



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ DE BOUIRA
FACULTE DES SCIENCES ET DES SCIENCES APPLIQUEES
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

N° d'ordre :...../Master/2016.

Série :...../GM/2016

MEMOIRE

Présenté pour obtenir le diplôme de master

En Génie Mécanique

OPTION :

**ETUDE ET SIMULATION D'UNE PILE A COMBUSTIBLE DE
TYPE PEM**

Par :

ARAB Lydia

CHEBBI Zahra

Soutenue le : 09/06/2016

Devant le jury composé de :

<u>Président</u> :	Mr. SADOUN Mohamed Améziane	MCB	Université Bouira
<u>Examineurs</u> :	Mr. LAOUARI Azzedine	M.A.A	Université Bouira
	Mr. LEKHAL Rachid	M.A.A	Université Bouira
<u>Encadreurs</u> :	Mr. MERZOUK Meziane	M.A.B	Université Bouira
	Mr. MEZIANE Fares	Attaché de recherche	C.D.ER –Alger

Remerciements

Nous tenons à remercier tout d'abord le Dieu tout puissant qui nous a aidé à la réalisation de ce travail.

Nous tenons à remercier Monsieur MEZIANE Fares qui a dirigé et suivi ce travail, merci pour votre aide, votre intelligence et votre patience et soutien ; soyez assuré de nos respects et nos reconnaissances.

A Monsieur MERZOUK Meziane, qui a également dirigé et suivi notre travail, nous voudrions vous exprimer tous nos sincères remerciements pour vos encouragements incessants et vos conseils précieux, merci également, cher enseignant d'avoir suivi notre travail, malgré vos multiples occupations, et cela prouve vos nobles qualités professionnelles et humaines

Meilleures salutations aux membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en participant à l'évaluation de notre travail.

Nous remercions aussi les enseignants du département de génie mécanique de l'université de BOUIRA et à tous les enseignants qui nous ont enseignés durant notre cursus universitaire.

- ✓ Toutes les personnes qui de près ou de loin nous ont aidé à finaliser ce travail.
- ✓ A nos chers parents.
- ✓ A tous nos amis.

Dédicaces

*Tout d'abord, je rends grâce à Allah pour toutes ses
bénédictions et la grâce de la réussite.*

*A ma chère mère, pour ses sacrifices depuis qu'elle m'a mise au
monde ;*

*A mon cher père, qui m'a toujours soutenu et m'a aidé à
affronter les difficultés ;*

A mes chères sœurs et mes chers frères.

A mes tantes et mes oncles.

A toute ma famille.

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

*A tous mes amis particulièrement : Zahra, Radia, Siham, ...,
et mes collègues.*

A tous les enseignants du département Génie mécanique ;

Je dédie ce modeste travail.

ARAB

Dédicaces

Tout d'abord, je rends grâce à Allah pour toutes ses bénédictions et la grâce de la réussite.

A ma chère mère, pour ses sacrifices depuis qu'elle m'a mise au monde ;

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

A tous mes chères sœurs et mes chers frères.

A mes tantes et mes oncles.

A toute ma famille.

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

*A tous mes amies particulièrement : Lydia, Fatima, Kamila, Kahina...,
et mes collègues.*

A tous les enseignants du département Génie mécanique ;

Je dédie ce modeste travail.

CHEBBI

Sommaire

<i>Remerciements</i>	ii
<i>Nomenclature</i>	viii
<i>Liste Des Figures</i>	x
<i>Liste des tableaux</i>	xi
<i>INTRODUCTION GENERALE</i>	xii

Chapitre I

GENERALITES SUR LES PILES A COMBUSTIBLE

GENERALITES SUR LES PILES A COMBUSTIBLE.....	1
Introduction.....	1
I.1 DESCRIPTION GENERALE D'UNE PILE A COMBUSTIBLE :	2
I.1.1 APERÇU HISTORIQUE DE LA PILE :	2
I.2.PRESENTATION DE LA PAC	3
I.2.1. FONCTIONNEMENT :	3
I.2.2. CLASSIFICATION DE PILES A COMBUSTIBLE :	3
I.2.3. DOMAINES D'APPLICATION :	4
<i>I.2.3.1.les applications transports :</i>	5
<i>I.2.3.2.les applications stationnaires :</i>	5
<i>I.2.3.3. les applications portables :</i>	5
<i>I.2.3.4. les applications militaires et spatiales :</i>	5
<i>I.2.3.5. Utilisation la pile à combustible dans différent capteur:</i>	6
I.2.4. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES PILES A COMBUSTIBLE :	6
<i>I.2.4.1. Avantages des piles à combustible :</i>	6
<i>I.2.4.2.Les inconvénients des piles à combustibles :</i>	7
I.2.5.DESCRPTION GENERALE DES PHENOMENES PHYSICOCHEMIS D'UNE PILE A COMBUSTIBLE :	8
<i>I.2.5.1.Phénomène thermodynamique :</i>	8
<i>I.2.5.2. Phénomènes fluidiques :</i>	9

1.2.5.3. <i>Phénomènes électrochimiques</i> :	9
1.2.5.4. <i>Phénomènes thermiques</i> :	10
I.3. LA PILE A COMBUSTIBLE DE TYPE PEM	10
I.3.1. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE PILE A COMBUSTIBLE DE TYPE PEM:	11
I.3.2. DESCRIPTION DE LA CELLULE PEM :	12
1.2.3.1 <i>électrolytes (membrane)</i> :	12
1.2.3.2 <i>Les électrodes</i> :	13
1.2.3.3 <i>Plaques bipolaires</i> :	13
1.2.3.4. <i>Couches de diffusion(Backing)</i> :	14
1.2.3.5. <i>Assemblage Membrane – Electrodes</i> :	15
I.3.3. DESCRIPTION DU STACK DE TYPE PEM :	15
I.4. SYSTEME PILE A COMBUSTIBLE PEM	16
I.4.1. LES AUXILIAIRES :	16
I.4.2. ALIMENTATION DE PILE A COMBUSTIBLE DE TYPE PEM :	17
1.4.2.1. <i>Circuit d'alimentation en hydrogène</i> :	17
1.4.2.2. <i>Circuit d'alimentation en air</i> :	17
I.5. CARACTERISTIQUES DE POLARISATION D'UNE PILE A COMBUSTIBLE PEMFC	18
I.6. DEGRADATION DE LA PILE PEM	18
I.6.1. LES DEFAUTS DE LA PILE PEM	19
1.6.1.1. <i>Dégradations liées à la gestion de l'eau</i> :	19
1.6.1.2. <i>Dégradations liées à une mauvaise gestion des débits, des pressions, des températures et de l'humidité relative des gaz</i> :	20
1.6.1.3. <i>Contamination par les réactifs</i> :	21
1.6.1.4. <i>Vieillessement naturel</i> :	21
I.7. RENDEMENT DE PILE A COMBUSTIBLE	21
I.7.1. RENDEMENT MATIERE - QUANTITES DE COMBUSTIBLES :	21
I.7.2. RENDEMENT THERMODYNAMIQUE :	22
I.7.2. RENDEMENT VOLTAÏQUE	22
I.7.3. RENDEMENT GLOBAL :	23

Chapitre II

MODELISATION & SIMULATION D'UNE PILE A COMBUSTIBLE DE TYPE PEM

MODELISATION & SIMULATION D'UNE PILE A COMBUSTIBLE DE TYPE PEM.....	24
II.1. MODELE PHYSIQUE DE LA PILE A COMBUSTIBLE	25
II.2. MODELISATION	25
II.3. MODELE DYNAMIQUE DE LA PEM.....	29
II.4. BLOC D'UNE PEMFC	30
II.4.1.MISE EN PAGE SUR MATLAB SIMULINK :	30
II.4.2.LES RESULTATS OBTENUS :	31

Chapitre III

ETUDE EXPERIMENTALE des CARACTRSTIQUES D'une PILE A COMBUSTIBLE PEM DE 50-W

ETUDE EXPERIMENTALE des CARACTERISTIQUES D'une PILE A COMBUSTIBLE PEM DE 50-W	36
III.1.PRESENTATION DU SYSTEME.....	37
III.2.COMPOSITION DU SYSTEME	38
III.3 ETUDE DES CARACTERISTIQUES DE LA PILE A COMBUSTIBLE.....	39
III.4.COMPARAISON ENTRE L'ETUDE DE SIMULATON ET L'ETUDE EXPERIMENTALE D'UNE PILE A COMBUSTIBLE DE TYPE PEM	48
CONCLUSION GENERALE	50
REFERENCES	51
Annexes.....	55
Résumé.....	59

Nomenclature

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

a :	nombre de cellules de la pile à combustible	.....	[-]
B :	constante d'Activation de tension	.....	[A ⁻¹]
C :	constante d'Activation de tension	.....	[V]
E :	potentiel thermodynamique	.....	[V]
E ₀ :	Tension à vide	.....	[Volt]
F :	constante de Faraday	.....	[C/kmol]
j :	Représente l'élément (H ₂ O, H ₂ , O ₂)	.....	[-]
H :	hauteur du mat	.....	[M]
I :	courant électrique	.....	[A]
K :	facteur de forme	.....	[-]
K _{H₂} :	constante de valve d'hydrogène	.....	[Kmol/s.atm]
K _{H₂O} :	constante de valve d'eau	.....	[Kmol/s.atm]
K _{O₂} :	constante de valve d'oxygène	.....	[Kmol/s.atm]
K _r :	constante de modélisation	.....	[Kmol/s .A]
ṁ _{H₂} :	Débit de l'hydrogène	.....	[Kmol/s]
ṁ _{H₂O} :	Débit de l'eau	.....	[kmol/s]
M _i :	Masse atomique de l'élément i	.....	[gr/mol]
ṁ _{O₂} :	Débit de l'oxygène	.....	[kmol/s]
N ₀ :	nombre de cellules en série	.....	[-]
P :	pression	.....	[Atm]
P _{H₂} :	Pression de l'hydrogène	.....	[atm]
P _{H₂O} :	Pression de l'eau	.....	[atm]
P _{O₂} :	Pression de l'oxygène	.....	[atm]
R :	constante des gaz parfaits	.....	[Kmol/k]
R _a :	Résistance d'activation	.....	[V/A]
R _{int} :	Résistance interne	.....	[Ω]
T :	température	.....	[K]
U :	taux d'utilisation	.....	[-]
U :	tension d'une cellule de l'électrolyseur	.....	[V]

V_{act} : la surtension d'activation.....	[V]
V_{ohm} : la surtension ohmique.....	[V]
V_{conc} : la surtension de concentration.....	[V]
V_{FC} : la surtension de pile.....	[V]
V_a : Volume de l'anode.....	[m ³]
V_c : volume de la cathode.....	[m ³]
V_{cell} : Tension d'une cellule de pile à combustible	[V]
V_m : volume molaire aux conditions standards.....	[L/mol]
V_{rev_PCI} est La tension thermodynamique réversible.....	[V]
η_{act} : Rendement d'activation de la pile à combustible.....	[-]
η_{stack} : Rendement de stack.....	[-]
η_v : Rendement de tension	[-]
η_I : Rendement de courant.....	[-]
τ_{H_2} : constante de temps pour l'hydrogène.....	[s]
τ_{H_2O} : constante de temps pour l'eau.....	[s]
τ_{O_2} : constante de temps pour l'oxygène.....	[s]
G : énergie libre de Gibbs.....	[J/mol]
H : énergie libre d'enthalpie.....	[J/mol]
S : énergie libre d'entropie.....	[J/mol]
W_{max} : le travail maximum.....	[J]
n : la charge qui circule dans la cellule.....	[C]
F : la force motrice.....	[N]
E : énergie potentiel.....	[J]
$E_{électrode}$: est le potentiel standard à une cathode.....	[J]
$E_{cathode}$: est le potentiel standard à une anode.....	[J]
ΔG^0 : variation d'enthalpie libre standard	[kJ/mol]
ΔH^0 : variation d'enthalpie standard.....	[kJ/mol]



Liste Des Figures

<i>FIGURE I- 1: L'EXPERIENCE DE SIR WILLIAM GROVE</i>	2
<i>FIGURE I- 3: DOMAINES D'APPLICATION DES PILES A COMBUSTIBLE</i>	4
<i>FIGURE I- 2: CLASSIFICATION DES PILES A COMBUSTIBLE</i>	4
<i>FIGURE I- 4: DESCRIPTION GENERALE DES PHENOMENES ELECTROCHIMIQUES AU SEIN D'UNE PILE PEM)</i>	8
<i>FIGURE I- 5: PRINCIPE D'UNE PILE PEM</i>	11
<i>FIGURE I- 6: LES DIFFERENTS ELEMENTS DE PILE PEM</i>	12
<i>FIGURE I- 7: LA MEMBRANE DE PILE A COMBUSTIBLE</i>	12
<i>FIGURE I- 8: PLAQUE BIPOLAIRE</i>	14
<i>FIGURE I- 9: LE CŒUR DE PILE A COMBUSTIBLE</i>	14
<i>FIGURE I- 10: SCHEMA D'UNE PILE A COMBUSTIBLE DE TYPE PEM</i>	16
<i>FIGURE I- 11: CARACTERISTIQUE TENSION-COURANT D'UNE PILE A COMBUSTIBLE PEM</i>	18
<i>FIGURE I- 12: SCHEMA DES DEFERENTES DEGRADATIONS DE LA PILE PEM</i>	19
<i>FIGURE II- 1: MODELE PHYSIQUE DE LA PILE A COMBUSTIBLE</i>	25
<i>FIGURE II- 2: MODELE DYNAMIQUE D'UNE PAC</i>	29
<i>FIGURE II- 3: ORGANIGRAMME DE MODELISATION DE MATLAB SIMULINK</i>	31
<i>FIGURE II- 4: COURBE DE POLARISATION DE PEMFC</i>	32
<i>FIGURE II- 5: LA COURBE DE PUISSANCE DE LA PEMFC</i>	33
<i>FIGURE II- 6: LA COURBE DE PERTES ACTIVATION EN FONCTION DE LA DENSITE DE COURANT</i>	34
<i>FIGURE II- 7: PERTES D'ACTIVATION EN FONCTION DE LA TEMPERATURE</i>	35
<i>FIGURE III- 1: SCHEMA D'UNE PILE A COMBUSTIBLE</i>	37
<i>FIGURE III- 2: SCHEMA SYNOPTIQUE DU BANC D'ESSAI INSTRUCTOR</i>	37
<i>FIGURE III- 3: COMPOSANTS DU SYSTEME INSTRUCTOR</i>	38
<i>FIGURE III- 4: VARIATION DE LA TENSION EN FONCTION DE COURANT</i>	40
<i>FIGURE III- 5: VARIATION DE LA PUISSANCE EN FONCTION DE COURANT</i>	40
<i>FIGURE III- 6: EFFET DE LA TEMPERATURE SUR LA TENSION DE LA PEM</i>	41
<i>FIGURE III- 7: EFFET DE L'ALIMENTATION EN AIR</i>	42
<i>FIGURE III- 8: VARIATION DU DEBIT EN FONCTION DU COURANT</i>	43
<i>FIGURE III- 9: PUISSANCE ET RENDEMENT DE LA PILE A COMBUSTIBLE</i>	47

<i>FIGURE III- 10: LES DIFFERENTS RENDEMENTS DE LA PILE A COMBUSTIBLE.</i>	<i>48</i>
<i>FIGURE III- 11: COMPARAISON ENTRE LES COURBES</i>	<i>49</i>

Liste des tableaux

<i>TABLEAU 1-: CARACTERISTIQUES TECHNIQUE DE LA PAC SIMULEE [12]</i>	<i>30</i>
<i>TABLEAU 2-: CARACTERISTIQUES DES MODULES DE LA PILE A COMBUSTIBLE.....</i>	<i>39</i>
<i>TABLEAU 3: CALCUL DE RENDEMENT DU LA PILE A COMBUSTIBLE.</i>	<i>46</i>

INTRODUCTION GENERALE



Les questions énergétiques recouvrent à l'heure actuelle deux enjeux. L'un est lié au risque d'épuisement des ressources fossiles et fissiles, l'autre est environnemental.

Les sources utilisées aujourd'hui sont en effet à réserves finies, aussi bien pour les combustibles fossiles (hydrocarbures, charbon...) que pour les combustibles fissiles (uranium).

L'utilisation de ces sources d'énergie engendre en outre des effets secondaires indésirables : émission de gaz à effet de serre dans le cas des hydrocarbures, et production de déchets difficiles à traiter dans le cas du nucléaire.

Face à la diminution des ressources énergétiques, il est devenu indispensable de trouver des alternatives énergétiques possédant les mêmes propriétés que les hydrocarbures en termes de stockage et de transport.

Dans ce contexte, l'hydrogène s'avère être un candidat très sérieux, même s'il ne constitue qu'un vecteur énergétique et non une ressource primaire. De plus, l'hydrogène peut apporter une réponse aux enjeux climatiques en permettant de rationaliser l'utilisation des énergies renouvelables par nature dispersées et aléatoires.

L'hydrogène, qui n'existe pas à l'état naturel, peut en effet être synthétisé à partir des énergies renouvelables. Outre sa fonction de vecteur énergétique, est alors exploité son caractère stockable permettant d'une part, de s'affranchir du côté aléatoire de ces modes de production, et d'autre part, de répondre aux exigences fixées par les consommateurs d'énergie.

La pile à combustible s'impose alors naturellement comme le chaînon manquant en transformant l'énergie chimique en énergie électrique pouvant être manipulée avec des rendements élevés. La pile à combustible met en effet en jeu la réaction d'oxydoréduction entre l'hydrogène et l'oxygène pour donner de l'eau, de l'électricité et de la chaleur.

