

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE : Technologie

DEPARTEMENT: Electronique

N° : -15/D11/ELN40

-15/D11/ELN41



DOMAINE : Science et Technologie

FILIERE : GENIE ELECTRIQUE

OPTION : TECHNOLOGIE DES  
SYSTEMES ELECTRO-ENERGETIQUE

**Mémoire présenté pour l'obtention  
Du diplôme de Master Académique**

**Par: YOUCEFI Abdelhak**

**TELEMÇANI Belkacem**

**Intitulé**

**Modélisation d'une pile à combustible de type  
PEM**

**Soutenu devant le jury composé de:**

.....	Université de M'sila	Président
Mr Ballouti Adel	Université de M'sila	Rapporteur
.....	Université de M'sila	Examineur

**Année universitaire : 2016 /2017**

# Remerciements

Je remercie vivement Monsieur SAIGAA Djamel pour les immenses efforts afin de nous encadrer durant notre superbe formation, pour les nombreuses discussions que nous avons eu, malgré un emploi du temps chargé, pour sa sensibilité, son égard, le respect et la sympathie dont je fus témoin.

Je tiens à remercier Monsieur BALOUTI Adel pour avoir encadrer ce travail de mémoire, je le remercie pour le temps et les conseils qu'il n'a pas comptés, pour l'enthousiasme insatiable dont il fait preuve pour la recherche

J'adresse mes sincères remerciements au Monsieur BENCHOUCHE Walid pour avoir initié et soutenu mon travail et d'avoir fait preuve d'une patience et d'une attention toute particulière.

Je veux remercier également ma famille et mes amis pour leur soutien moral

# Dédicaces

Tout d'abords, je rends grâce à Allah "الله" pour toutes les bénédictions et la grâce de la réussite.

A ma chère mère, pour ses scarifies de puis qu'elle m'a mise au monde.

A mon cher père, qui m'a toujours soutenu et m'a aider à affronter les difficultés.

A tous mes chères sœurs et frères.

A mes tantes et mes oncles et mes grands-mères.

A tous ma famille.

Pour tous ceux qui ont fait pour que je puisse les honorer.

A tous mes amis et mes collègues.

A tous les enseignants du département d'électronique.

Je dédie ce modeste travail.

# SOMMAIRE

Introduction Générale.....	1
----------------------------	---

## Chapitre I: Généralité sur la pile à combustible

I.1 Introduction.....	2
I.2 Historique .....	2
I.3 Principe de fonctionnement .....	4
I.4 Les différents types de piles à combustibles .....	6
I.5 Constitution d'une pile à combustible de type PEM.....	8
• Electrodes.....	9
• Electrolyte.....	9
• Catalyseur.....	10
➤ Les catalyseurs du coté anode.....	10
➤ Les catalyseurs du coté cathode.....	11
• Plaque bipolaire.....	11
I.5.1 L'alimentation des piles en combustible .....	12
I.6 Systèmes pile à combustible embarquée .....	13
• Le conditionnement entrée-sortie cathode .....	14
• Le conditionnement entrée-sortie anode.....	14
• Le refroidissement et l'humidification.....	14
• La conversion et l'exploitation de l'énergie électrique.....	15
I.7 Applications des piles à combustibles .....	15
I.7.1 Applications portables.....	16
I.7.2 Applications stationnaires .....	16
I.7.3 Applications embarquées .....	16
I.8 Les rendements de fonctionnement des PAC.....	17
I.9 Les avantages et inconvénients des piles à combustible de type PEM .....	17
I.9.1 Les avantages .....	18
I.9.2 Les inconvénients .....	18
II.10 Conclusion.....	18

## Chapitre II: Modélisation et dimensionnement du stack à pile à combustible

II.1 Introduction.....	19
II.2 Modélisation de la PEMFC .....	19
II.2.1 Modèle de tension .....	20
➤ Tension de Nernst.....	20
➤ Polarisation d'activation (Charge transfert kinetics).....	21
➤ Polarisation ohmique.....	21
➤ Polarisation de concentration (Mass Transport) .....	22
II.3 Conclusion .....	24

## **Chapitre III: Simulation numérique**

III.1 Introduction.....	25
III.2 Programme de simulation par MATLAB.....	25
III.3 Résultats de simulation.....	26
III.3.1 Caractéristiques tension-densité de courant et puissance-densité de courant d'une cellule PEM.....	26
III.3.2 Rendement d'une cellule PEM.....	27
III.3.3 La tension de 25 cellules mises en série.....	27
III.3.4 Effet de la température sur la caractéristique de la cellule.....	28
III.3.5 Effet de la pression sur la caractéristique de la cellule.....	28
III.4 Conclusion.....	29
Conclusion Générale et Perspective.....	30



### Introduction

La nécessité de réduire les émissions de polluants, l'utilisation des ressources énergétiques disponibles de façon plus efficace et le besoin en énergies, a conduit à une attention accrue vers des solutions énergétiques alternatives auxiliaires ou autonomes (exemple : les piles à combustibles). La mise en œuvre de ces nouveaux systèmes dans des dispositifs électriques hybrides (par exemple : HPVFC) peut être une solution efficace pour répondre à la demande d'électricité, surtout dans les périodes de faible ensoleillement ou de forte demande de la charge.

Dans un système d'énergie HPVFC, l'électricité est produite par un générateur photovoltaïque pour répondre aux exigences d'une charge, Quand il y a un rayonnement solaire suffisant, la charge externe peut être alimentée entièrement par l'électricité photovoltaïque. Pendant les périodes de faible ensoleillement, l'électricité auxiliaire est nécessaire, un système d'énergie d'hydrogène formé par un électrolyseur, un système de stockage d'hydrogène, et une pile à combustible fonctionnent comme un générateur auxiliaire. Dans ces systèmes hybrides, l'hydrogène est produit par un électrolyseur, alimenté par le surplus d'énergie disponible à partir des sources primaires. La conception de ces systèmes s'appuie sur les batteries pour le stockage de l'énergie à court terme, tandis que l'hydrogène est utilisé pour le stockage de l'énergie à long terme pour une utilisation en temps par les piles à combustible. Ceci nécessite souvent le stockage et la conversion de l'énergie même complémentaires. Le stockage de l'hydrogène peut être une solution.

Dans ce travail on s'intéresse aux piles à combustibles et leurs caractéristiques électriques ainsi qu'aux différentes technologies utilisées. Nous y présentons également une modélisation d'une pile de type Polymère Electrolyte Membrane (PEM).

Ce mémoire est divisé en trois chapitre, le premier chapitre est consacré à la présentation des piles à combustibles et leurs caractéristiques électriques et chimiques ainsi que les différentes technologies utilisées.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation statique de la pile à combustible de type PEM.

Enfin le troisième chapitre qui présente la simulation d'une pile de type PEM qui prend en compte l'effet de la température et de la pression de travail sur le rendement de la pile.

# **Chapitre I**

## **Généralité sur la pile à combustible**

## I.1 Introduction

Une pile à combustible (PAC) est un dispositif électrochimique qui permet de convertir directement l'énergie chimique interne d'un combustible en énergie électrique sans aucun processus thermique ou mécanique.

## I.2 Historique

La découverte du principe de la pile à combustible remonte à 1839. Toutefois elle ne resta pendant de nombreuses années qu'une simple curiosité scientifique, son utilisation n'étant alors pas une nécessité.

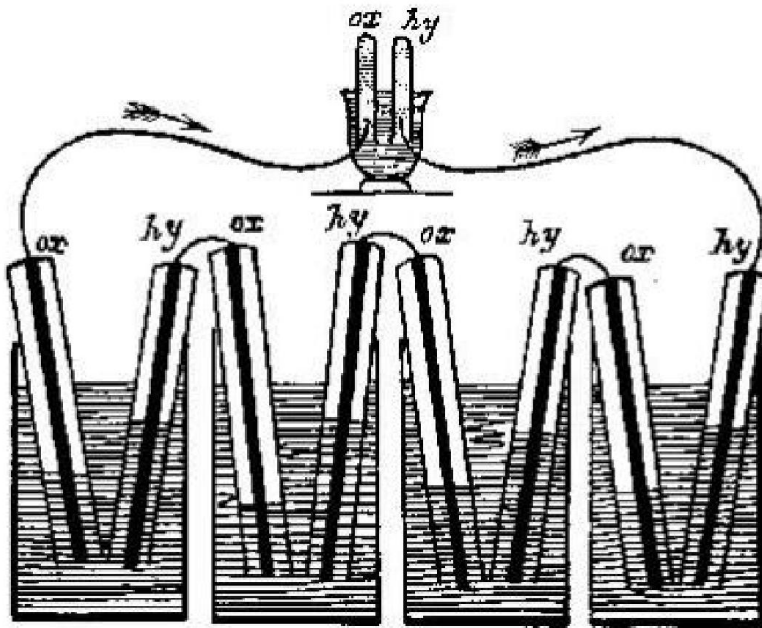
Cette découverte s'est effectuée en plusieurs étapes. En effet, à la période des précurseurs succéda un relatif abandon de près d'un siècle avant une « redécouverte » vers la fin du 20e siècle de cette technique, relancée par les préoccupations environnementales liées à l'aggravation de l'effet de serre.

Le premier pas vers la pile à combustible a été réalisé en 1806 par le chimiste et physicien anglais Sir Humphry Davy qui en réalisant l'électrolyse de l'eau pure obtient distinctement de l'hydrogène et de l'oxygène dont il constate qu'ils sont les seuls produits.. L'électrolyse de l'eau consistant, à l'aide d'un courant électrique (décomposer l'eau en hydrogène et oxygène gazeux), certains scientifiques se sont alors intéressés à effectuer le processus inverse afin de générer un courant électrique à partir de l'hydrogène et de l'oxygène.

