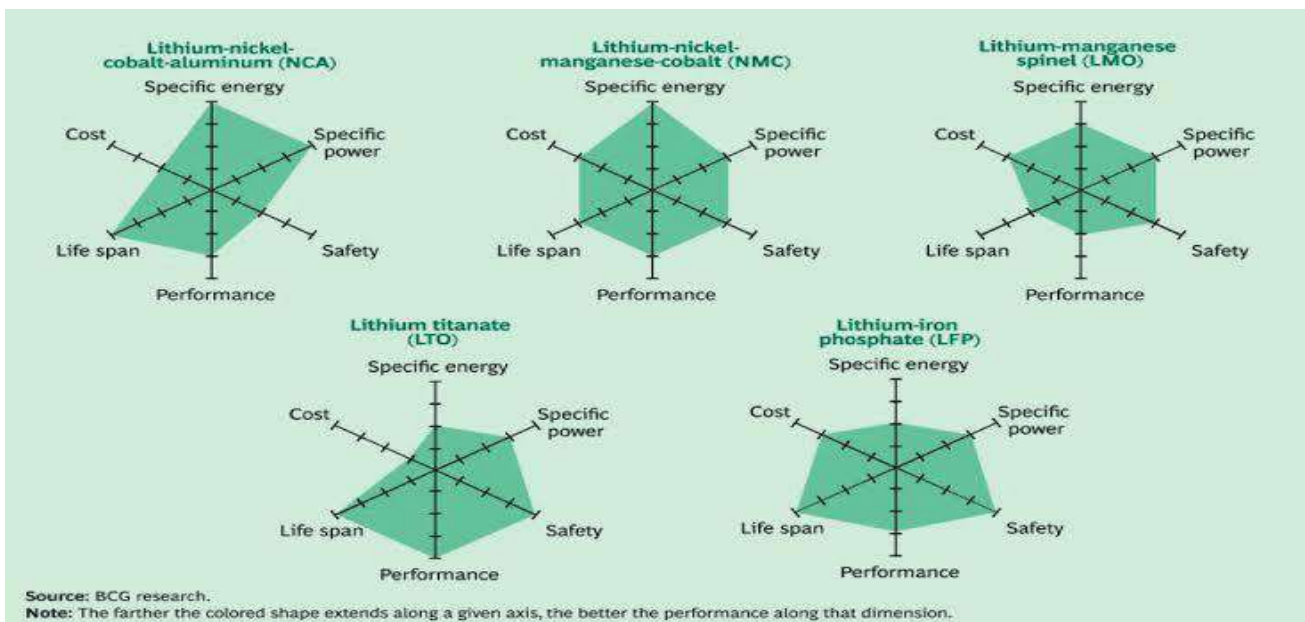


Figure.I. 15 : Caractéristiques de différentes technologies de batterie lithium-ion. [21]

Actuellement, on trouve sur le marché trois types de cathodes pour les batteries lithium-ion. Le premier type correspond aux cathodes à base de dioxyde de métal, comme le dioxyde de cobalt ( $\text{LiCoO}_2$ ) dont la densité d'énergie est la plus élevée, ou bien de dioxyde de métaux composés comme le nickel-manganèse  $\text{LiMnNiO}_4$ , nickel-cobalt-aluminium  $\text{LiNiCoAlO}_2$  (NCA) ou encore le nickel-manganèse-cobalt  $\text{LiNiMnCoO}_2$  (NMC). Le deuxième type correspond aux cathodes dites « spinelle » comme le lithium manganèse  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  (LMO). Le troisième type de cathode utilise les métaux de transition de phosphate comme le phosphate de fer  $\text{LiFePO}_4$  (LFP).

#### **I.8.4 Format de la cellule : cylindrique, prismatique, poche**

Les constructeurs actuels offrent des batteries sous différents formats. Pour une application donnée, le packaging global du système de stockage est influencé par le type de cette application pour plusieurs raisons telles que la masse résultante, les propriétés mécaniques et la gestion thermique. Ainsi, le format de la cellule influence à leur tour sur la durée de vie de la batterie

Pour les cellules de petite taille, elles utilisent généralement le format cylindrique. La fabrication de tel format est basée sur la superposition de bandes anodes-séparateur-cathode séparateur qui est enroulée autour d'un pivot central. Cet enroulement est parfois constitué de quelques dizaines à plusieurs centaines de tours. Ensuite, les connections électriques entre les tours sont faites d'un seul ou de chaque côté de l'enroulement. Finalement, le package est introduit dans une enveloppe qui est généralement en acier.

Le format prismatique est utilisé pour les cellules de capacité supérieure à 10 Ah. Elle peut atteindre une meilleure densité d'énergie volumique. Ce type de format est introduit dans une enveloppe très rigide avec des éléments de protections. Le format poche, est pour les cellules de faibles à hautes capacités. Contrairement aux autres types il ne contient pas un système sécuritaire, mais il a l'avantage de pouvoir ajuster facilement la taille de la cellule selon l'application grâce à sa souple enveloppe scellée au plus près de l'empilement électrodes-séparateur et autorise une éventuelle déformation liée à la pression interne de la cellule. [17]

### Three types of packaging for lithium ion batteries

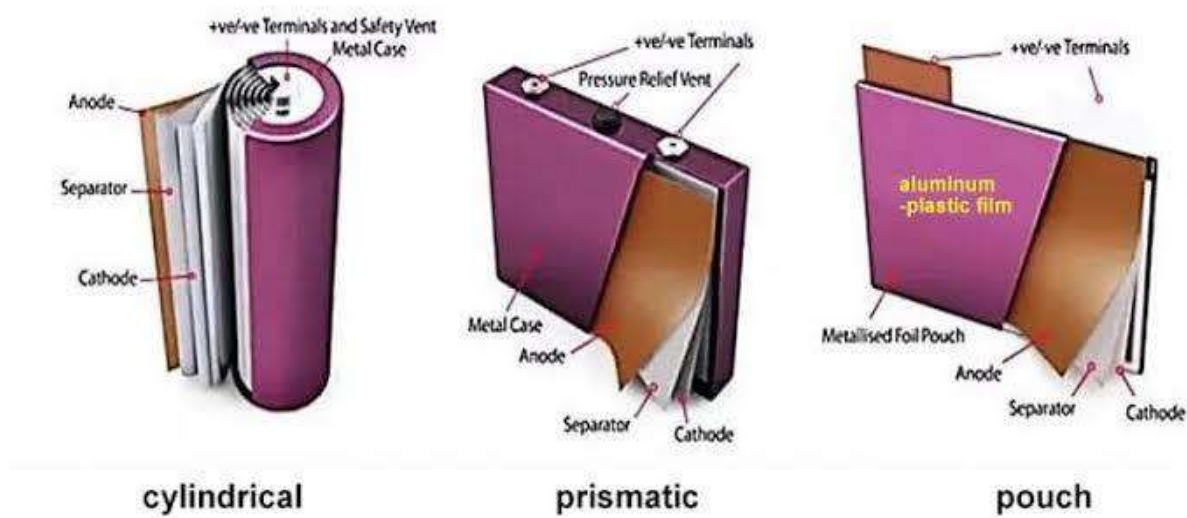


Figure.I. 16 : Formats cylindrique, prismatique et poche des batteries li-ion

#### I.8.5 Les avantages et l'inconvénient du lithium-ion

##### . Les avantages :

Les avantages sont :

- ✓ Une LIB typique est capable de stocker 150 wattheures d'électricité par kg de batterie, contre 100 wattheures d'électricité dans une batterie nickel-hydrure métallique (NiMH) et seulement 25 wattheures d'électricité dans une batterie plomb-acide.
- ✓ Les LIB tiennent bien la charge. Ils perdent généralement environ 5% de leur charge chaque mois, contre une perte mensuelle de 20% pour les batteries NiMH.
- ✓ Les LIB ne nécessitent pas une décharge complète avant la recharge.
- ✓ Les LIB sont capables de gérer plus de cycles de charge / décharge.


##### . Les inconvénients

Les inconvénients sont :

- ✓ Les LIB commencent à se dégrader au moment où ils quittent l'usine. Ils ne durent généralement que deux à trois ans à compter de la date de fabrication, qu'ils soient utilisés ou non.
- ✓ Les LIB sont très sensibles aux températures plus élevées. Une température plus élevée entraîne une vitesse de dégradation beaucoup plus rapide que la normale.
- ✓ Si une LIB est complètement déchargée, elle est totalement endommagée.
- ✓ Les LIB sont relativement chers.
- ✓ Il existe une petite possibilité que si le pack LIB échoue, il peut éclater en flamme.

**I.9 Conclusion**

Dans ce chapitre on s'est intéressé aux piles à combustible et principalement aux piles PEM. On a abordé l'historique du développement des piles à combustible, leur principe de fonctionnement. On a aussi présenté les différentes parties de la constitution d'une pile à combustible, leurs avantages et inconvénients. Par la suite, nous avons consacré une étude concernant les batteries lithium ion. Dans un premier temps, nous avons présenté leur origine, leur principe de fonctionnement, les différents types et leurs grandeurs caractéristiques.



# Chapitre II :

## Dimensionnement et modélisation de système

## II.1. Introduction

Avant de faire des recherches sur le système hybride autonome, la détermination de la taille de ses composants et la modélisation de ces composants sont des étapes décisives pour assurer un fonctionnement normal même dans des conditions instables.

Dans ce chapitre, nous modéliserons deux sources (pile à combustible et batterie lithium-ion) après nous allons faire le dimensionnement de chaque source pour prédire le comportement et la performance d'un système.

## II-2. Dimensionnement énergétique du système hybride autonome

Préalablement à tout test du système, le dimensionnement de ses composants reste une étape décisive pour assurer un bon fonctionnement tout au long de sa durée de vie. Pour cela, la sélection des composants doit suivre une méthodologie très précise.