Parmi toutes les familles existantes de piles à combustible, nous intéresserons qu'aux piles à basses températures à membranes polymères échangeuses de protons (PEM), cette technologie semble effectivement être la plus mûre et la plus proche du stade commercial.

Le présent travail porte sur l'étude et Simulation d'une Pile à Combustible de type PEM de 50 Watts, dont l'objectif est, d'une part la modélisation dynamique d'une pile à combustible de type PEM (Proton Exchange Membrane), et d'autre part, l'étude expérimentale de l'effet de différents paramètres (l'air, le débit de l'hydrogène, ainsi la température) sur les caractéristiques d'une pile à échangeuse de proton, il est structuré de la façon suivante :

Dans le premier chapitre, nous présentons un état de l'art sur les piles à combustibles, les différents types existants, ainsi leur classification.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation dynamique d'une pile à combustible de type PEM.

Le troisième chapitre est réservé à une étude expérimentale d'une pile à combustible de type PEM, de 50 Watts (Banc d'essai Héliocentris).

Enfin nous allons terminer par une conclusion générale.

Chapitre I

GENERALITES SUR LES PILES A COMBUSTIBLE

Introduction

Les piles à combustibles font valoir des arguments forts qui pourraient permettre à cette technologie de s'imposer dans les applications de production d'énergie. Dans un marché en constant changement (ouverture à la concurrence) et face à une demande croissante en électricité, les piles à combustibles représentent des sources de production d'énergie très intéressantes. Tout d'abord les piles à combustibles sont très efficaces dans la conversion du combustible en électricité. D'autre part elles ne dégagent que de l'eau et de la chaleur qui peut être valorisée pour chauffer les maisons et commerces. De plus, les piles à combustibles sont silencieuses. Finalement la pile à combustibles se révèle intéressante pour les besoins simultanés en électricité et en chaleur. Mais on peut aussi envisager des demandes uniquement en électricité ou en chaleur ou distinguer selon que les besoins dominants seront en électricité ou en chaleur. Les deux étant produits par une pile (dans un ratio dépendant du type de pile).

Dans ce chapitre, nous allons passer en revue un état de l'art sur les piles à combustibles, leur classification, mode de fonctionnement, ainsi que leur application, sans oublier les avantages et les inconvénients de ces dernières.

I.1 DESCRIPTION GENERALE D'UNE PILE A COMBUSTIBLE :

Une pile à combustible est un générateur d'énergie électrique. Elle transforme directement l'énergie chimique du combustible en énergie électrique. C'est un système qui ne produit pratiquement pas de nuisances sonores, puisqu'il ne comporte pas de composants mécaniques en mouvement, comme les turbines et les moteurs. De plus, le courant électrique est produit tant que la pile est alimentée conjointement en combustible (hydrocarbures, alcools, biomasse, gaz naturel, hydrogène) et en comburant (oxygène de l'air). C'est ce qui la différencie des batteries, accumulateurs et autres piles, où se trouve stockée sous forme chimique une quantité limitée d'énergie électrique et qui doivent soit être rechargés lorsque c'est possible (batterie de véhicule), soit être remplacés (piles pour poste de radio).[1]

I.1.1 Aperçu historique de la pile :

L'histoire des piles à combustible a commencé en 1839, lorsque William Robert Grove réalisa l'expérience de l'électrolyse inverse de l'eau, qui a donné naissance à la batterie à gaz (Figure I.1), qui est devenue plus tard une pile à combustible

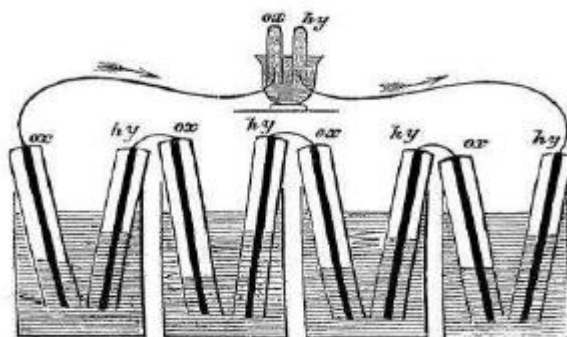


Figure I- 1: l'expérience de Sir William Grove

Durant l'année 1889, des améliorations sont portées sur le système existant, par L. MOND et C. LANGER en lui introduisant un catalyseur en platine, dans ce cas-là, l'électrolyte pouvait être contenu dans des matrices poreuses en plâtres ou en amiante. [2]

Après 1945, trois groupes de chercheurs (Etats Unis, Allemagne et en URSS) reprennent les études sur les principaux types de générateur, en apportant les améliorations technologiques nécessaires à un développement " industriel ". Ces travaux ont débouché sur les concepts actuels. Les premières applications des piles à combustible sont les programmes spatiaux (NASA : les années 60, APOLLO : 1968).[3]

Dans les années 1960 et 1970, les PAC ont fait l'objet de nombreux travaux qui ont abouti aux applications spatiales : alimentation en énergie électrique des capsules Gemini (pile PEM), Apollo (pile alcaline) et de la navette spatiale .Mais c'est surtout depuis le premier choc pétrolier qu'elle est prise en considération à travers de nombreuses recherches de développement sur l'automobile électrique [2].

Actuellement, on trouve de nombreux prototypes utilisant des PEMFC dans le domaine des transports. Daimler-Chrysler en collaboration avec Ballard commence, à partir de 1994, à fabriquer des prototypes de véhicules à pile à combustible. En parallèle, un bus à pile à combustible (NEBUS) fonctionnant à l'hydrogène est lancé en 1997.

D'autres producteurs de véhicules à pile à combustible se font remarquer: Renault présente le prototype FEVER en 1996 et PSA le modèle HydroGen en 2001. General Motors propose également en 2001, via Opel, un prototype HydroGen 3. Toyota lance en 2002 les modèles FCHV-3,4 et 5 et Honda sort la FCX-V3. Ford et Ballard construisent une Ford Focus à pile à combustible en 2000. [4].

I.2.PRESENTATION DE LA PAC

I.2.1. Fonctionnement :

On peut dire que le fonctionnement de toutes les piles à combustible, quelque soit leur technologie (alcaline, carbonate fondu, polymère, céramique, etc.), repose sur le même principe, à savoir qu'elles sont alimentées en Hydrogène et en Oxygène qui en se combinant dans le cœur de la pile donne lieu à des dégagements de chaleur, d'eau et d'électricité [5].

I.2.2. Classification de piles à combustible :

Il existe différents types de piles à combustible qui se différencient essentiellement par la nature de l'électrolyte utilisé et par la température de fonctionnement [6] :

- _ La Pile A Membrane Electrolyte Polymérique (PEMFC),
- _ La Pile A Méthanol Direct (DMFC),
- _ La Pile A Electrolyte Alcalin (AFC),
- _ La Pile A Acide Phosphorique (PAFC),
- _ La Pile A Oxyde Solide (SOFC),
- _ La Pile A Carbonates Fondus (MCFC),

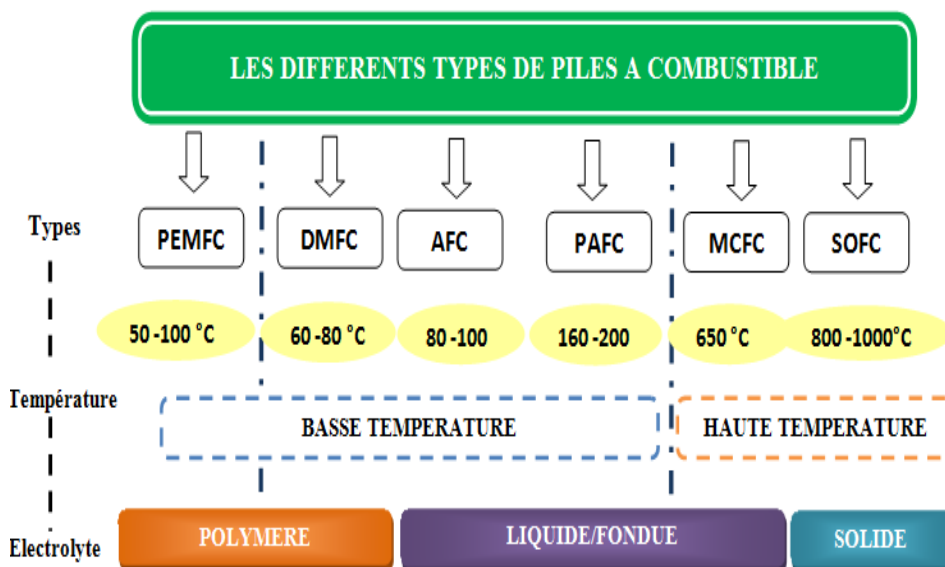


Figure I- 2: Classification des piles à combustible

I.2.3. Domaines d'application :

Les piles à combustibles sont utilisées dans une large gamme de domaines qui seront présentés ci-dessous:



Figure I- 3: Domaines d'application des piles à combustible

I.2.3.1.les applications transports :

Parmi les applications des piles à combustible dans le domaine de l'automobile, on peut citer la PEMFC pour la propulsion du véhicule (20 à 50 kW) et les piles alcalines pour l'alimentation en électricité des appareils de bord (climatisation, appareils électroniques). [7]

I.2.3.2.les applications stationnaires :

L'avantage des piles à combustible dans ce domaine est la production simultanée de l'électricité et de la chaleur, les types SOFC et MCFC sont mieux adaptées à la cogénération d'électricité et de chaleur. La pile à combustible commence à intéresser de nombreux industriels de ce secteur, en particulier en France, Japon, Etats-Unis, etc. L'activité est centrée sur deux grands domaines d'applications:

- la production collective (200 kW à quelques MW)
- la production domestique ou individuelle (2 à 7 kW). [8]

I.2.3.3. les applications portables :

Pour des applications portables, les piles à combustible sont en concurrence avec les batteries. On espère gagner en temps d'autonomie et pouvoir recharger plus vite des réserves d'énergie épuisées. Les piles utilisées dans ce domaine doivent être extrêmement robustes et peu sensibles aux conditions extérieures, seulement deux types de piles sont susceptibles d'avoir des applications portables, les PEMFC et DMFC, qui sont caractérisées par leur faible température de fonctionnement variable entre 60 et 80°C, ce qui diminue les problèmes de gestion thermique et fonctionnent à température ambiante. [9]

I.2.3.4. les applications militaires et spatiales :

Les spécificités des piles peuvent être utilisées pour ces secteurs de pointe que sont le militaire et le spatial. La NASA a utilisé des piles à combustible de type AFC pour alimenter en électricité les circuits de navettes spatiales notamment au cours du programme GEMINI et des missions APPOLO. Il est maintenant question qu'ils choisissent les PEMFC dans des applications futures. L'armée allemande a aussi développé un sous marin fonctionnant grâce à des PAC. [10]

I.2.3.5. Utilisation la pile à combustible dans différent capteur:

Ils y a plusieurs capteurs qu'utilise la pile à combustible comme une source d'énergie quelque types :

❖ Capteurs de terrains :

Plusieurs types de capteurs existent ; ils sont développés notamment dans du PNIR biofilms (pôle national de recherche a implantation régionale).

❖ Capteurs électrochimiques :

Le principe repose sur la mesure ampérométrique du flux de matière d'une espèce électro-active, l'oxygène dissous ou un indicateur électrochimique spécifique, au niveau de la surface de l'électrode. Le bio film en se développant sur la surface de l'électrode. Provoque la diminution du flux de matière.

❖ Capteurs optiques :

Ils reposent sur plusieurs principes :

Spectroscopie infrarouge atténuée a réflexion totale.

Analyse de la diffusion multiple de la lumière par les agrégats qui permet de déterminer leur dimension fractale.

❖ Capteurs biologiques :

Il s'agit d'utiliser les possibilités de la biologie moléculaire en immobilisant des anticorps et /ou des sondes nucléiques [11].

I.2.4. Avantages et inconvénients des piles à combustible :

Les avantages et inconvénients des piles à combustible dépendent bien entendu du type de pile considéré et donc de l'application envisagée.

I.2.4.1. Avantages des piles à combustible :

Les avantages les plus importants sont les suivants :

Très bon rendement énergétique (supérieur à 50 %) : en comparaison avec moteurs a combustion interne (25-30%).l'énergie non convertie en énergie électrique est émise sous forme de chaleur et est évacué sous forme d'eau chaude ou de vapeur. Ceci est un point fort

dans le cas des applications domestiques, car la pile à combustible est capable de fournir de l'électricité et également de l'eau chaude qui pourra être utilisée pour le chauffage domestique ce qui va augmenter le rendement de la pile à combustible jusqu'à 80-90%.

Protection de l'environnement : 99 % en moins de monoxyde de carbone en comparaison avec un véhicule à essence. [12]

Efficacité : les piles à combustible sont généralement plus efficaces que les moteurs à combustion à piston ou turbine fondée. Un autre indice pour cela est que les petits systèmes peuvent être tout aussi efficaces que les grands.

Modulabilité : Les piles à combustible ont la caractéristique importante d'être très modulables dans le sens où elles peuvent être facilement de tailles différentes. La taille d'une pile à combustible peut facilement être augmentée ou réduite et le rendement électrique est relativement indépendant de la taille de la pile. [13]

Silence : Les piles à combustible sont très calmes, même ceux qui ont d'importantes transformations au carburant supplémentaire équipement. Ceci est très important tant dans les applications portables que dans les productions combinées locales d'énergie et de chaleur. [3].

I.2.4.2. Les inconvénients des piles à combustibles :

Les inconvénients associés aux piles à combustible sont liés à leur manque de développement : [14], [15]

Coût trop élevé de production et de maintenance: Le coût qui est très élevé à cause de l'utilisation des métaux nobles comme le platine au niveau des électrodes et à cause du prix de fabrication de la membrane et des plaques bipolaires.

Le poids et le volume

La durée de vie : La plupart des piles sont encore des prototypes, on a donc peu de renseignements sur la durée de vie des piles. Les contraintes diffèrent selon l'application :

Automobile : quelques milliers d'heures.

Stationnaire : au moins 40 000 heures

Le manque d'infrastructures au niveau de l'approvisionnement en carburant (hydrogène, méthane). Ceci nécessite la mise en place de systèmes de production, de transport et de distribution. Cependant, la mise en place de tels systèmes ne peut se faire avant la commercialisation de la PAC.

I.2.5. Description générale des phénomènes physicochimiques d'une pile à combustible :

Les phénomènes physico-chimiques qui se produisent dans le cœur de pile sont nombreux. Nous avons les phénomènes thermodynamiques, fluidiques, électrochimiques ainsi que thermiques. L'interaction entre ces différents phénomènes fortement couplés est importante pour le bon fonctionnement du système.

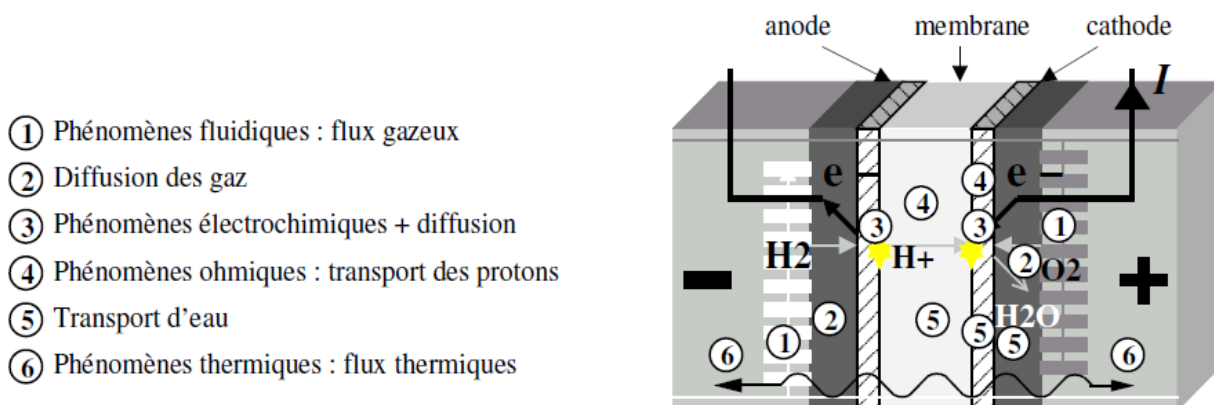


Figure I- 4: Description générale des phénomènes électrochimiques au sein d'une pile PEM)

I.2.5.1. Phénomène thermodynamique :

Dans la pile à combustible, l'énergie apportée est l'énergie chimique contenue dans les gaz entrant dans la pile. L'énergie fournie par la pile c'est l'énergie électrique et thermique. Ces dernières sont faciles à quantifier.

Contrairement à l'énergie fournie, l'énergie chimique n'est pas facile à quantifier. Ici, la définition de l'énergie libre de Gibbs qui s'applique:

L'énergie libre de Gibbs est reliée à l'enthalpie H par le terme de création d'entropie TS .

