

LA REPUBLIQUE ALGERIENNE  
DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE



MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT  
SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE



DEPARTEMENT DES SCIENCES APPLIQUEES

DE GENIE MECANIQUE SPECIALITE

MECANIQUE ENERGETIQUE

MASTER II ENERGETIQUE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

PRÉSENTÉ POUR OBTENIR LE DIPLÔME DE MASTER

**Etude et simulation des performances des piles à  
combustible à hydrogène dans des applications  
statiques et dynamiques**

Par :

**MANSOURI Aii**

**MANSOURI Kamel**

Soutenu le : 11/06/2022

Devant le jury composé de :

Président : Dr. CHERAD Nouredine

Université Ouargla

Examineur : Dr. GHEDAMSI Rebha

Université Ouargla

Encadreur : Dr. KABDI Zakaria

Université Ouargla

**Année Universitaire : 2021/2022**

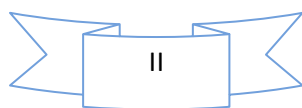
## REMERCIEMENTS

*TOUT D'ABORD, NOUS VOUDRIONS REMERCIER DIEU TOUT-PUISSANT QUI NOUS A DONNÉE LE COURAGE, LA PATIENCE ET LA VOLONTÉ D'ATTEINDRE LA FIN DE NOTRE VOYAGE. JE TIENS TOUT PARTICULIÈREMENT À REMERCIER MON PÈRE ET MA MÈRE QUI ONT ÉTÉ À MES CÔTÉS TOUT AU LONG DE MES ANNÉES SCOLAIRES, PAR LEURS CONSEILS ET LEURS SOUTIENS. NOUS TENDONS À REMERCIER CHALEUREUSEMENT NOTRE ENCADRANT, MR. KEBDI ZAKARIA, POUR SES ORIENTATIONS, SES PRÉCIEUX CONSEILS ET SA DISPONIBILITÉ TOUT AU LONG DE LA RÉDACTION DE CE MEMOIRE. NOUS ADRESSONS ÉGALEMENT NOS SINCÈRES REMERCIEMENTS AUX MEMBRES DU JURY POUR L'INTÉRÊT QU'ILS PORTENT À NOS RECHERCHES EN ACCEPTANT D'EXAMINER CE TRAVAIL ET DE L'ENRICHIR DE LEURS SUGGESTIONS.*



## **DEDICACES**

**Je dédie ce mémoire à : · Mes parents : Ma mère, qui a oeuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, qu'elle reçoit à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude. Mon père, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit ; Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi. Mes frères et soeurs qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage et de générosité. A toute ma famille, mes amis pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire.**



# Liste des Tableaux

## Chapitre I

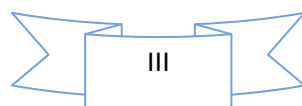
Tableau I.1 Types de piles à combustible 11

## Chapitre III

Tableau III.1 montrant la puissance électrique de quelques appareils portables simples 41

## Chapitre IV

Tableau IV.1 Caractéristiques technique de la PAC simulée 56



## Liste des Figures

Pages

### **Chapitre I**

Figure: I.1 schéma de fonctionnement d'une pile à combustible.	6
Figure: I.2 Les éléments constituent la pile à combustible	7
Figure: I.3 Télécommunications	20
Figure.I.4 : Illustration d'un avion à hydrogène	22
FigureI.5 Illustration d'une pile à combustible produisant de l'électricité	24

### **Chapitre II**

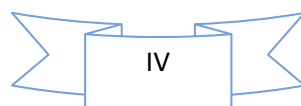
Figure II.1 Fonctionnement De Principe D'une Cellule De La Pile A Combustible	28
Figure II.2 . Composants D'une Seule Pile A Combustible PEM.	30
Fig:II.3 Les Différents Eléments De Pile PEM	30
Figure II.4: Plaque Bipolaire	32
Figure II.5:Le Cœur De Pile A Combustible	33

### **Chapitre III**

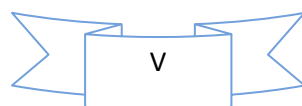
Figure. III.1. Applications portables pour les piles à combustible	39
Figure. III.2 : Train Coradia iLint	44
Figure III.3 : Toyota Mirai.....	44
Figure. Figure III.4: Le Dimona transformé par Boeing	45
Figure III.5 : Sous-marin allemand - Type 212	45
Figure III.6 : Décollage Saturn V (Apollo) Titan2(Gemini)	46
Figure III.7 : Saturn V (Apollo) Décollage.....	46

### **Chapitre IV**

<b>Fig. IV. 1:</b> Modèlestatique circuit à électrodesnon dissociéesd'une cellule PEM	49
<b>Fig. IV. 2:</b> Modèlestatique circuit à électrodes dissociées d'une cellule PEM	50
Figure IV .3:Modèle physique de la pile à combustible	51
Figure IV. 4: Modèle dynamique d'une PAC.	55



FigureIV .5 :Courbes des pertes d'activation en fonction de la densité de courant et des temperatures.	58
FigureIV.6: Représentation des pertes d'activation en fonction de la temperature et de la densité de courant.	59
FigureIV.7 Représentation du potentiel en fonction de la densité de courant (A/cm <sup>2</sup> ) et de la température	<b>60</b>
FigureIV.8 Représentation de la puissance en fonction de la densité de courant (A/cm <sup>2</sup> ) et de la température.	<b>61</b>



## Abréviations

PAC	Pile A Combustible
AFC	Pile A Combustible Alcaline
PEMFC	Pile A Combustible A Membran Echangeuse De Protons
PAFC	Pile A Combustible A Acide Phosphorique
SOFC	Pile A Combustible A Oxydes Solides
MCFC	Pile A Combustible A Carbonates Fondus
PCI	Pouvoir Calorifique Inférieur

## Symboles

A	nombre de cellules de la pile à combustible	
B	constante d'Activation de tension	[A-1]
C	constante d'Activation de tension	[A-1]
E	potentiel thermodynamique	[V]
E0	Tension à vide	[Volt]
F	constante de Faraday	[C/kmol]
J	Représente l'élément (H2O, H2, O2)	
H	hauteur du mat	[M]
I	courant électrique	[A]
K	facteur de forme	
$k_{H_2}$	constante de valve d'hydrogène	[Kmol/s.atm]
$k_{H_2O}$	constante de valve d'eau	[Kmol/s.atm]
$k_{O_2}$	constante de valve d'oxygène	[Kmol/s.atm]
Kr	constante de modélisation	[Kmol/s.A]
$\dot{m}_{H_2}$	Débit de l'hydrogène	[Kmol/s]
$\dot{m}_{H_2O}$	Débit de l'eau	[kmol/s]
Mi	Masse atomique de l'élément i	[gr/mol]
	Débit de l'oxygène	[kmol/s]
N0	nombre de cellules en série	
P	Pression	[Atm]
$P_{H_2}$	Pression de l'hydrogène	[atm]
$P_{H_2O}$	Pression de l'eau	[atm]
$P_{O_2}$	Pression de l'oxygène	[atm]
R	constante des gaz parfaits	[Kmol/k]
Ra	Résistance d'activation	[V/A]
Rint	Résistance interne	[Ω]
T	Température	[K]
U	taux d'utilisation	
U	tension d'une cellule de l'électrolyseur	[V]

# Table des Matières

<b>Table des Matières</b>	pages
Remerciements	I
Dédicace	II
Liste des Tableaux	III
Liste des Figures	IV
Abreviations	VI
Introduction générale	1
<b>Chapitre I : Généralités sur les piles à combustible</b>	<b>3</b>
I1.Introduction	4
I2- Définition	4
I.3- Principe de fonctionnement	5
I4 - Les éléments constituent la pile à combustible	6
I4-1 Les électrodes	7
I4-2 Les catalyseurs	8
I4.2.1- Du côté anode	8
I4.2.2-.Du côté cathode	8
I4.2.3- L'électrolyte	8
I4-3- Les plaques bipolaires	9
I4-3.1-rôles	9
I5-Types de piles à combustible	10
I5-1Pile à combustible à électrolyte polymère (PEMFC).	12
I5.1.1Avantages	12
I5.1.2Inconvénients	13
I5-2 Pile à combustible alcaline (AFC)	13
I5-2.1-Avantages	14
I5-2.2- Inconvénients	14
I5-3 Pile à combustible à acide phosphorique (PAFC)	14
I5-3.1-Avantages	15
I5-3.2-Inconvénients	15
I5-4Pile à combustible à carbonate fondu (MCFC)	16
I5-4.1-Avantages	16
I5-4.2- Inconvénients	17
I5-5 Pile à combustible à oxyde solide (SOFC)	17
I5-5.1-Avantages	17
I5-5.2- Inconvénients	18
I6-Applications défieront des piles à combustible	18
I6-1 Applications fixes	19
I6-1.1Télécommunications	19
I6-1.2-Usines de traitement des eaux usées Décharges et de certaines boissons	20
I6-2 Dans le domaine des transports	20
I6-2.1- avions	21
I6-2.2 Bateaux	22
I6-2.3-Unités d'alimentation auxiliaires (APU)	22
I6-3 Alimentation portable	22
I6-3.1-Micro-équipement électrique	23
I6-4 Dans le domaine des turbines à gaz	24
Conclusion	25



# Table des Matières

<b>Chapitre II LA PILE A COMBUSTIBLE DE TYPE PEM</b>	<b>26</b>
<b>II-1 Introduction</b>	<b>27</b>
II.1 Principe de fonctionnement	27
II.2 Eléments de base d'une cellule élémentaire de pile PEM	28
II.2.1. Plaques bipolaires	28
II.2.2. Couches de diffusion	29
II.2.3. Assemblage Membrane – Electrodes	29
II.3- Description de la cellule PEM	30
II.3.1 électrolytes (membrane)	31
II.3.2 Les électrodes	31
II.3.3 .Plaques bipolaires	31
II.3.4. Couches de diffusion(Backing)	32
II.3.5. Assemblage Membrane – Electrodes	33
II.4-Rendements	34
II.4.1-Rendement thermodynamique	34
II.4.2-Rendement de matière	34
II.4.3-Rendement voltaïque	34
II.4.4-Rendement faradique	35
II.4.5Rendement global	35
Conclusion	36
<b>CHAPITRE III APPLICATIONS DES PILES A COMBUSTIBLES PEMFC</b>	<b>37</b>
Introduction	38
III.1-1 application pile a combustible dans le secteur portable	38
III.2-le transport	43
III.2.1voiture	43
III.2.2-transport ferroviaire	43
III.2.3 Automobile	44
III.2.4-velo	44
III.2.5-aéronautique	45
III.2.6-bateau	45
III.2.7-spatial	46
Conclusion	47
<b>CHAPITRE IV : MODELISATION ET SIMULATION DE LA PILE A COMBUSTIBLE DU TYPE PEMFC</b>	<b>48</b>
Introduction	49
IV .1- Représentation de la pile à combustible	49
IV .1.1Modèles statiques	49
IV .1.2 Modèle à électrodes non dissociées	49
IV .1.3 Modèle à électrodes dissociées	50
IV .2 Modulisation	51
IV. 2.1.Débit d'hydrogène et d'oxygène à l'entrée	51
IV. 2.2 La résistance interne	51

## Table des Matières

IV.2.3 Les pertes ohmiques $\eta_{ohmic}$	51
IV.2.4 Pertes d'activation $\eta_{act}$	51
IV.2.5 Résistance d'activation $R_a$	52
IV.2.6 La constante de modélisation $K_r$	52
IV.2.7 Pression d'hydrogène $p_{H_2}$	52
IV .2.8 Pression d'oxygène $PO_2$	52
IV.2.9 Pression de l'eau $p_{H_2O}$	53
IV .2.10 Potentiel thermodynamique	53
IV .2.11 Tension d'une cellule de la PAC	53
IV .2.12 Tension totale de la cellule PAC	54
IV .2.13 Puissance d'une pile à combustible	54
IV.2.14 Modè de la dynamique de la PEM	54
IV .3 Organigramme	57
	58
IV .4 Résultats Obtenus et discussions	
IV .4.1 Pertes d'activation en fonction de la densité de courant et de la température	58
IV .4.2 Pertes d'activation en fonction de la temperature et de la densité de courant	59
IV.4.3 Evolution du potentiel en fonction de la densité de courant et de la température dans une pile à combustible (PEMFC).	60
IV.4.4 Evolution de la puissance en fonction de la densité de courant et de la température dans une pile à combustible (PEMFC).	61
Conclusion	62
Conclusion générale	63
Résumé	64
Réferonce	65
Annexes : Programme	69

# **Introduction générale**

## **Introduction générale**

Les ressources en énergétiques sont nous de plus en plus consommées actuellement, comme le pétrole, le gaz naturel et le charbon.... Les questions énergétiques recouvrent à l'heure actuelle deux domaines. L'un est lié au risque d'épuisement des ressources fossiles et fissiles, l'autre est le problème de la pollution environnementale, tel que le réchauffement par effet de serre. Face à la diminution des ressources énergétiques et à l'augmentation de la pollution des énergies, il est impératif de diminuer la pollution dans le monde et de rechercher des alternatives énergétiques possédant les mêmes propriétés que les hydrocarbures. L'hydrogène est une solution intéressante en tant que source d'énergie durable et renouvelable. L'hydrogène, qui n'existe pas à l'état naturel, peut en effet être synthétisé à partir des énergies renouvelables. Son stockage est possible sous différents états. il est d'autre part léger et propre. Cependant il ne peut pas être utilisé directement, il nécessite la transformation d'une énergie chimique en énergie électrique. Cette production d'énergie a lieu dans une pile à combustible.

La pile à combustible est un générateur d'énergie électrique à partir de l'énergie chimique, elle utilise la réaction électrochimique d'oxydoréduction entre l'hydrogène et l'oxygène pour donner de l'électricité. Des recherches sur les piles à combustibles ont été faites depuis une centaine d'années. Les avantages offerts par la technologie des piles à combustibles à hydrogène comme l'efficacité, la protection de l'environnement et la construction modulaire, sont tels qu'elles ont suscité un intérêt permanent pour leur développement. William Robert Grove inventa **[1]** en 1839 la première pile à combustible. À partir de l'utilisation de l'électricité pour séparer l'eau en hydrogène et oxygène, d'après lui, il était possible d'inverser ce procédé et de produire de l'électricité en faisant réagir de l'oxygène avec de l'hydrogène. Par rapport aux dispositifs de stockage d'énergie (batteries, super capacités....), les piles à combustible ne fonctionnent que tant qu'elles sont alimentées en carburant. La première application de la pile à combustible s'est faite dans le cadre du programme spatial américain. Elles ont été utilisées avec succès dans une grande variété d'applications **[2]**. Pour une utilisation efficace de ces dispositifs, une modélisation pour comprendre le fonctionnement interne avec

## **Introduction générale**

les effets physiques est donc indispensable. Du fait du grand nombre de paramètres à contrôler à l'entrée et à la sortie d'une pile, la description de son comportement afin de l'intégrer dans les systèmes de production énergétique n'est pas évident. Chaque pile a ses propres conditions de fonctionnement comme la température, l'état de l'électrolyte ou l'environnement. Parmi les différents types, la pile à combustible à membrane échangeuse d'ions ou PEMFC est la plus adaptée pour les applications dans le transport, les portables...[2].

Le but de ce travail est d'estimer la quantité d'énergie transmise par la pile à combustible de type PEMFC et de voir l'influence de la température sur celui-ci.

Ce travail comporte quatre parties :

- Dans le premier chapitre nous donnons des généralités sur les piles à combustibles, une définition et le principe de fonctionnement, ainsi que les éléments qui constituent les piles à combustible. Nous parlons de leurs avantages et de leurs inconvénients ainsi que de leurs applications dans différents domaines.
- Dans le deuxième chapitre nous abordons en détail la pile à combustible à hydrogène du type PEMFC, où nous exposons son principe de fonctionnement et nous donnons les différentes expressions des rendements de la pile à combustible PEMFC.
- Dans le troisième chapitre, nous présentons des applications statiques et dynamiques de ces piles à combustibles à hydrogène PEMFC.
- Enfin dans le quatrième chapitre, nous faisons une modélisation et une simulation d'une pile à combustible à hydrogène du type PEMFC, cette simulation basée sur un modèle complet de cette pile. Nous avons conçu un organigramme et un programme Fortran qui nous permettra d'avoir des résultats.

***Chapitre I***  
***Généralités sur les piles***  
***à combustible***

## 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.

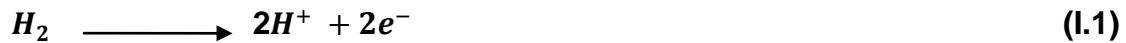
## I.2 Définition

Une pile à combustible est un générateur électrochimique d'énergie qui permet de transformer de l'énergie chimique en énergie électrique et en énergie thermique.