### II.2.1. Profil de consommation

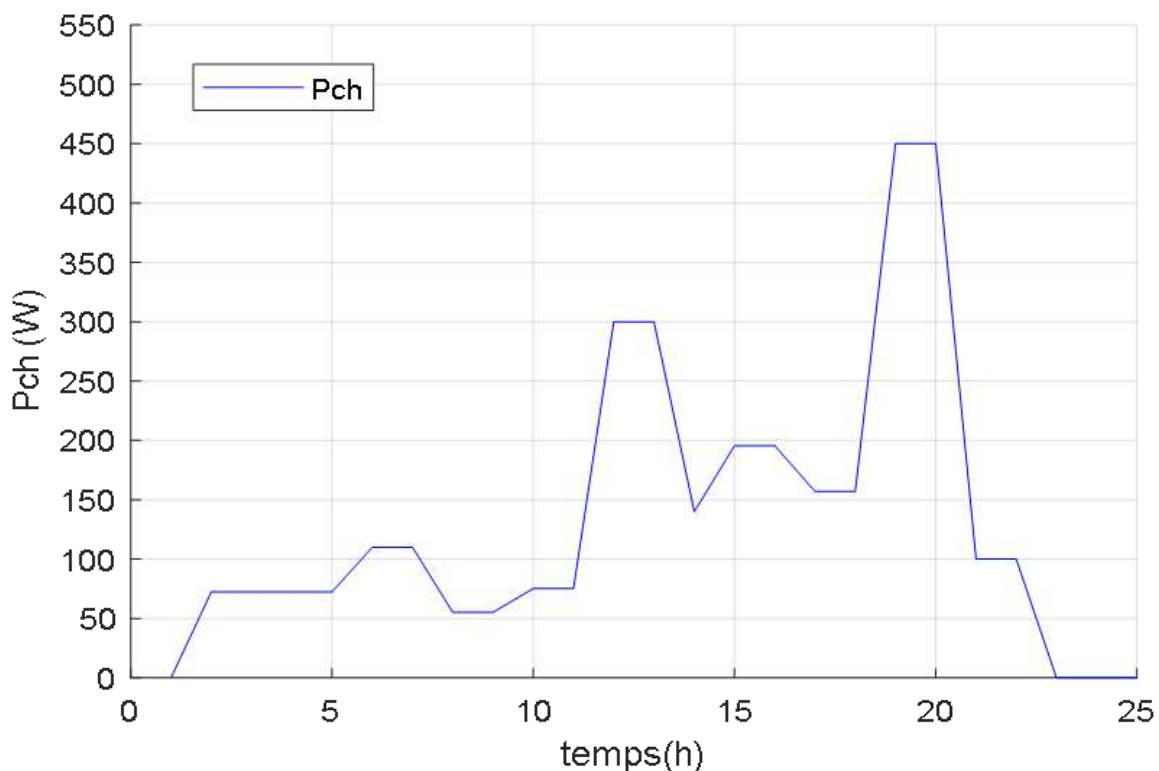


Figure II. 1 : Profil de consommation

Dans ce paragraphe, nous avons défini un profil de consommation horaire basé sur les habitudes d'utilisation au cours de la journée des appareils électriques comme les lampes, réfrigérateur, etc.

### II.2.2. Consommation journalière

Le (tableau II.1) expose le type des charges et leur nombre, ainsi que la consommation électrique journalière

**Tableau II. 1 :** Consommations électriques journalières de l'habitation considérée

Charge	Nombre d'éléments	Puissance [W]	Durée d'utilisation [h]	Consommation Journalière [Wh/j]
Lampes fluo	7	15	5	525
Réfrigérateur	1	85	6	510
Congélateur	1	150	6	900
Téléviseur	2	70	6	840
Machine à laver	1	360	1	360
Climatiseur	1	250	5	1250
Pc	1	35	4	140
<b>Total</b>	/	<b>965</b>	/	<b>4525</b>

Ces équipements demandent une puissance de **965W** et une consommation journalière de **4525Wh/j**

### II.2.3. Dimensionnement du stack de piles à combustible

La pile à combustible est la principale source d'énergie du système hybride. La mise à l'échelle consiste à déterminer le nombre de cellules PEM en série et en parallèle pour répondre aux besoins de logement en fonction du profil énergétique comme il est illustré dans la (figure II.1).

Le stack de Piles à combustible pour piloter le support capacitif de  $\frac{U_{dc}}{2} = 48V$ , connecté au bus via un transformateur Boost fixe. Pour obtenir l'efficacité optimale du transformateur lié, la tension de fumée doit être minimale. Il est égal à  $\frac{U_{dc}}{2}$  (c'est-à-dire **24 V**). [22-23]. Pour une tension  $E_{cell}$  de **0,6 V** [24], les cellules composées sont données en série par :

$$N_{pac s} = \frac{U_{dc}}{2E_{cell}} = 40 \quad (II.1)$$

La cellule de pile à combustible utilisée à une puissance  $P_{pac\ cell}$  de **64W**. Pour un stack de **300W**, le nombre des cellules construites en parallèle est :

$$N_{pac\ p} = \frac{P_{pac\ max}}{P_{pac\ cell}} = 5 \quad (\text{II.2})$$

$$N_{pac\ T} = N_{pac\ p} \times N_{pac\ s} = 200 \quad (\text{II.3})$$

#### II.2.4. Dimensionnement du stack de batteries lithium-ion

Le dimensionnement du stack de batteries requiert une attention particulière afin d'augmenter sa durée de vie et par la même occasion assurer l'autonomie du système et diminuer le coût global du système.

- La capacité nominale du stack est déterminée à partir de la relation.

$$Cn = (Ej \times Aut)/(Vn \times D) \quad (\text{II.4})$$

Avec :

$Cn$  : Capacité nominale des batteries [Ah]

$Ej$  : Besoins journaliers [Wh/j]

$Aut$  : Nombre de jours d'autonomie

$Vn$  : Tension nominale [V]

$D$  : Profondeur de décharge [%]

Pour répondre aux besoins d'un **jour** :

- La tension nominale est **28,8V**.
- La profondeur de décharge est de **90%**.
- L'énergie stockée par jour est de **6 962Wh**

$$Ej = 4525/k$$

- La valeur approchée utilisée sera souvent de : **k = 0,65**

Dans ce cas, le stack de batteries lithium-ion devrait avoir une capacité nominale d'environ **269Ah**.

Pour déterminer le nombre de batteries constituant le stack, nous avons sélectionné une batterie élémentaire ayant une capacité et tension nominaux de **30Ah** et **3.6V**.



Pour analyser les réponses à la tension et à l'état de charge des batteries, nous avons effectué une charge / décharge à un courant constant de **17.5A**.

- **Nombre des batteries en série :**

$$N_s = V_n / V_{n1} = 8 \text{ batteries} \quad (\text{II.5})$$

- **Nombre des batteries en parallèle :**

$$N_p = C_n / C_{n1} = 9 \text{ batteries} \quad (\text{II.6})$$

- **Nombre total des batteries :**

$$N_{ba\_tot} = N_s \times N_p = 72 \text{ batteries} \quad (\text{II.7})$$

Avec :

$N_s$  : Nombre des batteries en série

$N_p$  : Nombre des batteries en parallèles

$N_{ba\_tot}$  : Nombre total des batteries

$V_n$  : Tension nominale des batteries [V]

$V_{n1}$  : Tension nominale d'une seule batterie [V]

$C_n$  : Capacité nominale des batteries [Ah]

$C_{n1}$  : Capacité nominale d'une seule batterie [Ah]

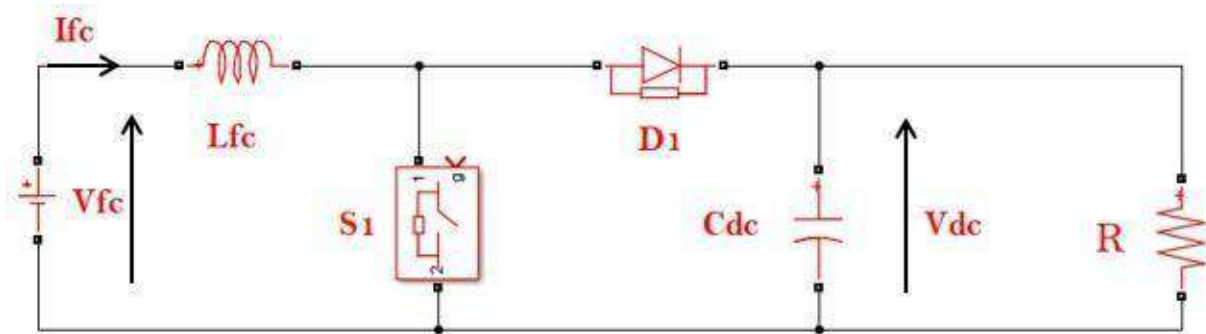
Pour obtenir à une énergie stockée par jour de **6 962Wh**, nous disposerons de **72 batteries** (9 en parallèle et 8 en série).

### II.3. Dimensionnement des convertisseurs DC-DC

Le dimensionnement des éléments des convertisseurs **DC-DC** connectés aux stacks de piles à combustible, de batteries lithium-ion, consiste à déterminer les valeurs des inductances de lissage  $L_{fc}$ ,  $L_{ba}$  et la valeur de la capacité de filtrage  $C_{dc}$  du bus continu.

### II.3.1. Convertisseur DC-DC lié aux piles

Le convertisseur relié à la pile à combustible est un convertisseur « Boost » appelé aussi : « survolteur ». [25]



**Figure II. 2:** Montage Boost du convertisseur DC-DC connecté au stack de piles à combustible PEM

Une étude faite par [26] a donné l'équation de l'inductance de lissage d'un convertisseur Boost. Elle est calculée par :

$$L_{fc} = \frac{V_{dc}}{4F\Delta I_{fc_{max}}} \quad (\text{II. 8})$$

Pour le condensateur de filtrage ayant une capacité  $C_{dc}$  (voir figure 2.2), il permet de limiter les ondulations de la tension qui résultent du courant alternatif dans le condensateur de sortie [19]. La valeur minimale du condensateur est déterminée par l'équation suivante :

$$C_{dc} = \frac{I_{fc_{max}}}{4F\Delta V_{dc}} \quad (\text{II. 9})$$

Pour :  $V_{dc} = 48V$ ,  $F = 2000Hz$ ,  $\Delta I_{fc_{max}} = 2\% * I_{fc_{max}}(12.5A)$ , et  $\Delta V_{dc} = 5\% * V_{dc}(48V)$ , les nous aurons valeurs suivantes :

$$L_{fc} = 0.024H$$

$$C_{dc} = 0.00065F$$

- Paramètres de la pile à combustible :

Tableau II. 2 : Paramètres de la pile à combustible

Pile à Combustible	Type de la pile	Udc	Le courant maximale (A)	La puissance maximale (W)
	PEMFC	48	12.5	300

### II.3.2. Convertisseur DC-DC lié aux batteries

Le convertisseur connecté au module de batteries possède deux structures : il fonctionne en mode « Buck » dans le cas où l'énergie électrique est à acheminer et en mode « Boost » lorsqu'il fournit de l'énergie électrique au bus continu.

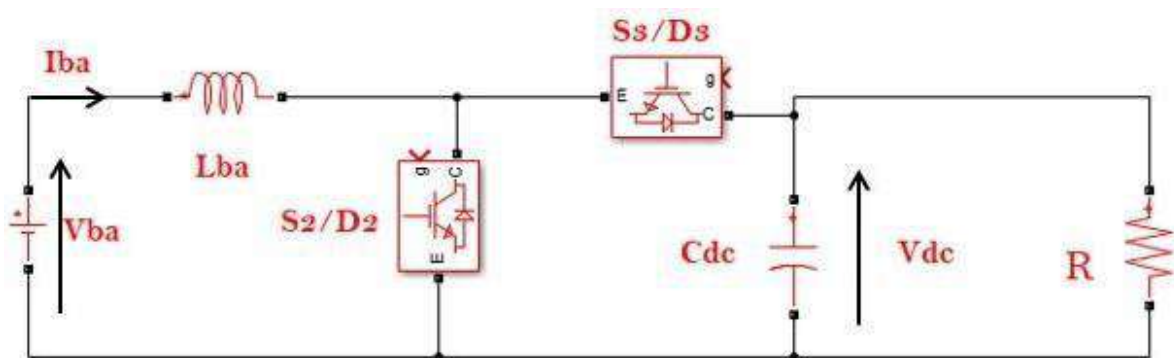


Figure II. 3 : Montage Buck/Boost du convertisseur DC-DC lié au stack de batteries lithium ion

Une étude faite par [26] a donné l'expression de l'inductance de lissage d'un convertisseur Buck/Boost. Elle est calculée par :

En appliquant la loi des nœuds :

$$L_{ba} = \frac{V_{dc}}{4F\Delta I_{ba_{max}}} \quad (\text{II. 10})$$

Pour :  $V_{dc} = 48\text{V}$  ;  $F = 2000\text{Hz}$  ;  $\Delta I_{ba_{max}} = 2\% * I_{ba}(17.5\text{A})$  ;  $\Delta V_{dc} = 5\% * V_{dc}(48\text{V})$  , nous aurons valeur suivante :

$$L_{ba} = 0.01714 \text{ H}$$

- Paramètres de la Batterie

Tableau II. 3: Paramètres de la Batterie

Batterie	Type de la batterie	La tension nominale (V)	Capacité (Ah)	Résistance interne ( $\Omega$ )	Courant nominal de décharge (A)
	Lithium-ion	28.8	30	0.01714	17.5

## II.4. Modélisation des sources d'énergie

### II.4.1. Modélisation du comportement du stack de piles à combustible

La tension d'une cellule à pile à combustible de type PEM chute en fonction du courant débité à cause des pertes. Ces pertes sont dues aux irréversibilités ; elles se manifestent en trois types :

- 1) Pertes d'activation, cause de la polarisation d'activation.
- 2) Pertes ohmiques, origine de la polarisation ohmique.
- 3) Pertes de concentration, source de la polarisation de concentration.