Ce dernier traduit la deuxième loi de la thermodynamique, selon l'équation suivant :

$$G = H - TS \quad (\text{I. 1})$$

le travail fait par un système électrique étant égal à la charge qui circule dans la cellule multipliée par la force motrice, le potentiel, il est alors permis d'écrire la relation suivante :

$$W_{max} = nFE \quad (\text{I. 2})$$

W_{max} : le travail maximum (J)

n : la charge qui circule dans la cellule (Columb)

F : la force motrice (N)

E : énergie potentiel (J)

Ceci permet donc d'exprimer l'énergie de Gibbs comme suit :

$$\Delta G = -nFE_{\text{électrode}} \quad (I.3)$$

$E_{\text{électrode}}$: est le potentiel standard pour une réaction donnée à une électrode,

n : le nombre d'électrons échangés

F : la constante de Faraday

La quantité E_{pile} ainsi définie est le potentiel standard de la pile dans des conditions opératoires données. Cette quantité correspond à l'énergie disponible pour faire circuler une charge entre deux électrodes : [16]

$$E_{\text{pile}} = E_{\text{cathode}} - E_{\text{anode}} \quad (I.4)$$

$E_{\text{électrode}}$: est le potentiel standard pour une réaction donnée à une cathode (J)

E_{cathode} : est le potentiel standard pour une réaction donnée à une anode (J)

I.2.5.2. Phénomènes fluidiques :

Les gaz circulent dans les canaux, qui sont généralement gravés dans les plaques bipolaires, pour atteindre le cœur de la cellule électrochimique. La conception des canaux est particulièrement importante pour assurer une répartition homogène des gaz sur toute la surface de l'électrode en minimisant les pertes de charge. Les gaz sont en général humidifiés avant d'être injectés dans les canaux, mais peuvent être également humidifiés de façon interne grâce à la présence de l'eau. Ainsi, la pression partielle du gaz est généralement inférieure à la pression totale des gaz qui est régulée. [17]

I.2.5.3. Phénomènes électrochimiques :

Les gaz qui traversent la couche de diffusion atteignent une zone appelée active ou de catalyse. C'est dans cette zone que le mécanisme réactionnel des deux demi-réactions d'oxydoréduction s'applique réalisant ainsi la transformation de l'énergie chimique en énergie électrique.

Lors de cette transformation, des pertes dues à la cinétique chimique des réactions apparaissent. La condition nécessaire au mécanisme réactionnel est la mise en présence au même point du gaz réactif, du proton, des électrons et du catalyseur. [14]

I.2.5.4. Phénomènes thermiques :

Les phénomènes thermiques sont très importants dans les piles à combustible. En effet, la température est un paramètre déterminant des réactions chimiques : plus la température est grande plus la cinétique des réactions est grande.

Pour être bon conducteur ionique, l'électrolyte doit être assez chaud. Mais, pour assurer un fonctionnement correct de la pile PEM, il est nécessaire de travailler en dessous de 100°C pour éviter un assèchement de la membrane. Or l'échauffement de la pile est assez rapide et nécessite souvent un système de refroidissement extérieur. La source principale de la chaleur est la réaction exothermique entre l'hydrogène et l'oxygène. La chaleur produite au niveau des couches actives se décompose en un flux de chaleur traversant les électrodes et un autre traversant la membrane par les phénomènes de conduction et de transport de matière. [18], [19]

I.3. LA PILE A COMBUSTIBLE DE TYPE PEM

Parmi toutes les familles existantes, la pile à combustible de type PEM suscite de nombreux travaux de recherche et développement à travers le monde. La technologie évolue vite, d'autant plus qu'elle est poussée par la volonté des constructeurs des piles de proposer le plus rapidement possible des produits économiquement viables et fiables.

Nous ne nous intéresserons qu'à la pile à combustible de type PEM, parce que cette technologie semble effectivement être la plus proche de la commercialisation dans le domaine du transport. En comparaison avec d'autres types des piles à combustibles, la pile de PEM a plusieurs caractéristiques attractives comme :

- Densité de puissance plus élevée ;
- Fort rendement de transformation d'énergie chimique en énergie électrique ;
- Basses températures, rapide et facile à démarrer ;
- Polymère solide ce qui réduit les soucis liés à la construction, au transport et à la fiabilité;
- Plus compacte et légère : une meilleure densité de puissance volumique ;
- Modulaire donc facile à installer.[20]

I.3.1. Principe de fonctionnement de pile à combustible de type PEM:

Une pile à combustible fonctionne sur le principe inverse de l'électrolyse de l'eau.

Des réactifs chimiques permettent la production d'énergie électrique.

La pile à combustible d'électrolyte à membrane polymère convertit l'hydrogène et oxygène en énergie électrique. Cette réaction d'oxydoréduction correspond à l'électrolyse de l'eau inversée :

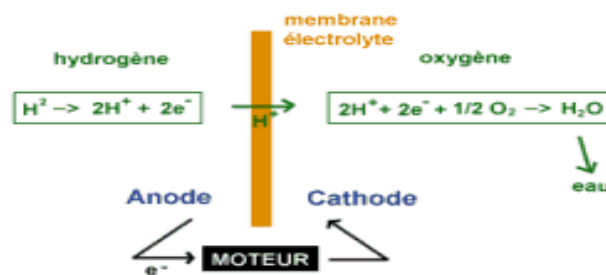
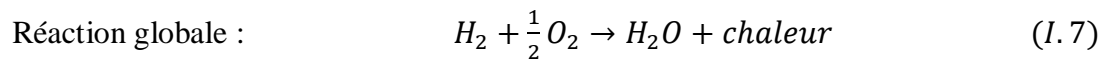
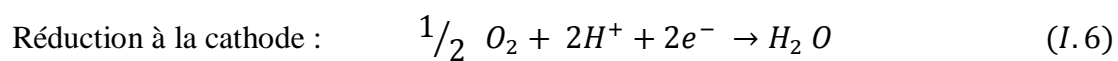
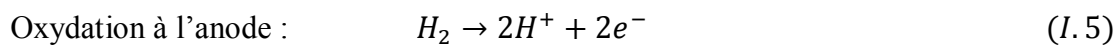


Figure I- 5: principe d'une pile PEM

L'électricité est produite par les deux électrons libérés par la molécule d'hydrogène.

Les protons d'hydrogène traversent la membrane séparant l'anode de la cathode et se recombinent à la cathode avec les électrons et les atomes d'oxygène. Idéalement, les seuls produits secondaires de la réaction sont de l'eau et de la chaleur. Le schéma de principe d'une cellule élémentaire de pile à combustible est présenté en figure I-5. La membrane est le cœur de la cellule élémentaire : il s'agit d'un électrolyte en polymère qui est perméable aux protons d'hydrogène et imperméable aux gaz. Pour garantir la perméabilité aux protons, la membrane doit être en permanence humidifiée. [21], [22]

I.3.2. 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.[23]

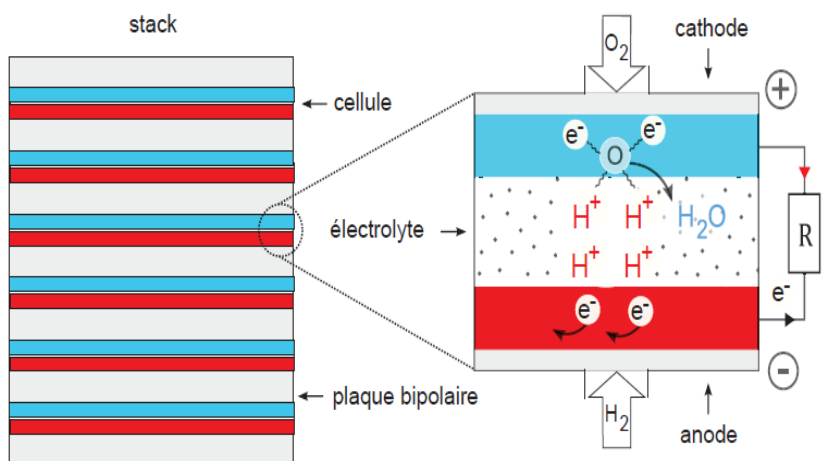


Figure I- 6: Les différents éléments de pile PEM.

1.2.3.1 électrolytes (membrane):

L'électrolyte, ou membrane, constitue 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. [24]

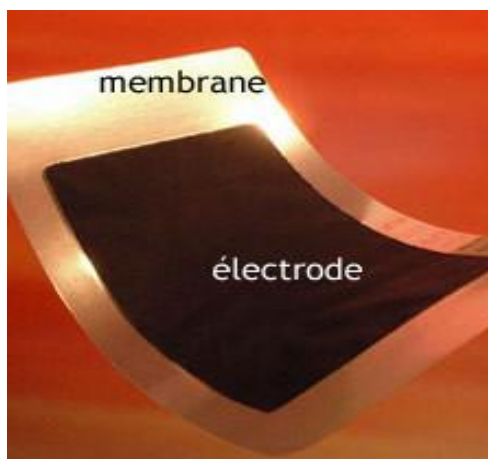


Figure I- 7: la membrane de pile a combustible

1.2.3.2 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 l'anode doivent pouvoir être évacués puis redistribués à la cathode 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). [19], [25]

L'anode : On réalise l'oxydation de l'hydrogène, selon la réaction précédente (pour une pile acide)

La cathode : On réalise la réduction de l'oxygène, selon la réaction précédente

Le catalyseur: pour 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 [21].

1.2.3.3 .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. [24]. [26]

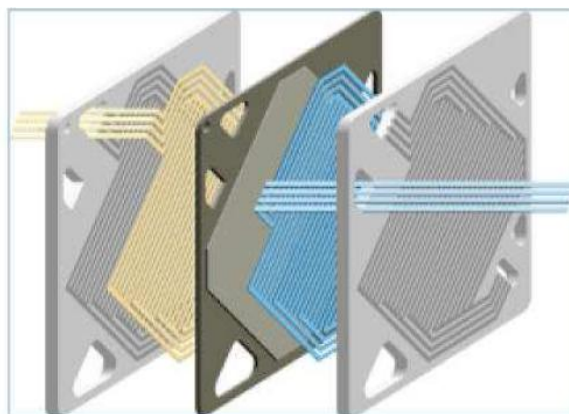


Figure I- 8: Plaque bipolaire.

1.2.3.4. Couches de diffusion(Backing) :

Entourant les électrodes, les couches de diffusion, d'une épaisseur comprise entre 300 μm 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.[27].

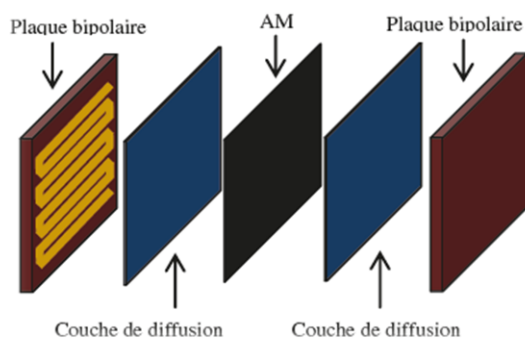


Figure I- 9:le cœur de pile a combustible

1.2.3.5. Assemblage Membrane – Electrodes :

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–Electrodes (en Anglais MEA, *Membrane Electrode Assembly*).

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 degrés actuels.[28]

I.3.3. Description du Stack de type PEM :

Un stack de pile à combustible de type PEM produit pratiquement autant d'énergie thermique que d'énergie électrique. Cette énergie thermique peut être employée de différentes manières.

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

Un système de refroidissement est utilisé pour régler la température de fonctionnement de la pile à combustible. [22]

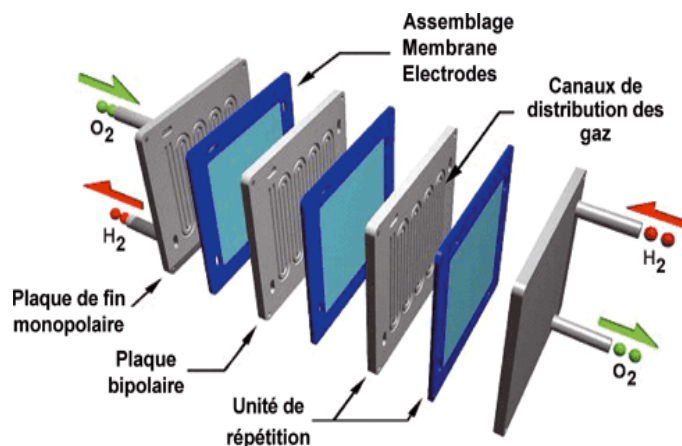


Figure I- 10: Schéma d'une pile à combustible de type PEM

I.4. SYSTEME PILE A COMBUSTIBLE PEM

Un stack de pile à combustible nécessite pour son fonctionnement l'ajout de plusieurs appareils auxiliaires destinés à l'alimentation et au conditionnement des gaz, à la gestion de l'humidification de la membrane et au contrôle de la température de fonctionnement du système.

I.4.1. Les auxiliaires :

Les systèmes auxiliaires (refroidissement, contrôle et régulation des flux de gaz et de la pression) assurent le bon fonctionnement de la pile à combustible. En effet, les variations de pression, d'humidité des gaz entrants, ou simplement de leur débit ont une influence majeure sur les performances de la pile.

Un système de recirculation de l'hydrogène non consommé du côté anodique peut être intéressant, pour des raisons de coût et de stockage de l'hydrogène (un des problèmes de la pile à combustible). Des humidificateurs sont souvent nécessaires pour humidifier les gaz en entrée, et diminuer en conséquence la résistance ohmique de la membrane. [28],[14]

I.4.2. Alimentation de pile a combustible de type PEM :**I.4.2.1. Circuit d'alimentation en hydrogène :**

Pour une pile fonctionnant à l'hydrogène direct, un circuit simple assure l'approvisionnement en hydrogène. L'hydrogène est généralement stocké sous forme gazeuse dans des réservoirs à haute pression (300 à 700 bars).

Une régulation mécanique de pression par détendeur est utilisée dans ce cas pour amener l'hydrogène à une pression convenable (1 à 3 bars). L'hydrogène non consommé peut être ensuite recyclé moyennant l'utilisation d'une pompe de recirculation ou d'un dispositif passif (Venturi) afin d'éviter un gaspillage du combustible. L'anode peut également fonctionner en régime fermé et dans ce cas une purge occasionnelle contrôlée par une valve doit être effectuée pour éviter l'accumulation de l'azote diffusé à travers la membrane électrolytique. Dans ce cas le résidu d'hydrogène peut être consommé dans un petit brûleur catalytique.

Eventuellement, l'hydrogène entrant dans le réacteur peut être humidifié avec de l'eau ionisée au moyen d'un système d'humidification à la membrane.[28],[29]

I.4.2.2. Circuit d'alimentation en air :

L'oxygène alimentant la pile à combustible est généralement prélevé dans l'air ambiant afin d'éviter le stockage de l'oxygène. Cependant, l'air ne contient que 21% d'oxygène. Afin d'augmenter la concentration d'oxygène, il est parfois nécessaire (pour les puissances élevées) de comprimer l'air. Dans certains cas, l'énergie disponible dans les gaz de sortie (air appauvri en oxygène) de la pile peut être récupérée par une turbine. Pour les petites puissances, une soufflante peut suffire.

L'utilisation d'un compresseur n'est pas sans conséquences sur le rendement global du système. Celui-ci est alimenté par la pile à combustible et lui prélève une puissance non négligeable qui peut représenter jusqu'à 25% de la puissance électrique délivrée par la pile. Le compresseur est donc un auxiliaire très important dans la pile et de nombreux verrous technologiques sont à lever dans ce domaine : il doit permettre l'alimentation en air, l'évacuation de l'eau produite sans assécher la membrane de la pile et assurer une bonne dynamique du système (c.-à-d., répondre en temps réel aux sollicitations du système).[29]

I.5. CARACTERISTIQUES DE POLARISATION D'UNE PILE A COMBUSTIBLE PEMFC

On peut distinguer sur la courbe caractéristique de la pile PEMFC, trois domaines différents, qu'on appelle également courbe de polarisation :

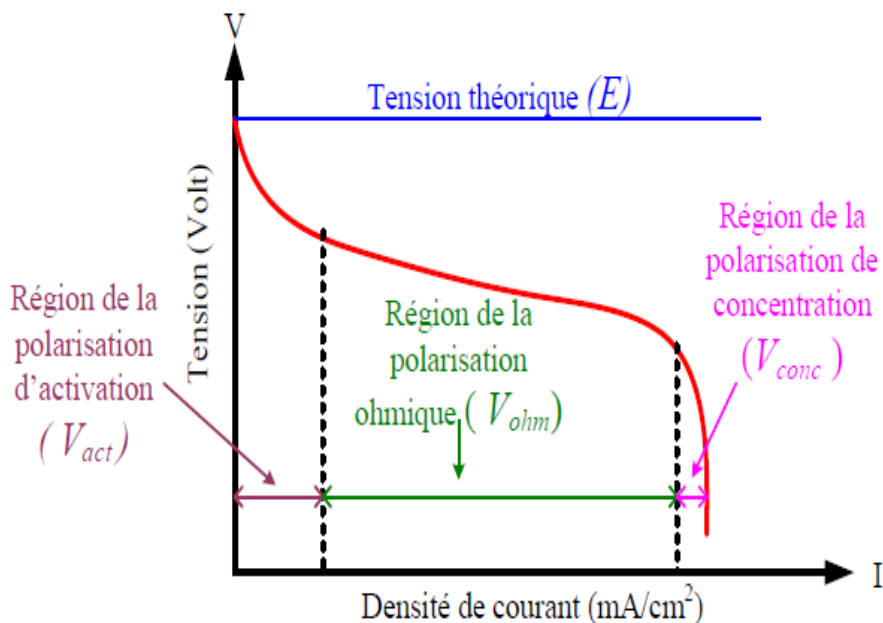


Figure I- 11: caractéristique tension-courant d'une pile à combustible PEM

- ✓ Polarisation d'activation due au transfert de charges à l'interface électrode/électrolyte, dues la lenteur de la réaction chimique a la surface de l'électrode.
- ✓ Polarisation de résistance qui est la résultante de la résistance électrique des différents éléments de la pile et surtout de l'électrolyte ;
- ✓ Polarisation de diffusion qui dépend de la concentration de l'électrolyte autour des électrodes. [30]

I.6. DEGRADATION DE LA PILE PEM

Il y a différentes manières de classer les défauts qui peuvent survenir au niveau du Stack. Comme la pile fait intervenir plusieurs phénomènes multi-physiques, on peut se baser sur la nature physique des phénomènes à l'origine de défauts : origines mécanique, thermique, ou électrochimique.