Un générateur électrochimique est un générateur de tension continue et rechargeable. Parmi toutes les piles à combustible, nous avons choisi d'étudier la pile à combustible à hydrogène. Une pile à hydrogène est composée de dihydrogène et de dioxygène. Le dioxygène est une molécule composée de deux atomes d'oxygène, notée  $O_2$ . Et le dihydrogène est une molécule comportant deux atomes d'hydrogène, de formule chimique  $H_2$  [7].

### 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 a besoin seulement de l'hydrogène et l'oxygène pour son fonctionnement. Dans le côté de l'anode l'hydrogène se décompose selon la demi réaction (l'oxydation de l'hydrogène)[4].



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):



En séparant ces deux demi-réactions pour 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 produisant dans une pile à combustible est[4].



L'eau formé est un liquide dans les conditions normales de température et de pression (0°C et 1 atm ou 273K et 1013 hpa) Comme le montre la figure. I.1 suivante [4].

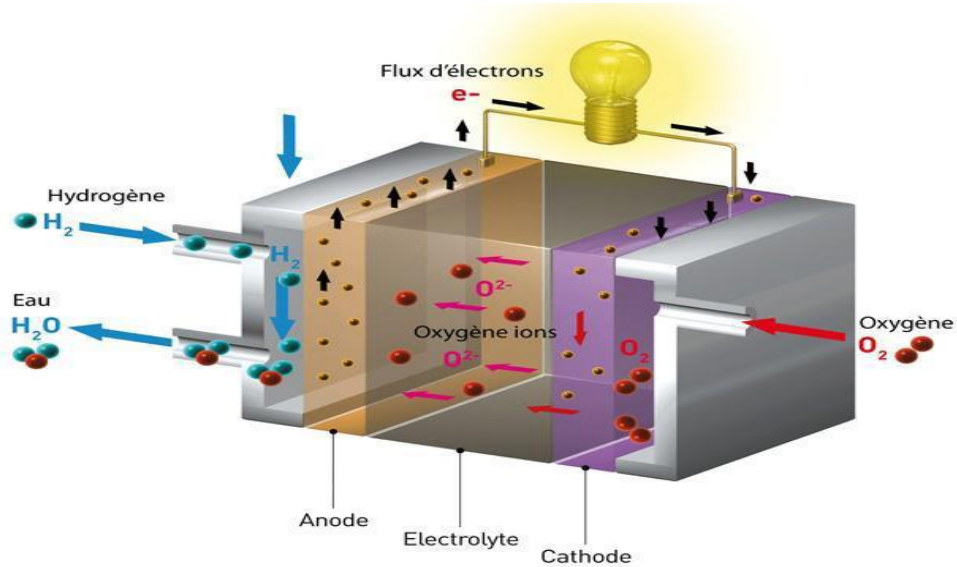


Fig I.1: schéma de fonctionnement d'une pile à combustible [22].

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.

#### I.4 Les éléments constituant la pile à combustible

Chaque type de pile a sa structure géométrique propre figure I.2, cependant les composants principaux restent les mêmes. Le cœur de la pile est constitué des électrodes, l'électrolyte (La membrane), des backings (couche de diffusion entourant les électrodes) et des plaques bipolaires. L'eau formé est un liquide dans les conditions normales de température et de pression (0°C et 1 atm ou 273K et 1013 hpa) Comme le montre la figure I.2 suivante [4].



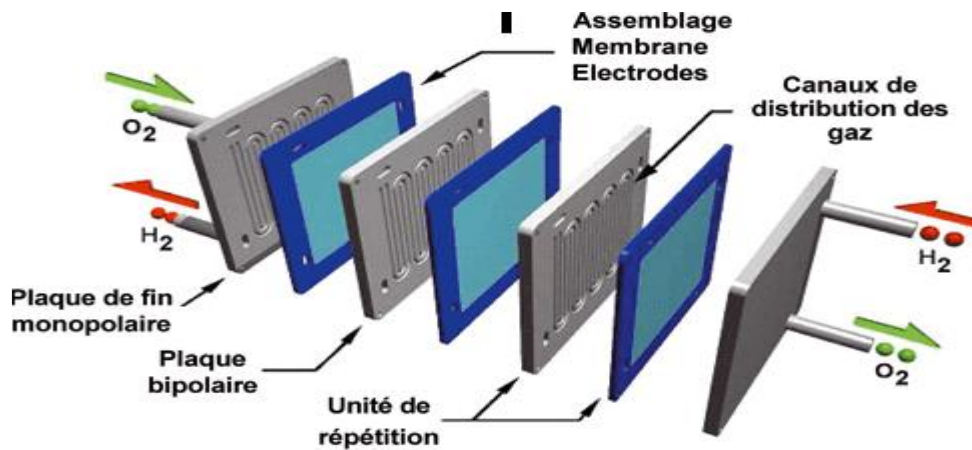


Fig:1.2 Les éléments constituent la pile à combustible

L'agencement exact de ces composants entre eux ainsi que la nature des composants dépend du type de pile. Leur rôle reste cependant le même.

#### 1.4.1 Les électrodes

Les électrodes sont le siège des réactions électrochimiques : une oxydation à l'anode et une réduction à la cathode. Ces réactions dépendent de plus de l'état de surface des électrodes et de la facilité avec laquelle les réactions se réalisent. Pour que l'hydrogène (ou tout autre carburant) soit oxydé, un catalyseur est nécessaire.

De même pour l'oxygène, il a pour rôle de faciliter les échanges électroniques. Une température plus élevée permettrait en théorie de faciliter ces échanges, mais cela impose des contraintes sur les matériaux. Les électrodes qui transportent les ions et les électrons sont le lieu des réactions. Par conséquent, ces éléments doivent être poreux, conducteur et posséder une grande surface d'échange [8].

## **I.4.2 Les catalyseurs**

### **I.4.2.1 A l'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 de particules de faible taille (2 nm). La réaction de dissociation de l'hydrogène est assez complexe. Ces électrodes sont très sensibles au CO 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), Pour les piles de haute température, on peut utiliser des métaux moins chers (Fer, Nickel, Cobalt) afin d'éviter le problème d'empoisonnement au CO [8].

### **I.4.2.2 A la 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.

### **I.4.2.3 L'électrolyte**

L'électrolyte varie en fonction du type de pile : KOH pour les piles AFC, membrane échangeuse d'ions pour les PEMFC ou les DMFC, acide phosphorique pour les PAFC, carbonates fondus pour les MCFC et oxydes solides pour les SOFC. Il permet que les ions (et pas les électrons) transitent de l'anode vers la cathode. Ces électrolytes déterminent la température de fonctionnement de la pile. Les caractéristiques de chaque type de pile sont leur conductivité ionique, leur étanchéité aux gaz, leur stabilité face aux réactifs chimiques, leurs propriétés mécaniques. A cela s'ajoute d'autres contraintes selon le type de pile, le niveau de la température, les composants

des gaz, les espèces ioniques passant à travers l'électrolyte ainsi que les conditions de pression. Quant à l'électrolyte, il doit être dense et imperméable aux différents gaz utilisés. L'imperméabilité aux gaz est nécessaire pour éviter tout contact entre l'oxygène et l'hydrogène qui serait préjudiciable au bon fonctionnement de la cellule.

L'électrolyte est également un bon conducteur ionique pour assurer la migration des ions. En revanche, il ne doit pas conduire les électrons pour ne pas mettre la pile en court circuit en créant un contact électrique entre l'anode et la cathode [8].

### **I.4-3- Les plaques bipolaires**

Ces plaques sont accolées aux supports De l'anode et de la cathode. Elles ont, aussi plusieurs rôles.

#### **I.4.3.1 rôles**

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

Généralement en graphite, ces plaques doivent être conductrices du courant, mais aussi permettre une diffusion homogène des gaz jusqu'aux électrodes ainsi qu'intervenir dans la gestion de l'eau à évacuer ou à apporter pour humidifier (pour les piles de type PEMFC).

Elles doivent être résistantes aux agressions du milieu (acide ou basique) et aussi être imperméables aux gaz réagissant (sous peine de provoquer un court circuit chimique).

La structure de ces ensembles est intéressante : des canaux y sont gravés pour permettre le passage des réactifs. Réalisés par usinage, ils sont très chers.

A ces composants essentiels qui forment le coeur de la pile s'ajouteront ensuite des auxiliaires nécessaires au bon fonctionnement. Il s'agit des réservoirs pour le carburant et l'eau, du compresseur pour l'air, de l'humidificateur, des pompes pour le carburant et l'eau, des échangeurs de chaleur pour refroidir la pile, de l'onduleur pour transformer le courant continu [8].

### I.5 Types de piles à combustible

Une variété de piles à combustible sont à différents stades de développement. La classification la plus courante des piles à combustible est celle du type d'électrolyte utilisé dans les piles et comprend :

- 1) la pile à combustible à électrolyte polymère (PEFC),
- 2) la pile à combustible alcaline ( AFC),
- 3) la pile à combustible à acide phosphorique (PAFC),
- 4) la pile à combustible à carbonate fondu (MCFC)
- 5) pile à combustible à oxyde solide (SOFC).

En gros, le choix de l'électrolyte dicte la plage de température de fonctionnement de la pile à combustible. La température de fonctionnement et la durée de vie utile d'une pile à combustible dictent les propriétés physicochimiques et thermomécaniques des matériaux utilisés dans les composants de la cellule (c'est-à-dire les électrodes, l'électrolyte, l'interconnexion, le collecteur de courant, etc.). La température de fonctionnement joue également un rôle important dans la détermination du degré de traitement du carburant requis. Dans les piles à combustible à basse température, tout le carburant doit être converti en hydrogène avant d'entrer dans la pile à combustible. De plus, le catalyseur de l'anode des piles à combustible à basse température (principalement du platine) est fortement empoisonné par le CO. Dans les piles à combustible à haute température, le CO et même le CH<sub>4</sub> peuvent être convertis en hydrogène ou même en interne directement oxydé électro-chimiquement. Le tableau 1 donne un aperçu des principales caractéristiques des principaux types de piles à combustible [6].

	PEMFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC
Électrolyte	Membranes échangeuses d'ions polymères hydratées	Hydroxyde de potassium mobilisé ou immobilisé dans une matrice d'amiante	Acide Phosphorique Liquide Immobilisé dans SiC	Carbonate fondu liquide immobilisé dans LiAlO <sub>2</sub>	Pérovskites (céramique)
Électrodes	Carbone	Métaux de transition	Carbone	Nickel et oxyde de nickel	Pérovskite et pérovskite / cermet métallique
Catalyseur	Platine	Platine	Platine	Matériau d'électrode	Matériau d'électrode
Interconnexion	Carbone ou métal	Métal	Graphite	Acier inoxydable ou nickel	Nickel, céramique ou acier
Température de fonctionnement	40 – 80 °C	65°C – 220 °C	205 °C	650 °C	600-1000 °C
Porteur de charge	H <sup>+</sup>	OH <sup>-</sup>	H <sup>+</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	O <sup>-</sup>
Reformeur externe pour carburants hydrocarbures	Oui	Oui	Oui	Non, pour certains carburants	Non, pour certains carburants et conceptions de cellules
Conversion par déplacement externe du CO en hydrogène	Oui, plus purification pour éliminer les traces de CO	Oui, plus purification pour éliminer le CO et le CO <sub>2</sub>	Oui	Non	Non
Composants de la cellule principale	À base de carbone	À base de carbone	À base de graphite	À base d'inox. Céramique	À base d'inox. Céramique
Produit Gestion de l'eau	Évaporatif	Évaporatif	Évaporatif	Produit gazeux	Produit gazeux
Product Heat Management	.Process Gas + Liquid Cooling Medium.	Gaz de procédé + circulation d'électrolyte	Gaz de procédé + Milieu de refroidissement liquide ou génération de vapeur	Reformage interne + gaz de procédé	Reformage interne + gaz de procédé

Tableau I.1 Types de piles à combustible [6].

### **I.5.1 Pile à combustible à électrolyte polymère (PEMFC)**

L'électrolyte de cette pile à combustible est une membrane échangeuse d'ions (polymère d'acide sulfonique fluoré ou autre polymère similaire) qui est un excellent conducteur de protons. Le seul liquide dans cette pile à combustible est l'eau. En règle générale, les électrodes en carbone avec électro-catalyseur en platine sont utilisées à la fois pour l'anode et la cathode et avec des interconnexions en carbone ou en métal. La gestion de l'eau dans la membrane est essentielle pour des performances efficaces ; la pile à combustible doit fonctionner dans des conditions où elle ne s'évapore pas plus vite qu'elle n'est produite car la membrane doit être hydratée. En raison de la limitation de la température de fonctionnement imposée par le polymère, généralement inférieure à 100 °C, mais plus généralement autour de 60 à 80 °C, et en raison de problèmes de l'équilibre hydrique, un gaz riche en H<sub>2</sub> avec peu ou pas de CO (un poison à basse température) est utilisé. Une charge de catalyseur plus élevée (Pt dans la plupart des cas) que celle utilisée dans les PAFC est nécessaire pour les deux anodes et cathode. Un traitement approfondi du carburant est nécessaire avec d'autres carburants, car l'anode est facilement empoisonnée par des niveaux même infimes de CO, d'espèces soufrées et d'halogènes. Les PEMFC sont recherchées pour une grande variété d'applications, en particulier pour l'alimentation principale des piles à combustible des véhicules (FCV). En raison du grand intérêt pour les FCV et l'hydrogène, l'investissement dans le PEMFC au cours des dernières années, dépasse facilement tous les autres types de piles à combustible combinés. Bien qu'un développement significatif du PEMFC pour les applications stationnaires ait eu lieu, de nombreux développeurs se concentrent sur les applications automobiles et portables.

#### **I.5.1.1 Avantages**

La PEMFC possède un électrolyte solide qui offre une excellente résistance au passage des gaz. La basse température de fonctionnement du PEMFC permet un démarrage rapide et en l'absence de composants de cellule corrosifs, l'utilisation de matériaux exotiques requis dans d'autres types de piles à combustible, à la fois dans la construction de la pile et dans le BOP

n'est pas nécessaire. Les résultats des tests ont démontré que les PEMFC sont capables de hautes densités de courant de plus de 2 kW/l et 2 W/cm<sup>2</sup>. Le PEMFC se prête particulièrement aux situations où l'hydrogène pur peut être utilisé comme carburant.

### **I.5.1.2 Inconvénients**

La plage de température de fonctionnement faible et étroite rend la gestion thermique difficile, en particulier à des densités de courant très élevées, et rend difficile l'utilisation de la chaleur rejetée pour la cogénération ou dans les cycles de fond. La gestion de l'eau est un autre défi important dans la conception PEMFC, car les ingénieurs doivent équilibrer la garantie d'une hydratation suffisante de l'électrolyte contre l'inondation de l'électrolyte. De plus, les PEMFC sont assez sensibles à l'empoisonnement par des traces de contaminants, notamment le CO, les espèces soufrées et l'ammoniac. Dans une certaine mesure, certains de ces inconvénients peuvent être compensés en abaissant la densité de courant de fonctionnement et en augmentant le chargement du catalyseur d'électrodes, mais les deux augmentent le coût du système. Si des carburants à base d'hydrocarbures sont utilisés, le traitement intensif du carburant requis a un impact négatif sur la taille, la complexité, l'efficacité (généralement au milieu de la trentaine) et le coût du système. Enfin, pour la PEMFC hydrogène, la nécessité de développer une infrastructure hydrogène constitue un frein à la commercialisation [6].

### **I.5.2 Pile à Combustible Alcaline (AFC)**

L'électrolyte de cette pile à combustible est concentré (85 % en poids) de KOH dans les piles à combustible fonctionnant à haute température (~250 °C), ou moins concentré (35 à 50 % en poids) de KOH pour des fonctionnements à température (<120 °C). L'électrolyte est retenu dans une matrice (généralement de l'amiante) et une large gamme d'électro-catalyseurs peut être utilisée (par exemple, Ni, Ag, oxydes métalliques, spinelles et métaux nobles). L'approvisionnement en combustible est limité aux constituants non réactifs à l'exception de l'hydrogène. Le CO est un poison et le CO<sub>2</sub> réagira avec le KOH pour former du K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, modifiant ainsi

l'électrolyte. Même la petite quantité de CO<sub>2</sub> dans l'air doit être considérée comme un poison potentiel pour la pile alcaline. Généralement, l'hydrogène est considéré comme le combustible préféré pour l'AFC, bien que certaines piles à combustible à carbone direct utilisent des électrolytes alcalins (différents). L'AFC a été l'une des premières piles à combustible modernes à être développée, à partir de 1960. L'application à l'époque était de fournir de l'énergie électrique à bord du véhicule spatial Apollo. L'AFC a connu un succès considérable dans les applications spatiales, mais son application terrestre a été mise au défi par sa sensibilité au CO<sub>2</sub>. Pourtant, certains développeurs aux États-Unis et en Europe poursuivent l'AFC pour les applications mobiles et à système fermé (pile à combustible réversible).

