

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Sciences Appliquées  
Département de Génie Electrique



Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et technologies

Filière : Génie électrique

Spécialité : Electrotechnique Industrielle

Présenté par :

**BOUCHAALA Soumia**

**BEGGARI Hadjer**

**Thème :**

# **Etude d'un système de pile à combustible de type PEMFC**

Soutenu publiquement : 13/06/2022

Devant le jury :

M <sup>r</sup> DJARAH Djalal	MAA	Président	UKM Ouargla
M <sup>r</sup> DJAFOUR Ahmed	Professeur	Encadreur/rapporteur	UKM Ouargla
M <sup>r</sup> KOUACHE Ahmed Zouhir	Doctorant	Co-encadreur	UKM Ouargla
M <sup>r</sup> BENMIR Abdelkader	MCB	Examineur	UKM Ouargla

Année universitaire 2021/2022



# *Dédicace*

**DIEU SOIT LOUÉ, QUI NOUS A PERMIS DE FAIRE CELA, ET NOUS N'Y SERIONS PAS PARVENUS SANS LA GRÂCE DE DIEU SUR NOUS A CEUX POUR QUI LE DEUX NOBLES VERSETS ONT ÉTÉ RÉVÉLÉS DANS LE VERSETS DU TOUTE PUISSANT.**

**JE DÉDIE CET HUMLE TRAVAIL À MES CHÈRE PÈRE ET MÈRE, QUI DIEU ME LES GARDE CEUX QUI SONT RESTÉS ÉVEILLÉS ET ONT TRAVAILLÉ DUR MON MON ÉDUCTION EN ACHEVANT CE TRAVAIL DE PRÈS OU DE LOIN..**

**A MON MARI ET À LA PRUNELLE DE MON YEUX, QUE DIEU LE PROTÈGE ET L'AIDE POUR MON PETITE GARÇON, LE POUSSIN ET MON AMOUR ET MON ÂGE EST SAMI, QUI DIEU LE PROTÈGE POUR MOI.**

**SEIGNEUR À MES SŒURS, GRANDES ET PETITES, SANS EXCEPTION.**

**À MES CHERS PROFESSEURS ET TOUTS MES AMIS ET PROCHES SANS EXCEPTION.**

**EN FIN CHÈRE PROFESSEURS ET À TOUTS LES CAMARADES DE CLASSE.**

*Hadjer.Beggari*





# *Dédicace*

**JE DÉDIE MON TRAVAIL À L'HOMME DE MA VIE, MON EXEMPLE ÉTERNEL, MON SOUTIEN MORAL ET SOURCE DE JOIE ET DE BONHEUR, CELUI QUI S'EST TOUJOURS SACRIFIÉ POUR ME VOIR RÉUSSIR, QUE DIEU TE GARDE À TOI MON PÈRE.**

**À LA LUMIÈRE DE MES JOURS, LA SOURCE DE TENDRESSE, L'EXEMPLE DE DÉVOUEMENT, LA FLAMME DE MON CŒUR, MA VIE ET MON BONHEUR MAMAN QUE J'ADORE.**

**AUX PERSONNES DONT J'AI BIEN AIMÉ LA PRÉSENCE À CÔTÉ DE MOI, À TOUS MES FRÈRES ET MES SŒURS, JE DÉDIE CE TRAVAIL DONT LE GRAND PLAISIR LEURS REVIENT EN PREMIER LIEU POUR LEURS CONSEILS, AIDES ET ENCOURAGEMENTS.**

**A MON CO-ENCADREUR AHMED ZOUHIR QUI DIEU DOIT PROTÉGER.**

**AUX PERSONNES QUI M'ONT TOUJOURS AIDÉ ET ENCOURAGÉ, QUI ÉTAIENT TOUJOURS À MES CÔTÉS, ET QUI M'ONT ACCOMPAGNÉ DURANT MON PARCOURS D'ÉTUDES, AIMABLES AMIS ET TOUS MES COLLÈGUES**

*Soumia.Bouchaala*





# *Remerciements*

*Avant tout, on remercie **ALLAH** le Tout-puissant de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail dans des meilleures Conditions.*

*Nous volons exprimer nos remerciements à notre encadreur le Professeur **DJAFOUR Ahmed** pour avoir accepté de diriger ce travail pour sa contribution et son aide qui nous ont été indispensable pour la réalisation de ce travail ainsi que toutes ces remarques constructives qui nous ont permis d'approfondir les connaissances scientifiques.*