Ce schéma montre les différentes dégradations de la pile PEM:

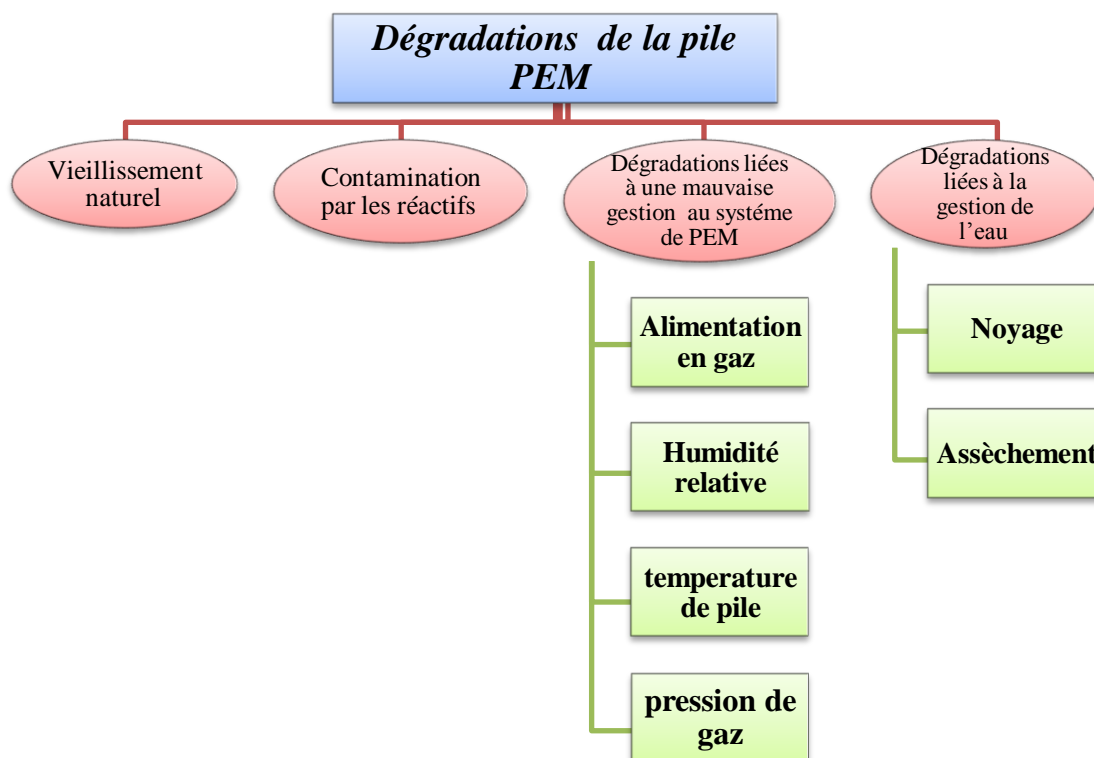


Figure I- 12: Schéma des différentes dégradations de la pile PEM

I.6.1. Les défauts de la pile PEM

I.6.1.1. Dégradations liées à la gestion de l'eau :

Certaines conditions opératoires appliquées à la pile à combustible peuvent donner lieu à deux types de défauts antagonistes : les noyages et les assèchements.

- **Noyage :**

Un noyage peut provoquer une accumulation d'eau liquide au sein d'une PEMFC. Différents moyens de corrections sont possibles :

- ✓ augmentation des débits des gaz,
- ✓ diminution du courant demandé à la pile quand l'application le permet,
- ✓ diminution de l'hygrométrie des gaz en entrée de pile.

- **Assèchement :**

Un assèchement se produit lorsque l'hydratation des membranes devient insuffisante pour assurer une bonne conductivité ionique.

Afin de réhydrater la membrane, les actions possibles sont :

- ✓ diminution des débits des gaz,
- ✓ augmentation du courant demandé à la pile si l'application le permet.

I.6.1.2. Dégradations liées à une mauvaise gestion des débits, des pressions, des températures et de l'humidité relative des gaz :

Les défauts qui apparaissent au niveau du stack ont souvent un lien direct avec la gestion des systèmes placés autour de la pile et qui ont pour rôle de fournir des conditions opératoires nécessaires au bon fonctionnement de la pile.

- **Alimentation en gaz :**

Les débits des gaz réactifs doivent être réajustés pour fournir la quantité de réactifs anode /cathode nécessaires pour débiter le courant demandé par la charge. Dans le cas où ces quantités ne sont pas suffisantes, la pile se retrouve dans un état d'appauvrissement en réactifs qu'on appelle aussi sous stœchiométrie.

- **Pression des gaz :**

Les membranes sont des dispositifs fragiles (épaisseur de l'ordre 25 – 100 um), un fort gradient de pression entre l'anode et la cathode peut endommager la membrane.

- **Température de la pile:**

La température est une condition opératoire déterminante pour les performances de la pile. La température constitue un paramètre très critique à surveiller : une température

trop élevée peut provoquer un assèchement et /ou dégradation de la membrane, tandis qu'une température basse favorise la formation d'eau liquide à l'intérieur de la pile.

– **Humidité relative :**

Une baisse de la valeur de l'humidité relative des réactifs en amont de la pile multiplie la valeur de la résistance de la membrane par un facteur de plusieurs centaines, occasionnant ainsi une forte diminution des performances de la pile.[31]

I.6.1.3.Contamination par les réactifs :

Les membranes et les couches actives peuvent être affectées par des contaminants tels que le monoxyde et le dioxyde de carbone, le soufre, et le NH₃. Cela conduit à la diminution des surfaces actives dans les assemblages membrane – électrodes.

I.6.1.4.Vieillessement naturel :

Une pile à combustible fonctionnant avec des conditions opératoires nominales et stables sera affectée par un processus de vieillissement naturel des composants qui la constituent à savoir les membranes, les électrodes, les couches de diffusion, les plaques bipolaires et les joints d'étanchéité .Cela aura pour effet une diminution des performances de la pile : diminution des propriétés liées aux transports des réactifs, diminution des propriétés électriques des matériaux, diminution de l'activité catalytique ainsi que l'apparition des phénomènes d'inétanchéité entre les différents compartiments du stack[32],[33].

I.7. RENDEMENT DE PILE A COMBUSTIBLE

L'un des principaux avantages d'une pile à combustible est son rendement énergétique global. Celui-ci est théoriquement très supérieur à celui d'un moteur thermique classique.[14],[34]

I.7.1.Rendement matière - Quantités de combustibles :

Pour les deux configurations décrites ci-dessus, on définit un rendement matière η_{mat} égale au rapport entre la quantité d'hydrogène consommée par la pile et la quantité produite par le reformeur suivant :

$$\eta_{mat} = \dot{M}_{H_2}^{pile} / \dot{m}_{H_2}^R = (\dot{M}_{H_2}^R - \dot{M}_{H_2}^{ex}) / \dot{M}_{H_2}^R \quad (I.8)$$

Ce rendement concerne l'utilisation des réactifs au niveau des électrodes. En effet, dans une pile, chaque ensemble "membrane-électrodes" doit être alimenté de manière identique, ce qui suppose un même débit et des pressions partielles identiques. Ces ensembles étant en série, tout défaut pour l'un d'eux se répercute sur tous les autres. On définit un coefficient d'utilisation des gaz que l'on estime typiquement à 95% :

$$\eta_{matiere} = 95\% \quad (I.9)$$

I.7.2.Rendement thermodynamique :

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:

$$\eta_{thermo} = \frac{\Delta G^\circ(T)}{\Delta H^\circ(T)} \quad (I.10)$$

Pour la réaction de formation de l'eau, lorsque celle-ci est produite à l'état liquide à 25°C et sous une pression de 1bar, ces grandeurs valent :

- variation d'enthalpie libre standard : $\Delta G^0 = -237$ kJ/mol

- variation d'enthalpie standard : $\Delta H^0 = -265.8$ kJ/mol.

Le rendement thermodynamique vaut alors :

$$\eta_{thermo} = 83\% \quad (I.11)$$

I.7.2.Rendement voltaïque

Ce rendement se calculé par le rapport entre la tension de sortie de la pile et la tension E_0 à la température concernée :

$$\eta_{voltaïque} = \frac{V_{pile}}{1.23} \quad (I.12)$$

$E_0 = 1,23$ V

I.7.3.Rendement global :

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

$$\eta_{global} = \eta_{thermo} \times \eta_{matiere} \times \eta_{voltaique} \quad (I.13)$$

En pratique, la tension d'utilisation d'une cellule de PEM se situe autour de 0,7V. Nous pouvons alors calculer un rendement global approximatif :

$$\eta_{global} = 0,43 \quad (I.7)$$

CONCLUSION

Au début de ce premier chapitre, nous avons présenté le problème énergétique dans le monde, l'énergie d'hydrogène est une énergie renouvelable pour le futur, la pile à combustible permet de transformer efficacement de l'énergie chimique en énergie électrique.

Dans ce contexte nous nous sommes intéressés dans ce travail qu'aux piles à membranes polymères échangeuses de protons PEM (*Proton Exchange Membrane*) aux causes de leurs avantages. Ensuite, la description du principe de fonctionnement d'une de type PEM et la structure complète de leur cellule .Enfin, on définit le rendement de la pile et ses différents caractéristiques.

Chapitre II

MODELISATION & SIMULATION D'UNE PILE A COMBUSTIBLE DE TYPE PEM

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, le développement des nouvelles sources d'énergie qui pourraient être une solution énergétique du futur est devenu une nécessité.

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 notable et indispensable pour approuver la conception et la performance des piles à combustible.

C'est dans ce contexte que ce chapitre a été mené, il est consacré à la modélisation dynamique de la pile à combustible de type PEM d'autre part, et la présentation d'un exemple

de simulation permettant la détermination de la courbe de polarisation et celle de la puissance d'une pile à combustible PEM, ainsi la variation des pertes d'activation en fonction de la densité de courant et la température, la chose qui permettra de bien comprendre les phénomènes essentiels qui se déroulent dans une pile à combustible.

II.1. MODELE PHYSIQUE DE LA PILE A COMBUSTIBLE

La figure (II.1), représente un modèle physique d'une pile à combustible (PAC).

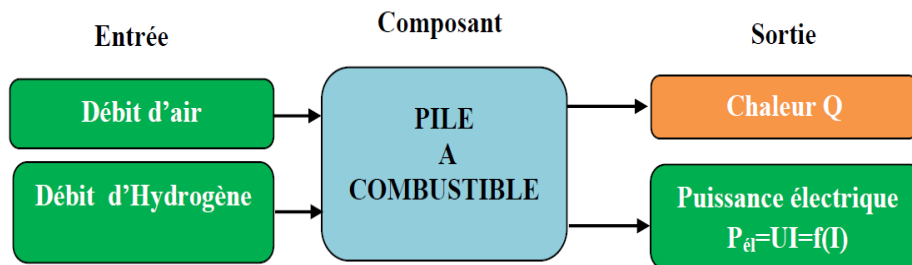


Figure II- 1:Modèle physique de la pile à combustible

La PAC correspond à une source d'énergie, en fonction du besoin de la charge un point de fonctionnement (Tension / Courant) va s'établir. La quantité d'hydrogène consommée est proportionnelle à la quantité d'électricité absorbée par la charge.

II.2. MODELISATION

La modélisation des piles à combustible prend une part très importante dans leur développement, car elle 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.

II.2.1. Le débit d'hydrogène et d'oxygène à l'entrée [35] : Les débits d'entrée de l'hydrogène (H_2), de l'oxygène (O_2) et l'eau (H_2O) sont donnés par l'équation suivante :

$$\dot{m}_{j,in} = \frac{N_0 I}{2.F.U} \quad (II.1)$$

I : Courant électrique (A).

j : Représente l'élément (H_2O , H_2 , O_2).

U : taux d'utilisation.

Chapitre II Modélisation & Simulation D'une Pile A Combustible

F : constante de faraday.

N0 : nombre de cellules en série.

II.2.2. La résistance interne : Elle est donnée comme suit,

$$R_{int} = 0.01605 - 3.5 * 10^{-5}.T + 8 * 10^{-5}.I \quad (II. 2)$$

II.2.3. Les pertes ohmiques : Les pertes ohmiques sont dues à la résistance qui oppose les électrodes et les plaques bipolaires à la circulation des électrons et l'électrolyte au passage des protons [36]. Elles sont données par l'équation suivante :

$$\eta_{ohmic} = I.R_{int} \quad (II. 3)$$

II.2.4. La surtension d'Activation : Les pertes d'activation sont dues au démarrage des réactions chimiques à l'anode et à la cathode. Une partie de l'énergie disponible est utilisée pour briser et reformer les liaisons chimiques aux électrodes. [37]

$$\eta_{act} = B * \log(C * I) \quad (II. 4)$$

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

C : facteur d'échelle. m/s

I : Courant électrique (A).

II.2.5. Résistance d'activation Ra :

$$R_a = -\frac{\eta_{act}}{I} \quad (II. 5)$$

II.2.6. La constante de modélisation Kr : C'est une constante supposée utilisée durant les calculs pour simplifier l'écriture des équations, elle est donnée par : [35]

$$Kr = \frac{N_o}{4.F} \quad (II. 6)$$

II.2.7. La pression de l'hydrogène [38] : La quantité d'hydrogène et de l'oxygène consommée dans la pile à combustible dépend des débits d'entrée et de sortie, de courant, et volume des électrodes, si les débits d'entrée et de sortie sont connus, la pression à l'anode peut être déterminée par :

$$\text{La loi des gaz parfait : } PV = nRT \quad (II. 7)$$

Donc on obtient :

$$\frac{V_a}{RT} \frac{dP_{H_2}}{dt} = \dot{m}_{H_2 \text{ in}} - \dot{m}_{H_2 \text{ out}} - 2 \cdot Kr \cdot I \quad (II.8)$$

$$\frac{dP_{H_2}}{dt} = \frac{RT}{V_{an}} (\dot{m}_{H_2 \text{ in}} - \dot{m}_{H_2 \text{ out}} - 2 \cdot Kr \cdot I) \quad (II.9)$$

$$\dot{m}_{H_2 \text{ out}} = K_{H_2} \cdot P_{H_2} \quad (II.10)$$

On remplace (II.8) dans (II.7) [37] on obtient :

$$\frac{dP_{H_2}}{dt} = \frac{RT}{V_{an}} (\dot{m}_{H_2 \text{ in}} - 2 \cdot Kr \cdot I) - \frac{RT}{V_{an}} K_{H_2} \cdot P_{H_2} \quad (II.11)$$

$$P_{H_2} = \frac{1}{K_{H_2}} (\dot{m}_{H_2 \text{ in}} - 2 \cdot Kr \cdot I) - \frac{dP_{H_2}}{dt} \cdot \frac{V_{an}}{RT K_{H_2}} \quad (II.12)$$

$$\tau_{H_2} = \frac{V_{an}}{RT K_{H_2}} \quad (II.13)$$

Après simplifications, on aura :

$$\tau_{H_2} \frac{dP_{H_2}}{dt} + P_{H_2} = \frac{1}{K_{H_2}} (\dot{m}_{H_2 \text{ in}} - 2 \cdot Kr \cdot I) \quad (II.14)$$

En appliquant la transformation de LAPLACE on aura :

$$P_{H_2} = \frac{\frac{1}{K_{H_2}}}{\tau_{H_2} \cdot s + 1} (\dot{m}_{H_2 \text{ in}} - 2 \cdot Kr \cdot I) \quad (II.15)$$

II.2.8. Pression d'oxygène P_{O_2} : On procède de la même manière que précédemment pour calculer la pression de l'oxygène, cette pression est donnée par :

$$\frac{dP_{O_2}}{dt} = \frac{RT}{V_c} (\dot{m}_{O_2 \text{ in}} - \dot{m}_{O_2 \text{ out}} - Kr \cdot I) \quad (II.16)$$

Ce qui donne :

$$P_{O_2} = \frac{\frac{1}{K_{O_2}}}{\tau_{O_2} \cdot s + 1} (\dot{m}_{O_2 \text{ in}} - Kr \cdot I) \quad (II.17)$$

II.2.9. Pression de l'eau : 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 :

$$\frac{V_a}{RT} \frac{dP_{H_2O}}{dt} = \dot{m}_{H_2O \text{ in}} - \dot{m}_{H_2O \text{ out}} + 2 \cdot Kr \cdot I \quad (II.18)$$

Chapitre II Modélisation & Simulation D'une Pile A Combustible

Après développement et simplification, on trouve :

$$P_{H_2O} = \frac{1}{\tau_{H_2O} \cdot S + 1} (2 \cdot Kr \cdot I) \quad (II.19)$$

I : courant électrique (A).

Kr : la constante de modélisation.