Néanmoins, la découverte du principe de la pile à combustible n'intervient qu'en 1839 quand le scientifique suisse Christian Friedrich Schönbein observe en réalisant une électrolyse que lorsqu'il coupe l'alimentation, les produits donnent lieu pendant quelques secondes à un courant électrique de sens inverse à celui appliqué pour réaliser l'expérience.

En 1839, lors d'une conférence scientifique à Birmingham, Schönbein rencontre l'avocat et chimiste anglais Sir William Robert Grove qui travaillait à l'époque sur les batteries électriques. Par la suite, les deux hommes entretiennent une correspondance et mettent en commun leurs découvertes.

Ceci débouche sur la célèbre expérience de Grove avec une pile à combustible: il s'agissait d'une cellule hydrogène-oxygène avec des électrodes de platine poreux et de l'acide sulfurique comme électrolyte. Nous sommes en 1845, Grove génère un courant sur le principe inverse de l'électrolyse de l'eau, c'est la première pile à combustible.

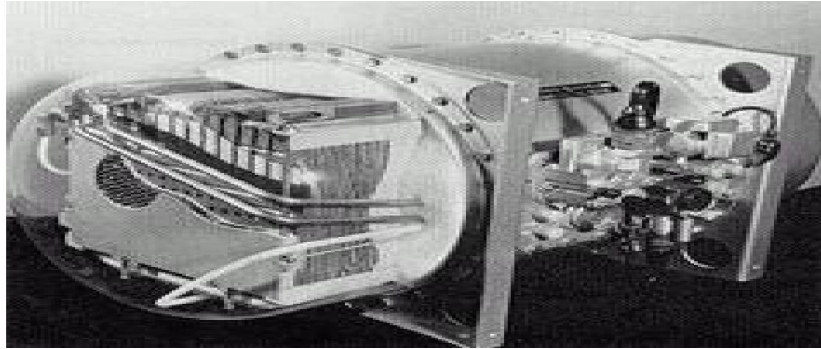


**Fig. I.1: L'expérience de Sir William Grove /ClubPac/. [1]**

Par la suite, la pile à combustible resta plus ou moins en latence durant près d'un siècle et après quelques légères améliorations par différents scientifiques du début du 20ème siècle, c'est Francis T. Bacon qui en 1935 enclenche le progrès le plus important en réalisant un prototype de pile à combustible remplaçant l'électrolyte acide par un électrolyte alcalin. L'avantage de ce dernier est d'être moins corrosif pour les électrodes. Cette pile à combustible aboutira en 1953 sur la création d'un premier générateur électrique de 1kW.

Le principe physique est établi, des dizaines de laboratoires et d'industriels vont se lancer dans les piles à combustible.

Néanmoins les coûts restant très élevés, ils sont un obstacle important à son utilisation, hormis pour la NASA qui peut se permettre de tels investissements. Ainsi elle l'utilise, avec succès, comme générateur électrique pour les missions Gemini et Apollo en 1963 et 1968.



**Fig. I.2: Projet Gemini. [1]**

Dans les années 1980 alors que les Etats-Unis et le Japon vont poursuivre de manière très active leurs recherches, l'Europe (à l'exception de l'Allemagne) va se désintéresser de ces travaux.

Ainsi, depuis sa découverte la pile à combustible a connu de nombreuses améliorations (perfectionnement des électrodes, optimisation de la température de fonctionnement ...), mais le principe reste le même. [1]

### **I.3 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 sa fonctionnement.

Dans le coté de l'anode l'hydrogène ce décompose selon la demi réaction (l'oxidation de l'hydrogène) :



Il ya libération de deux electrons qui vont circulé dans l'électrode vers la charge extérieure. Les ions hydrogène  $\text{H}^+$  ou proton vont migré vers la cathode à travers l'électrolyte. Les electrons passent ensuite par le circuit extérieure er arrivent à la cathode.

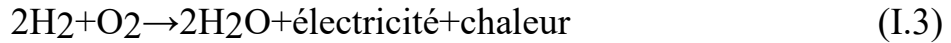
Dans le coté de la cathode l'oxygène ce decompose selon la demi reaction (la reduction de l'oxygène):



On suparant ces deux demi reactions pout un electrolyte non conducteur d'électrons.

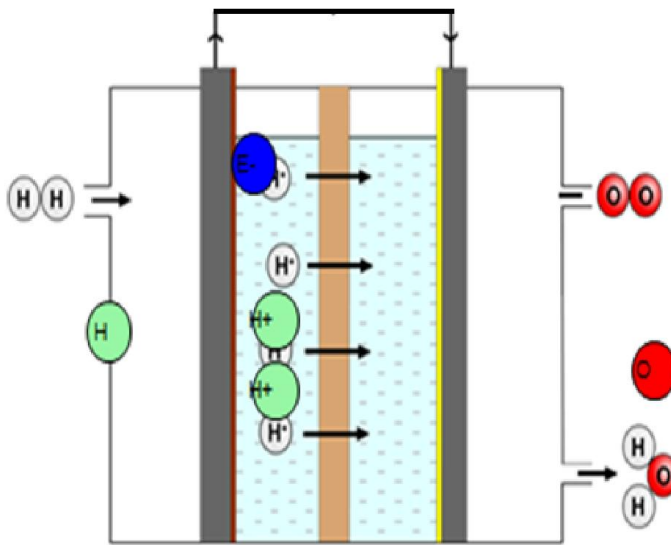
Les electrons liberés par la decomposition de l'hydrogène passent par la circuit extérieure, par contre les ions  $\text{H}^+$  (les protons) peuvent traverser l'électrolyte.

Le bilan global de la réaction ce produisent dans une pile à combustible est:



L'eau formé est un liquide dans les conditions normal de temperature et pression ( $0\text{C}^\circ$  et 1 atm ou 273k et 1013 pa).

La fig.I.3 montre le principe de fonctionnement d'une pile à combustible:



**Fig. I.3: schéma de fonctionnement d'une pile à combustible. [2]**

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.[2]

### I.4 Les différents types de piles à combustible

On distingue plusieurs types de piles à combustible et on les classe 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 Methanol Fuel Cell) [3]

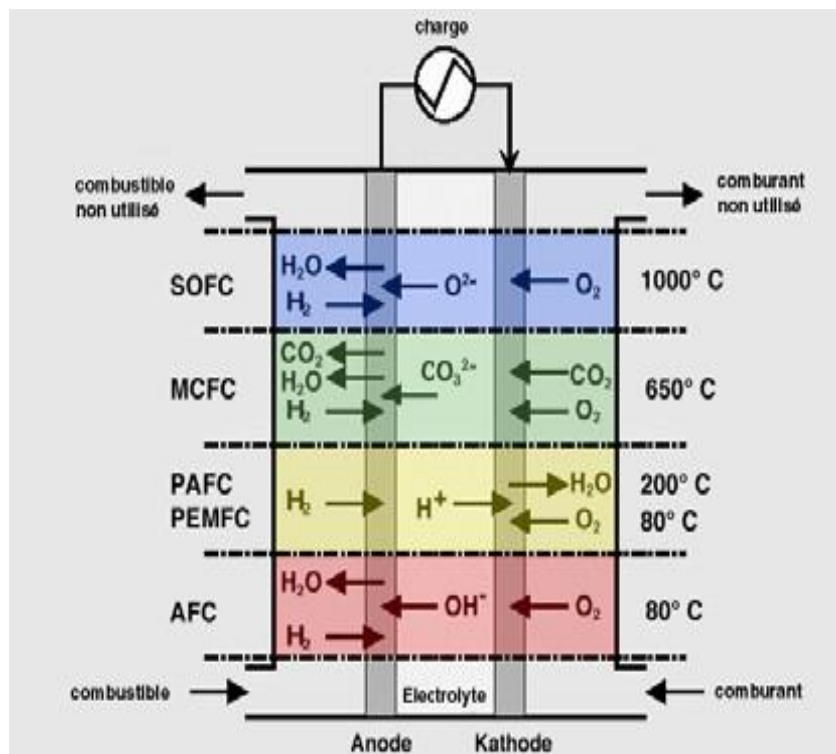


Fig. I.4: Différents types des PACs. [3]

## Chapitre I: Généralité sur la pile à combustible

	AFC	PAFC	PEMFC	DMFC	MCFC	SOFC
	Basse température				Haute température	
Température	50à250°C	150à220°C	70à100°C→ 200°C	70-90°C	600à800°C	700à1050°C
Electrolyte	Potasse(KOH) ) liquide	Acide phosphorique liquide	Membrane en Polymère solide	Membrane en polymère solide	Sel de Carbonate fondu liquide	Céramique Solide
Combustibles Possibles	Hydrogène	Hydrogène Gaz naturel (reformage)	Hydrogène	Méthanol	Hydrogène, Gaz naturel, Méthanol...	Hydrogène, Gaz naturel, Méthanol,...
Gamme de Puissance	1W à 100KW	200 KW à 100 MW	1W à10MW	1W à Plusieurs KW	500 KW à10 MW	1 KW à 100 MW
Rendement Electrique	55-60%	35-45% +75% en cogénération	30-45%		50-60%	50-55% 70% en cogénération
Applications	Spatial Défense, Equipement s portables	Stationnaire, Cogénération transport	Spatial transport, Stationnaire, Equipement portable	Transport, Equipement s portable	Stationnaire, Transport, Cogénéra- tion, production décentralisé	Stationnaire, cogénération
Principaux Constructeurs	ZEVCO IFC	IFC(ONSI) FUJI SIEMENS	BALLARD NUEVERA H-POWER AXANE* HELION* (*constructeurs Français)	SIEMENS HITACHI SMART FUEL CELL	MC- POWER ERC	SIEMENS WESTIGH- OUSE SULZER
Etat du marché	Commercial- isée	commercialisée	Commerciali- sée R&D	Commercia- lisée R&D	R&D	R&D exrémentale

**Tab. I.1: Différents types de piles à combustible. [4]**

La figure (Fig.I.5) présente les réactions à l'anode et à la cathode. Les PAC sont groupées en fonction du type d'ion qui assure le transfère de charge.