Chaque région de polarisation est indiquée dans la (figure II.7).

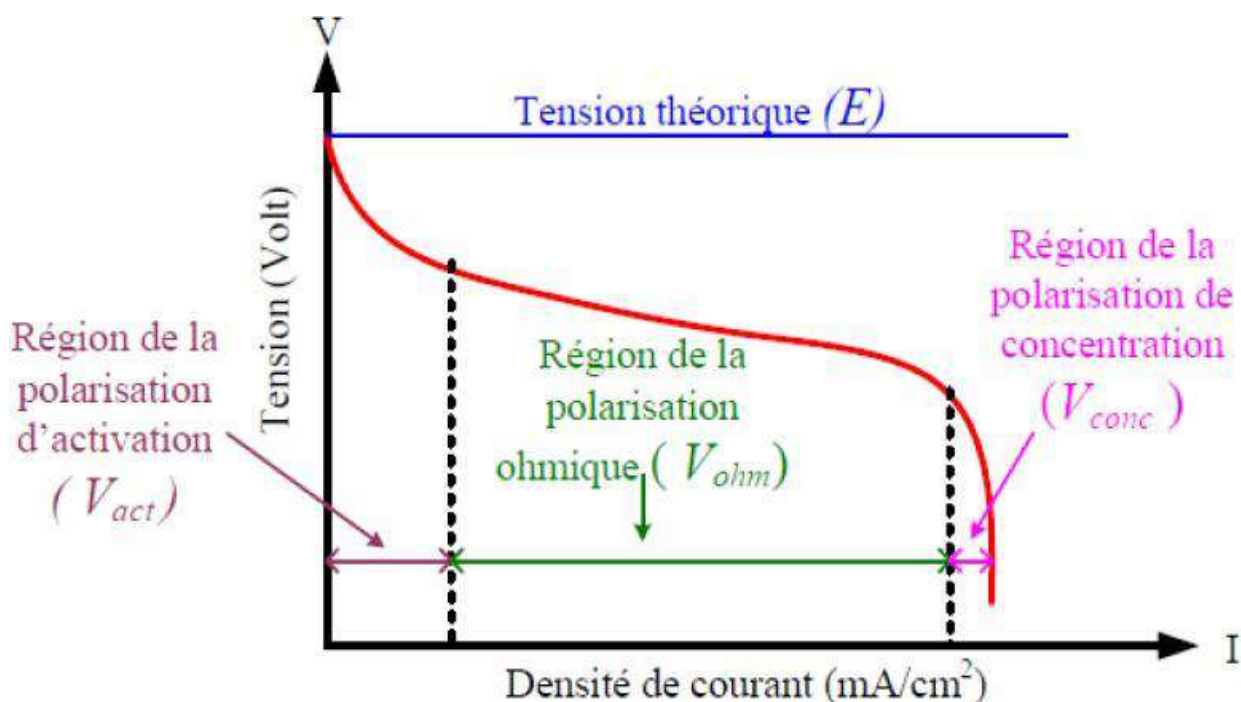


Figure II. 4: Caractéristique densité de courant-tension d'une pile PEM.

### II.4.1-1. Pertes d'activation

Les pertes d'activation provoquent une chute de tension sur un temps limité. Elle est provoquée par une réaction d'électrode lente, nécessitant une énergie d'activation pour se produire. En effet, pour qu'une réaction chimique ou électrochimique puisse démarrer, les réactifs doivent franchir une barrière d'activation [27].

Dans le cas d'une réaction électrochimique où la chute de tension  $\Delta v_{act}$  est supérieure à 50-100mV [27],  $\Delta v_{act}$  peut être exprimée par l'équation semi-empirique de **Tafel**. [27-28] Avec :

$$\Delta v_{act} = A \ln\left(\frac{i_{cell} + i_n}{i_0}\right) \quad (\text{II.11})$$

**$\Delta v_{act}$**  : Chute de tension due aux pertes d'activation [V].

**A** : Pente de la droite de **Tafel** qui est de l'ordre de 0.06V [23-10-29].

**$i_{cell}$**  : Courant délivré par la cellule PEM [mA.cm<sup>-2</sup>].

**$i_n$**  : Courant interne permettant de tenir compte d'une éventuelle traversée de gaz et/ou d'électrons à travers l'électrolyte [mA.cm<sup>-2</sup>].

**$i_0$**  : Courant d'échange caractérisant à vide les échanges électrode-électrolyte [mA.cm<sup>-2</sup>].

### II.4.1.2. Pertes ohmiques

La cause des pertes ohmiques est le passage des protons à travers une résistance Membrane, et à la circulation des électrons dans la résistance interne des électrodes. La chute de tension  $\Delta v_{ohm}$  résultante dépend linéairement du courant débité et peut être transcrite comme suit [22] :

$$\Delta v_{ohm} = (R_{mem} + R_{ele}) i_{cell} \quad (\text{II.12})$$

Avec :

**$\Delta v_{ohm}$**  : Chute de tension due aux pertes ohmiques [V]

**$R_{mem}$**  : Résistance de la membrane [kΩ.cm<sup>2</sup>]

**$R_{ele}$**  : Résistance interne des électrodes [kΩ.cm<sup>2</sup>]

**$i_{cell}$**  : Courant débité par la cellule PEM [mA.cm<sup>-2</sup>]

### II.4.1.3. Pertes de concentration

La chute de tension  $\Delta v_{con}$  due à la perte de concentration est très importante pour de courant élevé, Lorsque la demande en courant accroît, le maintien nécessaire de la concentration des réactifs devient difficile conduisant, ainsi, à un effondrement rapide de la tension aux bornes de la cellule. La chute  $\Delta v_{con}$  est exprimée par l'équation suivante

$$\Delta v_{con} = -m \exp(ni_{cell}) \quad (\text{II.13})$$

$\Delta v_{con}$  : Chute de tension due aux pertes de concentration [V]

$m$  : Constante de l'ordre de  $3 \cdot 10^{-5}$  [V]

$n$  : Constante de l'ordre de  $8 \cdot 10^{-3}$  [ $\text{mA}^{-1} \cdot \text{cm}^2$ ]

$i_{cell}$  : Demande en courant [ $\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ ]

### II.4.1.4. Expression de la tension aux bornes du stack en fonction du courant débité

Pour Comprendre le fonctionnement du stack à **PEM**, on s'est limité, dans ce travail, à une approche simple où les différents phénomènes sont rassemblés. La tension aux bornes d'une cellule PEM peut être exprimée par cette équation :

$$V_{cell} = E - r i_{cell} - A \ln \left( \frac{i_{cell} + i_n}{i_0} \right) - m \exp(ni_{cell}) \quad (\text{II.14})$$

En représente la tension théorique à vide (de l'ordre de 1.2V), et r est la résistance spécifique totale.

Comme indiqué dans le (paragraphe II.4.1.3), l'effondrement rapide de la tension  $V_{cell}$  aux bornes de la cellule PEM ne se produit que lorsque la demande en courant dépasse une certaine valeur. Pour cause, ce phénomène ne va pas être pris en considération. Par conséquent, la tension  $V_{cell}$  aux bornes d'une cellule PEM est écrite comme suit :

$$V_{cell} = E - R_{cell} i_{cell} - A \ln(ai_{cell} + b) \quad (\text{II.15})$$

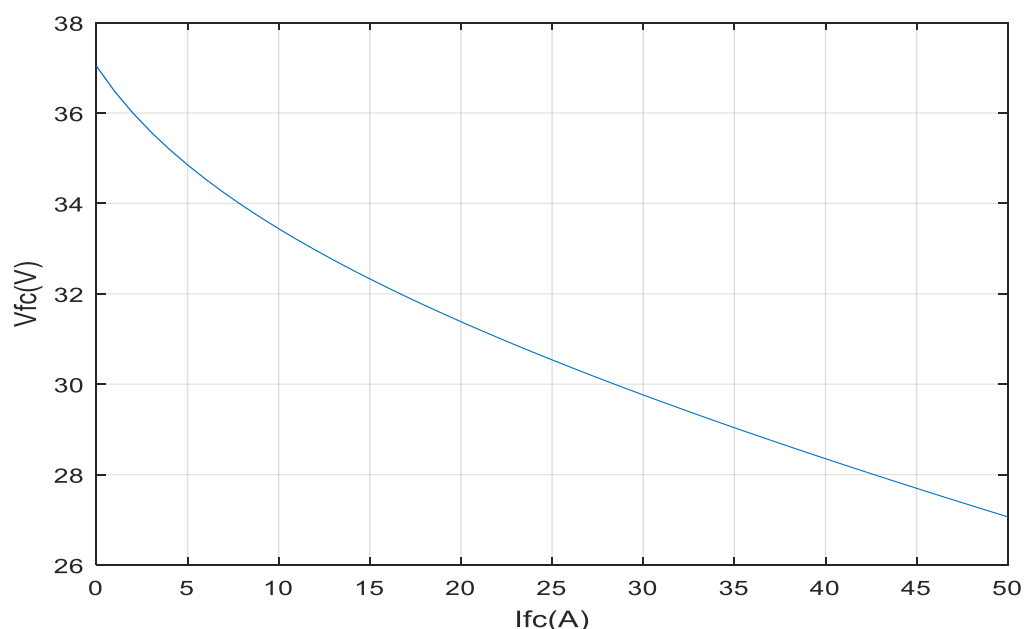
Dans [23], les constantes  $R_{cell}$ , a et b sont déterminées par une application différente étapes en cours lors de l'entrée dans la cellule. Les valeurs de  $R_{cell}$ , a et b sont données dans (tableau II.4).