*Nous adressons un immense Merci spatialement à notre Co-encadreur monsieur **KOUACHE Ahmed Zouhir** pour ces précieux conseils qu'ils n'ont cessé de me prodiguer tout à la longe la réalisation de ce travail ainsi que pour sa disponibilité quotidienne.*

*Sans oublions on remercie les jurys qui nous ferons l'honneur de juger ce travail.*

*Nos gratitude va particulièrement à tous les enseignants de Département de Génie électrique (**UKM Ouargla**) pour toute efforts durent ces années.*

*Enfin, dans ces dernières lignes on tient à remercier nos parents, nos sœurs et nos frères, nos amies pour les conseils et les encouragements qu'ils nous ont toujours prodigués ainsi que pour leur soutien tant moral que financier. Sans eux, on n'en serait pas où on 'en est et ce qu'on est.*

*.Merci encore à tous...*



## LISTE DES ACRONYMES

LES ACRONYMES	LES DEFINITIONS
<b>PAC</b>	Pile A Combustible
<b>SPEFC</b>	Solid Polymer Electrolyte Fuel Cell
<b>PEM</b>	Proton Exchange Membrane (Membrane d'échange de protons)
<b>PEMFC</b>	Proton Exchange Membrane Fuel Cell (Pile à Combustible à Membrane d'Echange de Protons)
<b>GE</b>	General Electrique
<b>EME</b>	Ensemble électrode à double squelette
<b>NASA</b>	National Aeronautics and Space Administration (Administration Nationale de l'Espace et de l'Aéronautique)
<b>DSK</b>	Double SKeleton catalyst
<b>PAFC</b>	Phosphoric Acid Fuel Cell (Pile à combustible à acide phosphorique)
<b>AFC</b>	Alkaline Fuel Cell (Pile à combustible alcaline)
<b>MCFC</b>	Molten Carbonate Fuel Cell (Pile à combustible au carbonate fondu)
<b>SOFC</b>	Solid Oxide Fuel Cell (Pile à combustible à oxyde solide)
<b>USA</b>	United States
<b>DC</b>	Direct Current( courant continu)
<b>FCV</b>	Fuel cell véhicule
<b>EPV</b>	Energie photovoltaïque
<b>ONM</b>	Office national de météorologie

## LISTE DES SYMBOLES

Symboles	Définitions	Unités
<b>Chapitre I</b>		
$\text{SO}_3^- \text{H}$	Groupes sulfoniques	[-]
$\text{COOH}$	Acide carboxylique	[-]
$\text{O}_2$	Oxygène	[-]
$\text{H}^+$	Ion d'hydrogène	[-]
$\text{e}^-$	Électron	[-]
$\text{H}_2\text{O}$	L'eau	[-]
$\text{H}_2$	Hydrogène	[-]
$\text{CO}_2$	Le dioxyde de carbone	[-]
$\text{CO}$	Le monoxyde de carbone	[-]
$\text{KOH}$	L'hydroxyde de potassium	[-]
$\text{OH}^-$	Ion hydroxyde	[-]
$\text{Cr}$	Chrome	[-]
$\text{Fe}$	Fer	[-]
$\text{Mn}$	Manganèse	[-]
$\text{Ni}$	Le nickel	[-]
$\text{Ag}$	Argent	[-]
$\text{Pt}$	Platin	[-]
$(\text{CO}_3)^{-2}$	Les ions carbonatent	[-]
$\text{CH}_4$	Méthane	[-]
$\text{PO}_4$	Phosphate	[-]
<b>Chapitre II</b>		
$V_{\text{PAC}}$	La tension aux bornes de la pile à combustible	[V]
$E_{\text{nernst}}$	La tension théorique	[V]
$R_{\text{act}}$	La résistance d'activation	[Ω]
$R_{\text{con}}$	La résistance de concentration	[Ω]
$V_{\text{act}}$	La surtension d'activation.	[V]
$V_{\text{ohm}}$	La surtension ohmique	[V]
$V_{\text{conc}}$	La surtension de concentration	[V]