Systèmes	Anode	Electrolyte	Cathode	Température
AFC	$H_2 + 2(OH)^- \rightarrow 2H_2O + 2e^-$	$\leftarrow OH^- \leftarrow$	$\frac{1}{2} O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2(OH)^-$	60-80 °C
PEMFC PAFC DMFC	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	$\rightarrow H^+ \rightarrow$	$\frac{1}{2} O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$	60-220 °C
MCFC	$H_2 + CO_3^- \rightarrow H_2O + CO_2 + 2e^-$ $CO + CO_3^- \rightarrow 2CO_2 + 2e^-$	$\leftarrow CO_3^{2-} \leftarrow$	$\frac{1}{2} O_2 + CO_2 + 2e^- \rightarrow CO_3^-$	600-660 °C
ITSOFC SOFC	$H_2 + O^- \rightarrow H_2O + 2e^-$ $CO + O^- \rightarrow CO_2 + 2e^-$ $CH_4 + 4O^- \rightarrow 2H_2O + CO_2 + 8e^-$	$\leftarrow O^{2-} \leftarrow$	$\frac{1}{2} O_2 + 2e^- \rightarrow O^-$	600-1000 °C

Fig.I.5: réactions chimiques des différents piles. [5]

### I.5 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.6) [6]

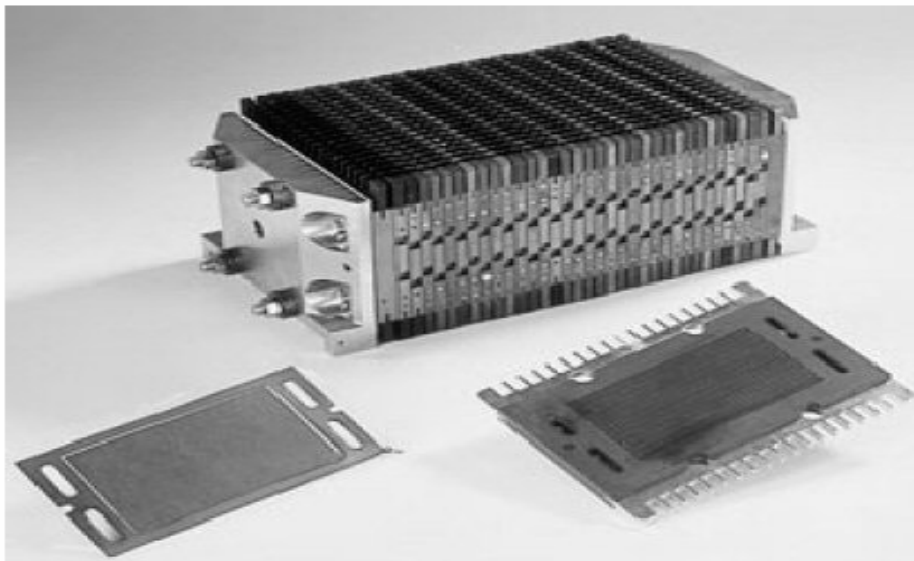
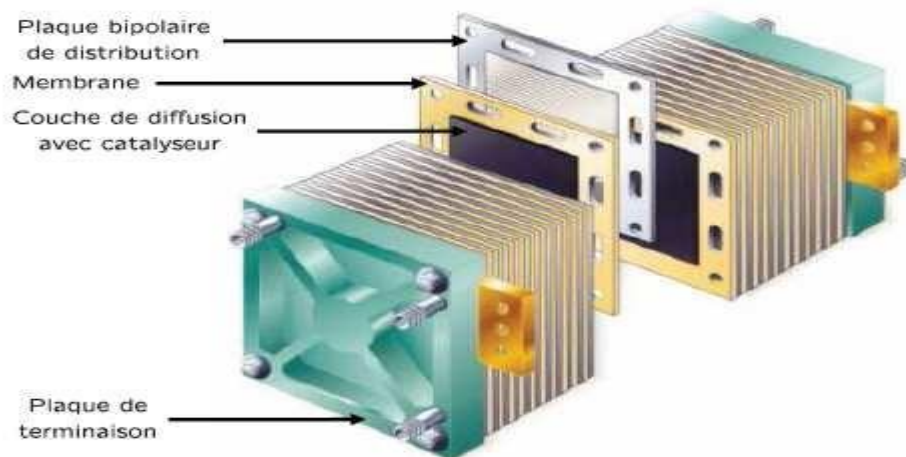


Fig.I.6: 'Stack' d'une pile à combustible de type PEMFC. [6]

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



**Fig.I.7:** Structure d'un empilement des cellules PEMFC (Electro Encyclo). [6]

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. [6]

### • Les électrodes

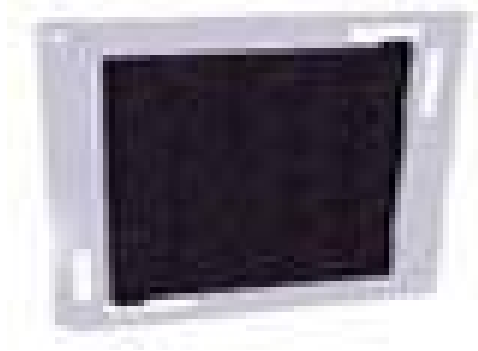
Les électrodes sont le siège des réactions chimiques mettant en jeu des réactifs (hydrogène ou oxygène par exemple) qui sont consommés au fur et à mesure qu'ils diffusent dans l'électrode, ils ont plusieurs fonctions:

- ✓ Supporter le catalyseur finement divisé et permettre son contact avec les gaz.
- ✓ Permettre aux espèces protoniques de se déplacer depuis les sites catalytiques d'oxydation de l'hydrogène vers les sites où l'oxygène est réduit grâce à la présence de polymère ionique.
- ✓ Evacuer les électrons des sites catalytiques anodiques et redistribuer ces électrons sur les sites catalytiques cathodiques. [6]

### • Electrolyte

L'électrolyte en polymère solide est la caractéristique distinctive d'une pile à combustible de type PEM. L'électrolyte est une fine membrane d'une épaisseur de 50 à 175  $\mu\text{m}$ . 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. Le 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.8).



**Figure I.8:** Membrane DuPont. [7]

En outre, certains fabricants de piles à combustible comme Ballard ont développé leurs propres membranes. [7]

- **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). [6]

- **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. [6]

### ➤ Les catalyseurs du côté cathode:

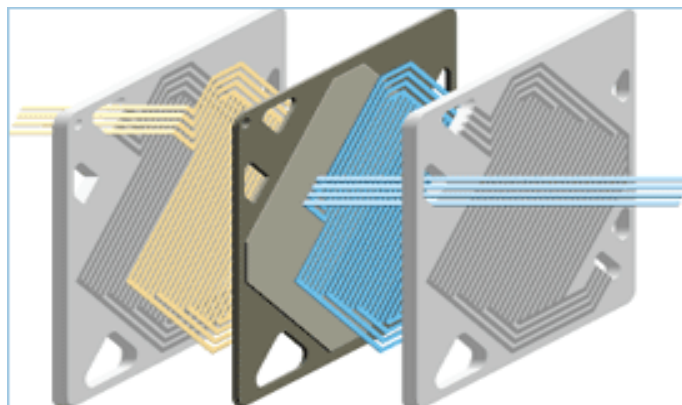
Pour les piles de basse et moyenne température, on utilisera aussi des métaux précieux et certains métaux de transition usuels (Chrome, Nickel), ou bien du charbon actif avec de l'or ou de l'argent. Pour les piles de haute température, on peut utiliser soit du Nickel fritté ou des oxydes mixtes. La réaction 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. [6]

### • Plaque bipolaire

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

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



**Fig I.9:** Plaque bipolaire. [6]

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. Pour réduire ce coût, deux autres types de plaques bipolaires ont été mis au point.

- Les plaques bipolaires à base de composites organiques. Ces plaques reposent sur l'utilisation de charges (carbone, graphite...) dispersées dans un matériau thermoplastique ou thermodurcissable. Ces charges vont donner aux plaques bipolaires la conductivité électrique nécessaire à la collecte du courant et le liant polymère leur bonne tenue mécanique nécessaire à l'assemblage des différents éléments. L'intérêt majeur réside d'une part dans le faible coût des matières de base et d'autre part dans le fait que les canaux de distribution peuvent être obtenus directement par moulage du polymère chargé sur une empreinte sans phase ultérieure d'usinage.