Tableau II. 4 : Paramètres de la cellule PEM utilisée dans. [23]

Constante	Valeur
$R_{ce}[\Omega]$	0.002
$a [A^{-1}]$	21.273
$b$	96.2

Enfin, l'expression de la tension aux bornes du stack en fonction du courant débité est tracée de la fonction  $V_{fc} = (i_{fc})$  est présenté sur la figure ci-dessous.

$$V_{fc} = 40(E - R_{cell}i_{fc} - A \ln(ai_{fc} + b)) \quad (\text{II.16})$$

Figure II. 5: Caractéristique  $V_{fc} = (i_{fc})$  du stack de piles à combustible

#### II.4.2. Modélisation d'une batterie lithium ion

Il existe plusieurs modèles de batteries lithium-ion. Cependant, leur situation. Le travail n'est pas facile du fait du respect de plusieurs paramètres (température, résistance interne ... etc.). En fonction des applications et de leurs limites. Ces batteries interagissent différemment. Donc on ne trouve pas un seul modèle cela est vrai en toutes circonstances. Dans ce travail, nous avons sélectionné un circuit RC séquentiel

Similaire à une batterie lithium-ion [19]. En mode décharge, la tension est aux bornes de la cellule de batterie sont données par l'expression :

$$v_b = E_0 - R_b i_b - \frac{1}{c_b} \int i_b dt \quad (\text{II.17})$$

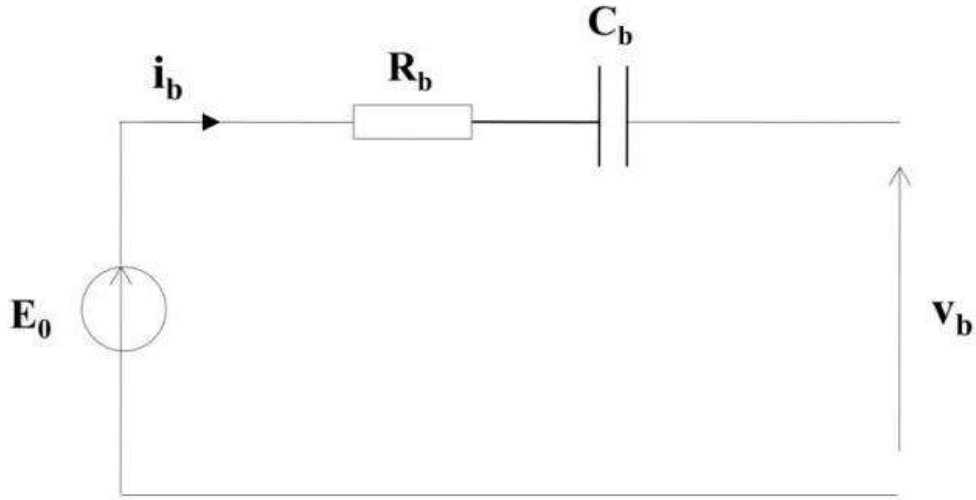


Figure II. 6 : Modèle d'une batterie lithium ion Avec :

$v_b$  : tension de la batterie lithium ion [V]

$E_b$  : sa tension à vide [V]

$I_b$  : son courant [A]

$R_b$  : sa résistance [ $\Omega$ ]

Pour un stack composé de  $N_{bs}$  batteries en série, et  $N_{bp}$  en parallèle, on peut écrire :

$$E_{ba0} = N_{bs} \times E_0 \quad (\text{II.18})$$

$$R_{ba} = \frac{N_{bs}}{N_{bp}} \times R_b \quad (\text{II.19})$$

$$C_{ba} = \frac{N_{bp}}{N_{bs}} \times C_b \quad (\text{II.20})$$

$$v_{ba} = E_{ba0} - R_{ba} i_b - \frac{1}{c_{ba}} \int i_b dt \quad (\text{II.21})$$

Nous définissons l'état de charge,  $EDC_{ba}$ , du stack comme étant le rapport entre sa capacité nominale  $C_{ban}$  et la quantité de charge  $Q_{bam}$  manquante par rapport à  $C_{ban}$ .

$$EDC_{ba} = \left(1 - \frac{Q_{bam}}{C_{bam}}\right) \times 100\% \quad (\text{II.22})$$



Avec :

**EDCba** : Etat de charge stack des batteries

**Cban** : Capacité nominale

**Qmba** : Quantité de charge

## II.5. Modélisation du fonctionnement des convertisseurs statiques

Les deux convertisseurs statiques sont représentés par la médiation entre le bus continu et les sources d'énergie (pile à combustible et batteries).

Le convertisseur boost pour le stack de la pile à combustible permet d'élever la tension de stack de PAC puisque la tension de bus continu est inférieure à celle du pack.

En utilisant deux convertisseurs statiques (buck/boost) bidirectionnelle de courant continu pour cellule de stockage le stack de batterie peuvent être chargés ou déchargés.

La modélisation des convertisseurs passe par l'analyse des différentes séquences de fonctionnement selon l'état des interrupteurs considérés parfaits [26].  $u_1$ ,  $u_2$ ,  $u_3$ , les signaux de commandes des transistors S1, S2, S3 (voir figures II.4, II.5).

L'expression des deux convertisseurs statiques commandés en courant fait de fonctionnement :

### ❖ Type 1 :

Quand les deux convertisseurs fonctionnent en mode « Boost », leur comportement est décrit par le système d'équation suivante :

$$\begin{cases} \frac{di_{fc}}{dt} = \frac{1}{i_{fc}} (V_{fc} - (1 - u_1)V_{dc}) \\ \frac{di_{ba}}{dt} = \frac{1}{i_{ba}} (V_{ba} - (1 - u_2)V_{dc}) \end{cases} \quad (\text{II.23})$$

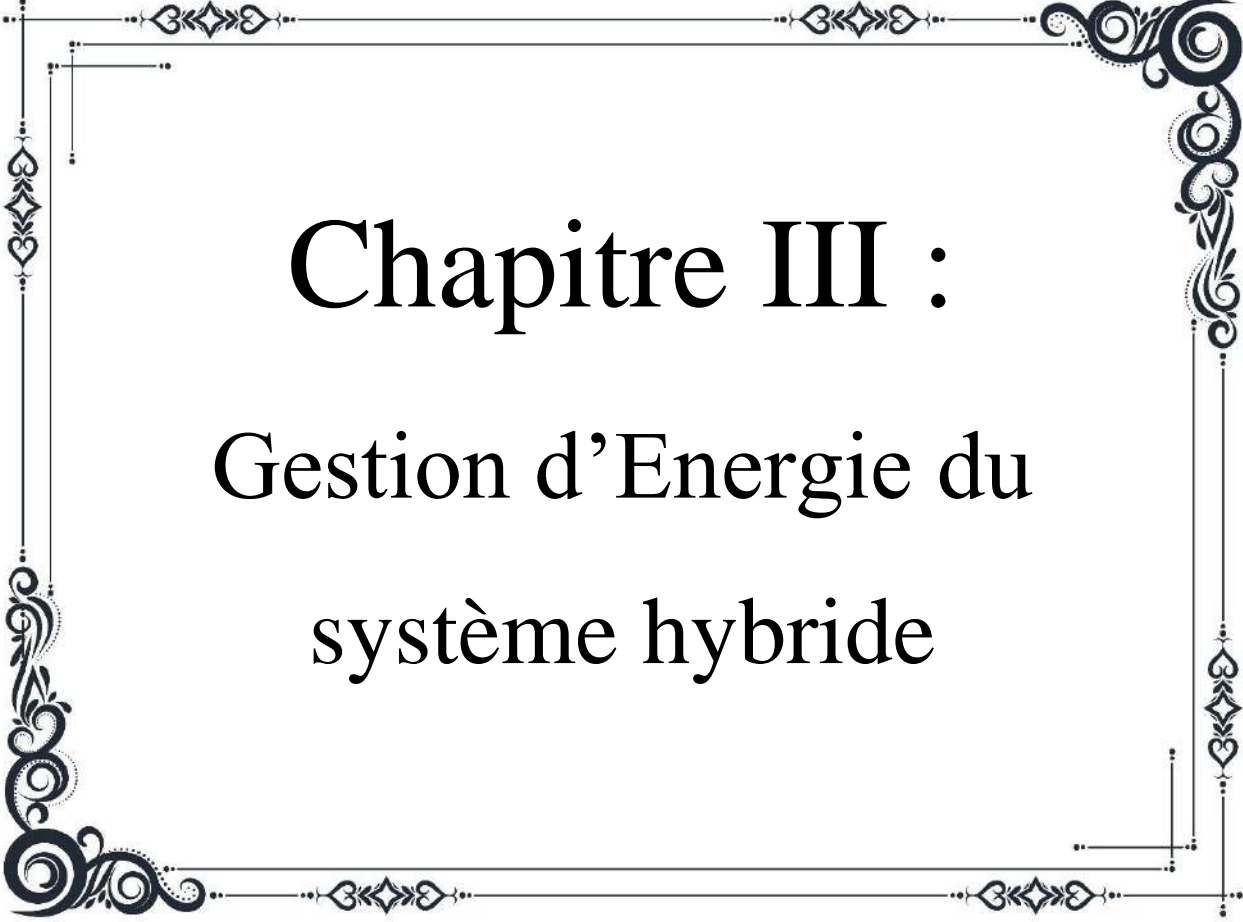
## ❖ Type2 :

Dans le cas où le convertisseur lié au stack de batteries fonctionne en mode « Buck »(le stack reçoit de l'énergie qui provient des piles à combustible), le comportement des deux convertisseurs peut être représenté par le système d'équation suivante :

$$\begin{cases} \frac{di_{fc}}{dt} = \frac{1}{i_{fc}} (V_{fc} - (1 - u_1)V_{dc}) \\ \frac{di_{ba}}{dt} = \frac{1}{i_{ba}} (V_{ba} - u_3V_{dc}) \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

**II -6. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons examiné le dimensionnement et la modélisation des piles à combustible et la modélisation des batteries au lithium-ion et convertisseurs DC-DC à connectés à la maison, et ainsi nous obtenons les caractéristiques et principes de fonctionnement des éléments du système hybride totalement autonome.



Chapitre III :  
Gestion d'Energie du  
système hybride

### III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons gérer les flux énergétiques entre une source hybride composée de deux : piles à combustibles, batteries, d'une part, une charge, d'autre part. Pour cela, les modèles présentés précédemment seront utilisés et implantés sous « Matlab ». Différents résultats de simulation seront présentés et discutés.

### III.2. Architecture du système hybride à bord

Pour faire une connexion d'un bus continu DC avec deux sources, il faut prendre en considération le coût, le volume, la masse totale, et l'efficacité du système. La structure répondant à toutes ces contraintes, et retenue pour ce travail est celle représentée sur la figure III.1. Cette architecture présente les avantages d'une énergie spécifique très élevée, d'une puissance importante durant des périodes très brèves, et elle se compose de :

Un bus continu basse tension  $V_{dc}$  de 48V, et de nature capacitive ( $C_{dc}$ ). Une source principale d'énergie représentée par un stack de piles à combustible, reliée au bus continu à travers un convertisseur Boost. Cette source possède une tension  $V_{fc}$  et fournit une puissance  $P_{fc}$ . Des batteries lithium-ion considérées comme organe de stockage d'énergie, reliées au bus continu par un convertisseur Buck/Boost bidirectionnel en courant. Ils ont une tension  $V_{ba}$  et une puissance  $P_{ba}$ . Une charge résistive variable ( $R$ ) modélisant l'ensemble « onduleur + charges alternatives ».