$\Delta G$	Le changement d'énergie libre	[J/k. mol]
$\Delta S$	Le changement d'entropie	[J/k. mol]
F	La constante de faraday	[C/k. mol]
T	La température de fonctionnement de la pile.	[k]
$T_{ref}$	La température de référence	[k]
R	La constante universelle du gaz	[J/k. mol]
$P_{H_2}^*$	La pression partielle à l'interface d'hydrogène.	[atm]
$P_{O_2}^*$	La pression partielle à l'interface d'oxygène.	[atm]
$RH_a$	L'humidité relative à l'anode.	[%]
$RH_c$	L'humidité relative à la cathode.	[%]
$P_{anode}$	La pression de l'hydrogène à l'anode.	[atm]
$P_{cathode}$	La pression de l'oxygène à la cathode.	[atm]
$P_{H_2O}^{sat}$	La fraction molaire de saturation de l'eau dans le gaz humidifié.	[atm]
$\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4$	Coefficients paramétriques appropriés à chaque modèle physique de PAC.	[-]
$I_{PAC}$	Courant de fonctionnement de la pile.	[A]
$CO_2^*$	La concentration d'oxygène à la surface de la catalyseur.	[mol/cm <sup>3</sup> ]
$R_C$	La résistance équivalente de contact à la conduction des électrons.	[ $\Omega$ ]
$R_m$	La résistance équivalente de la membrane à la conduction des protons.	[ $\Omega$ ]
l	L'épaisseur de la membrane.	[ $\mu m$ ]
A	La surface active de la pile.	[cm <sup>2</sup> ]
$\rho_M$	La résistivité spécifique de la membrane.	[ $\Omega \cdot cm$ ]
$\lambda_{H_2O/SO_3^-}$	La teneur en eau dans la membrane.	[-]
J	La densité de courant.	[A/cm <sup>2</sup> ]
$J_{max}$	La densité de courant maximale.	[A/cm <sup>2</sup> ]
b	La constante électrochimie.	[V]
$P_{stack}$	La puissance de stack de la pile à combustible.	[W]
$V_{stack}$	La tension de stack de la pile à combustible.	[V]
$I_{stack}$	Le courant de stack de la pile à combustible.	[A]
$P_{in}$	La puissance d'entrée de la pile à combustible	[W]
$V_{H_2}$	Le débit molaire d'hydrogène de la pile à combustible	[ml/s]
PCI	Le pouvoir calorifique inférieur.	[KJ/Nm <sup>3</sup> ]

$\eta_{stack}$	Le rendement de stack de la pile à combustible	[%]
$\eta_V$	Rendement de tension	[%]
$a$	Nombre de cellules	[-]
$V_{rev LHV}$	Tension de référence	[V]
$\eta_I$	Rendement de courant	[%]
$I_{th}$	Courant théoriquement possible	[A]
$Z$	Nombre d'électrons	[-]
$V_m$	Volume molaire de $H_2$	[l/mol]
<b>Chapitre III</b>		
$E_{H2}$	Energie consommé par l'hydrogène	[Wh]
$\eta_{FC}$	Rendement de pile à combustible	[%]
$P_{ele}$	Puissance de charge (électrolyseur)	[W]
$E_c$	L'énergie consommée par électrolyseur	[Wh]
$T(ele)$	Nombre d'heures d'utilisation par l'électrolyseur par heure	[h]
$V_{H2}$	Volume d'hydrogène	[m <sup>3</sup> ]
$Q$	Débit d'hydrogène	[m <sup>3</sup> /h]
$K$	Coefficient	[-]
$P_c$	Puissance crête du générateur	[W]
$E_i$	La valeur moyenne quotidienne de radiation solaire	[KWh/m <sup>2</sup> /j]
$N_m$	Nombre des modules	[-]
$N_s$	Nombre des panneaux en série	[-]
$N_p$	Nombre des panneaux en parallèle	[-]
$R_t$	Coefficient réducteur de la température	[%]
$P_d$	Profondeur de décharge	[%]
$D$	Coefficient de décharge	[-]
$V_{tr}$	Tension de travaille	[V]
$C_{20}$	Capacité de batterie	[W]
$j_{aut}$	Nombre de jours d'autonomie	[-]
$N_b$	Nombre des branches des batteries	[-]
$N_s$	Nombre des batteries en série	[-]