II.2.10. Potentiel thermodynamique [38] : La tension réversible dépend en pratique des pressions et de la température de fonctionnement. Il s'agit de la loi de Nernst :

$$E = \left[E_0 + \frac{R \cdot T}{2 \cdot F} * \log \left(\frac{P_{H_2} \cdot P_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{P_{H_2O}} \right) \right] \quad (II.20)$$

E_0 : est la tension (le « potentiel ») standard, calculé à partir de l'enthalpie libre standard définie pour 25°C et à 1 bar et sont respectivement les pressions relatives (bars) des gaz oxygène et hydrogène P_{H_2}, P_{O_2}

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)

II.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 [39, 40], elle est donnée comme suit :

$$V = E - \eta_{act} - \eta_{ohmic} \quad (II.21)$$

V : Tension d'une cellule, Volt

η_{act} : Polarisation d'activation de l'anode et de la cathode, Volt

η_{ohm} : Polarisation ohmique de l'anode et de la cathode, Volt

II.2.12. Tension totale de la cellule PAC : La pile à combustible est composée de plusieurs cellules placées en série formant un assemblage [41, 42]

$$V_{stack} = N_0 * V_{cell} \quad (II.22)$$

II.4. BLOC D'UNE PEMFC

Les données et les caractéristiques d'une pile à combustible considérées dans notre simulation sont illustrées en tableau I :

Paramètres du modèle PAC	
Constante de Faraday	$F = 964872 \text{ C.}$
Constante des Gaz parfaits.	$R=8.314 \text{ (J/mol k).}$
Température.	$T_c=80 \text{ }^\circ\text{C.}$
Pression de l'hydrogène.	$P_{H2} = 3 \text{ (Atm).}$
Pression de l'Air.	$P_{air} = 3 \text{ (Atm).}$
Surface de Cellule	$A_{cell}=100.$
Nombre de cellules	$N_{cells}=90.$
Resistance interne	$r = 0.19 \text{ (Ohm-cm}^2\text{)}$
Coefficient de transfert	$\text{Alpha} = 0.5;$
Facteur d'Amplification.	$\text{Alpha1} = 0.085$
Facteur d'échange densité de courant.	$i_o = 10^{-6,912} \text{ (A/cm}^2\text{)}$
Densité de courant limite.	$i_l = 1.4 \text{ (A/cm}^2\text{)}$
Fonction de Gibbs état liquide.	$Gf_{liq} = -228170 \text{ (J/mol).}$
Constante transport de masse.	$k = 1.1.$

Tableau I-: Caractéristiques technique de la PAC simulée [12]

II.4.1.MISE EN PAGE SUR MATLAB SIMULINK :

Les modèles mathématiques offrent un outil notable et indispensable pour approuver la conception et la performance des piles à combustible. L'organigramme de **Figure II- 3** montre les étapes que nous allons suivre pour la modélisation d'une pile à combustible (PAC) de type PEM.

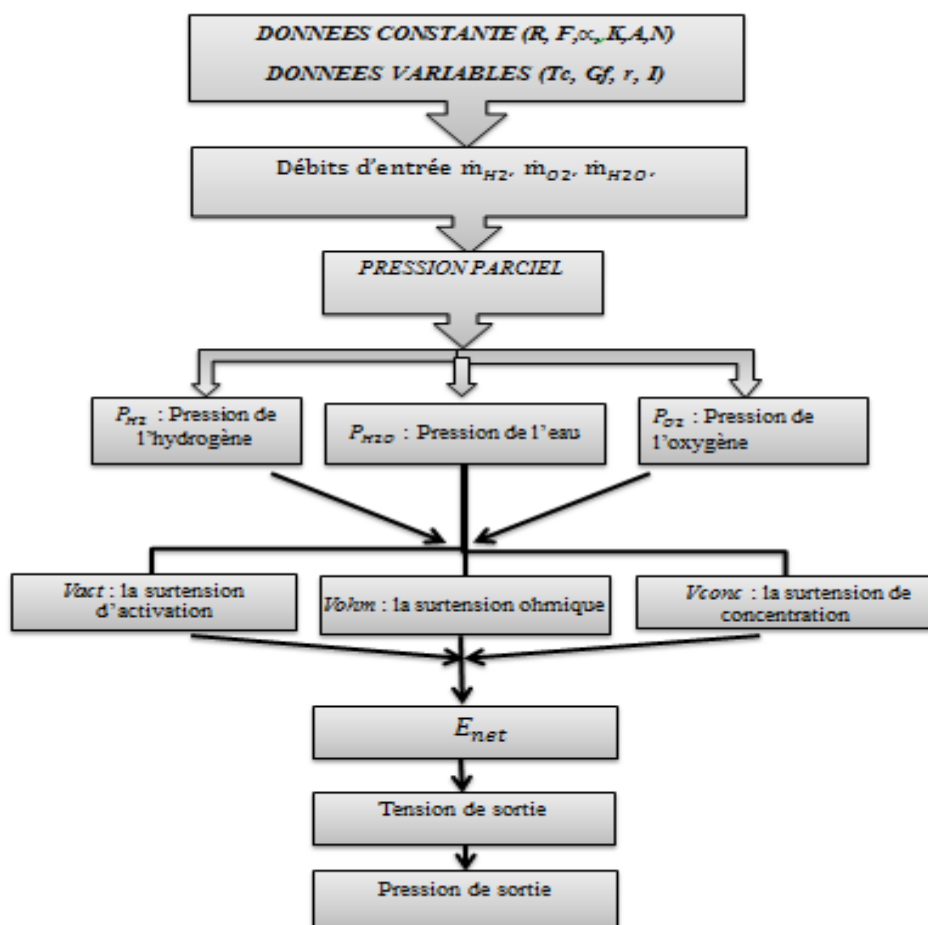


Figure II- 4: Organigramme De Modélisation De Matlab Simulink

Cet organigramme est un outil pour représenter des systèmes complexes pour découvrir le rôle de chacun des éléments et le fonctionnement d'un ensemble. Il renseigne le programme Matlab des courbes de polarisation qui résume les relations existantes entre le débit de l'hydrogène et la puissance de sortie de la pile en fonction des différents paramètres.

II.4.2. Les résultats obtenus :

a. La courbe de polarisation :

Le potentiel réel d'une pile à combustible décroît par rapport au potentiel de Nernst, à cause des pertes de potentiel dues aux phénomènes de polarisation ou surtension qui sont de trois types : la polarisation d'activation, la polarisation ohmique et la polarisation de concentration.

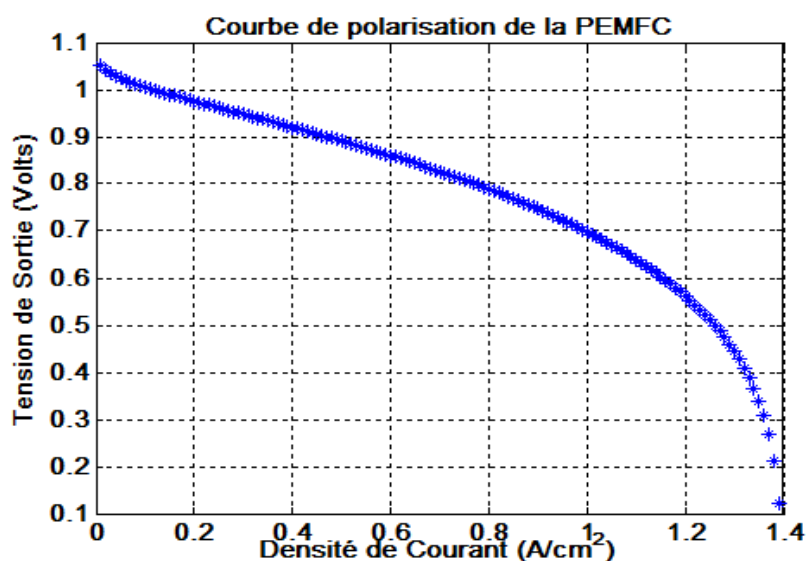


Figure II- 5: Courbe de polarisation de PEMFC

La figure II.4 représente la variation de la tension de sortie en fonction de la densité de courant (courbe de polarisation).

On remarque d'après cette courbe que les caractéristiques de la pile sont non linéaires ; à chaque fois que le courant augmente la tension diminue.

On distingue trois zones de fonctionnement sur la courbe de polarisation :

0 à 0,4 (A/cm²) environ:

La première chute de potentiel aux faibles densités de courant est due aux cinétiques de transfert de charges à l'interface électrochimique car une part d'énergie est nécessaire à l'amorçage des réactions d'oxydoréductions aux électrodes.

0,4 à 1(A/cm²) environ :

La partie linéaire traduit un comportement résistif aux densités de courant moyennes. Les principales sources de cette résistance sont attribuées au transport des protons dans la membrane, ainsi les autres éléments de l'assemblage de la cellule, diffuseurs et plaques bipolaires présentent des conductivités électroniques élevées, car ils sont généralement élaborés à partir de carbone et les chutes de potentiel sont relativement faibles.

Le transfert des protons dans la membrane dépend de la conductivité protonique.

Chapitre II Modélisation & Simulation D'une Pile A Combustible

1 à 1.4 (A/cm²) environ :

Aux fortes densités de courant, on peut observer une chute rapide du potentiel se traduisant par un courant limite. Les phénomènes responsables de cette chute de potentiel sont en général liés aux problèmes de diffusion des gaz jusqu'aux sites catalytiques. Il peut s'agir d'une alimentation insuffisante en gaz aux fortes densités de courant ou d'une gêne créée par la condensation de l'eau aux électrodes.

Cette courbe de polarisation permet de constater que la diminution des surtensions à la cathode et de la résistance de la membrane sont des points fondamentaux en vue d'une amélioration des performances.

b. La courbe de puissance :

Pour qu'une réaction électrochimique puisse se produire, les réactifs doivent dépasser une barrière d'activation. La polarisation d'activation correspond aux pertes liées à l'activation catalytique. Elle est en fonction de la nature et de la surface du catalyseur.

On remarque que la puissance d'une pile à combustible augmente progressivement pour passer par un maximum à un certain temps puis elle diminue de nouveau.

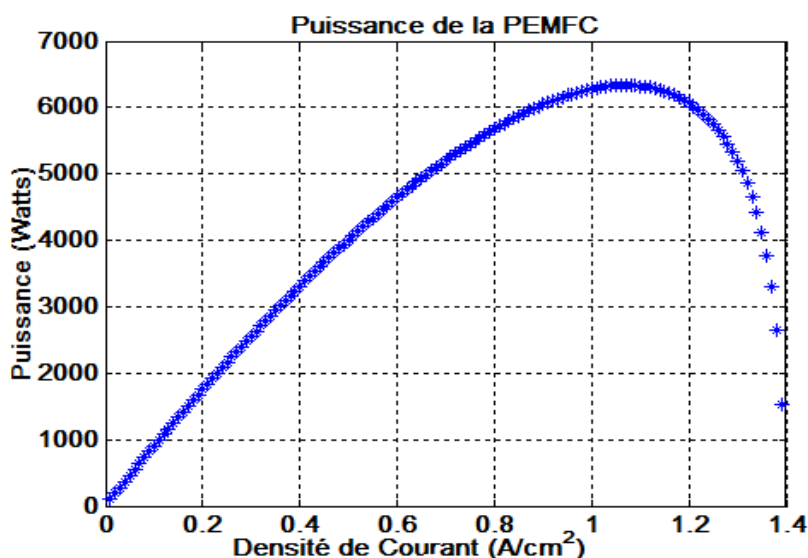


Figure II- 6: la courbe de puissance de la PEMFC

Il est indispensable de tracer la courbe de la densité de puissance en fonction de densité de courant pour connaître les capacités de pile et ses conditions de fonctionnement optimal.

Chapitre II Modélisation & Simulation D'une Pile A Combustible

La courbe obtenue est parabolique, elle croit d'une manière linéaire, puis atteint un maximum et diminue rapidement, nous pouvons expliquer ce comportement par les relations :

$$P = U \cdot I$$

Dans le tronçon le plus long où les polarisations ohmiques prédominent; nous avons :

$$U = R \cdot i \quad ; \quad P = R \cdot i^2$$

C'est l'équation d'une parabole

c. La courbe de Pertes d'activation en fonction de densité de courant :

La figure (II.6) montre que les pertes d'activation sont en variation exponentielle avec l'augmentation de la densité de courant

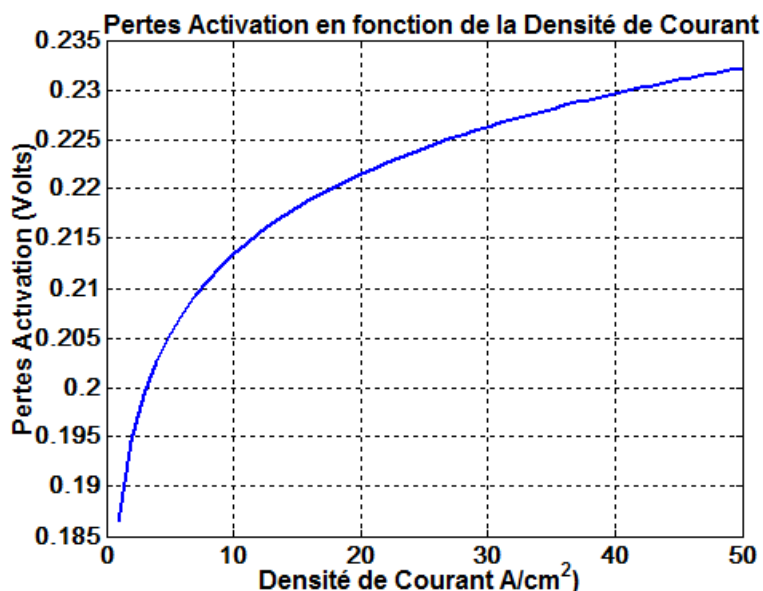


Figure II- 7: la courbe de pertes activation en fonction de la densité de courant

Dans la figure II.6, on représente l'effet de la variation de densité de courant sur les pertes d'activation, dans la cellule PEMFC à anode supportée. On remarque que les pertes varient proportionnellement avec la densité de courant.

d. La courbe de température :

La figure (II.7) montre que les pertes d'activation sont en variation linéaire avec l'augmentation de la température, ce qui signifie que l'augmentation de la température influe sur le taux de pertes d'activation.

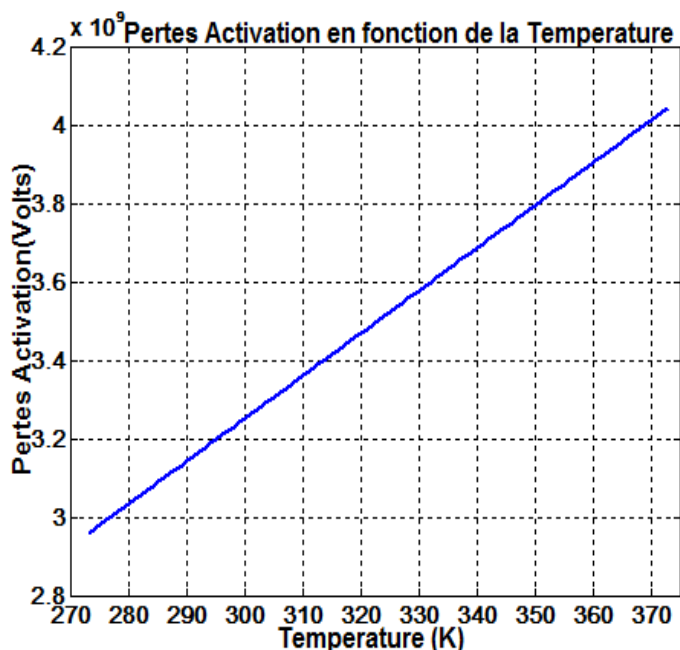


Figure II- 8: Pertes d'activation en fonction de la température.

Les pertes d'activation sont d'autres sources d'énergie thermique qui provoquent une élévation de température et prennent naissance dans les électrodes.

La température de fonctionnement provoque une augmentation des pertes d'activation et accélère la cinétique des réactions. Il faut noter que l'augmentation de la température doit être limitée car elle entraîne la déshydratation de la membrane.

CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons établi un modèle dynamique d'une pile à combustible de type PEM, en passant en revue les différentes équations mathématiques permettant une bonne compréhension des phénomènes qui se déroulent dans la pile à combustible.

Nous avons ensuite présenté un exemple de simulation de caractéristiques de la pile à combustible.

Chapitre III

ETUDE EXPERIMENTALE des CARACTERISTIQUES D'une PILE A COMBUSTIBLE PEM DE 50-W

INTRODUCTION

Les piles à combustible sont des dispositifs électrochimiques qui produisent de l'électricité à un rendement élevé et sans combustion. Elles apparaissent comme un producteur efficace de puissance dans beaucoup d'applications, y compris les véhicules électriques, les centrales électriques à petite échelle et probablement même dans les appareils électroniques.

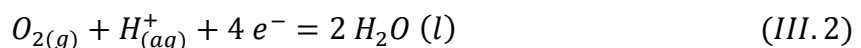
La pile à combustible échangeuse de proton (PEMFC) fonctionnant à basse température, dans laquelle une membrane de polymère conducteur de protons est utilisée comme électrolyte. Les pertes de tension d'une pile électrochimique résultent des cinétiques des réactions, de la surtension ohmique, et des limitations de transfert de masse.

La pile à combustible utilisant le dihydrogène et le dioxygène. Il s'agit d'une combustion électrochimique et contrôlée de dihydrogène et de dioxygène, avec production simultanée d'électricité, d'eau et de chaleur, selon la réaction chimique de fonctionnement de la pile (Eq.III.1)



La mise en œuvre de cette réaction d'électrode : l'anode et la cathode séparées par un électrolyte.