### **I.5.2.1 Avantages**

Les attributs souhaitables de l'AFC incluent ses excellentes performances sur l'hydrogène (H<sub>2</sub>) et l'oxygène (O<sub>2</sub>) par rapport aux autres piles à combustible candidates en raison de sa cinétique d'électrodes O<sub>2</sub> active et de sa flexibilité pour utiliser une large gamme d'électro-catalyseurs.

### **I.5.2.2 Inconvénients**

La sensibilité de l'électrolyte au CO<sub>2</sub> nécessite l'utilisation de H<sub>2</sub> très pur comme combustible. Par conséquent, l'utilisation d'un reformeur nécessiterait un système d'élimination du CO et du CO<sub>2</sub> très efficace. De plus, si l'air ambiant est utilisé comme oxydant, le CO<sub>2</sub> dans l'air doit être éliminé. Bien que cela ne soit techniquement pas difficile, cela a un impact significatif sur la taille et le coût du système [6].

### **I.5.3 Pile à Combustible à Acide Phosphorique (PAFC)**

L'acide phosphorique, concentré à 100 %, est utilisé comme électrolyte dans cette pile à combustible, qui fonctionne généralement entre 150 et 220 °C. À des températures plus basses, l'acide phosphorique est un mauvais conducteur ionique et l'empoisonnement au CO de l'électro-catalyseur au Pt dans l'anode devient grave. La stabilité relative de l'acide phosphorique concentré est élevée par rapport aux autres acides courants, par conséquent,



le PAFC est capable de fonctionner à l'extrémité supérieure de la plage de température de l'acide (100 à 220 °C). De plus, l'utilisation d'acide concentré (100 %) minimise la pression de vapeur d'eau, de sorte que la gestion de l'eau dans la cellule n'est pas difficile. La matrice la plus couramment utilisée pour retenir l'acide est le carbure de silicium, et l'électro-catalyseur à la fois dans l'anode et la cathode est le Pt. Les PAFC sont principalement développés pour des applications stationnaires. Aux États-Unis et au Japon, des centaines de systèmes PAFC ont été produits, vendus et utilisés dans des tests et des démonstrations sur le terrain. C'est encore l'un des rares systèmes de pile à combustible disponibles à l'achat. Le développement du PAFC avait ralenti au cours des dix dernières années, au profit des PEMFC dont on pensait qu'ils avaient un meilleur potentiel de coût. Cependant, le développement du PAFC se poursuit.

### **I.5.3.1 Avantages**

Les PAFC sont beaucoup moins sensibles au CO que les PEMFC et les AFC. Les PAFC tolèrent environ 1 % de CO comme diluant. La température de fonctionnement est encore suffisamment basse pour permettre l'utilisation de matériaux de courants, du moins dans les composants BOP. La température de fonctionnement offre également une flexibilité de conception considérable pour la gestion thermique. Les PAFC ont démontré des efficacités de système de 37 à 42 % (sur la base du LHV du gaz naturel), ce qui est supérieur à ce que la plupart des systèmes PEMFC pourraient atteindre (mais inférieur à la plupart des systèmes SOFC et MCFC). De plus, la chaleur résiduelle du PAFC peut être facilement utilisée dans la plupart des applications de cogénération commerciales et industrielles et permettrait techniquement l'utilisation d'un cycle de fond.

### **I.5.3.2 Inconvénients**

La réduction de l'oxygène côté cathode est plus lente que dans l'AFC et nécessite l'utilisation d'un catalyseur au platine. Bien que moins complexes que pour le PEMFC, les PAFC nécessitent toujours un traitement important

du combustible, y compris généralement un réacteur de conversion eau-gaz pour obtenir de bonnes performances. Enfin, le caractère très corrosif de l'acide phosphorique nécessite l'utilisation de matériaux coûteux dans l'empilement (notamment les plaques séparatrices en graphite) [6].

#### **I.5.4 Pile à combustible à carbonate fondu (MCFC)**

L'électrolyte de cette pile à combustible est généralement une combinaison de carbonates alcalins, qui est retenue dans une matrice céramique de  $\text{LiAlO}_2$ . La pile à combustible fonctionne à 600 à 700 °C où les carbonates alcalins forment un sel fondu hautement conducteur, les ions carbonates assurant la conduction ionique. Aux températures de fonctionnement élevées des MCFC, le Ni (anode) et l'oxyde de nickel (cathode) sont adéquats pour favoriser la réaction. Les métaux nobles ne sont pas nécessaires au fonctionnement et de nombreux hydrocarbures courants peuvent être reformés en interne. Le développement du MCFC s'est concentré sur les applications stationnaires et marines plus importantes, où la taille et le poids relativement importants du MCFC et le temps de démarrage lent ne sont pas un problème. Les MCFC sont pour une utilisation avec une large gamme de carburants conventionnels et renouvelables. La technologie de type MCFC est également envisagée pour DCFC. Après le PAFC, les MCFC ont été démontrés le plus largement dans les applications fixes, avec des dizaines de projets. Alors que le nombre de développeurs MCFC et le niveau d'investissement sont réduits, le développement et les démonstrations se poursuivent.

##### **I.5.4.1 Avantages**

La température de fonctionnement relativement élevée du MCFC (650 °C) présente plusieurs avantages : aucun électro catalyseur coûteux n'est nécessaire car les électrodes en nickel fournissent une activité suffisante, et le CO et certains hydrocarbures sont des carburants pour le MCFC, car ils sont converti en hydrogène dans la pile (sur des plaques de reformeur spéciales) simplifiant le BOP et améliorant l'efficacité du système. De plus, la chaleur perdue à haute température permet l'utilisation d'un cycle de fond

pour augmenter encore l'efficacité du système entre les années cinquante et les années soixante..

#### **I.5.4.2 Inconvénients**

Le principal défi pour les développeurs de MCFC provient de l'électrolyte très corrosif et mobile, qui nécessite l'utilisation de nickel et d'acier inoxydable de haute qualité comme matériel de cellule (moins cher que le graphite, mais plus cher que les aciers ferriques). Les températures plus élevées favorisent les problèmes de matériaux, affectant la stabilité mécanique et la durée de vie de la pile[6].

#### **I.5.5 Pile à combustible à oxyde solide (SOFC)**

L'électrolyte de cette pile à combustible est un oxyde métallique solide et non poreux, généralement du  $ZrO_2$  stabilisé au  $Y_2O_3$ . La cellule fonctionne à 600-1000 °C où la conduction ionique par les ions oxygène a lieu. Typiquement, l'anode est en cermet Co- $ZrO_2$  ou Ni- $ZrO_2$ , et la cathode est en  $LaMnO_3$  dopé au Sr. Au début, la conductivité limitée des électrolytes solides nécessitait un fonctionnement de la cellule à environ 1000 °C, mais plus récemment, les cellules à électrolyte mince avec des cathodes améliorées ont permis une réduction de la température de fonctionnement à 650-850°C. Certains développeurs tentent de pousser les températures de fonctionnement SOFC encore plus bas. Cela a permis le développement de SOFC compacts et performants qui utilisaient des matériaux de construction relativement peu coûteux. Des efforts concertés de développement de piles, en particulier par le biais du programme SECA du DOE américain, ont considérablement fait progresser les connaissances et le développement des SOFC planaires à électrolyte mince. Grâce à l'amélioration des performances, les SOFC sont désormais envisagées pour un large éventail d'applications, notamment la production d'électricité stationnaire, l'alimentation mobile, l'alimentation auxiliaire pour les véhicules et les applications spécialisées [6].

### **I.5.5.1 Avantages**

La SOFC est la pile à combustible avec la plus longue période de développement continu, commençant à la fin des années 1950, plusieurs années avant l'AFC. Comme l'électrolyte est solide, la cellule peut être moulée sous diverses formes, telles que tubulaire, plane ou monolithique. La construction en céramique solide de la cellule unitaire atténue tout problème de corrosion dans la cellule. L'électrolyte solide permet également une ingénierie précise de la frontière triphasée et évite le mouvement de l'électrolyte ou l'inondation des électrodes. La cinétique de la cellule est relativement rapide, et le CO est un combustible directement utilisable comme dans le MCFC. Il n'y a pas d'exigence de CO<sub>2</sub> à la cathode comme avec le MCFC. Les matériaux utilisés dans les SOFC sont d'un coût modeste. Il a été démontré que les cellules unitaires SOFC planes à électrolyte mince sont des câbles de densités de puissance proches de celles obtenues avec PEMFC. Comme avec le MCFC, la température de fonctionnement élevée permet d'utiliser la majeure partie de la chaleur perdue pour la cogénération ou dans les cycles de fond. Des rendements allant d'environ 40 % (petits systèmes à cycle simple) à plus de 50 % (systèmes hybrides) ont été démontrés, et le potentiel d'un rendement supérieur à 60 % existe, comme c'est le cas pour le MCFC [6].

### **I.5.5.2 Inconvénients**

La température élevée de la SOFC a ses inconvénients. Il existe des décalages de dilatation thermique entre les matériaux et l'étanchéité entre les cellules est difficile dans les configurations de plaques plates. La température de fonctionnement élevée impose des contraintes sévères sur la sélection des matériaux et entraîne des processus de fabrication difficiles. La corrosion des composants de l'empilement métallique (tels que les interconnexions dans certaines conceptions) est un défi. Ces facteurs limitent la densité de puissance au niveau de la pile (bien que nettement plus élevée que dans PAFC et MCFC), ainsi que le cycle thermique et la durée de vie de la pile (bien que ce dernier soit meilleur que pour MCFC et PEMFC) [6].

## I.6 Applications des piles à combustible

Les piles à combustible ont d'abord été utilisées dans des applications spatiales, puis ont commencé à se développer et à se répandre davantage dans les cercles militaires, où les piles à combustible étaient alors utilisées comme source de secours en raison de leur grande fiabilité. Actuellement, tous les constructeurs automobiles commercialisent leurs nouveaux produits hybrides utilisant des piles à combustible, en plus de l'utilisation des piles à combustible, qui se répandent dans les bus, les trains, les avions et les mini-vélos.

Les piles à combustible se sont également répandues dans de petites applications telles que les téléphones cellulaires, les ordinateurs portables et autres. La possibilité d'utiliser des piles à combustible pour alimenter les hôpitaux, les banques et les distributeurs de billets est en cours. Les applications des piles à combustible sont nombreuses, avec le développement de la technologie, les domaines de leur utilisation se multiplient [17].

### I.6.1 Applications fixes

Actuellement, plusieurs systèmes de piles à combustible ont été installés dans le monde dans des hôpitaux, des hôtels, des bureaux et des écoles, en plus d'utiliser des piles à combustible comme postes électriques connectés au réseau électrique public pour fournir un support au réseau ou des postes électriques indépendants dans zones difficiles à connecter au réseau. Les systèmes de pile à combustible fonctionnent à une efficacité de 15 % sans bruit et sans pollution de l'air. Lorsque les piles à combustible sont utilisées dans un système de cogénération où l'énergie thermique résultante est utilisée, l'efficacité peut être portée à 85 % [7].

### I.6.1.1 Télécommunications

Avec l'utilisation croissante des ordinateurs, d'Internet et des réseaux de communication, la nécessité d'une plus grande source fiable est apparue

L'eau formé est un liquide dans les conditions normal de température et de pression (0C° et 1 atm ou 273K et 1013 hpa) Comme le montre la figure.I.3 suivante [4].



**Figure : I .3 Télécommunications [17].**

Les piles à combustible ont prouvé que leur fiabilité peut être remplacée. Quant aux économies réalisées avec les piles à combustible pour fournir une puissance allant jusqu'à 5 kW, elles sont silencieuses et respectueuses de l'environnement, et elles peuvent être conçues pour être durable, c'est-à-dire qu'elles peuvent résister aux conditions météorologiques environnantes. Elles sont actuellement utilisé comme source d'alimentation principale ou comme source de support dans les tours cellulaires et les nœuds de commutation et de télécommunications [17].

### I.6.1.2 Usines de traitement des eaux usées et de certaines boissons

Des piles à combustible sont désormais installées dans les usines de traitement des eaux usées du monde entier et cette technologie s'est avérée efficace pour réduire les émissions car elle utilise le gaz méthane de ces sites comme combustible. Il a également été installé dans plusieurs usines de production de certaines boissons [17].

## I.6.2 Dans le domaine des transports

- **Bus** : Au cours des dernières années, beaucoup de bus à pile à combustible ont été utilisés en Europe, en Amérique du Nord et du Sud, en

Asie de l'Est et en Australie. Le haut rendement des piles à combustible en plus des très faibles polluants car l'hydrogène est produit à partir de sources renouvelables a considérablement amélioré la qualité de l'air, en particulier dans les zones considérées comme l'une des plus polluées au monde comme la Chine.[17]

**-Vélos moteur** : Malgré leur petite taille, de nombreux vélos moteur sont considérés comme polluant l'air, leurs gaz d'échappement sont très polluants par rapport à leur petite taille. Il produit du monoxyde de carbone et des hydrocarbures en quantités similaires à celles d'un camion diesel. Par conséquent, les vélos moteur qui fonctionnent avec des piles à combustible sont une solution appropriée pour des pays comme l'Inde et l'Asie où de nombreuses personnes utilisent des vélos moteur comme moyen de transport [17].

### **Ascenseurs et mécanismes de transport dans les usines Chariots élévateurs/Manutention**

En plus de la fonction de réduction des émissions de gaz nocifs, les ascenseurs fonctionnant avec des piles à combustible se caractérisent par le fait qu'ils nécessitent beaucoup moins d'entretien que les mécanismes fonctionnant à l'électricité, car ils doivent recharger leurs batteries périodiquement ou les remplacer. Elles s'endommagent rapidement car le travail dans ce domaine doit être arrêté et redémarré rapidement et fréquemment, de sorte que les piles à combustible sont considérées comme ayant d'excellentes performances et une sortie électrique stable, en plus de cela, elles ne souffrent pas de la chute de tension qui se produit [17].

**I.6.2.1 Avions** L'attention est portée sur la technologie des piles à combustible qui alimentent militairement les avions en raison de leur faible bruit, de leur petite taille et de la possibilité de les utiliser dans les airs. L'une des plus grandes entreprises développant cette technologie est Boeing. La figure montre un avion allemand basé sur des piles à combustible survolant la ville de Hambourg

L'eau formé est un liquide dans les conditions normal de température et de pression (0C° et 1 atm ou 273K et 1013 hpa) Comme le montre la figure.I.4 suivante [4].



Fig I.4: Illustration d'un avion à hydrogène [17].

**I.6.2.2 Bateaux** : l'Islande s'est engagée à convertir sa vaste flotte de pêche pour utiliser les piles à combustible comme source d'alimentation auxiliaire à la fin de 2015 afin d'ouvrir la voie à l'ensemble de la flotte pour passer aux piles à combustible comme source principale. Les moteurs à pile à combustible sont plus efficaces que les moteurs à combustion, en plus de leurs autres avantages de réduction de la pollution [17].

### **I.6.2.3 Unités d'alimentation auxiliaires (APU)**

Les camions transportent à bord de nombreux appareils électriques tels que des radiateurs, des climatiseurs, des ordinateurs, des téléphones, des réfrigérateurs et des micro-ondes. Pour faire fonctionner ces équipements lorsque le camion est à l'arrêt, le moteur doit être démarré [17].

### **I.6.3 Alimentation portable**

Les piles à combustible peuvent nous fournir de l'énergie là où le réseau électrique n'est pas disponible. Elles sont utilisées dans des situations



d'urgence et dans des applications militaires. Elles sont plus efficaces que les batteries, durent plus longtemps et sont plus légères [17].

### **1.6.3.1 Micro-équipement électrique**

Les piles à combustible sont l'une des sources d'énergie les plus appropriées pour les petits appareils électroniques en raison de leur petite taille et de leur capacité à générer une grande quantité d'énergie électrique pour leur petite taille. Les piles à combustible sont désormais utilisées dans les téléphones portables, les ordinateurs portables, les montres et d'autres petites applications.