- Les plaques bipolaires à base de métaux et alliages, et particulièrement les aciers inoxydables. Celles-ci présentent un ensemble de propriétés (tenue mécanique, étanchéité, conductivité électrique, aptitude à la mise en forme et l'assemblage par des procédés de production de masse) qui en font des candidates de choix pour la conception et la réalisation de plaques bipolaires compactes, légères et bon marché. Leur densité supérieure à celle du graphite impose de les utiliser sous forme de feuilles minces, facilement mises en forme par emboutissage. Dans ces conditions, l'évacuation des calories et le contrôle de la température du module en fonctionnement peuvent être assurés avec précision par circulation d'un fluide de refroidissement interne. [6]

### **I.5.1 L'alimentation des piles en combustible**

Les piles fonctionnent essentiellement par l'hydrogène comme combustible, ou dans certains cas avec un mélange hydrogène monoxyde de carbone. L'intégration d'une unité de reformage dans le système, permettrait l'utilisation d'autres combustibles, tels que le gaz naturel et des hydrocarbures légers. L'unité de reformage permet de produire un gaz riche en hydrogène à partir d'un composé hydrocarboné (méthanol, éthanol, méthane, essence ....) et d'air et/ou d'eau. On distingue deux systèmes de production de l'hydrogène au sein d'une pile, soit le reformage interne pour les piles fonctionnant à haute température, MCFC et SOFC, soit le reformage externe pour les piles fonctionnant à des basses et moyennes températures, PEMFC et PAFC. [5]

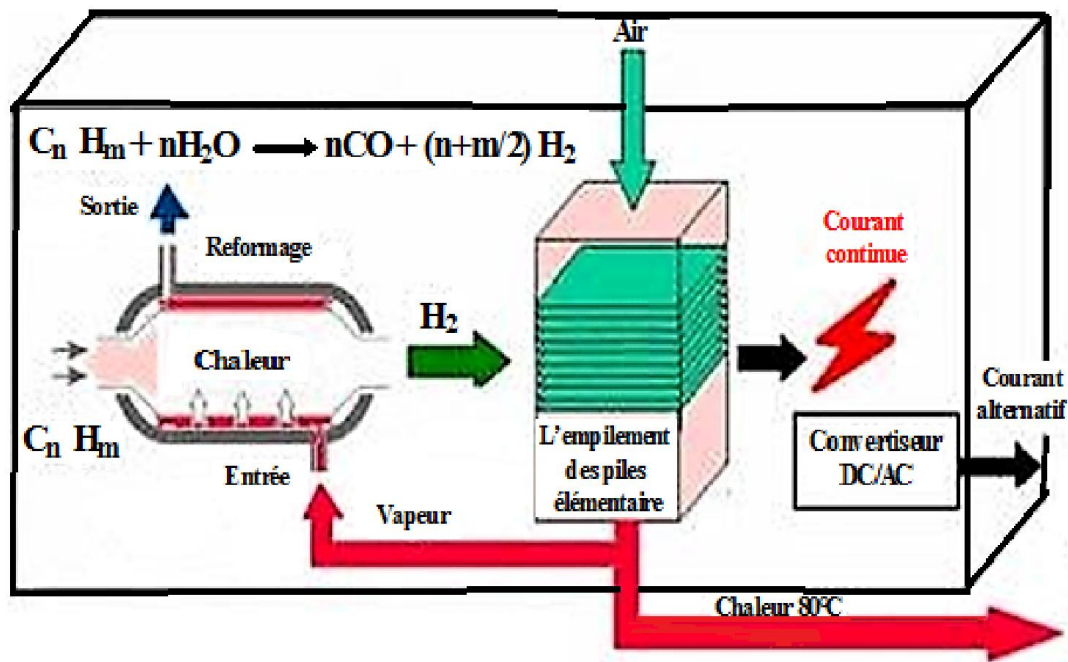


Fig.I.10: Schéma des PAC fonctionnant à haute température et à reformage interne de l'hydrogène. [5]

### I.6 Système pile a combustible embarquée

Le système ou générateur PAC se compose donc de la pile et de composants auxiliaires destinés à la faire fonctionner. La figure ci-dessous fait apparaître un exemple de schéma relatif à un système PAC embarqué. [8]

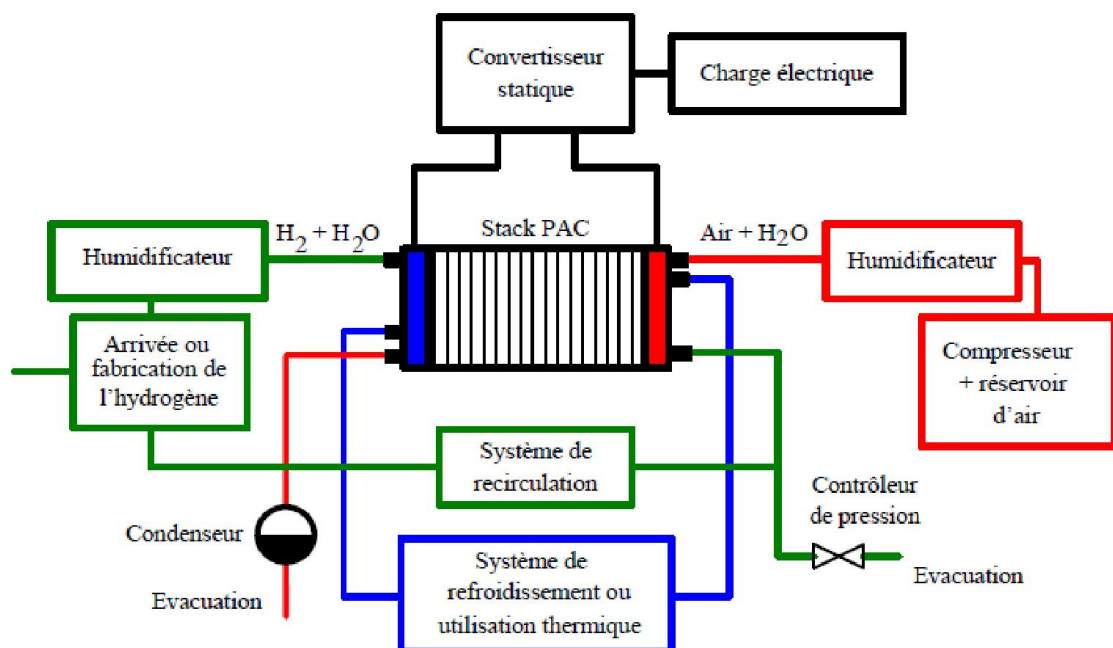


Fig.I.11: Schéma illustrant les différents éléments d'un système PaC. [8]

Les auxiliaires assurent notamment l'approvisionnement des réactifs, leur conditionnement, l'évacuation des produits et de la chaleur, la conversion et l'exploitation de l'énergie électrique. Il est ainsi possible de décomposer le système PàC en plusieurs sous-systèmes assurant ces fonctions de base au sein d'un véhicule. [8]

- **Le conditionnement entrée-sortie cathode**

La PàC peut être alimentée soit directement en oxygène pur stocké sous pression dans un réservoir, soit en air. Dans ce cas, l'air est fourni au moyen d'un compresseur ou d'une soufflante. Le choix de la pression de fonctionnement a une influence sur le rendement de la conversion électrochimique, sur le procédé d'humidification des réactifs et sur la consommation en énergie du compresseur. Un fonctionnement à haute pression permet d'obtenir de plus fortes densités de puissance pour la pile ; il facilite aussi la gestion hydrique et thermique. L'utilisation d'une turbine de détente en sortie cathode peut éventuellement permettre de récupérer une partie de l'énergie de compression. Un fonctionnement à basse pression conduit au niveau de la pile à un rendement en tension moins bon et oblige à augmenter la capacité de l'ensemble humidification / condensation. Par contre, à basse pression, la consommation du compresseur est réduite. L'air sort de la cathode généralement saturé d'humidité et en présence d'un flux d'eau liquid. [9]

- **Le conditionnement entrée-sortie anode**

Le combustible utilisé au sein de la pile PEM est l'hydrogène. Il peut être stocké dans un réservoir ou bien produit à partir d'un hydrocarbure, généralement du méthanol, au moyen d'un reformeur. Une alimentation en hydrogène pur permet l'optimisation de la quantité d'énergie embarquée: il est ainsi possible de faire réagir au moins 90 % de l'hydrogène embarqué, l'hydrogène non consommé correspondant à des purges. Le circuit hydrogène peut intégrer une boucle de re-circulation (avec pompe). Des humidificateurs et condenseurs peuvent aussi être mis en oeuvre. [9]

- **Le refroidissement et l'humidification**

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

Dans une pile PEM, il n'est guère envisageable d'effectuer des échanges de chaleur entre les sources et les puits de chaleur : ainsi, la chaleur due à la réaction dans la pile, maintenue à une température souvent inférieure à 80 °C environ, ne permet-elle pas d'humidifier les réactifs. Le circuit de refroidissement d'un système PàC destiné à une application automobile est souvent complexe; il peut être scindé en plusieurs circuits. La stratégie de refroidissement des stacks est beaucoup discutée et aucune solution universelle n'a encore été trouvée. Bien que la PàC soit un générateur à haut rendement, l'énergie thermique à évacuer n'est pas négligeable.