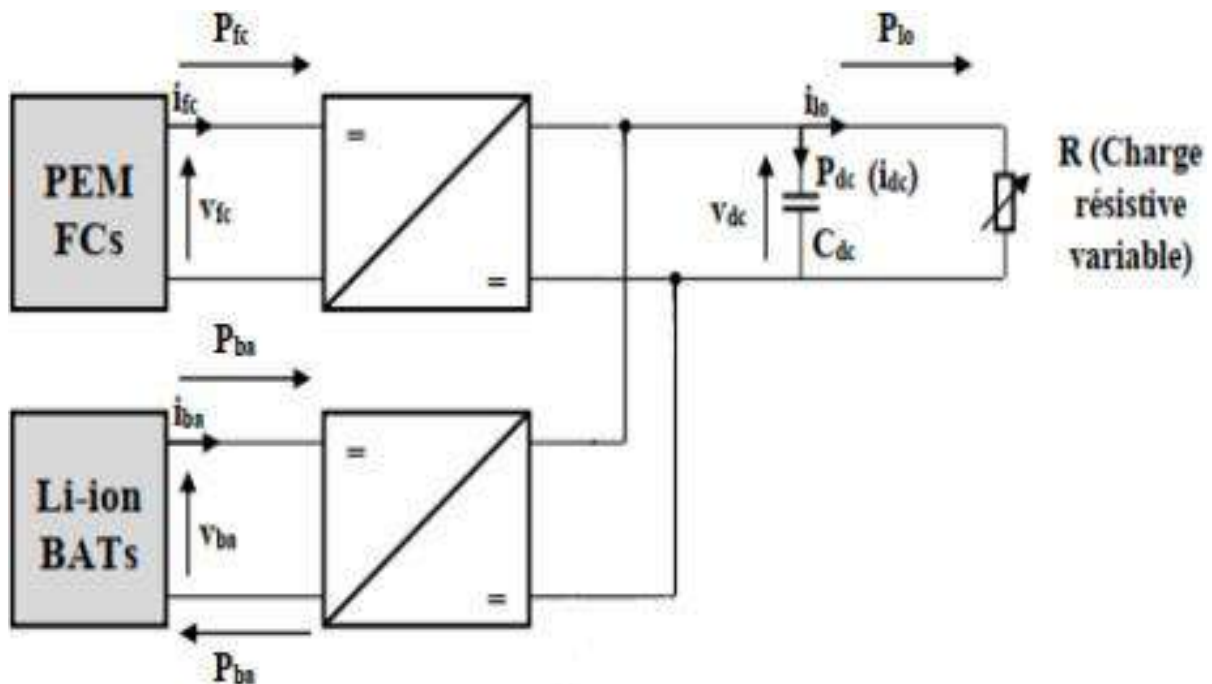


Figure III. 1 : Structure du système hybride autonome

III.3. Schéma de Simulation (MATLAB) :

- Pile à combustible :

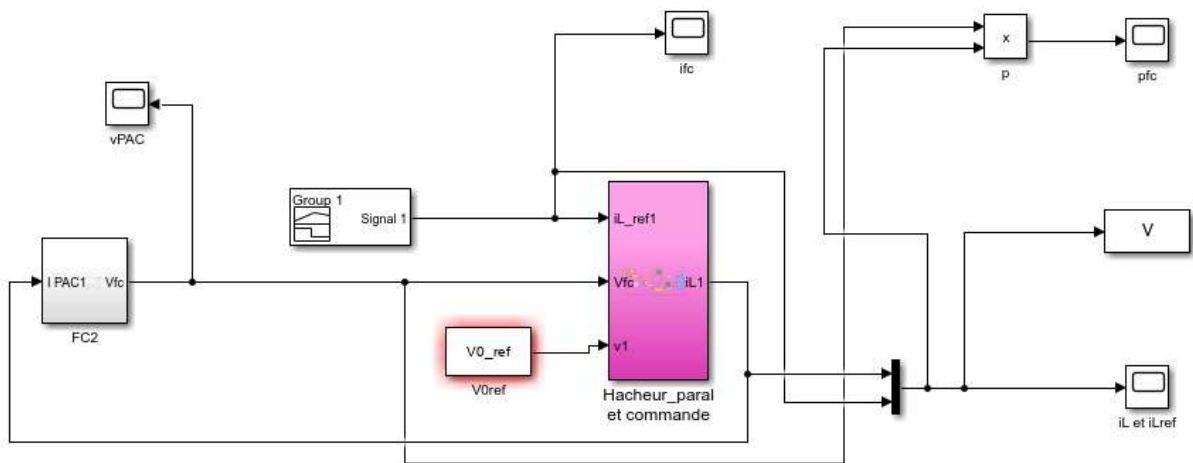

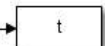


Figure III. 2: Simulation de schéma pile à combustible (Matlab)  

- Batterie lithium-ion :

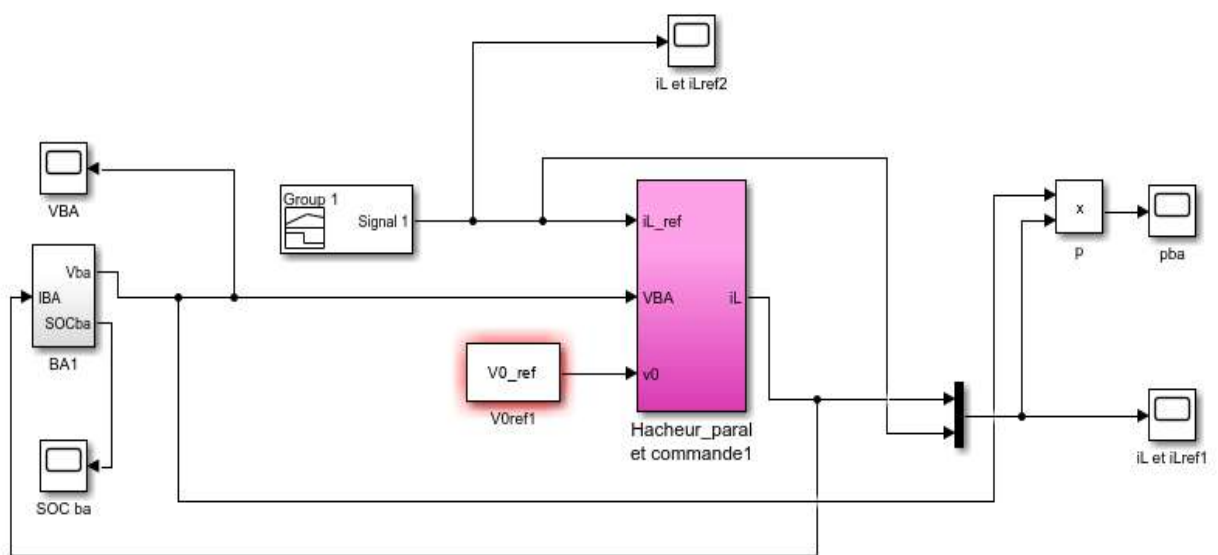


Figure III. 3: Simulation de schéma Batterie lithium-ion(Matlab)  

### III.4. Principe de la gestion d'énergie

Le but principal de la gestion d'énergie est la satisfaction de la puissance demandée par la charge, donc trouver la meilleure distribution des puissances entre les sources d'énergie du système.

Le principe de la gestion d'énergie repose sur l'assurance de la continuité de la puissance requise par la charge tout en respectant différentes contraintes de fonctionnements tels que la puissance limite des piles, états de charge des batteries.

### III.5. Résultats de simulation et discussion

Afin de vérifier le principe de gestion d'énergie proposée, nous avons :

- Proposé le profil de consommation indiqué dans la (figure III.1) tenant en compte trois Phases : phase de démarrage, phase normale, et phase de récupération et les paramètres du système hybride autonome sont groupés dans le (tableau III.1). Utilisé l'outil « Matlab/Simulink ».

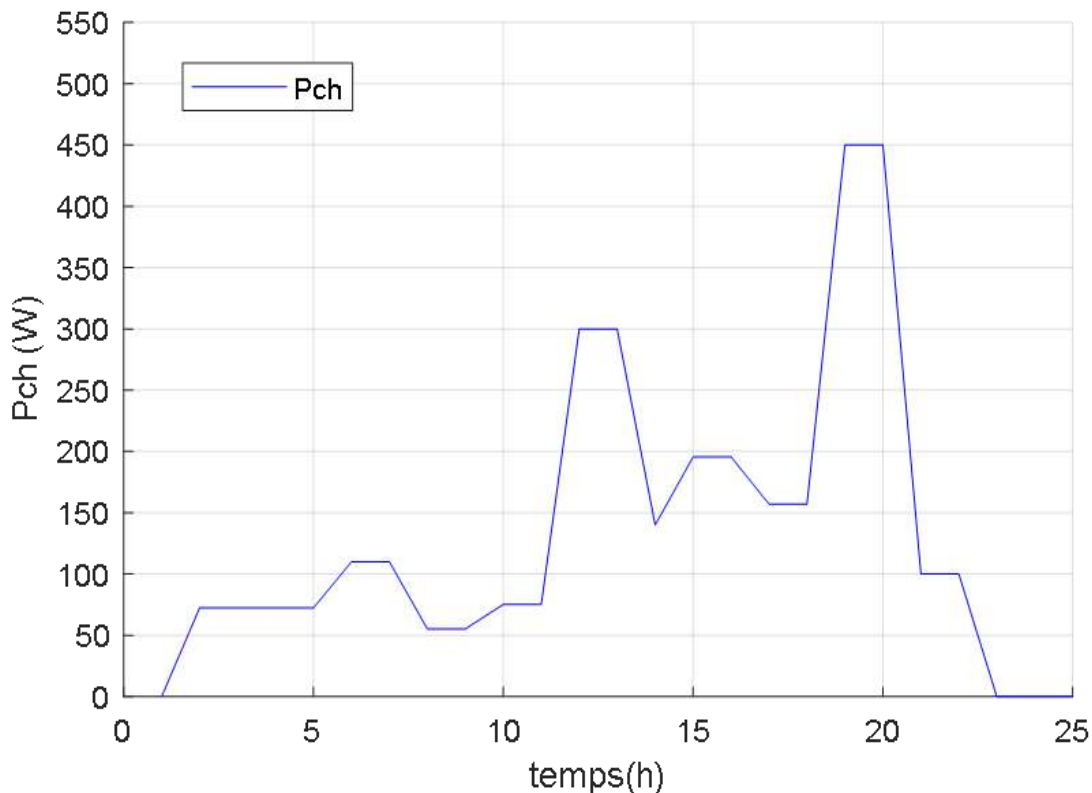


Figure III. 4 : Profil de consommation.

Tableau III. 1: Paramètres du système hybride autonome.