Les chargeurs proposés sur le marché permettent désormais de recharger l'ordinateur pour une autonomie une vingtaine d'heures et le téléphone portable pour une autonomie de trente jours. Ils ont également été utilisés dans les détecteurs de fumée, les alarmes et les caméras de surveillance. Beaucoup de ces équipements sont exposés chaque année à l'exposition sur les piles à combustible FC EXPO qui se tient chaque année à Tokyo. Sony a présenté un chargeur portable, qui est un appareil hybride entre une pile à combustible et une batterie au lithium. Toshiba a présenté, à travers le salon "Hanovre", le Notebook (ordinateur portable) équipé d'une mini pile à combustible, et il permet à l'appareil de fonctionner pendant une semaine entière sans s'arrêter sans assistance ni connexion à aucune autre source d'alimentation L'eau formé est un liquide dans les conditions normal de température et depression ( $0\text{C}^{\circ}$  et 1 atm ou 273K et 1013 hpa) Comme le montre la figure.1.6.3 suivante [4].



Figure : I.5 ustration d'une pile à combustible produisant de l'électricité [17].

#### I.6.4 Dans le domaine des turbines à gaz

Les turbines à gaz sont celles qui produisent le mouvement de rotation nécessaire pour faire tourner le générateur et ainsi générer de l'électricité, améliorant ainsi le rendement de l'électricité générée .Une étude publiée par le centre (BBC marketing/ technology) a confirmé que les ventes de piles à combustible en 2003 atteignaient 1,3 milliard de dollars, alors qu'elles atteignaient 355 millions de dollars en 1998, soit une augmentation de 30 % et cela confirme la tendance à l'utilisation universelle des piles à combustible dans diverses applications. Par conséquent, la recherche s'oriente vers l'obtention de nouveaux matériaux pouvant être utilisés dans ces cellules au lieu de matériaux coûteux, et les travaux sont toujours basés sur le développement de cellules, la réduction de leur prix, de leur poids, de leur taille et l'augmentation de leur efficacité et de leur énergie, ils conviennent à de nombreuses applications et autres processus [17].

## Conclusion

La pile à combustible offre un faible coût dans un système énergétique qui entre dans le domaine des énergies renouvelables. Dans ce chapitre, nous avons commencé par une introduction sur les piles à combustible, puis un bref historique qui donne un aperçu du développement qu'a connu la pile à combustible depuis 1839. Les différents types de piles ont été présentées puis classés selon leur température de fonctionnement et la nature de leur électrolyte. Dans les chapitres suivants on va modéliser la pile à PEMFC en donnant toutes les équations mathématiques à fin d'obtenir la tension à la sortie de la pile et l'énergie obtenue [26].

***chapitre II***  
***la pile a combustible de***  
***type PEMFC***

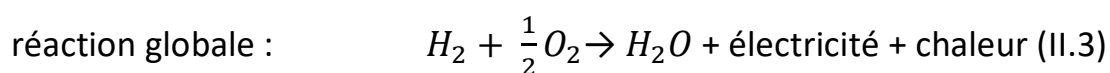
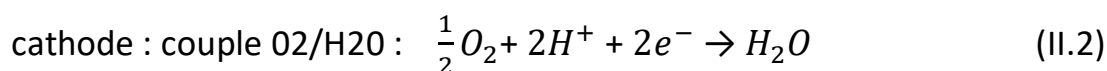
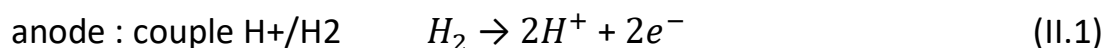
## INTRODUCTION

Pour subvenir aux besoins en énergie, qui occupe une position stratégique dans toutes les activités humaines, et tenir compte de l'augmentation de la demande énergétique, Il est devenu nécessaire de développer de nouvelles sources d'énergie comme solution énergétique du futur.

Les systèmes qui interviennent dans la production et la transformation de l'hydrogène qui est un vecteur énergétique de futur, on trouve les piles à combustible, leur modélisation prend une part très importante dans leur développement, car cela facilite la compréhension des phénomènes mis en jeu en leur sein. Il existe ainsi un grand nombre de modèles de piles à combustible, qui ont généralement chacun leurs propres spécificités et utilités, suivant les phénomènes étudiés. Les modèles mathématiques offrent un outil indispensable pour approuver la conception et la performance des piles à combustible. Nous étudierons dans ce chapitre la modélisation statique et dynamique d'une pile à combustible de type PEMFC [11].

### II.1 Principe de fonctionnement d'une pile à combustible de type PEM

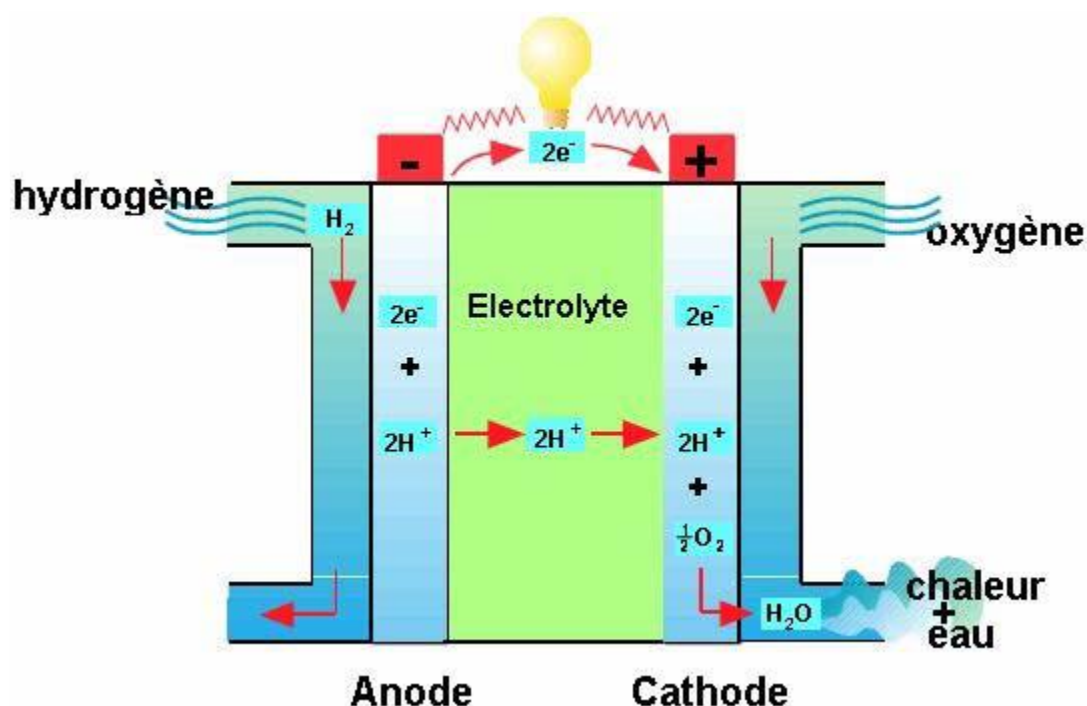
Une pile à combustible de type PEM est constituée d'un empilement de cellules électrochimiques en série. Chaque cellule est le siège d'une réaction électrochimique. A l'inverse de l'électrolyse de l'eau, la réaction d'oxydoréduction (en présence de platine), fait réagir l'hydrogène et l'oxygène pour produire de l'eau, de l'électricité et de la chaleur selon les équations suivantes [15]



Cette réaction crée une différence de potentiel entre les électrodes de l'ordre du Volt, différence de potentiel qui est propre au couple redox que forment H<sub>2</sub> et O<sub>2</sub>. Du fait de ce caractère naturel très basse tension, les constructeurs

assemblent plusieurs cellules électrochimiques en série afin d'obtenir une tension suffisamment élevée pour la traiter d'un point de vue électrique, avec un rendement satisfaisant.

La figure II.1 présente un schéma d'une pile à combustible constituée de 3 cellules, alimentée en H<sub>2</sub> et en O<sub>2</sub>. Comme le montre la figure II.1 [15].



**Figure II.1** Fonctionnement de principe d'une cellule de la pile à combustible [10]

## II.2 Eléments de base d'une cellule élémentaire de pile PEM

La cellule de base d'une pile à combustible est constituée d'un empilement de deux électrodes poreuses séparées par un électrolyte solide. De chaque côté de l'électrode, on trouve deux couches de diffusion et deux plaques bipolaires [14].

### II.2.1 Plaques bipolaires

La tâche principale des plaques bipolaires est d'assurer l'arrivée des gaz à la surface de la couche de diffusion. Elles sont à base de graphite et contiennent des canaux qui permettent le passage des gaz le long de la

surface. Sur le dos de chaque plaque, on trouve généralement des canaux conçus pour transporter le liquide de refroidissement du système.

L'architecture des canaux et des circuits de refroidissement fait encore l'objet de nombreuses études [14].

Les plaques bipolaires servent aussi à collecter le courant et à assurer la mise en série électrique des cellules.

### **II.2.2 Couches de diffusion**

Les couches de diffusion assurent une bonne distribution des gaz sur toute la surface de réaction, qui est la surface active de l'électrode. Elles doivent avoir une bonne résistance mécanique à la température et à la présence d'eau.[14]

### **II.2.3 Assemblage membrane – Electrode**

Les électrodes sont à base d'un matériau carboné sur lequel sont déposés des grains de platine jouant le rôle de catalyseur. Leur épaisseur est de l'ordre de quelques dizaines de micromètres. Le processus de réalisation conduit à les déposer sur la membrane où elles s'imbriquent fortement. Une fois ce processus réalisé, l'ensemble constitue ce que l'on appelle l'Assemblage Membrane – Electrode (en Anglais MEA, Membrane Electrode Assembla).

Les travaux actuels portent sur :

- la réduction de la quantité de platine qui est un matériau onéreux
- la réduction de l'épaisseur de la membrane qui en s'opposant à la circulation des ions intervient pour une part non négligeable dans la résistance interne du système.
- la recherche de matériaux de membrane pouvant fonctionner à des températures supérieures aux 40° – 90° actuels et où intervient des ions pour une part non négligeable dans la résistance interne du système Comme le montre la figure.II.2 [14].

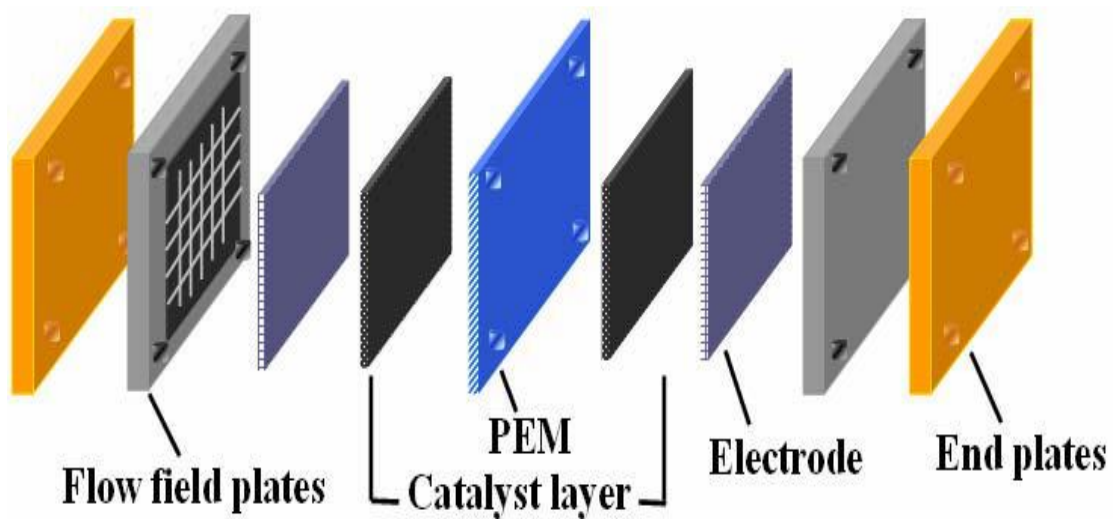


Figure II.2 composants d'une seule pile à combustible PEM.

### II.3- Description de la cellule PEM

La cellule de base d'une pile à combustible est constituée d'un empilement de deux électrodes poreuses séparées par un électrolyte solide. De chaque côté de l'électrode, on trouve deux couches de diffusion et deux plaques bipolaires. Comme le montre la figure.II.3 [11].

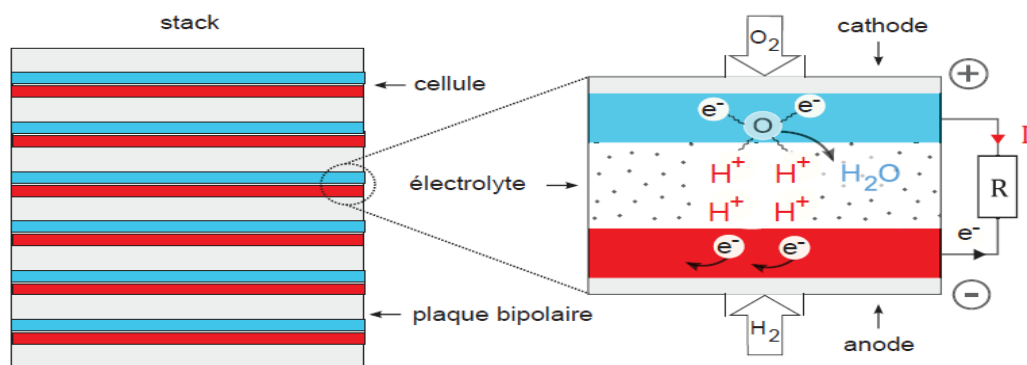


Fig: II.3 Les différents éléments de la pile PEM [11]



### II.3.1 Electrolytes (membrane)

L'électrolyte et membrane, constituent un des éléments principaux de la pile PEMFC. Son rôle est multiple et les performances de la pile dépendent fortement de ses caractéristiques mécaniques, électriques et chimiques. Elle assure notamment la séparation des deux compartiments anodique et cathodique.

### II.3.2 Les électrodes

Les électrodes doivent pouvoir assurer le transfert des protons depuis les sites catalytiques d'oxydation de l'hydrogène vers les sites de réduction de l'oxygène via la membrane.

De même, les électrons produits par la cathode doivent pouvoir être évacués puis redistribués à l'anode par le circuit extérieur. Ainsi, les électrodes doivent assurer une bonne conductivité ionique et électronique. Pour cela, elles sont constituées d'un mélange intime de carbone (Conducteur électronique), d'électrolyte (conducteur protonique) et de platine (catalyseur). [11],

**A l'anode**, on réalise l'oxydation de l'hydrogène, selon la réaction précédente (pour une pile acide)

**A la cathode**, on réalise la réduction de l'oxygène, selon la réaction précédent

Le catalyseur fait que les deux demi-réactions soient possibles, il faut un catalyseur (c'est-à-dire un composé capable d'augmenter la vitesse de réaction, sans être consommé par lui-même). Afin que le catalyseur puisse travailler efficacement, la création de zones actives doit être assurée. Ces zones mettent en présence à la fois le gaz réactif, les électrons, les protons et le catalyseur, cela se réalise au niveau de l'interface électrode-électrolyte [11].

### II.3.3 Les plaques bipolaires

Ces plaques sont dites bipolaires car elles assurent simultanément l'alimentation en gaz ( $H_2$  et  $O_2$ ) des deux cellules les encadrant dans le cas d'empilement de cellules. Ainsi, une plaque apporte l'oxygène du côté cathodique et l'hydrogène du côté anodique de la cellule suivante et l'évacuation de l'eau produite par la réaction. Ces plaques sont composées de

graphite à haute densité. Elles, sont disponibles commercialement mais à des prix très élevés Comme le montre la figure.II.4.

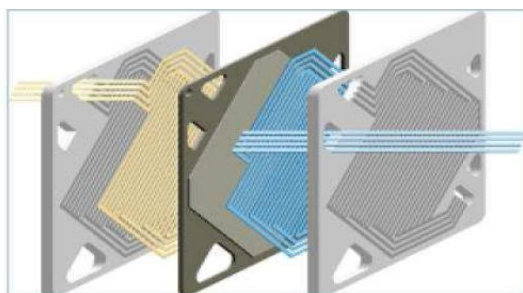


Figure II.4 Plaque bipolaire[11].

### II.3.4. Couches de diffusion (Backing)

Entourant les électrodes, les couches de diffusion, d'une épaisseur comprise entre 300  $\mu\text{m}$  et un millimètre ont un triple rôle. Elles doivent tout d'abord permettre la distribution et la diffusion des réactifs depuis les plaques bipolaires jusqu'aux électrodes, ainsi que permettre le transfert des électrons de l'anode ou de la cathode vers les plaques bipolaires. Elles assurent enfin un rôle essentiel dans la gestion de l'eau en permettant à la fois qu'elle soit évacuée et qu'elle humidifie la membrane. Elles doivent donc être à la fois conductrices de courant et de structure poreuse. La porosité peut varier entre 40 et 80% selon leur nature et leur application.