A la cathode, le comburant mis en jeu est le dioxygène, selon la demi-équation électronique suivante (Eq.III.2)



A l'anode, le combustible utilisé est le dihydrogène, selon la demi-équation suivante (eq.II.3)

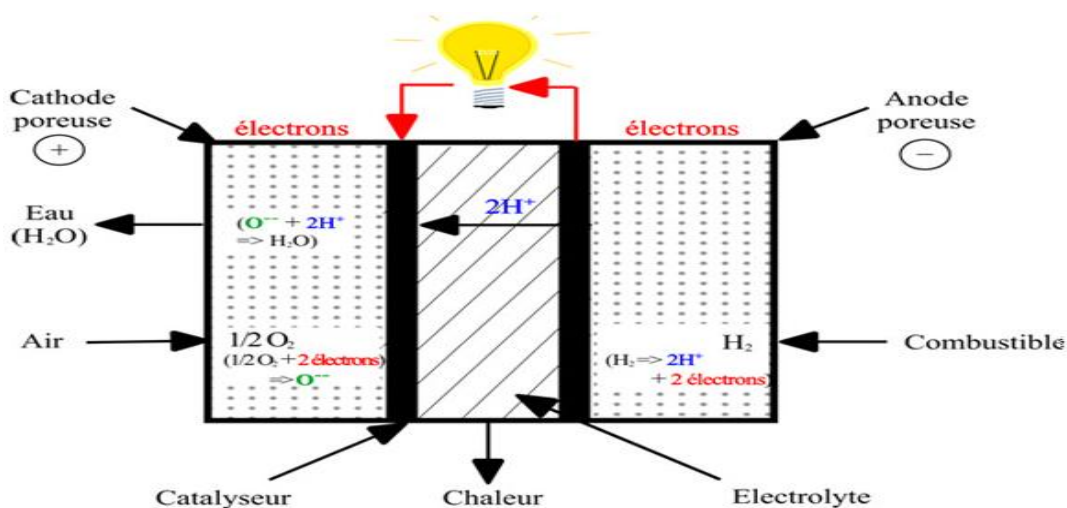


Figure III- 1: Schéma d'une pile à combustible.

Le but de cette étude expérimentale est de déterminer la courbe caractéristique d'une pile à combustible à échangeur de protons de 50 W et l'étude de l'influence de différents paramètres (température de fonctionnement, l'alimentation en air, débit de l'hydrogène...) sur les performances de cette pile à combustible.

III.1.PRESENTATION DU SYSTEME

Le banc d'essai Instructor avec un générateur d'hydrogène, permet la production d'hydrogène, son stockage et sa conversion, il est représenté schématiquement en Figure III.2.

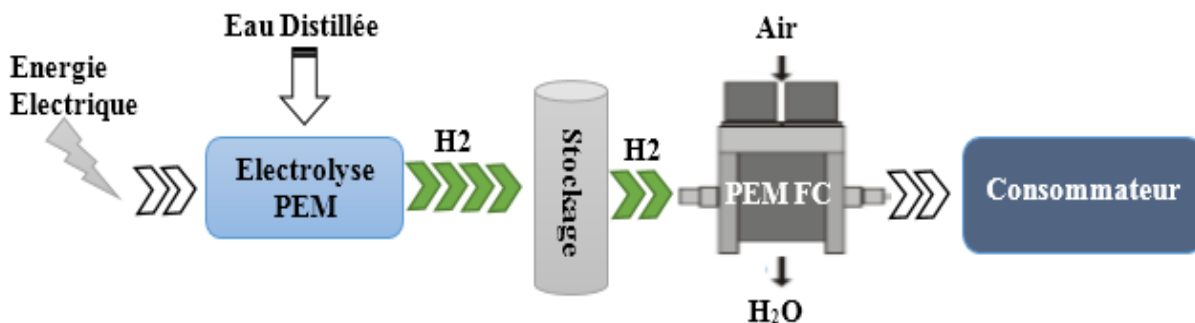


Figure III- 2:Schéma synoptique du banc d'essai Instructor.

III.2.COMPOSITION DU SYSTEME

Il est composé principalement de quatre modules (figure III.3) :

- Pile à combustible.
- Générateur d'hydrogène.
- Système de stockage.
- Charge (consommation).

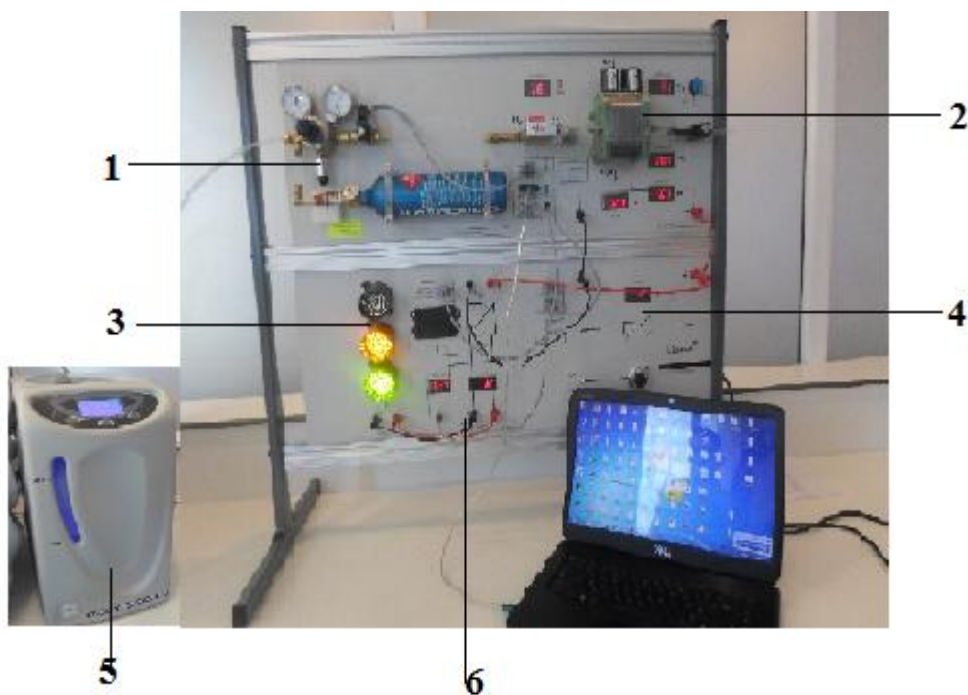


Figure III- 3: composants du système Instructor.

1. Réservoir à hydrogène
2. pile à combustible
3. feu de circulation (charge)
4. la charge électrique
5. générateur d'hydrogène
6. convertisseur DC/DC

Les caractéristiques de chaque module sont données dans le tableau (III.1)

Pile à combustible	
Puissance nominale	40 W (8A, 5V)
Tension à circuit ouvert	9V
Courant maximal	10A
Pression nominale de l'hydrogène	0.6 ± 0.1 bar
Générateur d'Hydrogène	
Débit d'hydrogène	0 à 500 cm ³ /mn
Pression	1.4 – 11 bar.
Consommation électrique	300 VA
Stockage	
Spécification de l'hydrogène	Pur à 5.0 ou plus.
Capacité de stockage	150 si la charge est à 10 bars
Décharge	8bar g à 20°C (50°C max)
Charge	10 bars à 20°C
Température admise.	15 à 30 °C

Tableau 2-: caractéristiques des modules de la pile à combustible.

III.3 ETUDE DES CARACTERISTIQUES DE LA PILE A COMBUSTIBLE

Dans ce qui suit, nous allons étudier les différentes caractéristiques de la pile à combustible à savoir :

- Caractéristique courant-tension et courbe de puissance.
- Influence de la température et l'apport en air sur la puissance.
- Caractéristique hydrogène-courant.
- Rendement de la pile à combustible.
- Courbe tension-courant

- Courbe tension -courant

Les différentes mesures de la tension de la pile à combustible pour une variation de courant permis de calculer la puissance de cette dernière, les résultats obtenus sont représentés en Figures (III.4) et (III.5).

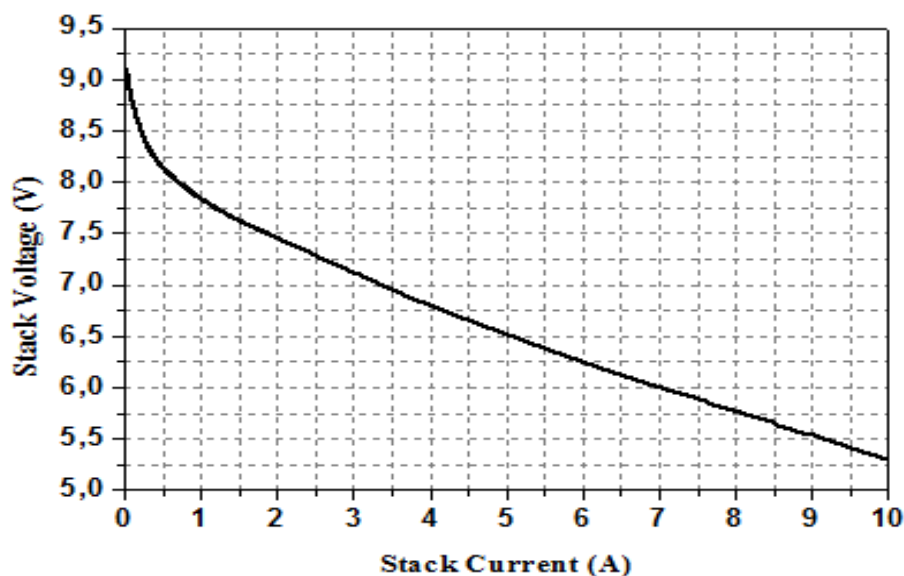


Figure III- 4: variation de la tension en fonction de courant.

La courbe de tension-courant présente une relation exponentielle entre 0 A et 2 A, au-delà de 2 A cette relation devient linéaire.

Pour un courant de charge faible, la tension décroît exponentiellement avec le courant ascendant, ce processus exponentiel est caractéristique de tous les processus électrochimiques.

- La courbe Puissance-Courant

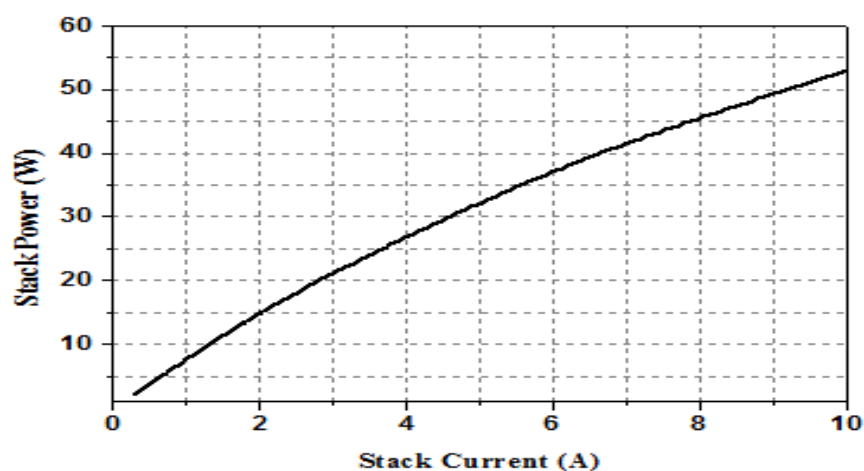


Figure III- 5: variation de la puissance en fonction de courant.

La figure (III.5), représente la courbe de puissance de la pile à combustible, pour un courant maximal de 10A, la pile à combustible produit environ 50W (puissance maximale). Si on fait une extrapolation des caractéristiques des courants plus importants (au-delà de 10 A), nous remarquons que la puissance maximale de la pile à combustible se situe en dehors de la plage examinée. La chose qui ne peut être pas déterminée expérimentalement par ce matériel.

- **Effet de température**

La variation de la tension et la puissance de la pile à combustible pour deux différentes températures 28 °C, 44 °C respectivement est illustrée en Figure III.6.

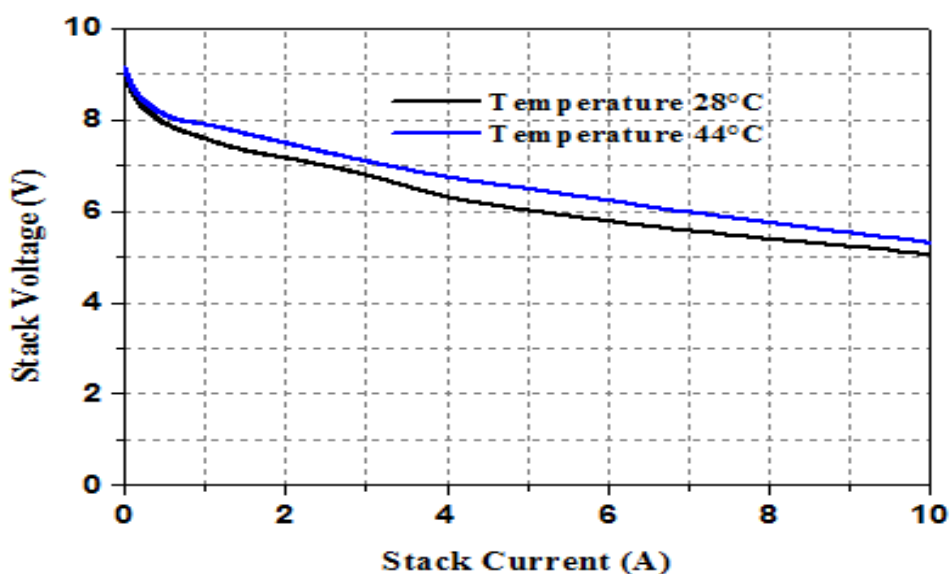


Figure III- 6: Effet de la température sur la tension de la PEM.

Sur la Figure (III.6), les caractéristiques de la pile à combustible pour deux températures différentes sont représentées. La réaction chimique qui se produit dans la pile à combustible est soumise à un procédé catalytique, qui est toujours accéléré par des températures élevées, par lequel aussi la réaction totale peut survenir plus rapidement. La convergence des deux courbes caractéristiques pour des charges élevées peut être expliquée par la conduction ionique de la membrane et la conduction d'électrons des plaques bipolaires. Dans la gamme linéaire (résistance ohmique) les caractéristiques sont approximativement parallèles, mais une convergence progressive se produit à une tension supérieure à 7 A.

La résistance ohmique augmente par l'augmentation de la température qui à son tour provoque le phénomène d'assèchement de la membrane, la chose qui diminue la conductivité ionique.

Une autre raison de la convergence est la résistance croissante des plaques bipolaires avec élévation de la température.

- **Effets de l'alimentation en air**

La figure (III.7) illustre le comportement de la pile à combustible pour une concentration appropriée et celle réduite en air. Dans ce cas-là, on distingue trois zones différentes :

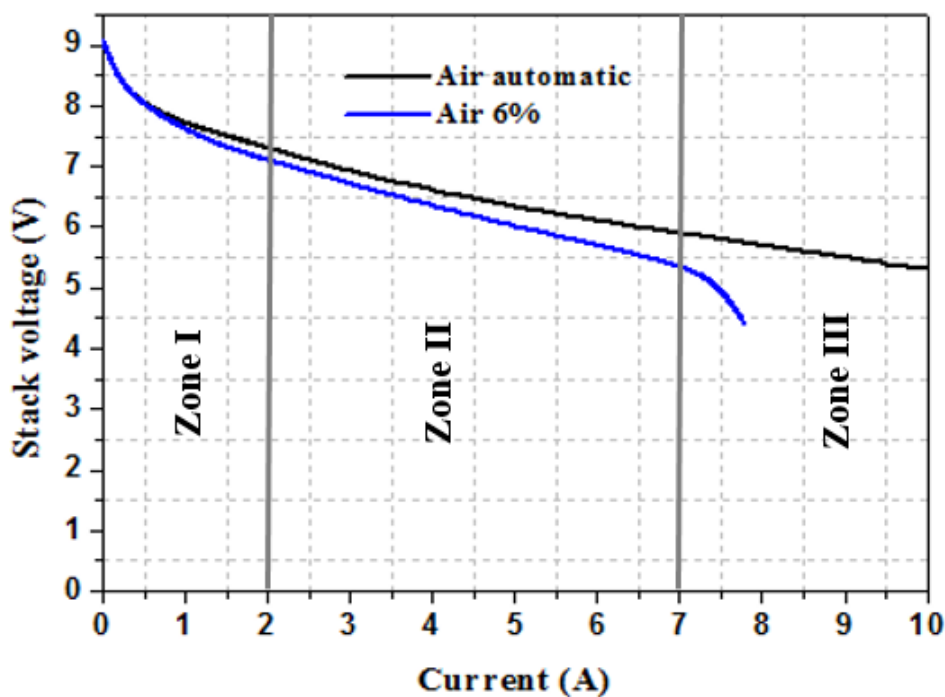


Figure III- 7: Effet de l'alimentation en Air.

Zone I : Courant variable de 0 à 2 A :

La variation de tension en fonction de courant est exponentielle, en raison des effets catalytiques dans les électrodes. Dans ce cas-là, les courbes sont à peu près superposées pour le contrôle automatique de ventilateur ou le cas de la réduction de l'offre de l'air (6%).

La fonction principale de la pile à combustible dépend des puissances électrique et thermique obtenues à partir de la réaction exothermique de l'hydrogène et de l'oxygène, si l'un de ces réactifs est insuffisant, la réaction est partielle ou totalement annulée.

Zone II : Courant variable de 2 à 7 A :

Dans cette zone la variation de tension en fonction de courant est linéaire pour le cas d'une alimentation en air réduite (6%), la concentration en oxygène diminue dans la cathode en fonction de la charge. Si le courant de charge est constant, une diminution aura lieu dans la tension de la pile à combustible, en fonction de la résistance électrique de cette dernière.

Dans cet intervalle, avec la diminution de la quantité d'air fournie, une augmentation de la température aura lieu, ce qui provoque le phénomène de séchage de la membrane, ce qui conduit à une conductivité ionique plus faible et une chute de tension.

Zone III : Courant > à 7 A :

Une quantité d'oxygène importante est nécessaire à travers la couche de diffusion de gaz à cause de courant de charge élevé. La limitation de la quantité d'air dans la cathode (faible concentration en oxygène), implique une faible diffusion dans cette zone, la pile à combustible se déconnecte automatiquement grâce à un dispositif automatique lorsque la tension diminue au-delà de 5 V.