La contribution des flux des gaz à l'évacuation de la chaleur étant très faible, un système de refroidissement doit dans la plupart des cas être intégré au stack. Le problème du refroidissement de la pile peut cependant être envisagé en fonction du niveau de puissance. Pour des piles dont la puissance maximale est environ 1 kW, un refroidissement par air (convection) peut être effectué. Pour des piles dont la puissance est supérieure à 1 kW, le refroidissement est généralement réalisé par un fluide. Nous avons vu qu'il était impératif de préserver la charge en eau dans la membrane de la pile. Il convient donc souvent d'humidifier les gaz avant leur entrée dans le stack. [9]

- **La conversion et l'exploitation de l'énergie électrique**

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

Tous les auxiliaires, s'ils sont indispensables au fonctionnement de la pile, n'en sont pas moins des consommateurs d'énergie parasitant directement la production de la pile. Ces organes peuvent représenter jusqu'à 60% en masse et en volume du système et une dépense énergétique de l'ordre de 20%. [9]

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

On distingue trois types d'applications des piles à combustible (applications portables, stationnaires et embarquées). [9]

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

Celles-ci incluent le téléphone mobile d'une puissance moyenne de l'ordre de 400 mW et l'ordinateur portable d'une puissance moyenne de 10 W.

Ces applications connaissent une très forte croissance et les recherches les plus importantes sont axées sur l'utilisation d'une pile à combustible chargeant une petite batterie qui assure mieux l'apport d'énergie lors des pics d'émission. 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 terme de coût, la référence est celle de la meilleure batterie actuelle soit environ 0,80 €/Wh. [9]

### **I.7.2 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. [9]

### **I.7.3 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. [9]

### I.8 Les rendements de fonctionnement des PAC

En comparaison avec les moteurs à combustion interne et les autres systèmes de production de puissance (turbine à gaze, etc.), les piles à combustible ont un rendement énergétique très élevé. La figure I.12 présente une comparaison des performances des différents systèmes de production de puissance. [5]

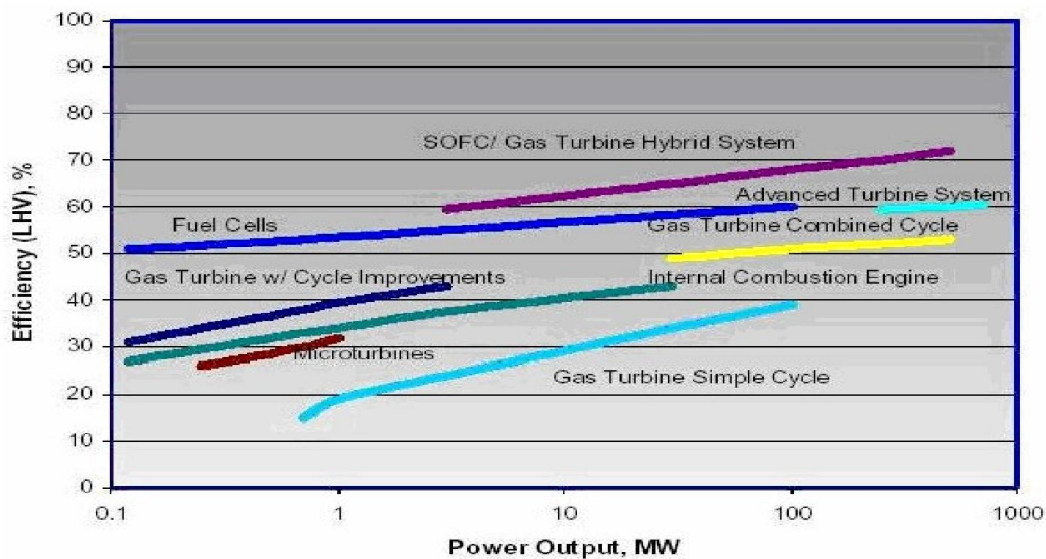


Fig. I.12: Comparaison de la performance des PAC par rapport aux autres systèmes de production de puissance. [5]

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. [5]

### I.9 Avantages et inconvénients des piles à combustible de type PEM

On a plusieurs avantages et inconvénients à propos les 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. [5]

- **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 inconvénient sont:

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

### **I.10 Conclusion**

Dans ce chapitre on s'est intéressé aux piles à combustible et principalement aux piles PEM. On a abordés 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.

## **Chapitre II**

# **Modélisation et dimensionnement du stack à pile à combustible**

## Chapitre II: Modélisation et dimensionnement du stack à pile à combustible

II.1 Introduction.....	19
II.2 Modélisation de la PEMFC .....	19
II.2.1 Modèle de tension .....	20
➤ Tension de Nernst.....	20
➤ Polarisation d'activation (Charge transfert kinetics).....	21
➤ Polarisation ohmique.....	21
➤ Polarisation de concentration (Mass Transport) .....	22
II.3 Conclusion .....	24

## Chapitre II: Modélisation et dimensionnement du stack à pile à combustible

### II.1 Introduction:

Dans ce chapitre on s'intéresse à la modélisation statique, et dynamique de la pile à combustible PEMFC. Ce type de pile retient notre attention pour trois raisons essentielles :

1) Sa température de fonctionnement relativement basse laisse envisager une technologie simplifiée pour assurer un démarrage rapide et une évacuation aisée de la chaleur produite à température ambiante.

2) Elle est, ensuite, insensible à la présence de CO<sub>2</sub> dans l'air, contrairement à la filière alcaline.

3) Enfin elle est de technologie (tout solide) et donc peut à la fois prétendre à des durées de vie supérieures aux piles à électrolyte liquide (pas de pièces mobiles au sein du convertisseur) ainsi qu'une industrialisation plus aisée : ceci permet d'envisager un coup prospectif compatible avec le marché visé, d'autant qu'elle offre une compacité sensiblement supérieure à celle des autres filières. C'est pour toutes ces raisons que nous avons choisi d'étudier l'utilisation d'une pile PEMFC dans notre application.

Dans une pile à membrane échangeuse de protons, le combustible brûlé est l'hydrogène, le comburant et l'oxygène, en général prélevé de l'air ambiant, le produit de la réaction chimique étant l'eau. L'hydrogène utilisé est soit, stocké dans des bouteilles de gaz comprimé ou dans des hydrures métalliques, soit produit par reformage à l'eau de différents combustibles: gaz naturel (CH<sub>4</sub>), charbon, méthanol, propane....

### II.2 Modélisation de la PEMFC:

Pour les piles à combustible avec un électrolyte conducteur de protons (PEMFC), l'hydrogène est oxydé à l'anode et les protons sont transportés à travers la membrane vers la cathode selon la réaction:



Et à la cathode, l'oxygène est réduit selon la réaction:



Les électrons circulent par le circuit externe durant ces réactions. Une fois arrivés à la cathode, les protons se recombinent avec les ions d'oxygène pour former de l'eau selon la réaction:



## Chapitre II: Modélisation et dimensionnement du stack à pile à combustible

### II.2.1 Modèle de tension:

Il existe un grand nombre de modèles quasi statiques pour décrire la réaction chimique présente dans une cellule de pile à combustible. Dans le cadre de cette étude, le modèle d'évolution de la tension choisi est issu des travaux présentés par Amphlett. [10]

Ce modèle est décrit en utilisant la combinaison des lois élémentaires et des modèles empiriques. Dans le développement des modèles élémentaires, les transports de matière sont pris en compte via les équations de Maxwell. Les potentiels d'équilibre thermodynamique sont définis en utilisant l'équation de Nernst. Les surtensions d'activation sont calculées par les équations de Tafel. [10] La résistance interne est déterminée par les équations de Nernst-Planck. [2] En utilisant la loi d'Ohm, nous pouvons exprimer la tension de cellule par :

$$V_{FC} = E_{\text{nernst}} - V_{\text{act}} - V_{\text{ohm}} - V_{\text{conc}} \quad (\text{II.4})$$

Les pertes, appelées souvent polarisation, proviennent principalement de trois sources: la polarisation d'activation ( $V_{\text{act}}$ ), la polarisation ohmique ( $V_{\text{ohm}}$ ) et de la polarisation de concentration ( $V_{\text{conc}}$ ). Ces pertes entraînent, pour une pile de potentiel idéal  $E_{\text{nernst}}$ , une chute de la tension:  $V_{\text{fc}} = E_{\text{nernst}} - \text{pertes}$ . [2]

#### ➤ Tension de Nernst :

$E_{\text{nernst}}$  dite tension réversible : est le potentiel d'équilibre thermodynamique défini en utilisant l'équation de Nernst.

$$E_{\text{nerst}} = \frac{\Delta G}{2.F} - \frac{\Delta S}{2.F}(T - T_{\text{ref}}) + \frac{R.T}{2.F} [\ln(P_{H_2}) + \frac{1}{2} \ln(P_{O_2})] \quad (\text{II.5})$$

Où:

$\Delta G$ : Est changement d'énergie libre (J/k.mol).

F: est la constante de faraday (96,487 C/K mol).

$\Delta S$ : est le changement d'entropie (J/k.mol).

R: est la constante universelle du gaz (8,3 14 J/K.mol).

$P_{H_2}$ ,  $P_{O_2}$ : sont respectivement les pressions partielles de hydrogène et l'oxygène (atm).

T: indique la température de fonctionnement de la pile (K)

$T_{\text{ref}}$ : est la température de référence (K)

## Chapitre II: Modélisation et dimensionnement du stack à pile à combustible

En utilisant les valeurs standards de la température et de la pression. L'équation peut être simplifiée comme suit :

$$E_{nerst} = 1.229 - 0.85.10^{-3} (T - 298.15) + 4.31.10^{-5} .T [\ln(PH_2) + \frac{1}{2} \ln(PO_2)] \quad (II.6)$$

Il faut noter que la température de la membrane et les pressions partielles du gaz varient en fonction du courant: avec l'augmentation du courant les pressions d'hydrogène et de l'oxygène diminuent, bien que la température augmente.