La nature poreuse de ces supports permet aux réactifs de diffuser, ce qui leur permet d'entrer plus efficacement en contact avec la surface entière de l'électrode puis de la membrane Comme le montre la figure.II.5 [11].

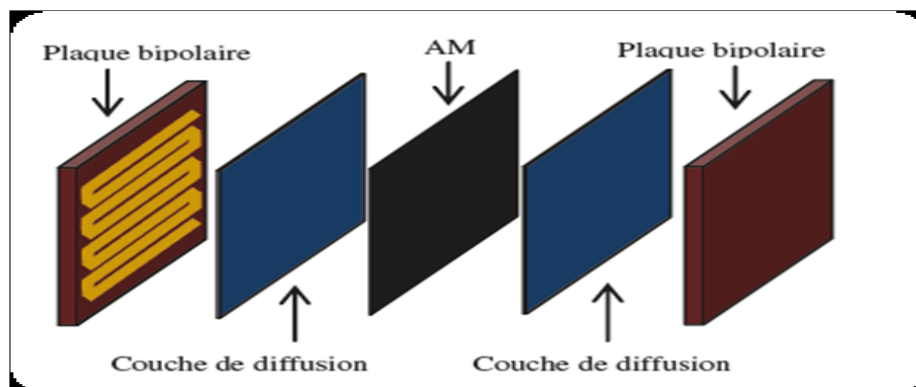


Figure II.5 le cœur de pile a combustible [23].

### II.3.5 Assemblage Membrane – Electrodes

Les électrodes sont à base d'un matériau carboné sur lequel sont déposées des grains de platine jouant le rôle de catalyseur. Leur épaisseur est de l'ordre de quelques dizaines de micromètres. Le processus de réalisation conduit à les déposer sur la membrane où elles s'imbriquent fortement. Une fois ce processus réalisé, l'ensemble constitue ce que l'on appelle l'Assemblage Membrane– Electrodes (en Anglais MEA, Membrane Electrode Assemblé ).

Les travaux actuels portent sur :

- la réduction de la quantité de platine qui est un matériau onéreux ;
- la réduction de l'épaisseur de la membrane qui en s'opposant à la circulation des ions intervient pour une part non négligeable dans la résistance interne du système ;
- la recherche de matériaux de membrane pouvant fonctionner à des températures supérieures aux 40 – 90° [11].

## II.4 Rendements

### II.4.1 Rendement thermodynamique

Dans un premier temps, on peut définir un rendement thermodynamique théorique maximal (dans les conditions standards) : il s'agit de comparer l'énergie électrique créée avec l'énergie calorifique de la réaction électrochimique[19]

$$\dot{\eta}_{\text{thermo}}(T) = \frac{G_0(T)}{H_0(T)} \quad (\text{II.4})$$

La réaction de formation de l'eau, lorsque celle-ci est Produit à l'état liquide à 25°C et à une pression de 1 bar, libère une variation d'enthalpie libre standard  $G_0 = -237,2 \text{ kJ/mol}$ , et une variation d'enthalpie de  $H_0 = -285.8 \text{ kJ/mol}$ . On trouve alors un rendement thermodynamique :

$$\dot{\eta}_{\text{thermo}} = 83\% \quad [19]$$

### II.4.2 Rendement de matière

Dans la notion de rendement global, intervient également le problème de la consommation des gaz. En effet, en pratique tout le gaz fourni n'est pas consommé par la pile, et on définit un coefficient d'utilisation des gaz que l'on estime typiquement à 0,95

$$\dot{\eta}_{\text{mat}} = \frac{M_{H_2}^{\text{pile}}}{m_{H_2}^R} = \frac{M_{H_2}^R - M_{H_2}^{\text{ex}}}{m_{H_2}^R}$$

$$\dot{\eta}_{\text{mat}} = 95\% \quad [19]$$

### II.4.3 Rendement voltaïque:

Comme nous avons pu le voir dans la dernière expression de la variation d'enthalpie libre, la pression et la température viennent modifier cette variation d'enthalpie libre. De plus, les pertes irréversibles de la réaction dépendantes de la pression et de la température dans le cas général vont jouer un rôle considérable. Il est alors commode de comparer le potentiel réel de la cellule avec le potentiel maximal théoriquement atteignable de

$E_0 = 1,23V$  . On introduit alors un rendement voltaïque [19]

$$\eta_{\text{voltaïque}} = \frac{V_{\text{cellule}}}{1.23} \times 100$$

#### II.4.4 Rendement faradique

Ce rendement permet de rendre compte du fait que le nombre d'électrons obtenu par moles de combustible ou de comburant consommées n'est pas toujours égal aux valeurs théoriques. Par exemple, il peut s'agir de quelques fuites de  $H_2$  à travers la membrane qui ne participera pas à la réaction électrochimique. Ce rendement est souvent considéré égal à 1 [19].

#### II.4.5 Rendement global

Il s'agit de prendre en compte tous les rendements précédents :

$$\eta_{\text{global}} = \eta_{\text{thermo}} \times \eta_{\text{matière}} \times \eta_{\text{voltaïque}} \quad [19]$$

En pratique, la tension typique d'utilisation d'une cellule de PEM se situe autour de 0.7 V. On peut calculer un rendement approximatif :

$$\eta_{\text{global}} = 43\%.$$

#### Remarque

Pour un système PAC, il est nécessaire de prendre en compte dans le rendement global la consommation énergétique des auxiliaires d'alimentation (compresseur, système de refroidissement...).

Il est important de noter que ce rendement est calculé en partant de l'énergie contenue dans les gaz et en ne valorisant que l'énergie électrique. Nous percevons dès lors l'intérêt de la cogénération valorisant électricité et chaleur [19].

## **Conclusion**

En conclusion, après avoir expliqué le principe de fonctionnement d'une pile à combustible PEMFC, nous avons donné en détail les différents éléments de base constituant cette pile. Parmi ses éléments, nous avons parlé de la nature, des électrodes, des plaques bipolaires, des membranes, des couches de diffusion ainsi que de leur assemblages. Nous avons en suite abordé le rendement de cette pile à combustible en donnant leur différentes formulation. On a surtout évoqué le rendement thermodynamique, le rendement de matière, le rendement voltaïque, le rendement Faradique et enfin le rendement global [19].

**chapitre III**  
 **piles a combustible PEMFC**  
 **dans les applications**  
 **portables et transport**

## **INTRODUCTION**

La pile à combustible peut être utilisée dans presque toutes les applications nécessitant une alimentation électrique. On distingue principalement deux catégories d'applications : Les applications de transport dans lesquelles les batteries sont utilisées pour entraîner ou pour alimenter en électricité des appareils embarqués dans des systèmes mobiles embarqués (automobiles, ferroviaires, aéronautiques, aérospatiaux, sous-marins...). Les Applications portables couvrant un large domaine des appareils électriques (ordinateurs, téléphones portables, caméscopes [18]).

### **III.1.1 Application des piles à combustible dans le secteur portable**

La demande croissante de qualité, de densité et de performances temporelles de l'alimentation électrique est le principal moteur du marché de la production d'énergie portable, qui comprend un nombre croissant de nouveaux produits (lecteurs de cassettes et de mini disques, ordinateurs portables, téléphones portables...). Sur ce marché, il y a toujours une concurrence entre les différentes technologies, car les produits doivent être plus petits, moins chers et plus légers, avec un nombre croissant de fonctions. De plus, les domaines des télécommunications, de l'informatique, d'Internet et des réseaux sociaux sont devenus incontournables pour l'homme.

Cela implique la nécessité d'une alimentation électrique totalement fiable. Pour toutes ces raisons, les piles à combustible sont particulièrement adaptées aux systèmes d'alimentation portables en raison du fait qu'elles ont un bon potentiel en termes de densité d'énergie, de durabilité, de conception simple et de faible coût. Une pile à combustible peut fonctionner tant que le carburant est économisé. Pour l'appareil, cela peut être facilement fait à partir d'un réservoir très petit et léger. Les applications portables des piles à combustible se concentrent principalement sur deux marchés principaux. Le premier est le marché des piles portables, générateurs électriques conçus pour des utilisations personnelles légères en extérieur (telles que le camping et l'escalade) et des applications commerciales légères telles que la



signalisation. Par exemple, dans un cadre de vacances en plein air (zone de camping), utiliser une pile à combustible pour l'énergie électrique au lieu d'un générateur diesel, éviter les émissions nocives, contribuer à préserver l'environnement et ne pas causer de problèmes de bruit aux autres personnes dans l'environnement. Le Le deuxième marché est celui des appareils électroniques grand public (par exemple, les ordinateurs portables, les téléphones portables, les radios, les caméscopes, les i-pods et, en gros tout appareil électronique qui fonctionne traditionnellement sur batterie). La modularité et la haute densité d'énergie des piles à combustible en font un fort potentiel. Candidats pour les futurs appareils électroniques personnels portables. Les piles à combustible peuvent également être utilisées pour fournir de l'énergie en tant que système principal ou de support pour les nœuds de commutation de télécommunications, les tours de transmission, la réception ou d'autres appareils électroniques pouvant bénéficier de l'alimentation CC. fourni par une pile à combustible. Les marchés en croissance dans le secteur portable comprennent les chargeurs de batterie portables en plus des véhicules miniatures de démonstration et éducatifs télécommandés, des jouets, des kits et des gadgets par les fabricants Comme le montre la figure.III.1 [21].

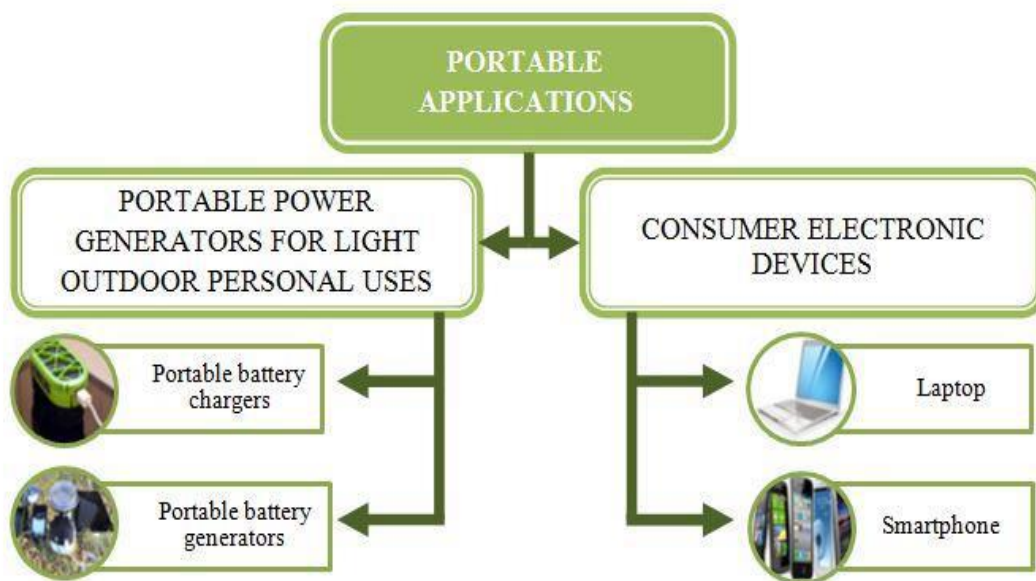


Fig III.1 Applications portables pour les piles à combustible[21].

En particulier, il existe une demande croissante de systèmes d'alimentation pour les équipements électroniques portables sur le marché militaire, ce qui signifie une demande croissante pour les PEMFC portables en raison de leur fonctionnement silencieux, de leur puissance supérieure, de leur densité d'énergie et de leur poids inférieur par rapport aux équipements portables actuels alimentés par batterie. De plus, le marché militaire accepte des prix plus élevés en échange de meilleurs compromis en termes de performances et de poids. Les centrales électriques à pile à combustible PEM offrent un fonctionnement très efficace. Cependant, le problème avec les grandes piles à combustible PEM (> 2 kW), est qu'elles nécessitent de l'hydrogène pour fonctionner. Tandis que l'hydrogène doit être généré à partir des carburants logistiques existants. Les perspectives d'une pile à combustible portable sont très élevées. Deux des systèmes n'ont pas pu être lancés et ont été produits par myFC, Il convient de noter qu'il y a toujours une augmentation de 174 % de la charge des piles à combustible par rapport à 2011. myFC et Horizon ont également continué à développer leurs systèmes pour qu'ils soient facilement évaluables par les consommateurs, tandis que Aquafairy a changé pour construire des piles à combustible pour l'alimentation de secours d'urgence. En 2013, l'intérêt pour les piles à combustible portables pour l'électronique grand public devrait se poursuivre, mais à un niveau légèrement inférieur à celui d'avant, car la technologie fait ses preuves face aux batteries concurrentes. En termes de mégawatts, le nombre de piles à combustible portables est faible par rapport à d'autres applications et la capacité des unités de pile à combustible fonctionnant dans le secteur mobile. Cependant, le marché des piles à combustible portables peut être classé en quatre domaines principaux comme suit : Recharge des appareils électroniques grand public (par exemple, les téléphones mobiles). Les Unités d'alimentation auxiliaires dans les applications récréatives (par exemple, camionnettes et caravanes). Utilisation militaire par les soldats (par exemple, véhicules aériens sans pilote, force portable). Les Faibles niveaux de puissance pour les utilisations éducatives et les jeux d'enfants. Il y a eu une forte croissance des expéditions du secteur des piles à combustible portables de 2013 à 2014, les ventes annuelles de certains fabricants se situant dans la fourchette des 10000. Cela est principalement dû à l'augmentation des produits de

consommation (par exemple, les téléphones portables). Horizon a démarré la commercialisation des chargeurs USB portables à pile à combustible en 2011 avec leur gamme Minipack. Depuis lors, ils ont lancé avec succès leur hydropack et Aquipen 180 en 2013 et 2014 respectivement. Les deux sont centrés sur les marchés du camping et de la caravane. des fonctionnalités de communication, de calcul et de divertissement, avec lesquelles les piles à combustible portables peuvent rendre ces appareils plus sûrs, pratiques. Pour une utilisation efficace de ces applications, il est impératif que les systèmes de charge et d'alimentation de secours de ces les appareils soient soigneusement étudiés. Un scénario pratique est le téléphone multimédia de troisième génération (B3G) qui nécessite environ 3790 mAh par jour. Les appareils électroniques de haute technologie hautement sophistiqués tels que les radios, les appareils de vision nocturne, les ordinateurs portables et les systèmes de refroidissement personnels en sont des exemples vitaux. Tous ces appareils exigent sûrement une alimentation électrique durable et sécurisée. pour des appareils tels que l'ordinateur portable. Le tableau (III.1) montre la demande électrique générale pour certains appareils portables simples qui peuvent nécessiter l'utilisation d'une pile à combustible [21].

<b>ÉLÉMENTS</b>	<b>PUISSANCE (W)</b>
<b>Téléphone cellulaire</b>	<b>1</b>
<b>Assistant numérique personnel (PDA)</b>	<b>1</b>
<b>Ordinateur personnel bloc-notes</b>	<b>20-30</b>
<b>Lampes de poche et jouets</b>	<b>1-10</b>
<b>Ordinateur personnel tablette</b>	<b>10</b>
<b>PlayStation portable (PSP)</b>	<b>2</b>
<b>Téléphone de diffusion multimédia numérique (DMB)</b>	<b>3</b>
<b>Iphone</b>	<b>2</b>
<b>Robot</b>	<b>10-15</b>
<b>Appareil photo numérique</b>	<b>1</b>

Tableau III.1 montrant la puissance électrique de quelques appareils portables simples [21].