Symbole	Appellation	Valeur
<b>Piles à combustible</b>		
V <sub>fc</sub>	Tension nominale [V]	37.04
P <sub>fcmax</sub>	Puissance maximale [W]	300
P <sub>fcmin</sub>	Puissance minimale [W]	0
<b>Batteries lithium-ion</b>		
V <sub>ba</sub>	Tension nominale [V]	28.8
C <sub>ban</sub>	Capacité [Ah]	269
C <sub>ba</sub>	Capacité [F]	40
R <sub>ba</sub>	Résistance [ $\Omega$ ]	0.015
<b>Bus continu</b>		
V <sub>dréf</sub>	Tension de référence [V]	48
C <sub>dc</sub>	Capacité [F]	0.00065

- Les puissances des sources d'énergies et la charge :

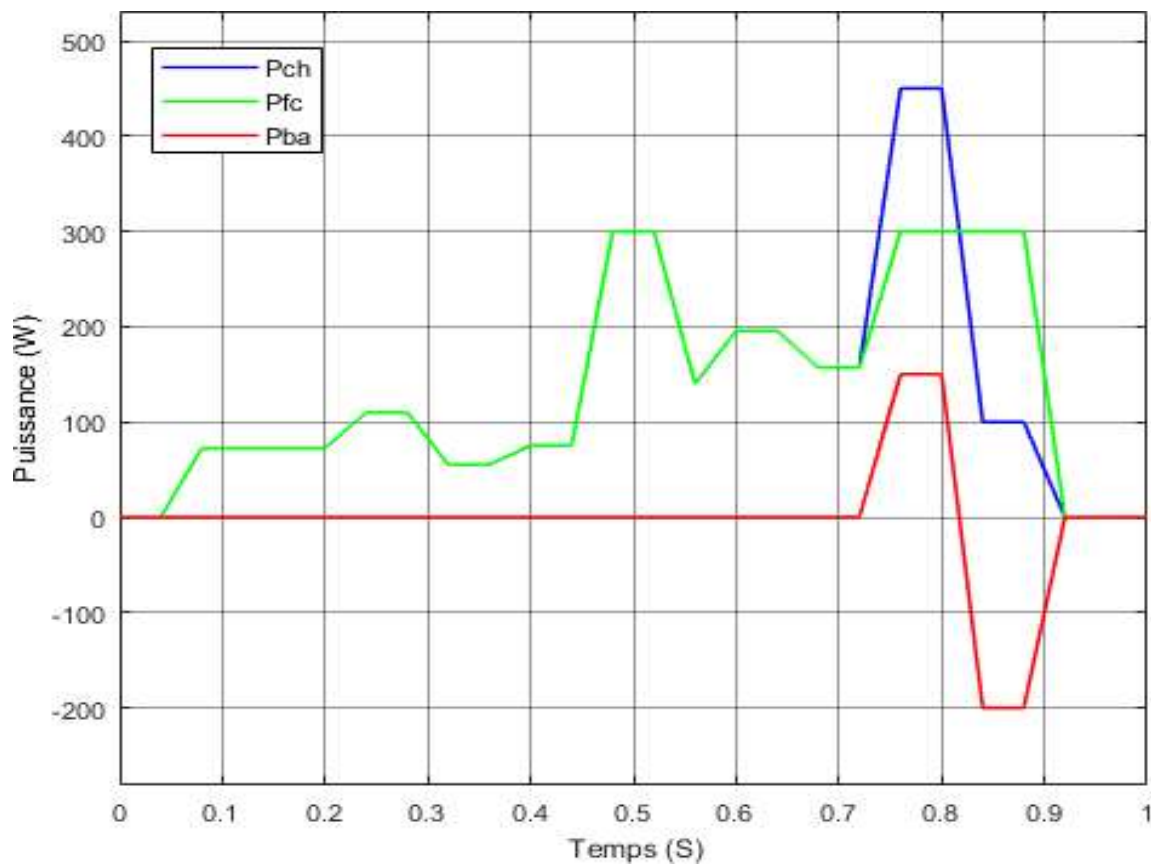


Figure III. 5: Courbes des puissances

(La figure III.3) démontre les transferts des puissances dans le système hybride.

La puissance de la batterie est confinée entre une valeur minimale nulle et une valeur maximale de 300 W.

Concernant les batteries, elles fournissent la différence entre la puissance de piles et la puissance de la charge.

Dans le cas où la puissance de la charge est inférieure à la puissance maximale de la pile ( $P_{fcmax}$ ), [entre  $t = 0$  et  $t = 0.73$  secondes] et que la batterie est complètement chargée ( $EDC = 100\%$ ), donc la puissance de la pile sera égale à la puissance de la charge et la puissance de la batterie est nulle ( $P_{ba} = 0$  Watts).

Dans le cas où la puissance de la charge est supérieure à la puissance maximale de la pile ( $P_{ch} > P_{fcmax}$ ), [entre  $t = 0.73$  et  $t = 0.82$  secondes], donc la puissance de la pile sera égale 300 W ( $P_{fc} = P_{fcmax}$ ) et la puissance de la batterie est positive de 150W, alors la batterie en décharg .

Dans le cas où la puissance de la charge est inférieure à la puissance maximale de la pile ( $P_{ch} < P_{fcmax}$ ) [entre  $t = 0.82$  et  $t = 0.92$  secondes], et que la batterie n'est pas complètement chargée ( $EDC < 100\%$ ), donc la puissance de la pile sera égale 300 W ( $P_{fc} = P_{fcmax}$ ) et la puissance de la batterie est négative de -200W, alors la batterie en charge.

- Les courant obtenus sont montrées dans les figures suivantes :

Les (figures III.4, III.5 et III.6) donnent les allures des courants de référence que doit la source hybride doit suivre.

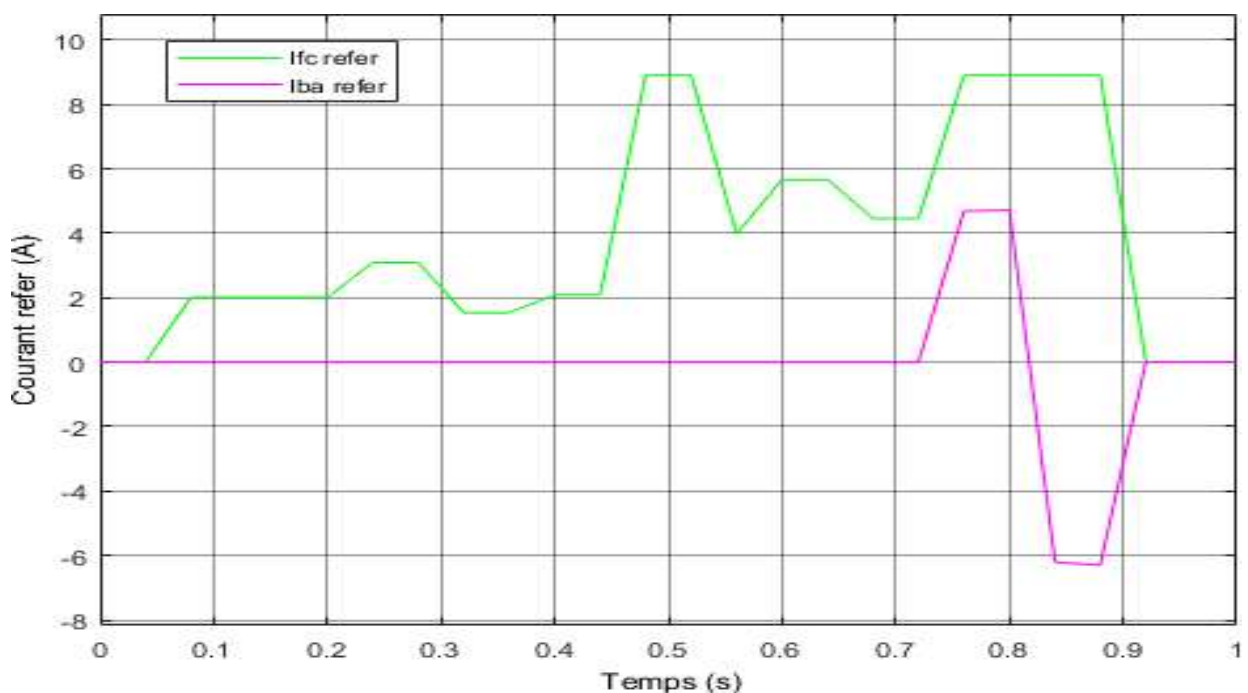


Figure III. 6: Courants de référence des piles et batteries



Comme la variation de la puissance consommée par la charge conduira à de la source hybride, les deux figures (III.5 et III.6), prouvent que le courant de chaque source suit bien sa référence fournit par la stratégie de gestion d'énergie.

La figure (III.5), présente le courant ( $I_{fc}$ ) des piles avec sa référence ( $I_{fc\text{réf}}$ ). Nous observons que le courant ( $I_{fc}$ ) suit bien sa référence ( $I_{fc\text{réf}}$ ).

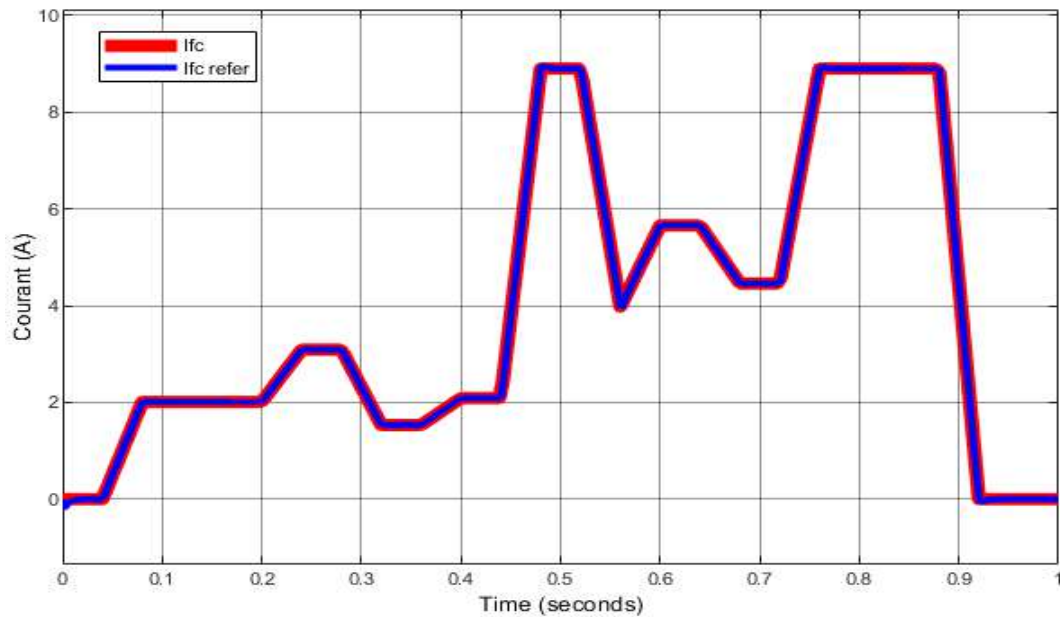


Figure III. 7: Courants des piles

Dans la figure III.6, sont présentées la courant de batterie ( $I_{ba}$ ) avec sa référence ( $I_{ba\text{réf}}$ ), on observe que la courant suit bien sa référence.