### ➤ Polarisation d'activation (Charge transfert kinetics) :

La polarisation d'activation est donnée par la relation de Tafel: [10]

$$V_{act} = - [\zeta_1 + \zeta_2.T + \zeta_3.T.\ln([CO_2]) + \zeta_4.\ln(I_{stack})] \quad (II.9)$$

Avec:

$I_{stack}$  est le courant de fonction de la pile, les  $\xi$  représentent les coefficients paramétriques pour chaque modèle de pile. [10]

[Co<sub>2</sub>] est la concentration de l'oxygène dans l'interface du catalyseur de la cathode donnée par la relation:

$$[CO_2] = \frac{P_{O_2}}{5,08.10^6 .e^{(-498/T)}} \quad (II.10)$$

### ➤ Polarisation ohmique :

Les pertes ohmiques sont dues à la résistance que rencontre le flux d'ions en traversant la membrane et à la résistance que rencontrent les électrons dans les électrodes et le circuit électrique. La membrane et les électrodes obéissant à la loi d'Ohm, on peut exprimer les pertes ohmiques par l'équation suivante:

$$V_{ohm} = I_{stack} . (R_m + R_c) \quad (II.11)$$

Avec  $R_m$  est la résistance équivalente de la membrane pour le flux d'ions, elle est calculée par la relation :

$$R_m = \frac{\rho_M . l}{A} \quad (II.12)$$

Où  $\rho_M$  est la résistivité spécifique de la membrane pour le flux d'électron,  $A$  est la surface active de la pile en ( $cm^2$ ), et  $l$  est la largeur de la membrane en ( $cm$ ).  $I_{stack}$  est le courant de fonction de la pile.

Dans ce travail on a considéré que la membrane est en Nafion. [10.11]

## Chapitre II: Modélisation et dimensionnement du stack à pile à combustible

$$\rho = \frac{181,6 \cdot \left[ 1 + 0,03 \cdot \left( \frac{I_{stack}}{A} \right) + 0,062 \left( \frac{T}{303} \right)^2 \cdot \left( \frac{I_{stack}}{A} \right) \cdot \left( \frac{I_{stack}}{A} \right)^{2,5} \right]}{\left[ \Psi - 0,643 - 3 \cdot \left( \frac{I_{stack}}{A} \right) \right] \cdot \exp \left[ 4,18 \left( \frac{T-303}{T} \right) \right]} \quad (\text{II.13})$$

Avec :

$\Psi$  : Fraction de l'aire ouverte d'une plaque perforée

### ➤ Polarisation de concentration (Mass Transport):

La polarisation de concentration est donnée par la relation suivante:

$$V_{con} = -B \cdot \ln \left( 1 - \frac{J}{J_{max}} \right) \quad (\text{II.14})$$

Avec:

$J$  : la densité de courant ( $A/cm^2$ )

$J_{max}$  : la densité de courant maximale ( $A/cm^2$ )

$B$  : Désigne la constante électrochimie (V) et donné par la relation suivant. [10]

$$B = \frac{R \cdot T}{n \cdot F} \quad (\text{II.15})$$

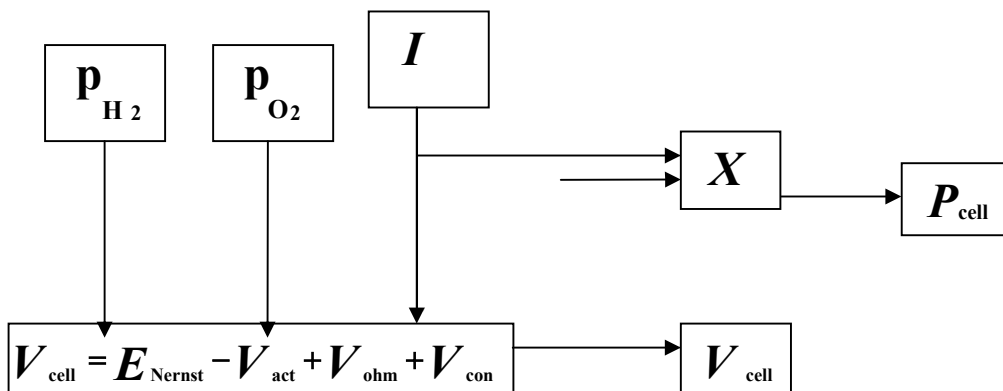
Avec :

$R$  : est la constante universelle des gaz ( $8.314 J/K \cdot mol$ )

$T$  : est la température (K)

$n$  : Nombre des cellules élémentaires de la pile

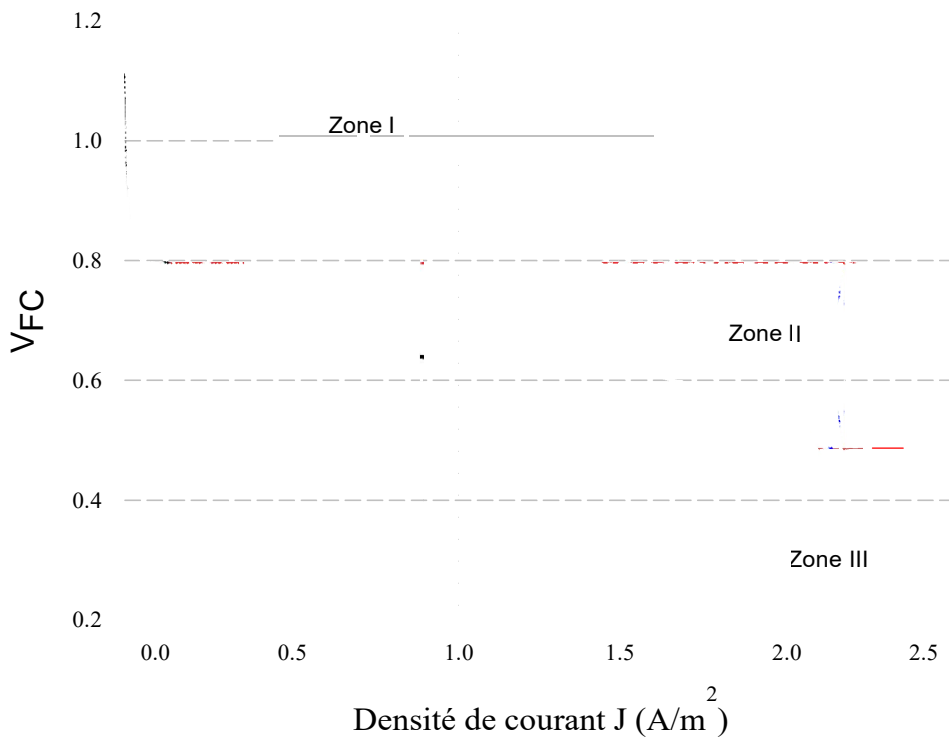
$F$  : Le constant de Faraday ( $96.487 C/K \cdot mol$ )



**Fig.II.1:** modèle statique simplifié de la pile à combustible (PEMFC) [10]

Cette loi de tension (12.13) permet de décrire la courbe caractéristique tension/densité de courant d'une cellule de pile à combustible PEMFC (Fig.II.2).

## Chapitre II: Modélisation et dimensionnement du stack à pile à combustible



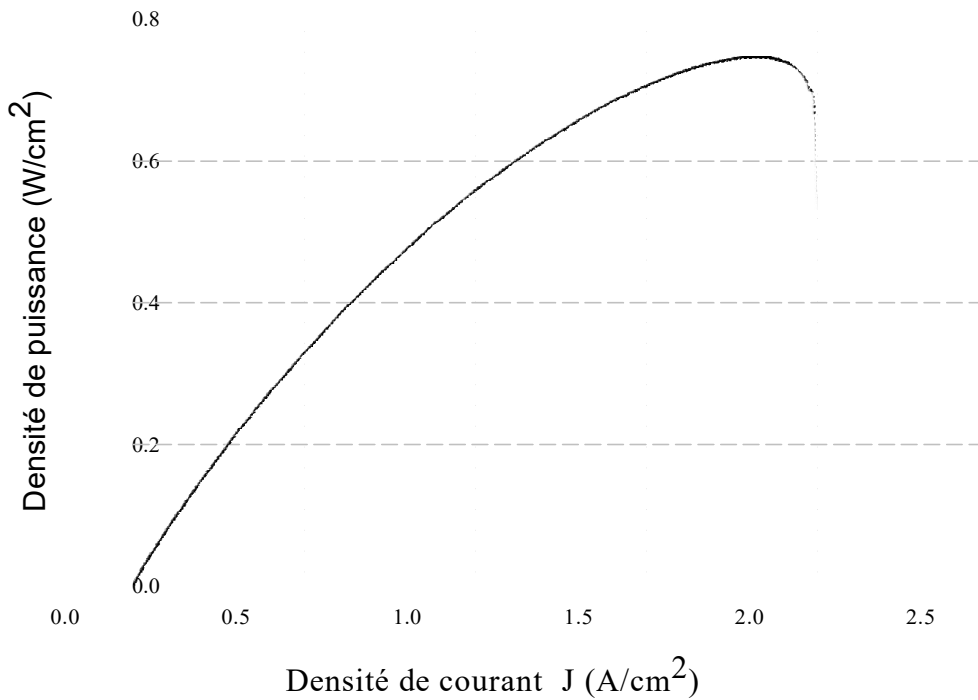
**Fig.II.2:** Caractéristique Tension/Densité de courant (tension par cellule) [10]

Cette courbe peut être décomposée en trois zones qui correspondent aux phénomènes prépondérants en fonction de la valeur de la densité de courant.