Les appareils mobiles sont évalués en fonction de la puissance requise, les petits appareils et appareils électroniques nécessitant jusqu'à 3 watts de puissance sont classés dans une catégorie (par exemple, lecteurs mp3, appareils photo, etc.), tandis que les gros appareils électroniques personnels (par exemple, ordinateurs portables, imprimantes) sont classés jusqu'à 30 watts de puissance dans une autre catégorie. Les progrès limités de la technologie actuelle des batteries n'ont généralement pas permis de répondre aux progrès rapides qui ont été réalisés dans la fabrication d'appareils électroniques portables (PED). En conséquence, certains chercheurs se sont tournés vers d'autres alternatives, y compris les piles à combustible. , conversion à haute énergie à partir de produits chimiques rendement énergétique au rendement électrique, bon potentiel d'allègement, de réduction de la pollution et de la pollution induite. Pas d'effet mémoire lors du ravitaillement, les piles à hydrogène sont bien meilleures en termes de densité d'énergie. Pour une meilleure concurrence entre les piles à combustibles portables et les batteries rechargeables. La recharge existe actuellement à grande échelle, l'efficacité énergétique, la densité énergétique et l'énergie également où le coût doit être soigneusement déterminé pour rendre l'option de la pile à combustible compétitive par rapport aux batteries, d'autre part, la conception globale de la batterie est généralement simple par rapport aux piles à combustible à hydrogène, principalement en raison de la présence de carburant et de systèmes à hydrogène, connexion de comburant, systèmes de gestion de l'eau, systèmes d'isolation de gaz et accès électriques flexibles et à faibles pertes, les perspectives de miniaturisation et d'application ultérieure sont affectées dans le dispositif portable miniature. Cependant, des progrès récents ont été réalisés dans la technologie des systèmes micro électromécaniques (MEMS) et son application dans la conception d'autres composants de pile à combustible a conduit à l'émergence de la possibilité de miniaturiser les dispositifs à pile à combustible pour les rendre compatibles avec PED miniature.[21]

-Les piles à combustibles sont de plus en plus utilisées comme alternative aux générateurs les recharges des batteries servant comme alimentation de secours, assurant une grande autonomie et restant fiable aux démarrages. Les PEMFC sont le plus souvent utilisées comme alimentation. De même

pour les téléphones mobiles et ordinateurs portables, qui connaissent tous deux, une très forte croissance mais sont limitées par l'autonomie de leur batterie [20].

### **II.2 Le transport**

La PAC est utilisée dans les transports depuis XVIIIème siècle, les physiciens Jacques Charles et Noël Robert ont effectués un voyage aérien dans un ballon appelé « aérostat à gaz hydrogène ». Elle est également utilisable pour la propulsion dans le domaine des transports. Utilisé pour la propulsion de fusée (Ariane V). Pour les avions et les bateaux (sous marins), l'utilisation de l'hydrogène n'est pas encore maîtrisée [22].

#### **II .2.1 Voiture**

L'entreprise Honda a mis en place la « Honda FCX Clarity », dont les premiers essais ont eu lieu en 2009. Son autonomie beaucoup plus élevée que les voitures électriques, 700km et son temps de chargement nettement plus rapide, seulement 3 minutes. Elle n'était cependant pas commercialisée du fait de son prix exorbitant. De plus pour les rares clients pouvant se l'offrir il est nécessaire de vivre assez proche d'une station. De plus l'installation d'une station à hydrogène coûterait entre 2.5 et 4 millions d'euros.

358 piles à combustible forment "une batterie" situées sous le capot. Il y a deux réservoirs, un principal de 117 litres plaqué contre le dossier de la banquette tandis qu'un second, de 24 litres, sous l'assise. Il y en a deux car le stockage de l'H<sub>2</sub> à 700 bars impose une forme cylindrique à la bonbonne, il faut donc trouver une place suffisante [22].

#### **II.2.2 Transport Ferroviaire**

Les piles à combustible sont aujourd'hui utilisées dans un train du nom de Coradia iLint qui a été créé par le groupe Alstom et est entré en service en Allemagne en 2018. Il a été conçu à Salzgitter en Allemagne et à Tarbes en France Comme le montre la figure.III.2 [20].



Figure III.2 : Train Coradia iLint [20]

### **III.2.3 Automobile**

Les prototypes les plus connus sont de la marque Mercedes, Audi, Peugeot, Ford, GM, Nissan, BMW et d'autres marques. De plus, les voitures hybrides électriques à hydrogène commercialisées depuis 2016 sont Toyota, Hyundai et Honda Comme le montre la figure.III.3 [20].



Figure III.3 : Toyota Mirai [20]

### **III.2.4 vélos électriques**

L'entreprise Pragma industrie à Biarritz a mis en place des vélos électriques. Les vélos "Alpha" ont été financés par une campagne de financement participatifs. La 1ère génération de vélos est sortie fin 2017. Leur autonomie est d'une centaine de kilomètres [22].

### **III.2.5 Aéronautique**

Dans le domaine aéronautique, le premier exemple d'application est le Dimona qui a été transformé par Boeing. Il s'agit d'un modèle réduit alimenté par une pile à hydrogène de type PEMFC de la firme britannique Intelligent Energie. L'avion a volé environ 20 minutes en palier à 100 km/h et a grimpé jusqu'à une altitude de 1 000 mètres Comme le montre la figure III.4 .



Figure III.4 Le Dimona transformé par Boeing [20]

### **III.2.6 Bateaux**

Les piles à combustible ont un rôle important dans la propulsion des sous-marins car elles sont bien plus autonomes que les batteries classiques. De plus leur fonctionnement est bien plus discret. Elles alimentent donc des sous-marins militaires.

De plus, le 06 Novembre 2017, la ville de La Rochelle a inauguré Yélo  $H_2$ , le premier bus maritime propulsé à l'hydrogène Comme le montre la figure.III.5 [22].



Figure III.5 Sous-marin allemand - Type 212 [20]

## III.2.7 Spatial

D'après une présentation sur la pile à combustible pour les 50 ans de la mission Apollo 11, présentée par David BOUQUIN, le jeudi 9 mai 2019 La NASA a utilisé 2 types de piles à combustible pour deux programmes avec l'aide d'ingénieurs de Général Electric.

Pour les missions Gemini, ils ont créé une pile AFC en hybridation avec des batteries, il y avait 6 stacks pour 707 h d'autonomie reliés à plusieurs batteries (Figure I.12). Cependant, ils ont trouvé une pile plus adaptée pour les missions Apollo, afin d'avoir moins de soucis quant aux niveaux d'eau dans les piles et aussi avec une durée de vie plus longue que l'AFC. Ils ont donc utilisé des piles PEMFC durant ces missions Apollo Comme le montre la figure.III.6 est (Figure III.7) [20].



**Figure III.6** Décollage Saturn V (Apollo)  
Titan2(Gemini) [20]



**Figure III.7** : Décollage  
Saturn V (Apollo) [20]



## **Conclusion**

Les recherches scientifiques et techniques ont contribué à faire largement apparaître les piles à combustible comme une solution prometteuse aux problèmes de l'énergie et de la pollution.

Des applications potentielles ont été imaginées dans de nombreux secteurs : le transport, la production décentralisée d'électricité et la cogénération, les appareils nomades (téléphone, ordinateurs portables, etc). Dans ce contexte nous nous sommes intéressés dans ce travail qu'aux piles à membranes polymères échangeuses de protons PEM (Proton Exchange Membrane). Cette technologie semble effectivement être la plus mûre et la plus proche du stade commercial. Elle est considérée actuellement comme étant la mieux adaptée pour le secteur des applications portable [24].

**CHAPITRE IV :  
MODELISATION ET  
SIMULATION DE LA PILE A  
COMBUSTIBLE DU TYPE  
PEMFC**

## Introduction

Dans ce chapitre, nous étudions la modélisation et la simulation d'une pile à combustible de type PEMFC, qui est la plus utilisée actuellement dans le monde. Le but du processus de modélisation est de concevoir un Modèle mathématique pour comprendre les phénomènes physiques, on a différents modèles de la pile selon la manière dont elle est conçue ou utilisée et à travers ces modèles nous étudierons en particulier des simulations des piles à combustible de type PEMFC. Dans la simulation, nous avons conçu un programme en Fortran qui nous a permis d'avoir les résultats exposés plus loin.

### IV.1 Représentation de la pile à combustible

La figure IV.1 montre un modèle physique d'une pile à combustible PEMFC. en général, de l'hydrogène et de l'oxygène sont introduits dans la pile à combustible et le transfert de protons a lieu à l'intérieur de la cellule, donne comme produits de l'eau, de l'électricité et de la chaleur Comme le montre la figure. IV .1.

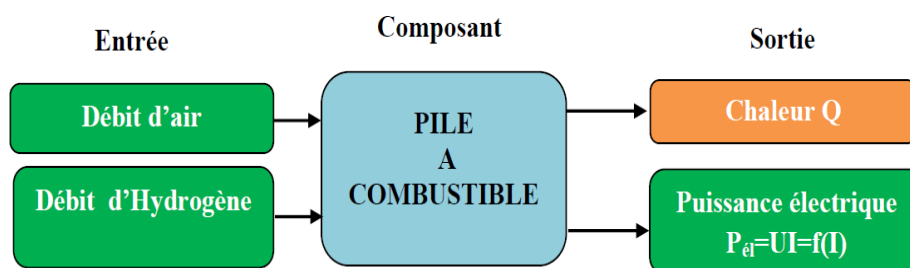


Figure IV.1:Modèle physique de la pile à combustible [23].

#### IV.1.1 Modèles statiques

Nous présenterons, dans ce chapitre, les modèles statiques à électrodes non dissociées puis dissociées [13].

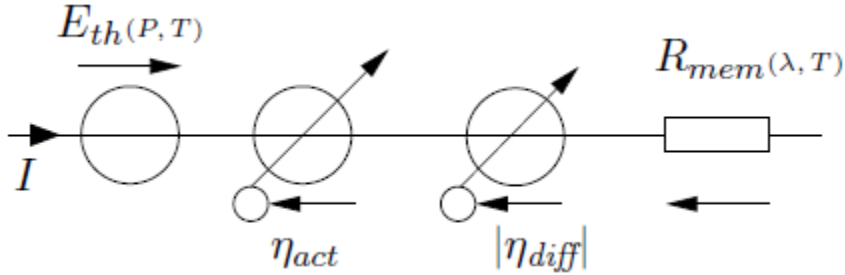
#### IV.1.2 Modèle à électrodes non dissociées[13]

La tension d'une cellule PEM peut être donnée en statique par l'expression :

$$V_{cellule} = E_{théoriques} - \eta_{act} - R_{mem}I - \eta_{con} \quad (IV.1)$$

Avec :

- $E_{théoriques}$  : Potentiel théorique fonction de la température et de la pression,
- $\eta_{act}$  : Pertes par activation,
- $\eta_{con}$  : Pertes par diffusion,
- $R_{mem}I$ : Pertes ohmiques principalement dues à la membrane.



**Fig.IV.2:** Modèle statique circuit à électrodes non dissociées d'une cellule PEM [13]

### IV.1.3 Modèle à électrodes dissociées[13]

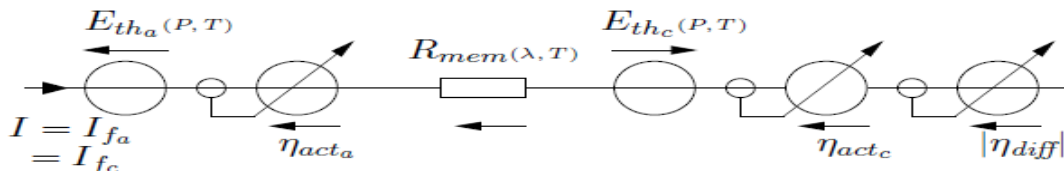
En dissociant les électrodes, la tension cellule peut s'exprimer par:

$$V_{cellule} = E_{théoriques C} - E_{théoriques A} - \eta_{actC} - \eta_{actA} - R_{mem}I - \eta_{con} \quad (IV.2)$$

$E_{théoriques C}$  et  $E_{théoriques A}$ : potentiels théoriques respectivement à la cathode et à l'anode, fonction de la température et de la pression

- $\eta_{actC}$  et  $\eta_{actA}$  : pertes par activation,
- $\eta_{con}$  : Pertes par diffusion,
- $R_{mem}I$  : Pertes ohmiques principalement dues à la membrane.

Les pertes par diffusion et les pertes ohmiques dépendent des mêmes expressions que dans le modèle à électrodes non dissociées.



**Fig. IV. 3:** Modèle statique circuit à électrodes dissociées d'une cellule PEM

## IV.2. MODELISATION

### IV.2.1 Débit d'hydrogène et d'oxygène à l'entrée

Les débits d'entrée de l'hydrogène ( $\dot{m}_{H_2}$ ), de l'oxygène ( $\dot{m}_{O_2}$ ) et ( $\dot{m}_{H_2O}$ ) sont donnés par l'équation suivante [11] .

$$\dot{m}_{j,in} = \frac{N_0 \cdot I}{2 \cdot F \cdot U} \quad (IV.3)$$

I: Courant électrique (A).

J :Représente l'élément(  $H_2O$  ,  $O_2$  ,  $H_2$  )

U :taux d'utilisation

F :constante de faraday.

$N_0$  :nombre de cellules en série

### IV.2.2 La résistance interne

L'équation de la résistance interne est donnée par[23]

$$R_{int} = 0.01605 - 3.5 \cdot 10^{-5} \cdot T + 8 \cdot 10^{-5} \cdot I \quad (IV.4)$$

### IV.2.3 Les pertes ohmique $\eta_{ohmic}$

La pile présente des pertes ohmiques, aussibien dans l'électrolyte que dans les électrodes. Ces phénomènes sont généralement modélisés dans les approches par circuits électriques par des résistances constantes et linéaires Elles sont données par l'équation suivante.[20].

$$\eta_{ohmic} = I \cdot R_{int} \quad (IV.5)$$

### IV.2.4 Pertes d'activation $\eta_{act}$

Les phénomènes d'activation engendrent des pertes. Dans la littérature, la modélisation des phénomènes d'activation par circuits électriques se fait généralement en utilisant la loi de Tafel, dans laquelle ces pertes sont modélisées soit par une résistance non linéaire, soit par une diode [20].

$$\eta_{act} = B \cdot \text{Log}(C \cdot I) \quad (IV.6)$$

B : constante d'activation de tension (A-1)

C : facteur d'échelle. m/s

I: Courant électrique (A).

#### IV.2.5 Résistance d'activation Ra [23]

$$R_a = -\frac{\eta_{act}}{I} \quad (IV. 7)$$

#### IV.2.6 La constante de modélisation Kr

C'est une constante utilisée durant les calculs pour simplifier l'écriture des équations, elle est donnée par [23] :

$$Kr = \frac{N_0}{4 * F} \quad (IV. 8)$$

#### IV.2.7 Pression d'hydrogène $p_{H_2}$

La Pression d'hydrogène et d'oxygène consommée dans une pile à combustible dépend des débits d'entrée et de sortie, du courant et de la taille des électrodes et peut être déterminée selon les équations suivantes [25]:

$$pP_{H_2} = 0.5 \left( \frac{P_{H_2}}{e^{\frac{1.653 * XI}{T_K^{1.334}}}} \right) - P_{H_2O} \quad (IV. 9)$$

#### IV .2.8 Pression d'oxygène $P_{O_2}$

La Pression d'oxygène consommé dans une pile à combustible dépend des débits d'entrée et de sortie, du courant et de la taille des électrodes et peut être déterminée par les equations suivantes [25]:

$$PP_{O_2} = \frac{P_{air}}{e^{\frac{4.192 * XI}{T_K^{1.334}}}} - P_{H_2O} \quad (IV. 10)$$

### IV.2.9 Pression de l'eau $p_{H_2O}$

Le calcul de la pression de l'eau se fait de la même manière que l'oxygène et l'hydrogène, la pression de l'eau est donnée par l'équation suivante [25] :

$$\text{Log}_{H_2O} = -2.1794 + 0.02953 * T_c - 9.1837 * 10^{-5} * T_c^2 + 1.4454 * 10^{-7} * T_c^3 \quad (IV.11)$$

### IV .2.10 Potentiel thermodynamique

Le potentiel thermodynamique est défini en fonction de la température  $T$  exprimée en Kelvin, et des pressions partielles  $p_{H_2}$  et  $p_{O_2}$  par l'équation empirique de Nernst comme suit [25] :

Dans une réaction électrochimique, le travail peut être considéré comme l'énergie électrique délivrée par la réaction. Le travail électrochimique [25]

$$\text{Enerst} = -\frac{GF_{liq}}{2 * F} - \frac{RT}{2 * F} * \ln \left( \frac{p_{H_2O}}{p_{H_2} * p_{O_2}^{\frac{1}{2}}} \right) \quad (IV.12)$$

F :est la constante de Faraday (96485 C/mol).

R :constante des gaz parfaits. (8,314J/K/mol).

P :Pression en atmosphérique.

T :température de fonctionnement du composant (K)

### IV.2.11 Tension d'une cellule de la PAC

La tension de sortie de la cellule est déterminée par la combinaison de l'effet thermodynamique, transport de masse, la cinétique et la résistance ohmique, elle est donnée comme suit [23] :

$$V_{cellule} = E - \eta_{act} - \eta_{ohmic} \quad (IV.13)$$

$V_{cellule}$  :Tension d'une cellule ( Volt )

$\eta_{act}$ : Polarisation d'activation de l'anode et de la cathode (Volt)

$\eta_{ohmic}$ : Polarisation ohmique de l'anode et de la cathode (Volt)

## IV .2.12 Tension totale de la cellule PAC

La pile à combustible est composée de plusieurs cellules placées en série formant un assemblage [11].

$$V_{stack} = N_0 * V_{cellule} \quad (IV. 14)$$

$N_0$  : nombre de cellules en série dans l'assemblage

$V_{cellule}$  : Tension d'une cellule.