- **Courbe Débit H₂-courant**

La figure (III.8), montre que le débit de l'hydrogène est proportionnellement variable avec le courant, nous remarquons qu'une quantité de l'hydrogène se produit malgré le fonctionnement sans charge, ce qui est dû à la différence de pression entre les côtés d'hydrogène et de l'oxygène.

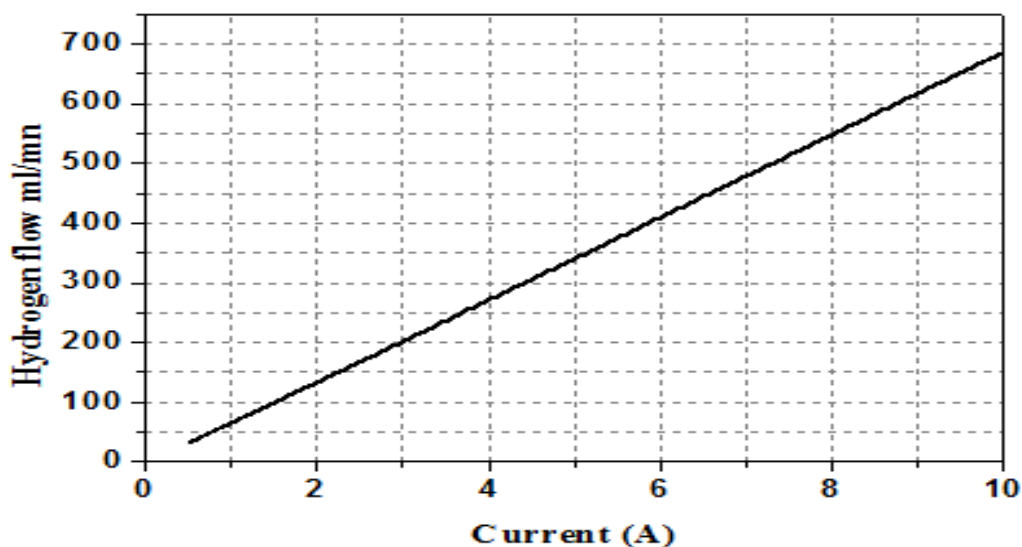


Figure III- 8: Variation du débit en fonction du courant.

- **Rendement de la pile à combustible**

Cette partie est réservée à la détermination du rendement de la pile à combustible par deux méthodes :

Calculer l'efficacité en utilisant l'enthalpie libre de réaction, et le pouvoir calorifique inférieur PCI de l'hydrogène.

Calcul de rendement en tenant compte de rendement de tension et de courant.

1^{ère} Méthode :

Cette méthode consiste à déterminer le rendement de la pile à combustible en basant sur la puissance produite P_{out} et celle fournie P_{in} .

La puissance de sortie P_{out} est le produit de la tension et le courant de la pile à combustible, elle est donnée par :

$$P_{out} = V_{stack} * I_{stack} \quad (III.4)$$

La puissance d'entrée P_{in} est le produit du pouvoir calorifique inférieur et le débit molaire de l'hydrogène, elle est donnée comme suit :

$$P_{in} = PCI * \dot{V}_{H2} \quad (III.5)$$

Le rendement de la pile à combustible représente le rapport entre la puissance produite et celle fournie, elle est donnée par :

$$\eta_{stack} = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{V_{stack} * I_{stack}}{PCI * \dot{V}_{H2}} \quad (III.6)$$

Avec : $PCI=10.8 \text{ MJ/m}^3$.

2^e Méthode :

Consiste à calculer le rendement de la pile à combustible, qui est le produit de rendement de tension (η_v) et le rendement de courant (η_I .)

Le rendement de courant peut être calculé comme suit :

$$\eta_I = \frac{I_{stack}}{I_{th}} \quad (III.7)$$

Le courant théorique est donné par :

$$I_{th} = \frac{\dot{V}_{H2} * F * z}{V_m * a} \quad (III.8)$$

Avec :

V_m : volume molaire aux conditions standards, égal à 22.4 l/mol.

a : nombre de cellules de la pile à combustible (dans notre cas $a=10$).

F : constante de Faraday, 96480 C/mol.

$z = 2$ pour l'hydrogène.

Le rendement de tension est déterminé par :

$$\eta_V = \frac{V_{stack}}{V_{rev_{PCI}} * a} \quad (III.9)$$

Avec $V_{rev_{PCI}}$ est La tension thermodynamique réversible liée à la valeur de pouvoir calorifique inférieur de l'hydrogène, environ 1.254 V.

Le rendement de la pile à combustible peut être calculé par :

$$\eta_{stack} = \eta_V * \eta_I \quad (III.10)$$

Les résultats de calcul du rendement de la pile à combustible par les deux méthodes sont illustrés en tableau suivant :

Mesures			1 ^{re} Méthode			2 ^e Méthode		
I _{Stack} (A)	V _{Stack} (V)	Q ml/mn	P _{out} (W)	P _{in} (W)	η _{stack}	η _v	η _I	η _{stack}
0	9,2	5	0,00	54,00	0,000	0,734	0,00	0,000
0,21	8,46	12	1,78	129,60	0,823	0,675	1,22	0,822
0,49	8,11	31	3,97	334,80	0,712	0,647	1,10	0,712
1,01	7,8	64	7,88	691,20	0,684	0,622	1,10	0,684
1,49	7,6	99	11,32	1069,20	0,635	0,606	1,05	0,635
2,01	7,41	134	14,89	1447,20	0,618	0,591	1,04	0,617
2,48	7,21	166	17,88	1792,80	0,598	0,575	1,04	0,598
3	7,04	200	21,12	2160,00	0,587	0,561	1,04	0,587
4,02	6,7	269	26,93	2905,20	0,556	0,534	1,04	0,556
4,98	6,41	335	31,92	3618,00	0,529	0,511	1,04	0,529
6,02	6,12	405	36,84	4374,00	0,505	0,488	1,04	0,505
7,02	5,85	473	41,07	5108,40	0,482	0,467	1,03	0,482
8,02	5,65	542	45,31	5853,60	0,464	0,451	1,03	0,464
9,02	5,45	610	49,16	6588,00	0,448	0,435	1,03	0,448
10,03	5,24	680	52,56	7344,00	0,429	0,418	1,03	0,429

Tableau 3: Calcul de rendement du la pile à combustible.

On remarque que les résultats obtenus sont identiques pour les deux différentes méthodes.

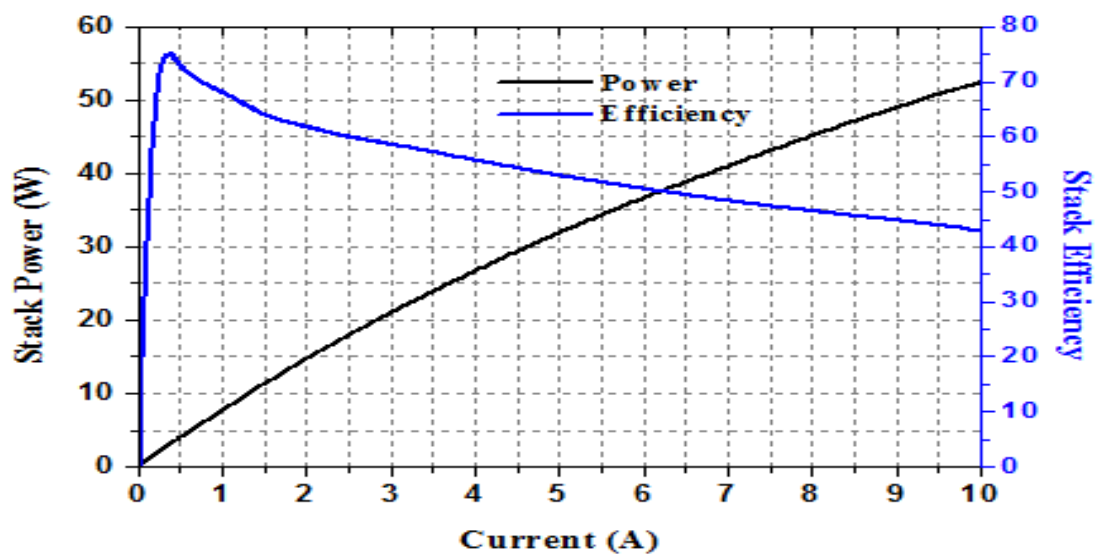


Figure III- 9: Puissance et rendement de la pile à combustible.

La figure (III.9), montre que le rendement optimal de la pile à combustible est atteint pour les faibles courants. Cependant, la puissance optimale est enregistrée pour des courants élevés.

Dans la conception des piles à combustible, il est nécessaire de choisir entre un rendement maximum ou la puissance maximale.

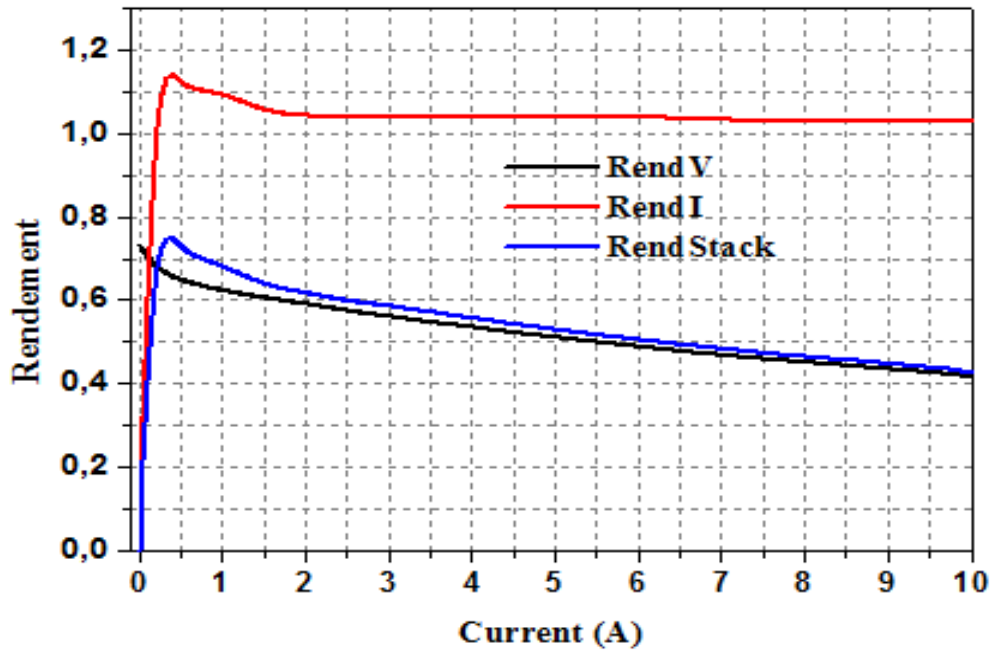


Figure III- 10: Les différents rendements de la pile à combustible.

Le rendement de courant est en croissance continue, jusqu'à la valeur limite de 1, par contre l'efficacité de tension décroît, puis se stabilise avec l'augmentation du courant.

Comme l'efficacité de la pile représente le produit du rendement de tension et du courant, donc pour des courants importants, cette efficacité est déterminée par l'efficacité de tension. Cependant, pour des courants faibles, cette efficacité est déterminée par le rendement de courant.

III.4.COMPARAISON ENTRE L'ETUDE DE SIMULATON ET L'ETUDE EXPERIMENTALE D'UNE PILE A COMBUSTIBLE DE TYPE PEM

On ne peut pas valider les résultats des deux études de comparaison car on n'a pas utilisé les mêmes conditions et aussi le type de pile PEM aussi diffère, mais on peut comparer juste l'allure des courbes comme la courbe de polarisation selon la figure III-11

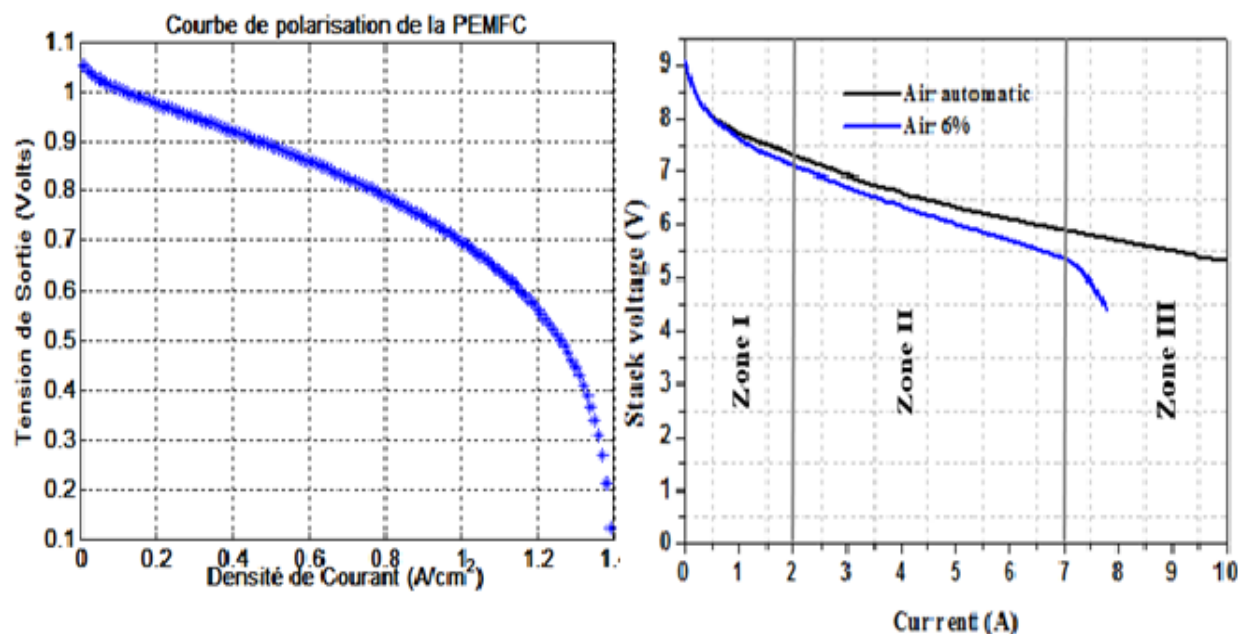


Figure III- 11: comparaison entre les courbes

On constate que les courbes obtenues par simulation sont semblables à la courbe de la pile unitaire obtenue expérimentalement de la littérature, et permettent le découpage des courbes de performance en trois zones.

Les résultats sont présentés sous forme de courbes et sous formes de tableaux numériques. On peut rencontrer différents types de variations parmi lesquelles la variation linéaire et la variation exponentielle. Cette variation peut être une croissance ou une décroissance.

On remarque que les courbes théoriques sont plus précises que les courbes obtenues expérimentalement, on constate que les caractéristiques du matériel ont des pertes de polarisation qui sont dues à l'influence des facteurs environnementaux (air, température...) ce qui traduit l'écart entre les courbes théoriques et expérimentales.

CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons fait appel au banc d'essai Instructor, pour une étude expérimentale de l'influence de certains paramètres (le débit de l'hydrogène, la température, l'air...) sur l'efficacité d'une pile à combustible de type PEM de 50 W.

CONCLUSION GENERALE

Même si la technologie des piles à combustible est apparue au dix-huitième siècle, mais ses intérêts technico-économiques ce sont révélés qu'au début des années soixante-dix. Sachant que pouvoir connaître les caractéristiques de fonctionnement dynamique ainsi que l'influence des conditions opératoires, constituent une base de données, qui est un champ de recherche pour un scientifique. Donc le travail expérimental est la clef qui nous permettra de résoudre tous les problèmes, ou du moins faire une approche de résolution en se basant sur la théorie établie auparavant.

Dans cette étude, nous avons effectué plusieurs manipulations afin de mieux comprendre le fonctionnement des piles PEMFC. En manipulant ces piles, nous avons remarqué que cette technologie est très simple, mais elle est, en même temps, délicate à l'utilisation parce que plusieurs phénomènes contribuent au bon fonctionnement de cette dernière. Notre choix de commencer notre étude par une pile unitaire avant d'entamer l'assemblage nous a été essentiellement bénéfique, ceci nous a permis de mieux comprendre les processus électrochimiques et dynamiques à l'intérieur d'une seule pile et donc de conclure que :

L'architecture de la pile, l'humidification de la membrane ainsi que les conditions opératoires jouent un rôle prépondérant qui influence les performances de cette dernière .nous avons constaté que l'humidification adéquate de la membrane ainsi qu'une température, pression et concentration des gaz réactifs appropriés sont les conditions qui adhèrent au bon fonctionnement de la pile et que tous ces paramètres doivent être optimaux pour obtenir des bonnes performances. L'augmentation de la température est indispensable pour augmenter les performances, mais en même temps elle dessèche la membrane et si nous l'humidifions trop elle s'inonde et réduit les performances. Alors que si nous augmentons la pression , nous obtenons de meilleur transfert de matière qui se traduit par une réduction des polarisations d'activation et de concentration , cela surtout à des fortes densités de courant, mais si elle dépasse un certain seuil elle peut perforer la membrane, c'est pour cela qu'il est indisponible de trouver le meilleur compromis entre ses facteurs pour augmenter la conductivité de la membrane et avoir un bon aménagement des fluides et de la chaleur à l'intérieur de la pile .

Avec ces manipulations, nous avons constitué une base de données expérimentale pour la modélisation.