- ✚ La première zone représente la surtension d'activation anode et cathode qui est le phénomène le plus important pour les faibles densités de courant.
- ✚ La deuxième zone caractérise le comportement ohmique de la cellule, c'est la zone la plus utilisée en fonctionnement car elle est linéaire et elle est valable sur une forte plage de variation de la densité de courant.
- ✚ La troisième zone liée à la polarisation de concentration.

La puissance est définie comme le produit entre le courant et la tension figure II.3. Elle permet de décrire la courbe caractéristique densité de Puissance /Densité de courant (par cellule)

## Chapitre II: Modélisation et dimensionnement du stack à pile à combustible



**Fig.II.3:** Caractéristique densité de Puissance /Densité de courant  
(Tension par cellule) [10]

### II.3 Conclusion:

Dans ce chapitre nous avons présenté un modèle de la pile basée sur l'évolution du potentiel d'équilibre thermodynamique de Nernst et les différents pertes (activation, ohmique, concentration), ce modèle va être utilisé pour tracer la courbe caractéristique de la pile dans le chapitre suivant.

# **Chapitre III**

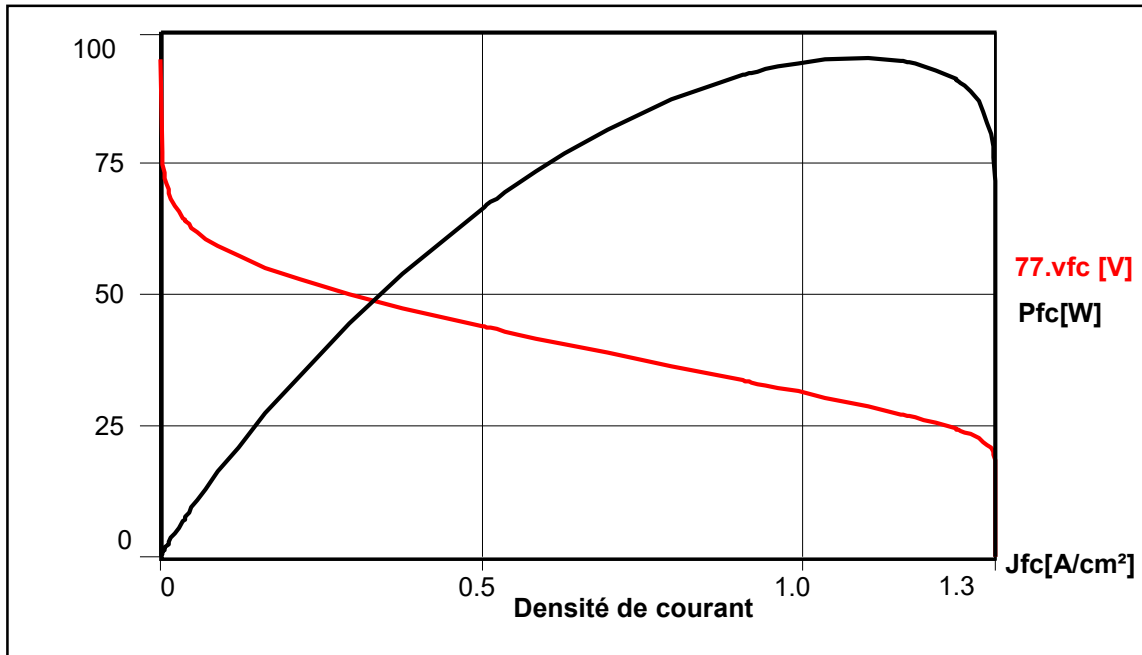
## **Simulation numérique**

### III.1 Introduction :

Nous présentons dans ce chapitre, une simulation du modèle sélectionnée de la pile à combustible. Pour réaliser la simulation, les composants principaux ont été étudiés pour connaître leurs caractéristiques.

### III.2 Résultats de simulation:

#### III.2.1 Caractéristiques tension-densité de courant et puissance-densité de courant d'une cellule PEM :



**Fig.III.1 :** Caractéristiques tension-densité de courant et puissance-densité de courant d'une cellule PEM.

La figure III.1 donne la tension et la puissance d'une cellule PEM en fonction de la densité de courant. Dans la région de la tension d'activation et à des densités de courant non nulles, il y a ce qu'on appelle une "surtension d'activation" où une certaine énergie d'activation doit être dépassée pour assurer la dissociation de l'oxygène et conduire les molécules d'hydrogène à diffuser rapidement à travers les pores, dans le catalyseur métallique. Dans la région de concentration ohmique et selon la loi d'Ohm, la quantité de perte de tension varie linéairement jusqu'à ce que la densité de courant se rapproche de la densité de courant limite (la concentration des réactifs à la surface du catalyseur atteint zéro). Dans ce cas, les pertes de concentrations deviennent dominantes (les réactifs sont consommés plus rapidement qu'ils sont fournis).

On voit aussi, à partir de ces courbes, qu'à des faibles densités de courant, la tension est maximum et la puissance est minimum, mais à des fortes densités de courant la tension est minimum et la puissance est maximum.

#### III.2.2 Rendement d'une cellule PEM :

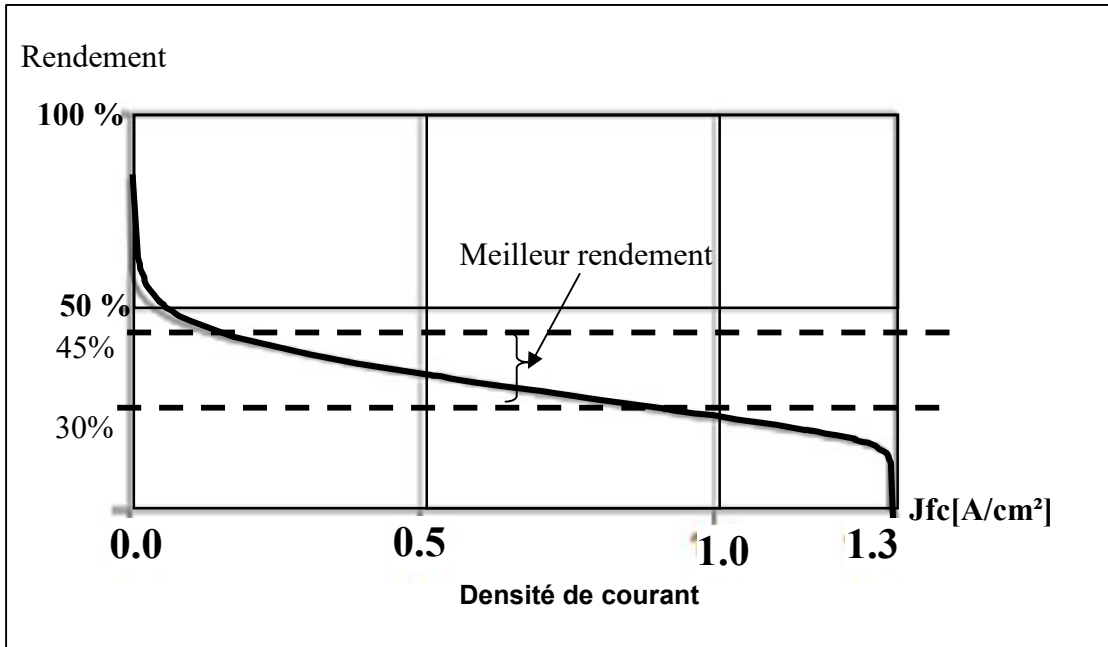


Fig.III.2 : Rendement d'une cellule PEM.

La figure présente le rendement d'une cellule qui fonctionne à température et pression constante.

D'après la figure III.2, le rendement pratique d'une pile dépend directement de la densité du courant qui traverse la pile. En général comprise entre 30% et 45%.

#### III.2.3 La tension de 25 cellules mises en série est représentée par la figure III.3

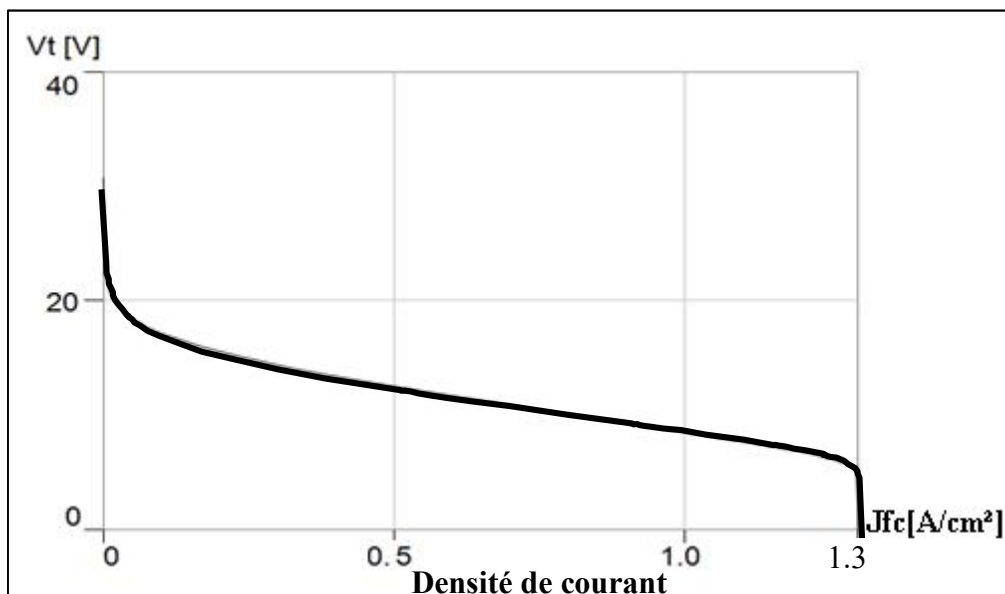


Fig.III.3 : Tension de 25 cellules PEM.