## IV.2.13 Puissance d'une pile à combustible

La puissance de la pile à combustible est le produit de la tension et le courant de cette dernière, elle est donnée par l'équation suivante[11] :

$$P_{puissance} = V_{stack} * I \quad (IV. 15)$$

$V_{stack}$  est la tension de l'assemblage,

$I$  est le courant de la pile (A).

**IV.2.14 Modèle de la dynamique de la PEM** La pile à combustible objet de notre étude fonctionne à des températures variables, son schéma est représenté par un bloc Simulink en figure IV. 4 :



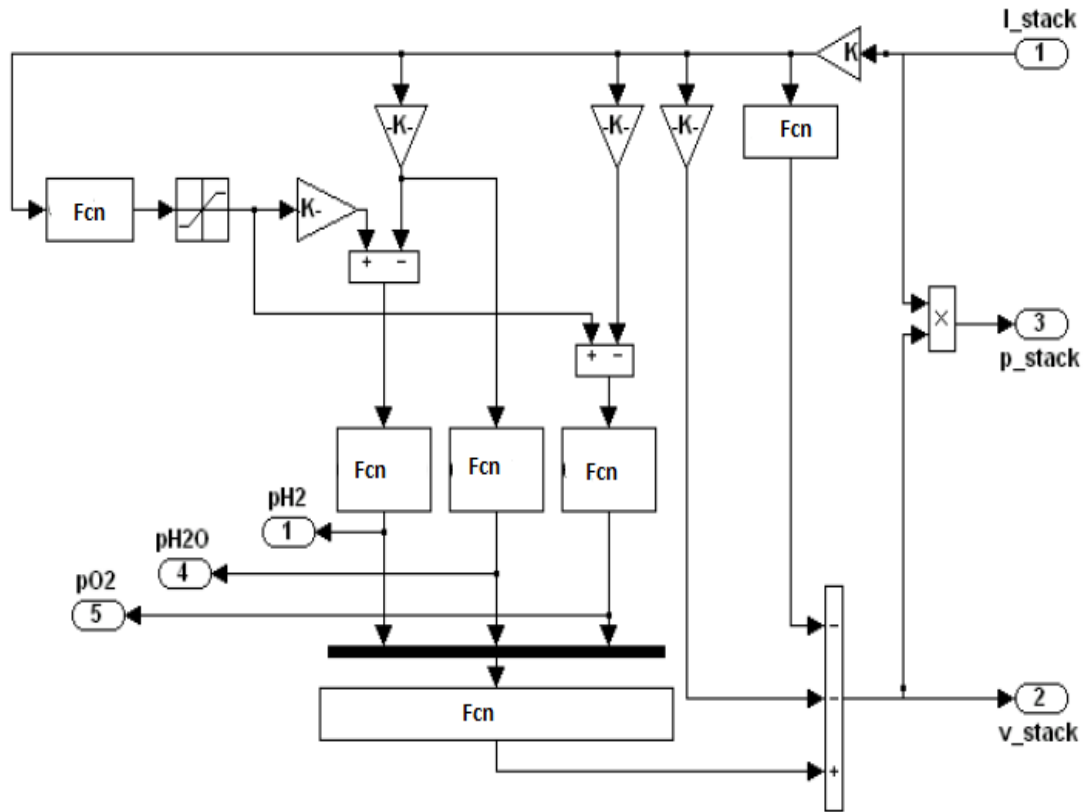


Figure IV. 4: Modèle dynamique d'une PAC [23]

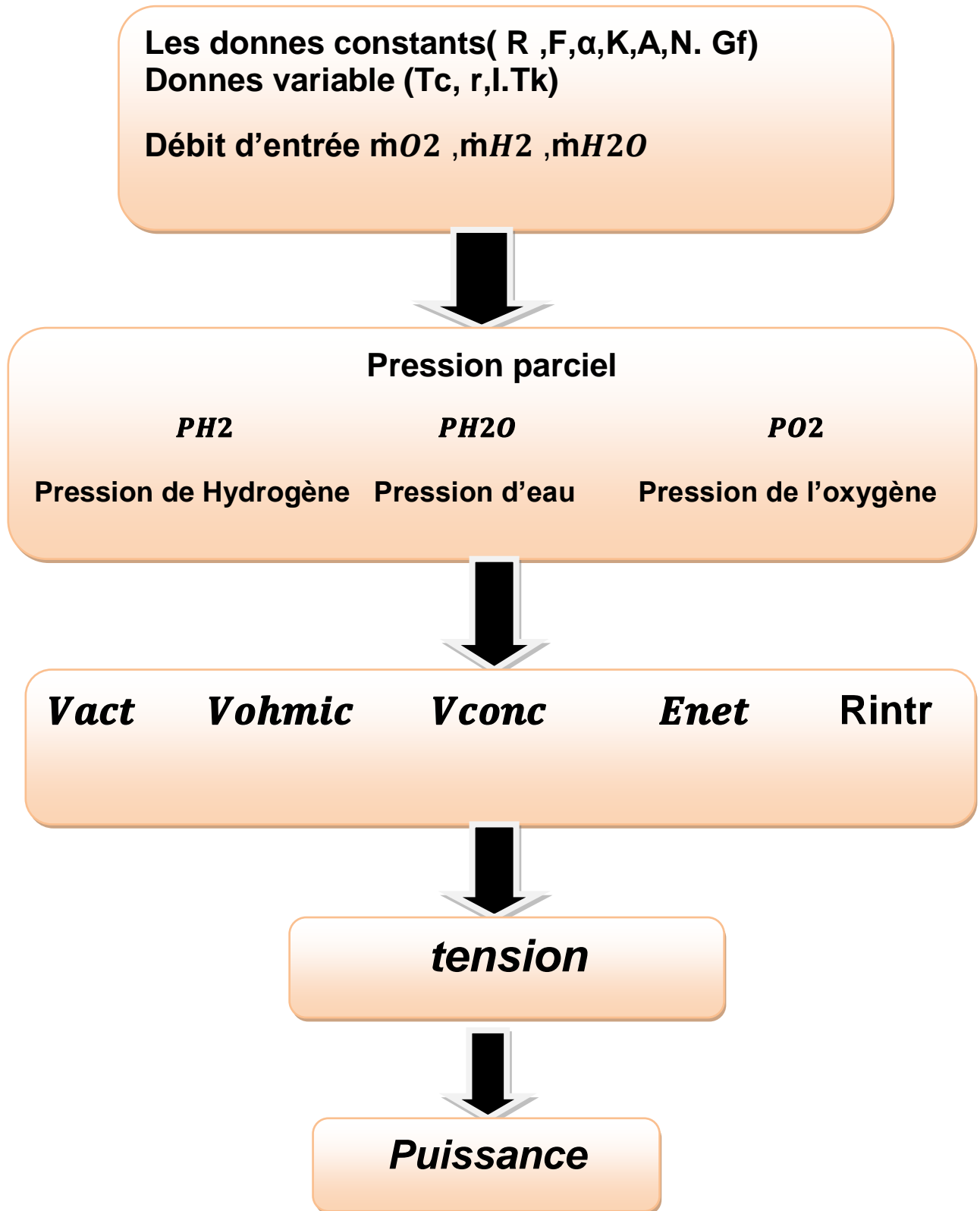
## Bloc d'une PEMFC

Les données et les caractéristiques d'une pile à combustible considérées dans notre simulation sont illustrées en tableau IV.1

<b>Paramètres du modèle PAC</b>	
Constante de Faraday	$F=964872C.$
Constante des Gaz parfaits.	$R=8.314(J/molk).$
Température.	$T_c=80^{\circ}C.$
Pression de l'hydrogène.	$P_{H_2}=3(Atm).$
Pression de l'Air.	$P_{air}=3(Atm).$
Surface de Cellule	$A_{cell}=100.$
Nombre de cellules	$N_{cells}=90.$
Résistance interne	$r=0.19(Ohm-cm^2)$
Coefficient de transfert	$\alpha=0.5$
Facteur d'Amplification.	$\alpha_1 = 0.085$
Facteur d'échange densité de courant.	$i_0=10^{-6,912}(A/cm^2)$
Densité de courant limite.	$i_l=1.4(A/cm^2)$
Fonction de Gibbs à état liquide	$G_{f\_liq}=-228170(J/mol).$
Constante de transport de masse.	$k=1.1$

Tableau IV.1 Caractéristiques techniques de la PAC simulée [11].

### IV.3 Organigramme



## IV.4 Résultats obtenus et discussions

Pour la simulation, nous avons conçu un programme en Fortran qui nous a permis d'avoir les résultats ci-dessous. Nous avons représenté les pertes d'activation en fonction de la densité de courant pour différentes valeurs de la température ainsi que les pertes d'activation en fonction de la température pour différentes valeurs de la densité de courant.

### IV.4.1 Pertes d'activation en fonction de la densité de courant et de la température

La Figure IV.16.1.4 représente les pertes d'activation en fonction de la densité de courant, on constate une augmentation des pertes d'activation avec une augmentation de la densité de courant pour les trois températures. On remarque dans les trois cas une augmentation importante des valeurs des pertes d'activation qui change avec l'augmentation de la densité de courant entre  $[0,10]$  ( $A/cm^2$ ). Puis une augmentation progressive des pertes d'activation avec une augmentation significative de la densité de courant entre  $[10,100](A/cm^2)$ .

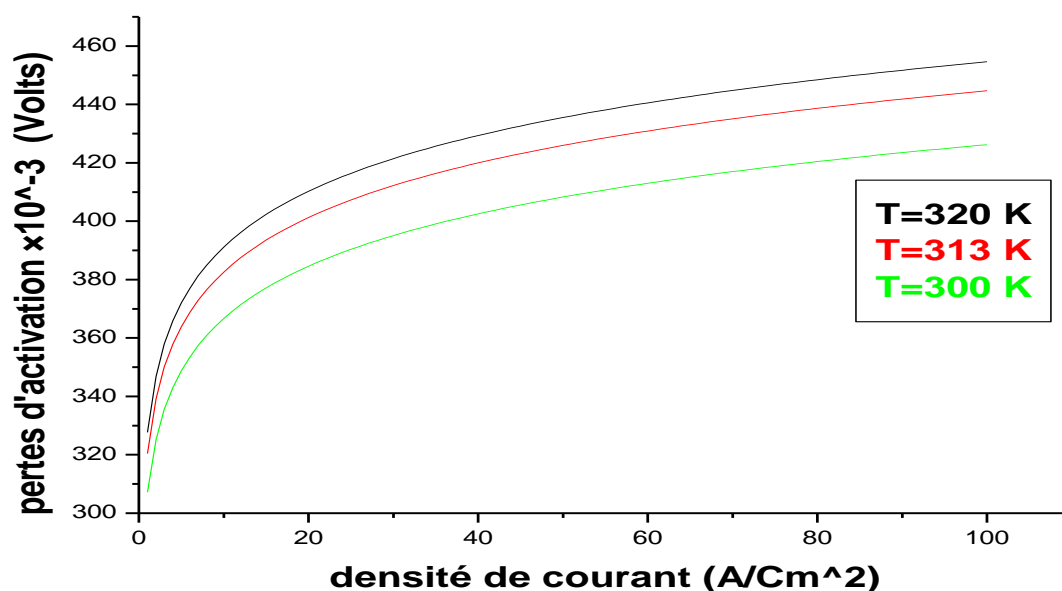


Figure IV.5 : Courbes des pertes d'activation en fonction de la densité de courant et des températures.

#### IV.4.2 Pertes d'activation en fonction de la temperature et de la densité de courant

La FigureIV.16.2.4 représente les pertes d'activation en fonction de la température pour différentes valeurs de la densité de courant. On constate des augmentations linéaires des pertes d'activation entre [0.28V, 0.38V], en fonction de la température [280K, 380K] pour des densités de courant de [0.4, 0.7, 0.9] et des pentes différentes.

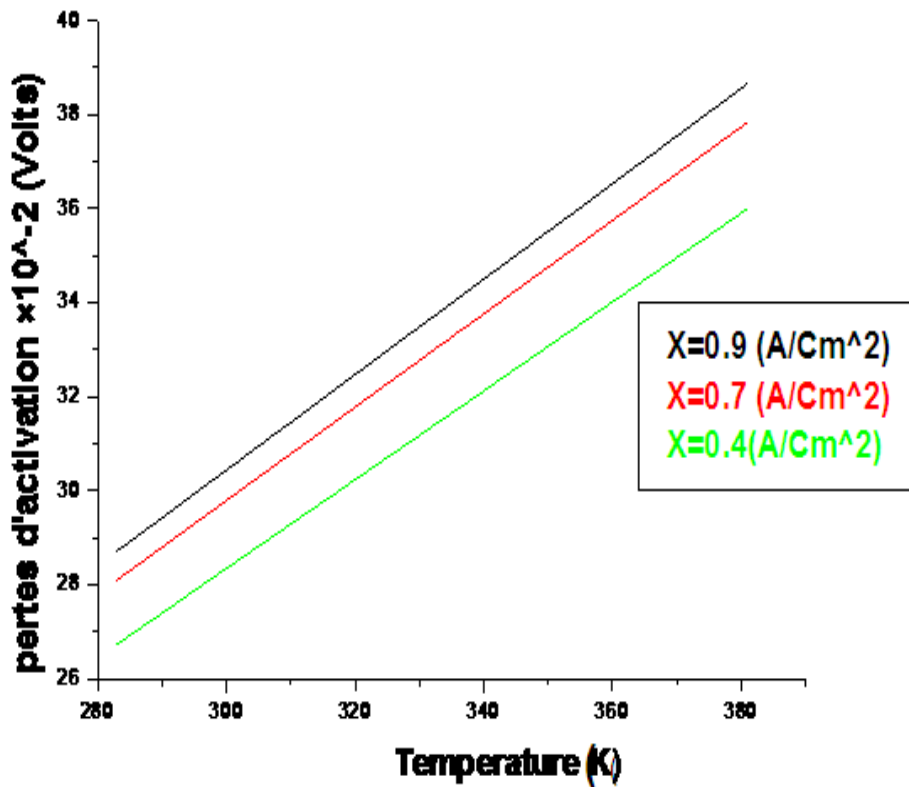


Figure IV.6: Représentation des pertes d'activation en fonction de la temperature et de la densité de courant.

### IV.4.3 Evolution du potentiel en fonction de la densité de courant et de la température dans une pile à combustible (PEMFC).

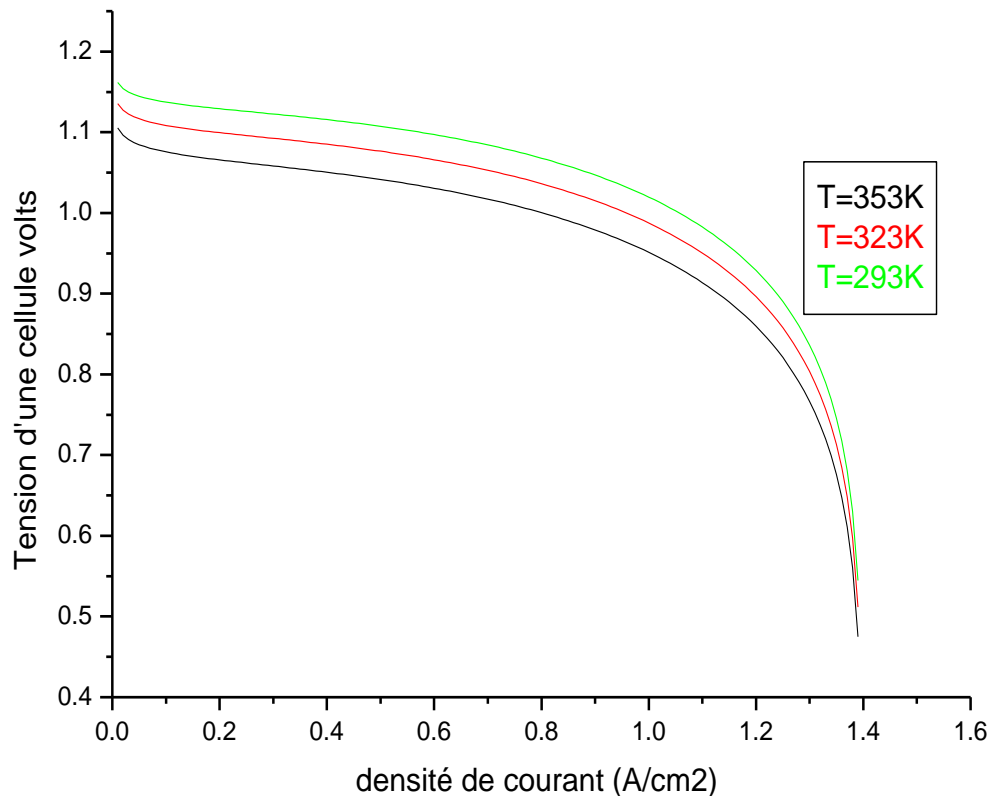


Figure IV.7 Représentation du potentiel en fonction de la densité de courant (A/cm²) et de la température.