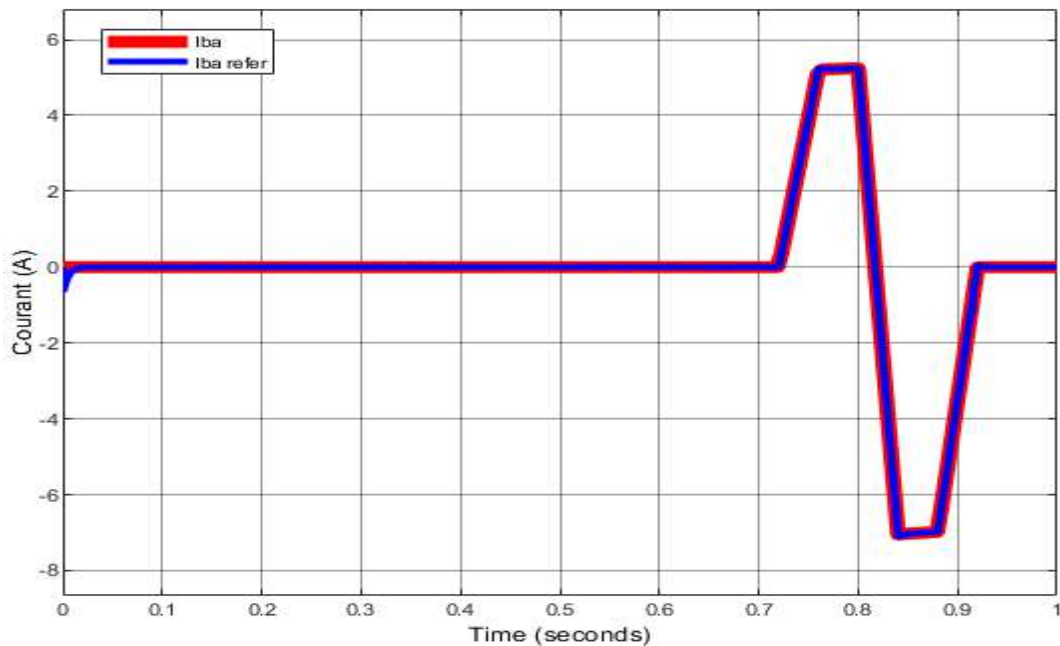


Figure III. 8: Courants des batteries

Les puissances obtenues sont présentées dans les figures suivantes :

Les deux (figures III.7 et III.8) démontrent que la puissance de chaque source suit sa référence fournit par la stratégie de gestion d'énergie.

La (figure III.7) présente la puissance ( $P_{fc}$ ) de pile avec sa référence ( $P_{fc\text{réf}}$ ), on observe que le courant suit bien sa référence.

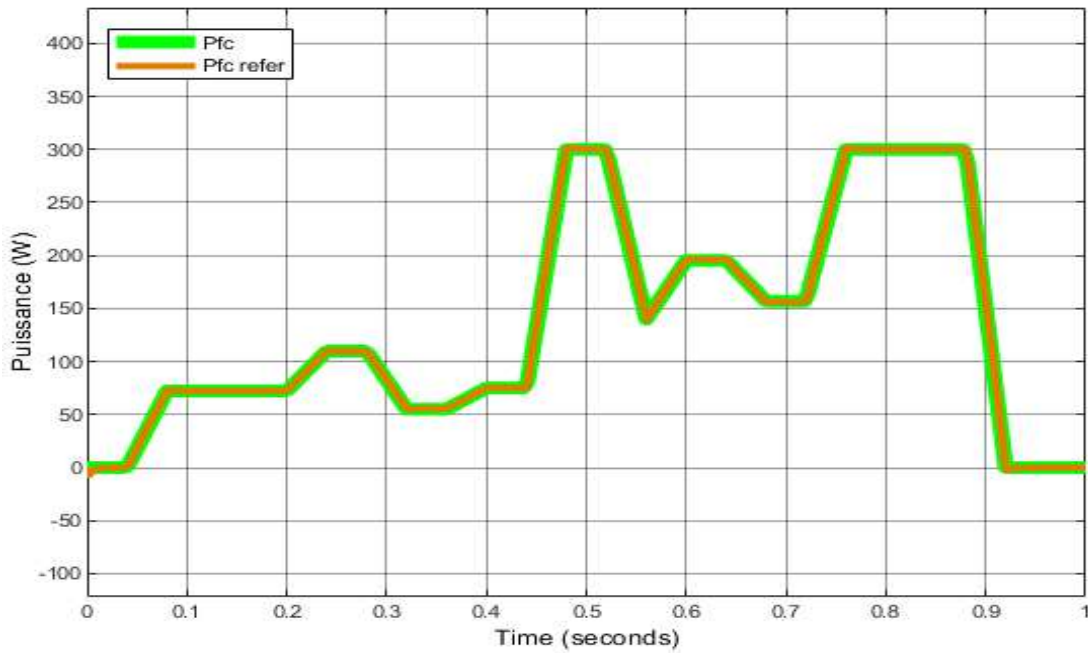


Figure III. 9 : Puissance des piles.

Dans la (figure III.8), sont présentées la puissance de batterie ( $P_{ba}$ ) avec sa référence ( $P_{ba\text{réf}}$ ), on observe que la puissance suit bien sa référence.

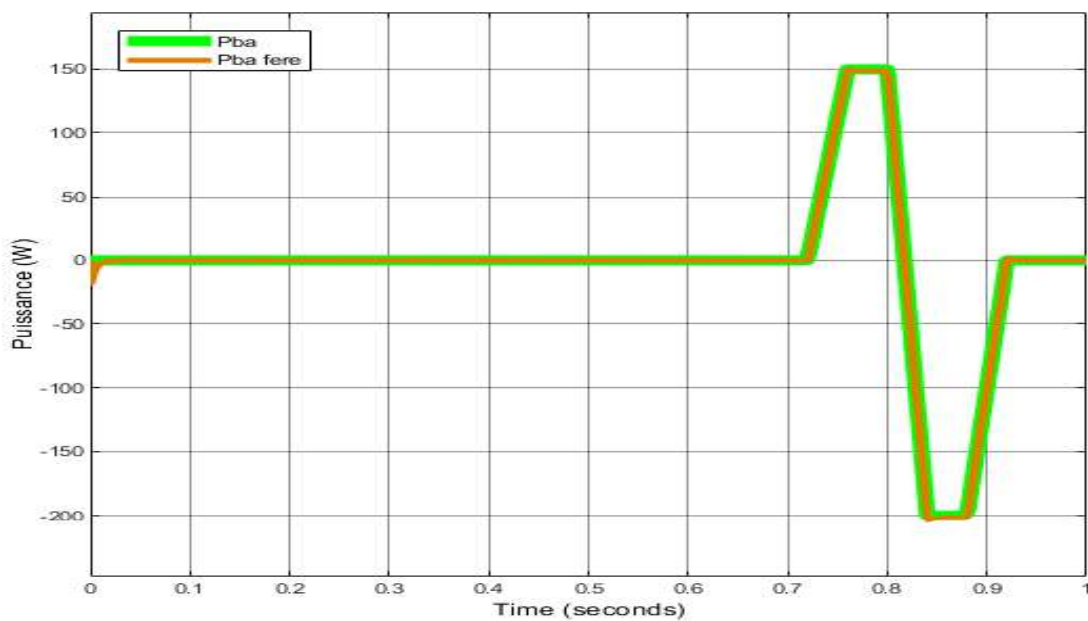
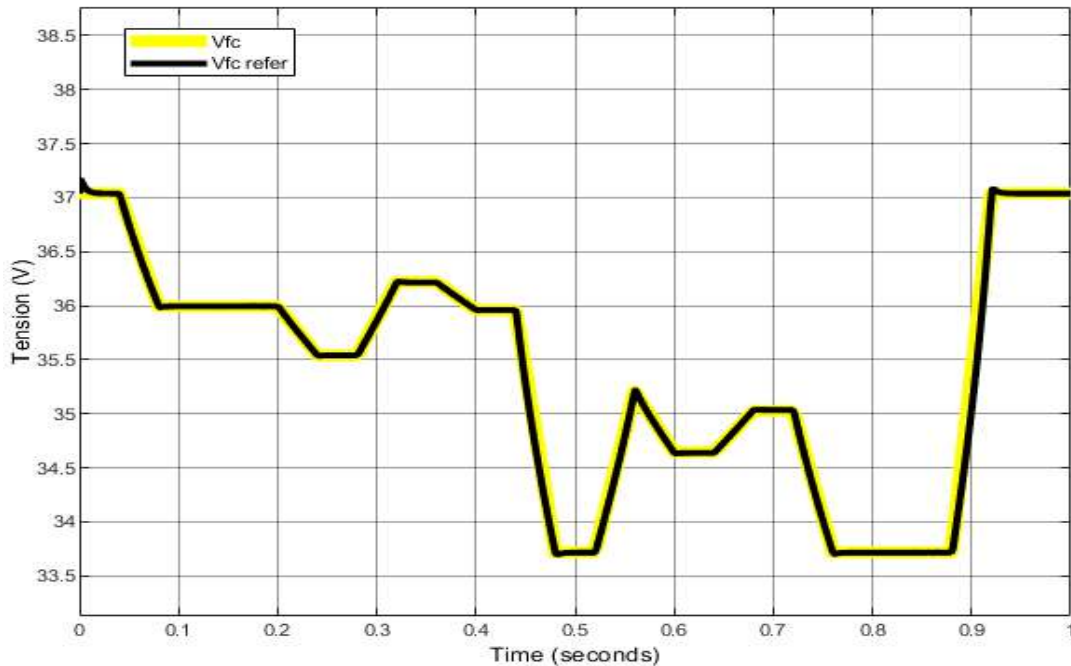


Figure III. 10 : Puissance des batteries

- Les tensions du système :



**Figure III. 11:** Tension des piles.

A partir de la (figure III.9), nous observons :

- Une variation décroissante de la tension ( $V_{fc}$ ) à partir de la valeur maximale de tension que peut délivrer les piles à combustible. Le sens de variation de la tension ( $V_{fc}$ ) est l'inverse du sens de variation du courant ( $I_{fc}$ ) (lorsque le courant augmente la tension décroît et vice-versa).
- Quelques zones où la tension reste constante. Cela est causée par le courant constant que délivrent les piles à combustible ; par exemple : entre 0.1 et 0.2 secondes

D'après les (figure III.10 et III.11) représentant la tension et l'état de charge des batteries, nous observons que celles-ci varient de la même manière. En effet :

- Lorsque le courant des batteries est positif : les batteries se déchargent entraînant la diminution de leur tension et état de charge.
- Quand le courant des batteries est négatif : les batteries se chargent entraînant l'augmentation de leur tension et état de charge.
- Lorsque le courant des batteries est nul : la tension et l'état de charge restent constants.