## Chapitre III : Simulation numérique

La figure III.3 présente la tension de 25 cellules PEM mises en série, en additionnant des cellules identiques en série, le courant de la branche reste la même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules en série.

### III.2.4 Effet de la température sur la caractéristique de la cellule

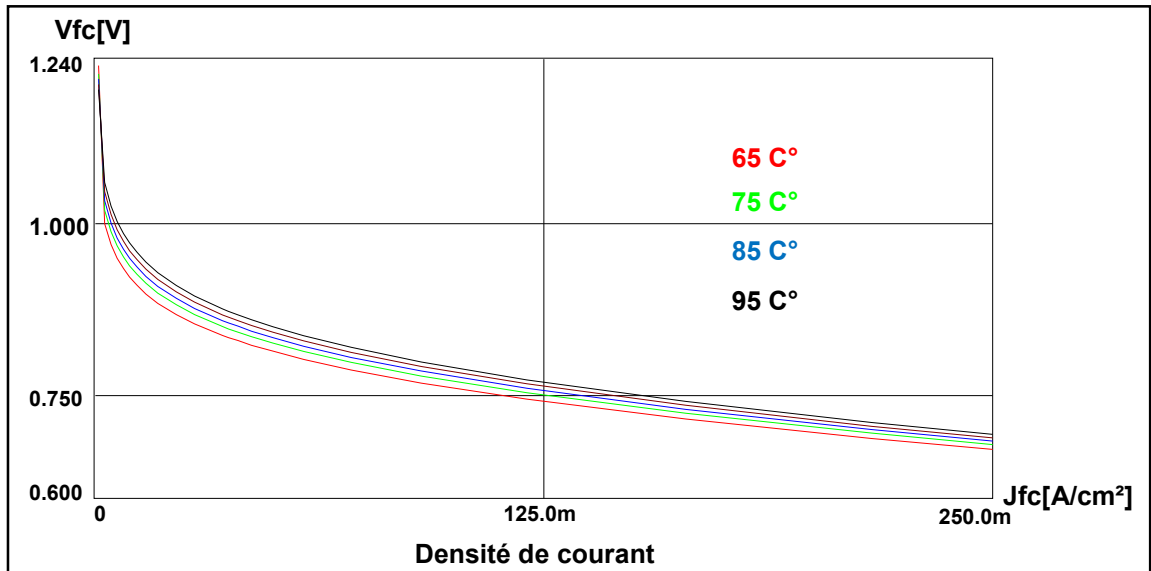


Fig.III.4 : Effet de la température sur la tension de la cellule avec  $P_{H_2}=P_{O_2}= 3$  atm.

D'après la figure III.4, on constate bien que l'augmentation de la température de la pile joue un rôle important sur la tension de cette dernière, ceci est expliqué par la forte conduction ionique de l'ensemble (électrodes, électrolyte).

### III.2.5 Effet de la pression sur la caractéristique de la cellule

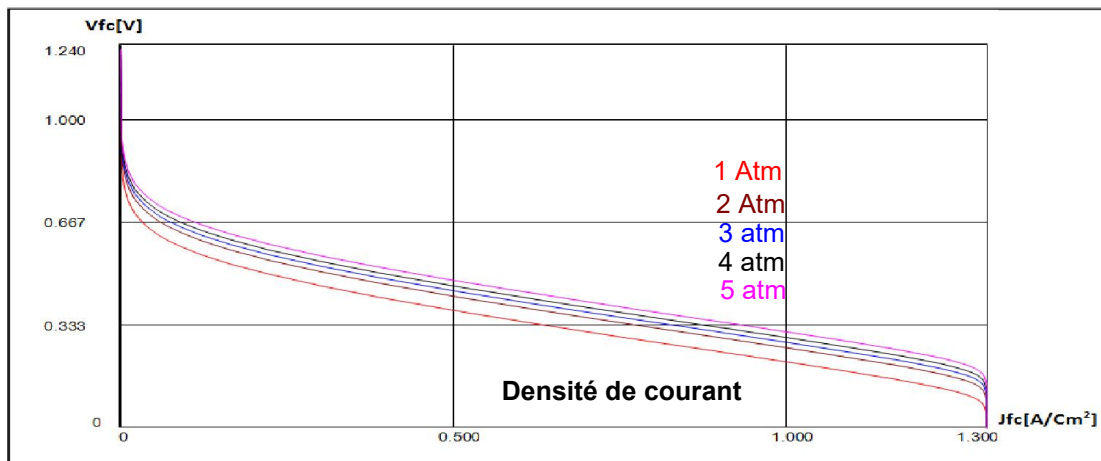


Fig.III.5 : Effet de la pression sur la pile à combustible.

## Chapitre III : Simulation numérique

D'après la figure III.5, la tension de la cellule augmente avec l'augmentation de la pression cela peut s'exprimer par l'augmentation du nombre d'électrons transférés par la réaction chimique.

La courbe du rendement est semblable de la courbe de tension, lorsque la pression de la cellule augmente, le rendement de la cellule augmente.

### III.3 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté la simulation de la pile et les caractéristiques tension-densité de courant et puissance-densité de courant d'une cellule PEM, rendement d'une cellule PEM, la caractéristique tension de 25 cellules mises en série, l'effet de la température sur la caractéristique de la cellule et l'effet de la pression sur la caractéristique de la cellule.

## Conclusion Générale et Perspective

### Conclusion

Dans ce mémoire nous avons présenté les piles à combustible, leurs différentes technologies, leurs caractéristiques électriques et chimiques et les différentes pertes. Un modèle de la pile PEM qui prend en considération l'effet de la température et de la pression sur les caractéristiques de la pile, écrit en Matlab, a été développé. La simulation sous l'environnement Matlab a permis d'obtenir un rendement compris entre 30% et 45%. Le modèle sera utilisé pour des applications hybrides ultérieures.

# Bibliographie

- [1] **K. Kordesch et G. Simader**, « Fuels Cells and Their Applications », ed VCH (1996).
- [2] Cours disponible sur: [www.ulb.ac.be/inforsciences/files/piles.pdf](http://www.ulb.ac.be/inforsciences/files/piles.pdf)
- [3] Cours disponible sur: <https://tpepilecombustible.wordpress.com>
- [4] **P.THONTHONG**, « conception d'une source hybride utilisant une pile a combustible et des supercondensateurs », these de doctorat, l'institut national polytechnique de lorraine, 2005.
- [5] **M.ZANDI**, « contribution Au Pilotage des sources Hybrides d'énergie électrique », thèse de doctorat, Université NANCY Institut National Polytechnique de LORRAINE, 2010.
- [6] **B.WAHDAME**, « Analyse et optimization du fonctionnement de piles à combustible par la méthode des plans d'expériences », thèse de doctorat, université de technologie de belfort montbeliard et de l'université de France – Comté, 2006.
- [7] **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.
- [8] **R. Benchrifa, D. Zejli, A. Bennouna**; "Piles à combustible, mode efficace et propre de production d'électricité", International Congres on the Renewable Energies and the Environment, Sousse, Tunisia, March 2005.
- [9] **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
- [10] **A.LACHICHI**, « Modélisation et stabilité d'un régulateur hybride de courant application aux convertisseurs pour pile à combustible », thèse de doctorat université de franche-comté, 2005.
- [11] **S. MEDDAH**, « Modélisation et commande d'un véhicule électrique à piles à combustible », Magistère, Université des Sciences et la Technologie d'Oran Mohamed BOUDIAF.
- [12] **SALEM, A.MEDDAH, MENASRIA**, « étude d'un système énergétique à pile combustible destiné à une application résidentielle », Ingénieur d'état, université tahri Mohamed de béchar, 2006.

**[13] Jérôme LACHAISE**, «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.

**[14] Jeferson M. Corrêa, Felix A. Farret, Luciane N. Canha, and Marcelo G. Simões**, "An electrochemical- Based Fuel- Cell Model Suitable for Electrical Engineering Automation Approach" vol. 51, NO. 5, October 2004.

# RÉSUMÉ

## Modélisation d'une Pile à Combustible de type PEM

### Mots clés

- Pile à combustible
- PEMFC
- Modélisation
- Simulation

### Résumé

La pile à combustible (PAC) est connue depuis longtemps comme un dispositif électrochimique qui permet de convertir directement l'énergie chimique en énergie électrique possédant de très bons rendements, les recherches sur cette technologie se développent partout dans le monde de manière considérable.

Les raisons sont bien connues: la réponse aux contraintes environnementales, aux problèmes posés par la production centralisée d'électricité, la nécessité d'avoir des alternatives énergétiques (vecteur hydrogène) et certaines exigences technologiques spécifiques telles que les applications spatiale, sous-marines, électroniques portables, alimentation électrique de sites isolés et de microsystemes.

Il est certain que nous assisterons dans les prochaines décennies à l'émergence de la filière hydrogène dans notre vie quotidienne comme vecteur énergétique. Le choix de la technologie des piles à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) est implicite vu les performances intéressantes (un très bon rendement énergétique, faible poids, robuste, électrolyte solide, démarrage rapide, peuvent fonctionner à basse température, demandent peu d'entretien, etc.).

Il est donc important de pousser encore plus loin les efforts de recherche/développement autour de cette technologie pour pouvoir la maîtriser et étendre son application.

Ce travail présente la modélisation d'une piles à combustible PEMFC et la simulation par le langage de calcul technique MATLAB, afin d'obtenir les caractéristiques de cette pile.