Evolution du potentiel en fonction de la densité de courant et de la température dans une pile à combustible (PEMFC).

La Figure IV.16.2.1 représente l'évolution du potentiel en fonction de la densité de courant et de la température dans une pile à combustible (PEMFC). On constate une diminution linéaire de la tension lorsque le courant augmente et une diminution de la tension lorsque la température augmente de 293k à 353k.,.

#### IV.4.4 Evolution de la puissance en fonction de la densité de courant et de la température dans une pile à combustible (PEMFC).

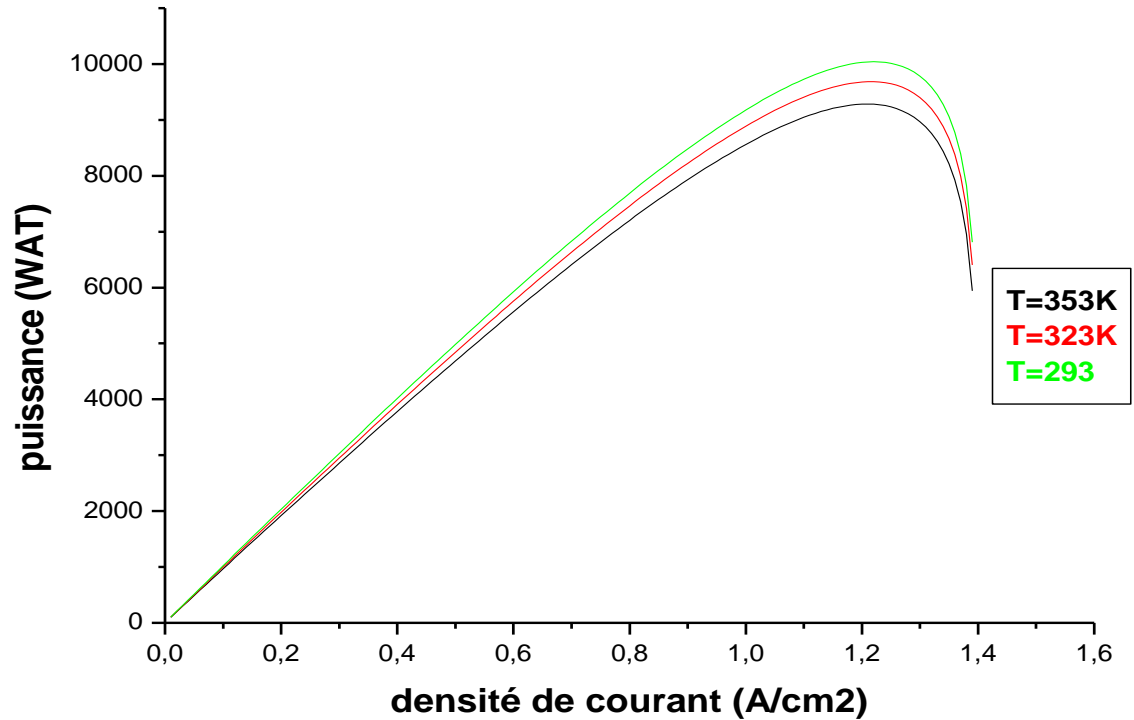


Figure IV.8 Représentation de la puissance en fonction de la densité de courant (A/cm<sup>2</sup>) et de la température.

Evolution de la puissance en fonction de la densité de courant et de la température dans une pile à combustible (PEMFC).

La Figure IV.16.2.1 représente l'évolution de la puissance en fonction de la densité de courant et de la température dans une pile à combustible (PEMFC). Dans la partie linéaire de la courbe, on constate une augmentation de la puissance lorsque le courant augmente et également une augmentation de la puissance lorsque la température augmente de 293k à 353k.,.

## Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié une pile à combustible de type PEMFC, en écrivant les diverses équations mathématiques qui permettent de bien comprendre les phénomènes physiques qui se produisent dans cette pile à combustible. Après cela, nous avons simulé une pile à combustible à l'aide d'un programme FORTRAN que nous avons conçu, puis nous avons obtenu plusieurs résultats dont les plus importants sont :

- Les pertes d'activation, directement liées à la température ainsi qu'à la densité de courant.
- La tension est également liée à la température et à la densité de courant.
- Les puissances de sortie qui dépendent de la température et de la densité de courant.

Nous avons enfin discuté des résultats obtenus.



## **Conclusion générale**

En conclusion, on peut dire que dans cette étude sur les PAC, nous avons commencé par donner quelques généralités telles que définition, résumé historique, principe de fonctionnement, puis évoqué les différents types de piles à combustible et leurs caractéristiques. Les applications dynamiques de chaque type, puis nous introduisons et discutons les modèles mathématiques de la pile de type PEMFC. Enfin, nous avons réalisé une simulation basée sur le modèle le plus complet d'une pile PEMFC, en concevant un organigramme et un programme Fortran.

Les résultats suivants ont été obtenus et discutés en bas des figures correspondantes. Nous avons représenté les pertes d'activation, directement liées à la température ainsi qu'à la densité de courant, la tension est également liée à la température et à la densité de courant et enfin les puissances de sortie qui dépendent de la température et de la densité de courant.

## Résumé

L'étude et la modélisation d'une pile à combustible (PAC) est un thème d'actualité. Parmi les différents types de pile à combustible existants, la pile à membrane échangeuse de protons (PEMFC), qui sera retenue dans le domaine des transports, pour les applications portables et stationnaires. Pour ces applications, la maîtrise de leur gestion présente un défi qui est très complexe, car elle est influencée par la gestion simultanée des transferts de réactifs (hydrogène et oxygène), de l'eau (produite par la réaction) et de la chaleur dans le coeur de la pile. Pour mieux comprendre certains effets et phénomènes dans le système PAC, on fait recours à une modélisation et une simulation sous Fortran.

**Mots clés:** Pile à combustible - PEMFC - électricité - modélisation – simulation – Fortran.

### Summary :

The study and modeling of a fuel cell (PAC) is a current topic. Among the different types of existing fuel cell, the proton exchange membrane cell (PEMFC), which will be used in the field of transport, for portable and stationary applications. For these applications, the control of their management presents a challenge which is very complex, because it is influenced by the simultaneous management of the transfers of reagents (hydrogen and oxygen), water (produced by the reaction) and heat in the core of the stack. To better understand certain effects and phenomena in the PAC system, we use modeling and simulation in Fortran.

**Keywords:** feul cell - PEMFC -electricity- modeling – simulation - fortran.

### ملخص

دراسة ونمذجة خلية الوقود (PAC) هو موضوع حالي. من بين الأنواع المختلفة لخلية الوقود الموجودة ، خلية غشاء تبادل البروتون (PEMFC) ، والتي سيتم استخدامها في مجال النقل ، للتطبيقات المحمولة والثابتة. بالنسبة لهذه التطبيقات ، يمثل التحكم في إدارتها تحديًا معقدًا للغاية ، لأنه يتأثر بالإدارة المتزامنة لعمليات نقل الكواشف (الهيدروجين والأكسجين) والماء (الناتج عن التفاعل) والحرارة في قلب كومة. لفهم بعض التأثيرات والظواهر بشكل أفضل في نظام PAC ، نستخدم النمذجة والمحاكاة في Fortran.

**الكلمات الجوهرية :** خلية الوقود - PEMFC - الكهرباء – النمذجة – المحاكات - Fortran

## Références

1 -DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ D'ÉVRY-VAL D'ESSONNE (Modélisation mécanique des interfaces multi-contacts dans une pile à combustible Soutenance prévue le 30 novembre 2010 devant le jury composé de) Zhiming,,ZHANG

2- MODELISATION DYNAMIQUE DU « COEUR » DE PILE A COMBUSTIBLE DE TYPE PEM (Dinh An NGUYEN) Date De Soutenance : 09 Juillet 2010

3- Rapport D'étude 31/01/2017n° Dra-17-156712-00653a  
Pile À Combustible Stationnaire Contexte Reglementaire Et Normatif International Et National Risques Potentiels

4- Modélisation D'une Pile A Combustible De Type PEM Mémoire Présenté Pour L'obtention Du Diplôme De Master Académique Par: YOUCEFI Abdelhak .TELEMÇANI Belkacem

5- Technology Characterization – Fuel Cells ( March 2015).

6 -Fuel Cell Handbook(Seventh Edition) U.S. Department of Energy  
Office of Fossil Energy National Energy Technology Laboratory  
P.O. Box 880 Morgantown, West Virginia 26507-0880  
November 2004

7 - [http://help.adobe.com/en\\_US/Acrobat/9.0/Standard/WS981E9B4B-F8E4-4511-ADE4-2D7380472979.html](http://help.adobe.com/en_US/Acrobat/9.0/Standard/WS981E9B4B-F8E4-4511-ADE4-2D7380472979.html) THEM : Environnement et progrès

8- Hocine Mahcene Université Kasdi Merbah Ouargla Soutenu le :

04 / 01 / 2012 devant le jury composé

9 - Journal Pre-proof DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egyai.2020.100045>  
Received date: 23 October 2020

10- Modélisation dynamique non linéaire d'une cellule de pile à combustible du type PEM : Effet de l'humidification de la membrane électrolytique  
Conference Paper · September 2008

11 - UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ DE BOUIRA ETUDE ET SIMULATION D'UNE PILE A COMBUSTIBLE DE TYPE PEM Présenté pour obtenir le diplôme de master ARAB Lydia CHEBBI Zahra  
Soutenu le : 09/06/2016

13- Etude et modélisation d'une pile à combustible Soutenu le : 09/05/2016  
AZZI Halim

14- Idris Sadli. Modélisation par impédance d'une pile à combustible PEM pour utilisation en électronique de puissance. Autre [cond-mat.other]. Institut National Polytechnique de Lorraine, 2006. Français. (<https://hal.univ-lorraine.fr/>  
Submitted on 29 Mar 2018)

15 -Modélisation et caractérisation de la pile PEM pour l'étude des interactions avec les convertisseurs statiques soutenue le 16 septembre 2005 devant le jury composé de :

16 -Modélisation et Commande du Système d'Alimentation en Air pour le Module de Puissance d'un Véhicule à Pile à Combustible avec Reformage Embarqué Nicolas Romani Submitted on 11 Apr 2008

17- الجمهورية السورية العربية وزارة التربية المركز الوطني للمتميزين الطلبة كرم شبيب يزن زيدان حسن -  
الشيحاي... 2015/2014

18- UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID – TLEMCEM FACULTE DE TECHNOLOGIE - DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE . Contribution à l'étude des phénomènes ayant lieu dans le catalyseur d'une pile à combustible de type PEMFC. Soutenu le 22/06/2014 [ABDERRAHIM Younes BELBACHIR Rabab]

19-Modélisation et caractérisation de la pile PEM pour l'étude des interactions avec les convertisseurs statiques(soutenu le 16 septembre 2005 devant le jury composé de : -M. Yann Bultel Rapporteur - M. Jean-Paul Ferrieux Rapporteur-M. Jean-Marie Kauffmann Examineur ).

20 -Université Mohamed Seddik Ben Yahia – Jijel Faculté des Sciences et de la Technologie Mr / DENNI Taqiy eddine et Mr / DJAOUI Adel

21- [PDF] Advances in stat-portable fuel cell ..[www.open-access.bcu.ac.uk](http://www.open-access.bcu.ac.uk) > ..

22- Projet de Physique P6 : STPI/P6/2018-34 PILE A COMBUSTIBLE ET APPLICATIONS

23-Université Mohamed Khider de Biskra Modélisation de la Pile à Combustible de type PEMFC (SALLEMINE Heythem / LACEFAR Madani)

24-Contribution à l'étude d'une pile à combustible de type PEMFC utilisée pour l'énergie électrique verteM. Belatel \*, F.Z. Aissous et F. Ferhat Constant Laboratoire d'Electrotechnique deFaculté des Sciences de l'Ingénieur, Univer Route Ain El Bey, Constantine, Algérie

25- PEM Fuel Cell Modeling and Simulation Using MATLAB® Colleen Spiegel

26- Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou Faculté de Génie Electrique et de l'Informatique modelisation et simulation d'une pile a combustible(SOFC) Melle: HAMMOUM Malika Et HADDADI Thafsouth

# **Annexes : Programme**

## Programmes

### Programme1

```
program pilecomb1

!IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)

REAL R,alfa,F,T2

REAL XI0,XI,XI2,b2,b

!INTEGER I,J

dimension T(100),b(100),Vact(100)

dimension Vact2(100),XI2(100)

open(71,file='result2.txt',status='new')

R=8.314

alfa=0.5

F=96485.

T(1)=283.

XI0=0.000006912

write(*,*)'XI0=',XI0

XI=0.7

T2=300.

write(*,*)R,alfa,F,XI0,XI

do 10 i=1,99

T(i+1)=T(i)+1

b(i)=R*T(i)/(2.*alfa*F)

Vact(i)=b(i)*log(XI/XI0)
```

```

write(*,*)Vact(i),T(i)

write(71,*)Vact(i)

10 continue

XI2(1)=1.

b2=R*T2/(2.*alfa*F)

Vact2(1)=10**3.*b2*log(XI2(1)/XI0)

write(*,*)R,alfa,F,XI0,XI,T2

write(*,*)XI2(1),Vact2(1)

write(71,*)'Vact2(1)=',Vact2(1)

do 20 i=1,99

XI2(i+1)=XI2(i)+1.

b2=R*T2/(2.*alfa*F)

Vact2(i+1)=b2*log(XI2(i+1)/XI0)

Vact2(i+1)=Vact2(i+1)*10**3.

write(*,*)XI2(i+1),Vact2(i+1)

write(71,*)Vact2(i+1)

20 continue

CLOSE(71)

stop

end

```

programme2

**program pilecomb7**

**REAL** R,F,PH2,Pair,Tc,Tk,zx

**REAL** XGfl,XI,yx,PH2O,XI0,Alpha



## Dimension

XI(140),Enx(140),ppH2(140),ppO2(140),Rint(140),Ppuissance(140)

**dimension** Vact(140),Vohmic(140),Vcellule(140),Vconc(140)

**open**(44,file='resulta4.txt',status='new')

R=8.314

F=96487.

PH2 =3.

Pair = 3.

N0=90

zx=100.

Alpha = 0.5

XI0 =0.000006912

XGfl=228170.

Tc=80.

Tk=353.

XI(1)=0

**write**(\* ,\*)Ppuissance(i+1), PH2

do 10 i=1,99

XI(i+1)=XI(i)+0.01

yx=-2.1794+0.02953\*Tc-  
9.1837\*0.00001\*Tc\*\*2.+1.4454\*0.0000001\*Tc\*\*3.

PH2O=10\*\*yx

ppH2(i+1)=(0.5\*PH2/exp(((1.653)\*XI(i+1))/(Tc\*\*1.334)))-PH2O

ppO2(i+1)=(Pair/exp(4.192\*XI(i+1)/Tk\*\*1.334))-PH2O

```

Enx(i+1)=XGfl/(2*F)-
(R*Tk/(2.*F))*log(PH2O/(ppH2(i+1)*ppO2(i+1)**0.5))

b=R*Tk/(2*Alpha*F)

Vact(i+1)=-b*log10(Xl(i+1)/Xl0)

Rint(i+1)=0.01605-3.5*0.00001*Tc+8.*0.00001*Xl(i+1)

Vohmic(i+1)=Xl(i+1)*Rint(i+1)

Vconc(i+1)=0.085*(Xl(i+1)**1.1)*log(1-(Xl(i+1)/1.4))

Vcellule(i+1)=Enx(i+1)+Vact(i+1)+Vohmic(i+1)+Vconc(i+1)

Ppuissance(i+1)=N0*Vcellule(i+1)*Xl(i+1)*zx

write(*,*)Ppuissance(i+1)

write(44,*)Xl(i+1)

10 continue

CLOSE(44)

stop

end

```