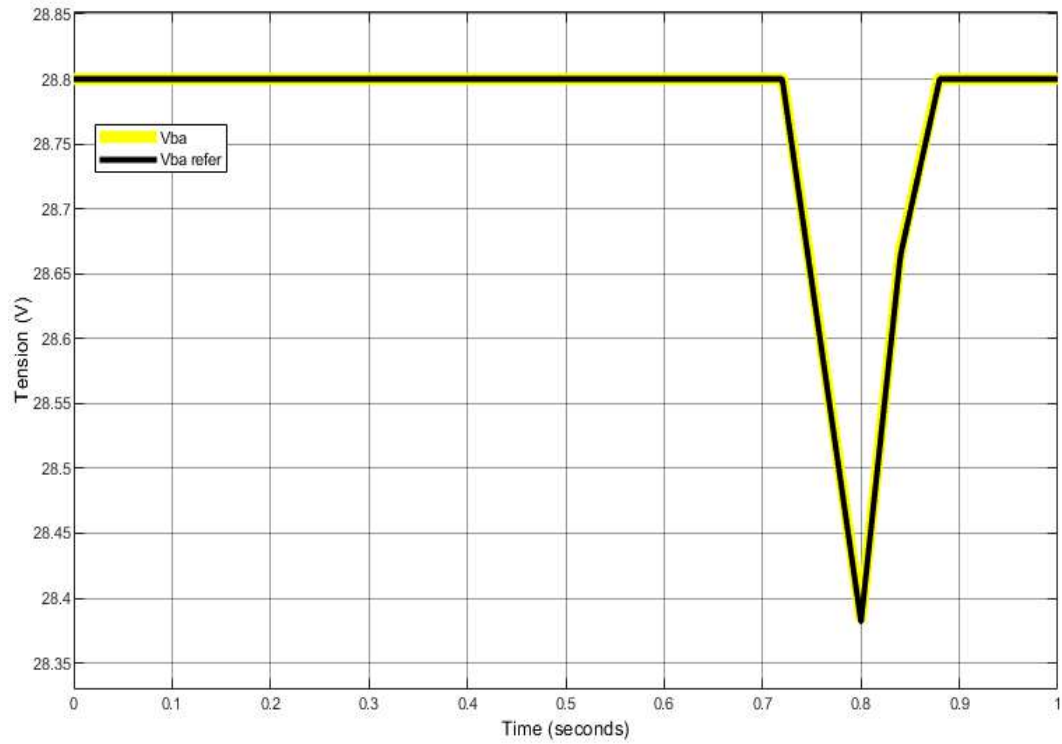


Figure III. 2 : Tension des batteries

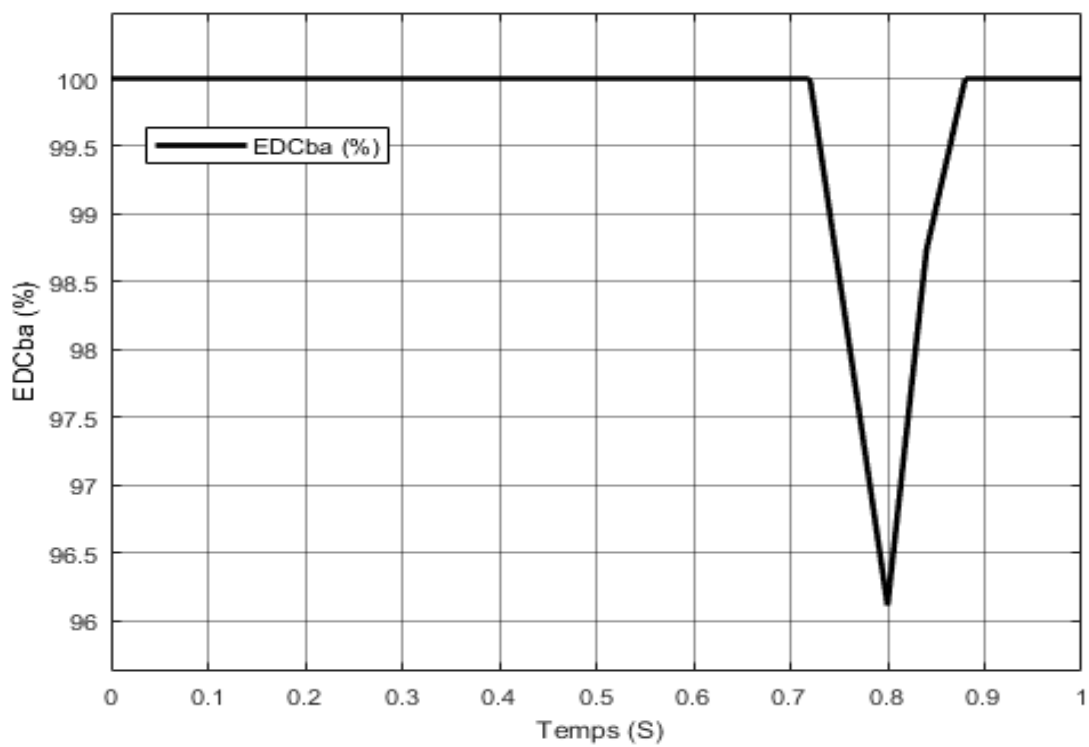


Figure III. 3: État de charge des batteries

### III.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé la gestion de l'énergie d'un système hybride autonome. Le système se compose d'empilements : le stack de piles à combustible qui sont considérés comme des sources principales, un stack de batteries lithium-ion utilisé comme une source secondaire. Pour la charge, elle a été modélisée par un profil de consommation journalier.

Selon les résultats obtenus, la source hybride permet de répondre aux besoins en puissance de la charge, et l'état de charge final des batteries est acceptable pour démarrer d'autres cycles de fonctionnement. Par conséquent, la durée de vie du système hybride autonome sera augmentée.



# Conclusion générale

# Conclusion générale

L'objectif principal de ce travail était la gestion d'énergie d'une source hybride autonome composé de deux sources : l'une, principale composée d'un stack de piles à combustible de type PEM, et l'autre secondaires constituées de stack de batteries au lithium ion.

Les deux sources d'énergie sont connectées au bus continu de sortie du système par convertisseurs statiques DC-DC d'interface : l'un Boost relié aux piles à combustible, l'autre Buck/Boost connectés aux stacks de batteries au lithium ion. Ces convertisseurs ont permis d'assurer les transferts d'énergie depuis les sources vers la charge et de la charge vers les éléments de stockage. Les résultats obtenus ont prouvé l'efficacité de l'algorithme proposé pour la gestion d'énergie et ont démontré la complémentarité entre les deux sources d'énergie à savoir : les piles à combustibles, batteries lithium ion. En fait :

- La source hybride permet de satisfaire les demandes en puissance de la charge.
- Les états de charge finaux des batteries et super condensateurs sont acceptables pour démarrer autres cycles de conduite. Ainsi, la durée de vie du système hybride autonome sera augmentée.



# Bibliographiques



## Bibliographiques

- [1] MEZZAI Sonia, TADJINE Katia « *Étude D'un Système Hybride (Eolien – Photovoltaïque)* » Mémoire de fin Cycle, Université Abderrahmane Mira-Bejaia, 2015.
- [2] S. khenfous, A. Kaabeche et S. Diaf « *Optimisation du dimensionnement d'un système hybride photovoltaïque/éolien par des méthodes méta heuristiques* », article (reçu le 10 juin 2017 - accepté le 30 juin 2017).
- [3] K.a.traoré, "gestion d'un système autonome hybride photovoltaïque", université du québec, juillet 2016.
- [4] MANSOURI Ali, MANSOURI Kamel « *Etude et simulation des performances des piles à combustible à hydrogène dans des applications statiques et dynamiques* », mémoire de fin d'études de master académique, université kasdi merbah ouargla, 2021/2022.
- [5] B. Tarek, S. Toufik « *Estimation de l'état de charge d'une batterie Li-ion utilis é dans un véhicule électrique* », mémoire de fin d'études de master académique, université kasdi merbah ouargla, 2021/2022.
- [6] PDF: <https://theses.hal.science/tel-01175993v1/document>.
- [7] Modélisation D'une Pile A Combustible De Type PEM Mémoire Présenté Pour L'obtention Du Diplôme De Master Académique Par: YOUCEFI Abdelhak. TELEMÇANI Belkacem
- [8] Cours disponible sur : [www.ulb.ac.be/infosciences/files/piles.pdf](http://www.ulb.ac.be/infosciences/files/piles.pdf).
- [9] Y. Abdelhak, T. Belkacem, « *Modélisation d'une pile à combustible de type PEM* » mémoire de fin d'études de master académique, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, 2016 / 2017.
- [10] P. THONTHONG, « *conception d'une source hybride utilisant une pile à combustible et des supercondensateurs* », thèse de doctorat, l'institut national polytechnique de lorraine, 2005.
- [11] B. WAHDAME, « *Analyse et optimisation du fonctionnement de piles à combustible par la méthode des plans d'expériences* », thèse de doctorat, université de technologie de Belfort Montbéliard et de l'université de France – Comté, 2006.
- [12] J. LACHAIZE, « *Etude des stratégies et des structures de commande pour le pilotage des systèmes énergétiques à Pile à Combustible (PAC) destinés à la traction* », thèse de doctorat, L'institut National Polytechnique de Toulouse, 2004.
- [13] I.SADLI ; « *modélisation par impédance d'une pile a combustible PEM pour utilisation en électronique de puissance* » ; thèse de doctorat, l'institut national polytechnique de lorraine ; 2006

- [14] M.ZANDI, « contribution Au Pilotage des sources Hybrides d'énergie électrique », thèse de doctorat, Université NANCY Institut National Polytechnique de LORRAINE, 2010.
- [15] An Li « Analyse expérimentale et modélisation d'éléments de batterie et de leurs assemblages – Application aux véhicules électriques et hybrides » L'UNIVERSITE CLAUDE BERNARD LYON 1 en 2013.
- [16] Akram Edahech « MODELISATION DU VIEILLISSEMENT ET DETERMINATION DE L'ETAT DE SANTE DE BATTERIES LITHIUM-ION POUR APPLICATION VEHICULE ELECTRIQUE ET HYBRIDE » L'UNIVERSITÉ BORDEAUX 1 en 2013.
- [17] MAZZI Yahia, « Estimation de l'état de charge d'une batterie lithium-ion utilisée pour les voitures électriques » mémoire de fin d'études de master académique, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, ( 2017- 2018).
- [18] P. Kurzweil and K. Brandt, “Secondary Batteries–Lithium Rechargeable Systems”, Encyclopedia of Electrochemical Power Sources, pp. 1-26, 2009.
- [19] BENAOUADJ Mahdi, “ Gestion de l'énergie d'un système hybride autonome pour application ‘ Smart Grid ‘ ”, Thèse de Doctorat d'université Mohamed Khider– Biskra, 04 / 06 / 2016.
- [20] Quentin Badey « Étude des mécanismes et modélisation du vieillissement des batteries lithium-ion dans le cadre d'un usage automobile » UNIVERSITÉ PARIS SUD 2012.
- [21] BCG research report.
- [22] Walid Hankache, “Gestion optimisée de l'énergie électrique d'un groupe électrogène hybride à pile à combustible”, Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 16 Décembre 2008.
- [23] Hattab Maker, “Optimisation et gestion d'énergie pour un système hybride : association Pile à Combustible et Supercondensateurs”, Thèse de Doctorat de l'Université de Technologie Belfort Montbéliard, 04 Novembre 2008.
- [24] M. Y. Ayad, M. Becherif, A. Aboubou and A. Henni, “Sliding Mode Control of Cell, Supercapacitors and Batteries Hybrid Sources for Vehicle Applications”, InTech, ISBN: 978- 953-307-162-6, pp. 87-109, 2011.
- [25] V. Boitier, C. Alonso, “Dimensionnement d'un Système Photovoltaïque”, CETSIS“2005, Nancy, 25-27 Octobre 2005.
- [26] 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”, Thèse de doctorat, de l'institut National Polytechnique de Toulouse, 20 Septembre 2004.

- [27] Amel Lachichi, ‘‘Modélisation et stabilité d’un régulateur hybride de courant Application aux convertisseurs pour pile à combustible’’, Thèse de Doctorat de l’Université de Franche-Comté, 24 Novembre 2005.
- [28] Fuel Cell Handbook, 7th Edition, EG&G Technical Services, Inc, November 2004.
- [29] James Larminie, Andrew Dicks, ‘‘Fuel Cell Systems Explained’’, 2nd Edition, ISBN: 978-0-470-84857-9, February 2003