REFERENCES

- [1]. **Z.ZHANG (2010)** : *Modélisation mécanique des interfaces multi-contacts dans une pile à combustible*, thèse de doctorat, Université d'Evry-Val d'Essonne.
- [2]. **B.WAHDAME (2006)** : *Analyse et optimisation du fonctionnement de piles à Combustible par la méthode des plans d'expériences*, thèse de doctorat, Université de technologie de Belfort Montbéliard et de l'Université de France -Comte.
- [3]. **S. BELKACEM BOUZIDA (2011)** : *Etude des phénomènes des écoulements des gaz dans les canaux dans une pile a combustible de type PEMFC*, thèse de magistère, Université El Hadj Lakhdar, Batna.
- [4]. **M.RADULESCU(2006)**:*Systèmes de cogénération d'électricité et de chaleur avec piles à combustible de type PEMFC ou SOFC et vapore formage externe*, thèse de doctorat ; l'Université Henri Poincaré, Nancy 1.
- [5]. **E. AGLZIM (2009)** : *Caractérisation Par Spectroscopie d'impédance De l'impédance Complexe d'une Pile A Combustible En Charge – Evaluation De l'influence De l'humidité –*, thèse de doctorat, Université Henri Poincaré – Nancy1.
- [6].**W.MABROUK(2012)** : *Synthèse et caractérisation de nouvelles membranes protoniques. Applications en pile à combustible à membrane échangeuse de protons*, thèse de doctorat, Faculté des Sciences de Tunis.
- [7]. **E.FRAPPÉ (2012)** : *Architecture de convertisseur statique tolérante aux pannes pour générateur pile à combustible modulaire de puissance-traction 30kW*, thèse de doctorat, Université Paris-Sud.
- [8]. **Y.ABDERRAHIM et R.BELBACHIR (2014)** : *Contribution à l'étude des phénomènes ayant lieu dans le catalyseur d'une pile à combustible de type PEMFC*, thèse de master, Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen.
- [9].**N.MEDDOUR (2010)** : *simulation numérique du transfert thermique incluant le mode de rayonnement dans une pile à combustible à oxyde solide*, thèse de magistère, Université Kasdi Merbah Ouargla.
- [10].**F.BREQUE(2008)** : *modélisation du transport de masse dans une pile à combustible de type pem et étude de l'humidification interne de la pile*, thèse de doctorat, l'Université du Québec A Trois-Rivières.
- [11].**A.BRANGER ,M.RICHER et S.ROUSTEL (2007)** :*Livre de Microbiochimie et alimentation* , Editeur scientifique, Dijon : Educagri éd., impr. 2007, cop. 2007.

- [12]. **DANA-MARIA PACLISAN(2013)** : *optimisation par la modélisation de l'expérimentation vibratoire des systèmes pile a combustible pour le transport terrestre*, thèse de doctorat, Université de technologie de Belfort-Montbéliard.
- [13]. **H.MAHCENE(2012)** : *Etude des causes d'augmentation de la température dans une pile à oxyde solide (SOFC): Etude bidimensionnelle du champ de température*, thèse de doctorat, Université Kasdi Merbah Ouargla.
- [14]. **A.HADDAD(2009)** : *Modélisation dynamique non linéaire de la pile à combustible du type PEM : Application à la régulation de l'humidité dans la membrane électrolytique*, thèse de doctorat, Université De Technologie De Belfort-Montbéliard.
- [15]. **EL-HASSANE AGLZIM (2009)** : *Caractérisation Par Spectroscopie d'impédance De l'impédance Complexe d'une Pile A Combustible En Charge – Evaluation De l'influence De l'humidité –*, thèse de doctorat, Université Henri Poincaré – Nancy1.
- [16].**T.AKIKI (2011)** : *Modélisation de la dégradation de la production de puissance d'une PAC suite aux sollicitations mécaniques*, thèse de doctorat, Université De Technologie De Belfort-Montbéliard.
- [17].**G.FONTES(2005)** : *Modélisation et caractérisation de la pile PEM pour l'étude des interactions avec les convertisseurs statiques*, thèse de doctorat, Institut National Polytechnique De Toulouse.
- [18].**Y.ABDERRAHIM et R.BELBACHIR (2014)** : *Contribution à l'étude des phénomènes ayant lieu dans le catalyseur d'une pile à combustible de type PEMFC*, thèse de master, Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen.
- [19]. **H.BEKKOUCHE(2014)** : *Etude numérique des phénomènes de transferts de chaleur et de masse dans une pile a combustible de type PEMFC*, thèse de magistère, Université Constantine 1.
- [20]. **P.THOUNTHONG(2005)** : *conception d'une source hybride utilisant une pile a combustible et des supercondensateurs*, thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine.
- [21].**M. BELATEL *, F.Z. AISSOUS et F. FERHAT(2012)** : *Contribution à l'étude d'une pile à combustible de type PEMFC utilisée pour la production d'énergie électrique verte*, Revue des Energies Renouvelables Vol. 15 N°1 (2012) 13 – 28.
- [22]. **Y.CHATILLON(2013)**: *Méthodes électrochimiques pour la caractérisation des piles à combustible de type PEM en empilement*, thèse de doctorat, Université De Lorraine.

[23]. **J.RAMOUSSE (2005)** : *Transferts couples masse-charge-chaueur dans une cellule de pile a combustible a membrane polymère*, thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine.

[24]. **J. LACHAIZE(2004)**: *Etude des stratégies et des structures de commande pour le pilotage des systèmes énergétiques à Pile à Combustible (PAC) destinés à la traction*, thèse de doctorat, Institut National Polytechnique De Toulouse.

[25].**M.HAMOUR(2012)** : *Contribution A L'étude Des Contraintes Thermodynamique Dans Les Piles A Combustible*, thèse de doctorat, Université mouloud Mammeri-Tizi-Ouzou.

[26].**D.NGUYEN(2010)** : *Modélisation Dynamique Du « Cœur » De Pile A Combustible De Type PEM*, thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de lorraine.

[27].**F.AMROUCHE(2004)** : *Caractérisation Expérimentale D'un Assemblage Stacks De Piles A Combustibles A Membrane Echangeuse De Protons*, thèse d'ingénieur d'état, Université des sciences et de la technologie Houari Boumediene.

[28]. **I.SADLI (2006)** : *Modélisation Par Impédance D'une Pile A Combustible PEM Pour Utilisation En Electronique De Puissance*, thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de lorraine.

[29].**T.AZIB(2010)**: *Contribution à l'Etude d'Electro-générateurs à Pile à Combustible*, thèse de doctorat, Université Paris-Sud Xi.

[30].**M.ZANDI (2010)** : *contribution au pilotage des sources hybrides d'énergie électrique*, thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de lorraine.

[31]. **T.HAMAZ(2014)** : *Outils de caractérisation et de diagnostic D'une pile à combustible de type PEM par mesure du champ électromagnétique externe*, thèse de doctorat, Université de Grenoble.

[32]. **C.DALET(2009)** : *Gestion de l'eau dans un système Pile à Combustible pour traction automobile : transferts couplés dans un humidificateur membranaire*, thèse de doctorat, Université Henri Poincaré.

[33].**E. FRAPPÉ (2012)** : *Architecture de convertisseur statique tolérant aux pannes pour générateur pile à combustible modulaire de puissance-traction 30kW*, thèse de doctorat, Université Paris-Sud.

[34]. **S.RABIH(2008)** : *Contribution à la modélisation de systèmes réversibles de types électrolyseur et pile à hydrogène en vue de leur couplage aux générateurs photovoltaïques*, thèse de doctorat, Université De Toulouse.

[35] : **F.MEZIANE (2011)** : *Etude et dimensionnement d'un système éolien –électrolyseur – pile à combustible pour l'alimentation électrique*, thèse de magistère, Université M'Hamed BOUGARA, Boumerdes.

[36]: **M.T. Iqbal,(2003)**: “*Modeling and control of a wind fuel cell hybrid energy system*, Renewable Energy, vol. 28, n° 2, pp. 223-237.

[37].**J. H. Lee, T. R. Lalk et A. J. Appleby (1998)**: “*Modeling electrochemical performance in large scale proton exchange membrane fuel cell stacks*,” Journal of Power Sources, vol. 70, n° 2, pp. 258-268.

[38]: **Gemmen RS (2001)**:*.Analysis for the effect of inverter ripple current on fuel cell operating conditions*. ASME International Mechanical Engineering Congress and Expositions, New York.

[39]:**M.Uzunoglu, M.S. Alam(2007)**, « *Dynamic modeling, design and simulation of a PEM fuel cell/ultra-capacitor hybrid system for vehicular applications.*”. Journal Energy conversion and Management.

[40]: **Amphlett JC, Baumert RM, Mann RF, Peppley BA, Roberge PR, Harries TJ(1995)**: *Performance modeling of the Ballard mark-IV solid polymer electrolyte fuel cell*. Journal of the Electrochemical Society

[41]: **M.W Fowler, R.F. Mann, J.C Amphlett, B.A. Peppley and P.R. Roberge (2002)**:*‘Incorporation of Voltage Degradation into a Generalised Steady State Electrochemical Model for a PEM Fuel Cell’*, Journal of Power Sources.

[42]:**J.M. Corrêa, F.A. Farret and L.N. Canna, (2001)**: ‘*An Analysis of the Dynamic Performance of Proton Exchange Membrane Fuel Cells Using an Electromechanical Model*’, in Proc. IEEE IECON'01, pp. 141 – 146.

Annexes

Programme 1:

```
% EXAMPLE 3-2: Using the Activation Overpotential Equation

% UnitSystem SI

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Inputs

R = 8.314; % Ideal gas constant (J/molK)

F = 96487; % Faraday's constant

Alpha = 0.5; % Transfer coefficient

io = 10^-6.912; % Exchange current density

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Part a: Constant Current Density of 0.7 A with a temperature
range from

i = 0.7; % Current

T = 273:373; % Temperature

%b=R*T/Alpha*F;

b = R.*T./(2.*Alpha.*F);

% Activation Losses

B = R.*T./(2.*Alpha.*F);

V_act = b.*log10(i./io); % Tafel equation

figure1 = figure('Color',[1 1 1]);

hdlp = plot(T,V_act);

title('Pertes Activation en fonction de
Temperature','FontSize',12,'FontWeight','Bold')

xlabel('Temperature (K)','FontSize',12,'FontWeight','Bold');

ylabel('Pertes Activation(Volts)','FontSize',12,'FontWeight','Bold');

set(hdlp,'LineWidth',1.5);

grid on;

% Part b: Constant temperature of 300 K with a current density
```

```

range from
% 0-1 A
i2 = 1:1:50; % range of current
T2 = 313; % Temperature
% Activation Losses
b2 = R.*T2./(2.*Alpha.*F);
V_act2 = b2.*log10(i2./io); % Tafel equation
figure2 = figure('Color',[1 1 1]);
hdlp = plot(i2,V_act2);
title('Pertes Activation en fonction de la Densité de
Courant','FontSize',12,'FontWeight','Bold')
xlabel('Densité de Courant A/cm^2'),'FontSize',12,'FontWeight','Bold');
ylabel('Pertes Activation (Volts)','FontSize',12,'FontWeight','Bold');
set(hdlp,'LineWidth',1.5);
grid on;

```

Programme 2:

```

R = 8.314; % Ideal gas constant (J/molK)
F = 96487; % constante de Faraday
Tc = 80; % Temperature in degrees C
P_H2 = 3; % Hydrogen pressure in atm
P_air = 3; % Air pressure in atm
A_cell=100; % Area of cell
N_cells=10; % Number of Cells
r = 0.19; % Internal Resistance (Ohm-cm^2)
Alpha = 0.5; % Transfer coefficient
Alpha1 = 0.085; % Amplification constant
io = 10^-6.912; % Exchange Current Density (A/cm^2)
il = 1.4; % Limiting current density (A/cm2)
Gf_liq = -228170; % Gibbs function in liquid form (J/mol)
k = 1.1; % Constant k used in mass transport

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Convert degrees C to K
Tk = Tc + 273.15;

% Create loop for current
loop = 1;
i = 0;
for N = 0:150
i = i + 0.01;

% Calculation of Partial Pressures
% Calculation of saturation pressure of water
x=-2.1794+0.02953.*Tc-9.1837.*(10.^-5).*(Tc.^2)+1.4454.*(10.^-7).*(Tc.^3);
P_H2O=(10.^x)

% Calculation of partial pressure of hydrogen
pp_H2 = 0.5.*((P_H2)./(exp(1.653.*i./(Tk.^1.334))))-P_H2O)

% Calculation of partial pressure of oxygen
pp_O2 = (P_air./exp(4.192.*i/(Tk.^1.334)))-P_H2O

% Activation Losses
b = R.*Tk./(2.*Alpha.*F);
V_act = -b.*log10(i./io); % Tafel equation

% Ohmic Losses
V_ohmic = -(i.*r);

% Mass Transport Losses
term = (1-(i./il));

if term > 0
V_conc = Alpha1.*(i.^k).*log(1-(i./il));
else
V_conc = 0;
end

% Calculation of Nernst voltage
E_nernst=-Gf_liq./(2.*F)-
((R.*Tk).*log(P_H2O./(pp_H2.*(pp_O2.^0.5))))/(2.*F)

```

```

% Calculation of output voltage
V_out = E_ernst + V_ohmic + V_act + V_conc;
if term < 0
V_conc = 0;
break
end
if V_out < 0
V_out = 0;
break
end

figure(1)
title('Courbe de polarisation de la PEMFC')
xlabel('Densité de Courant (A/cm^2)');
ylabel('Tension de Sortie (Volts)');
plot(i,V_out,'*')
grid on
hold on
disp(V_out)

% Calculation of power
P_out = N_cells.*V_out.*i.*A_cell;
figure(2)
title('Puissance de la PEMFC')
xlabel('Densité de Courant (A/cm^2)');
ylabel('Puissance (Watts)');
plot(i,P_out,'*');
grid on
hold on
disp(P_out);
end

```

Résumé

La pile à combustible (PAC) est connue depuis longtemps comme un convertisseur d'hydrogène en énergie (électrique + thermique) possédant de très bons rendements, les recherches sur cette technologie se développent partout dans le monde de manière considérable. Les raisons sont bien connues: la réponse aux contraintes environnementales, aux problèmes posés par la production centralisée d'électricité, la nécessité d'avoir des alternatives énergétiques et certaines exigences technologiques spécifiques telles que les différentes applications. Il est certain que nous assisterons dans les prochaines décennies à l'émergence de la filière hydrogène dans notre vie quotidienne comme vecteur énergétique. Le choix de la technologie des piles à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) est implicite vu les performances intéressantes (faible poids, robuste, électrolyte solide, démarrage rapide, etc.). Il est donc important de pousser encore plus loin les efforts de recherche/développement autour de cette technologie pour pouvoir la maîtriser et étendre son application. Ce mémoire présente les résultats de la modélisation de l'électrochimie et la production électrique des piles à combustible PEMFC alimentée directement en gaz pur (hydrogène et oxygène) et la validation expérimentale grâce à une base de données établie au niveau du "Laboratoire d'Hydrogène en Réseau – CDER", dans le but d'exploiter et d'améliorer les modèles électrochimiques existants.

Mots clés: Pile à combustible - PEMFC - électricité - modélisation de l'électrochimie-expérimentale

Abstract:

The fuel cell (PAC) has long been known as an energy hydrogen converter (electric + thermal) with very good yields, research on this technology develop over the world considerably. The reasons are well known: the answer to environmental constraints, the problems caused by centralized electricity production, the need for energy alternatives and specific technological requirements such as different applications. It is certain that we will see in the coming decades with the emergence of hydrogen technology in our daily life as an energy carrier. The choice of technology for fuel cell proton exchange membrane (PEMFC) is implied saw interesting performances (low weight, robust, solid electrolyte, quick start, etc.). It is therefore important to push even further the research efforts / development around this technology to be able to control and extend its application. This paper presents the results of modeling electrochemical and electrical production of PEM fuel cells powered directly by pure gas (hydrogen and oxygen) and experimental validation with a level established database " Laboratory of hydrogen Network - CDER " in order to operate and improve existing electrochemical models

Keywords: feul cell - PEMFC -electricity- modeling electrochemical -experimental

ملخص

خلية الوقود (PAC) منذ فترة طويلة والمعروفة باسم تحويل الطاقة الهيدروجينية (الكهربائية + الحرارية) مع غلة جيدة جدا والبحث على هذه التكنولوجيا تتطور في كل أنحاء العالم إلى حد كبير. لأسباب معروفة: الإجابة على القيود البيئية، والمشاكل الناجمة عن إنتاج الكهرباء المركزية، والحاجة إلى بدائل الطاقة ومتطلبات تقنية محددة مثل التطبيقات المختلفة. فمن المؤكد أننا سنشهد في العقود المقبلة مع ظهور تكنولوجيا الهيدروجين في حياتنا اليومية باعتبارها الناقل للطاقة. شهد اختيار التكنولوجيا لغشاء التبادل خلية وقود البروتون (PEMFC) فهذا يعني ضمنا العروض المثيرة للاهتمام (انخفاض الوزن، قوي، صلب بالكهرباء، بداية سريعة، وما إلى ذلك). ولذلك فمن المهم لدفع أكثر من ذلك الجهود البحثية / التنمية في جميع أنحاء هذه التكنولوجيا لتكون قادرة على السيطرة وتوسيع تطبيقه. تقدم هذه الورقة نتائج الكهروكيميائية النمذجة وإنتاج الكهرباء من خلايا الوقود بيم مدعوم مباشرة من الغاز النقي) الهيدروجين والأكسجين (والتحقق التجريبي مع قاعدة بيانات المستوى المحدد " مختبر شبكة الهيدروجين - CDER " من أجل العمل وتحسين نماذج الكهروكيميائية القائمة.

الكلمات الجوهرية : خلية الوقود-PEMFC - الكهرباء- نتائج الكهروكيميائية- التجريبي