# Sommaire

Dédicace	
Remercîment	
Liste des Acronymes	
Liste des Symboles	
Liste des figures	
Liste des Tableaux	
Introduction générale.....	1
<b>CHAPITRE I : Généralités sur les piles à combustible</b>	
I.1 Introduction.....	3
I.2 Historique générale de la pile à combustible .....	3
I.3 Structure de la pile à combustible .....	4
I.3.1 Structureur d'un cellule élémentaire de PEMFC .....	5
I.4 Principe de fonctionnement de la pilee à combustilbe.....	8
I.4.1 Principe de fonctionnement de la pile à combustible PEMFC .....	9
I.5 Les types de pile à combustibles .....	10
I.5.1. Pile à memmbrane polymère PEMFC .....	11
I.5.1.1 Caractrisitique de pile PEMFC.....	11
I.5.2 Pile à oxyde solide SOFC .....	12
I.5.2.1 Caractéristique de pile à SOFC.....	13
I.5.3 Pile à carbonate fondu MCFC.....	13
I.5.3.1 Caractéristique de Pile MCFC.....	14
I.5.4 Pile alcaline AFC .....	15
I.5.4.1 Caractiréristique de Pile AFC.....	15
I.5.5 Pile à acide phosphorique PAFC .....	16
I.5.5.1 Caractéristique de PAFC .....	17
I.6 Avantages et inconvénients des piles à combustiles .....	17

I.7 Applications des piles à combustibles.....	19
I.7.1 Transport .....	19
I.7.2 Application portables .....	20
I.7.3 Application stationnaires.....	21
I.7.4 Innovations et applications futures.....	21
I.8 Conclusion.....	22

## **CHAPITRE II : Modélisation et caractérisation de la pile PEMFC**

II.1 Introduction.....	24
II.2 Modélisation mathématique de la pile .....	24
II.2.1 Tention d'alimentation .....	24
II.2.2 Surtension d'activation .....	25
II.2.3 Surtention ohmique.....	25
II.2.4 Surtention de concentration .....	26
II.3 Caractérisation de la PEMFC .....	26
II.3.1 Plateforme de la caractrisation expérimentale.....	26
II.3.1.1 Maquette d'expérimentations (fuel cell trainer).....	26
II.3.1.2 Système d'acquisition .....	31
II.4 Courbe caractéristique tention-courant.....	32
II.5 Courbe caractéristique puissance-courant.....	33
II.6 Influence de l'alimentation en air sur la courbe de tension .....	33
II.7 Influence de l'alimentation en air sur la courbe puissance .....	34
II.8 Influence de température sur la courbe de tension .....	36
II.9 Influence de température sur la courbe de puissance.....	35
II.10 Courbe caractéristique hydrogène-courant .....	36
II.11 Rendement d'un pile à combustible .....	37
II.12 Rendement du stack .....	38
II.13 Rendement de la tension .....	39

II.14 Rendement de courant .....	39
II.15 Conclusion .....	39

### CHAPITRE III : Application de la PEMFC dans les véhicules électriques

III.1 Introduction .....	40
III.2 Véhicule à hydrogène .....	40
III.2.1 DÉFIS DE LA FCV .....	41
III.3 Nouveau cycle européen de conduite .....	42
III.3.1 Hypothèse d'étude .....	43
III.4 Analyse d'un véhicule à pile à combustible .....	43
III.4.1 Détermination de la profile de charge du véhicule .....	44
III.4.2 La consommation d'énergie .....	46
III.4.3 La consommation d'hydrogène .....	46
III.5 Dimensionnement d'une mini station de production d'hydrogène solaire .....	47
III.5.1 Energie solaire .....	47
III.5.1.1 Définition .....	47
III.5.1.2 Panneau photovoltaïque .....	47
III.5.1.3 Principe de fonctionnement des panneaux solaire .....	47
III.5.2 Dimensionnement de la charge (électrolyseur) .....	48
III.5.3 La base des données climatiques de station de METO (2020) .....	49
III.5.4 L'énergie consommée par électrolyseur .....	50
III.5.5 La puissance crete du générateur .....	50
III.5.6 Nombre des panneaux .....	51
III.5.7 Dimensionnement des batteries .....	51
III.5.7.1 Nombre des batteries .....	51
III.5.8 Dimensionnement des régulateurs .....	52

---

III.6 Résultats de dimensionnement .....	52
III.7 Conclusion .....	52
Conclusion générale .....	53
Références Bibliographiques	
Annexes	

## LISTE DES FIGURES

FIGURES	TITRES DES FIGURES	PAGES
<b>CHAPITRE I</b>		
<b>Figure I.1</b>	L'expérience de Sir William, inventeur historique de la pile à combustible	4
<b>Figure I.2</b>	Exemple de stack chez ZSW	4
<b>Figure I.3</b>	Catalyseur du coté anode	6
<b>Figure I.4</b>	Couche de diffusion de gaz	7
<b>Figure I.5</b>	Structure d'un empilement de cellule PEMFC	8
<b>Figure I.6</b>	Schéma de principe de fonctionnement de PEMFC	10
<b>Figure I.7</b>	Schéma de principe des différents types de piles à combustibles	10
<b>Figure I.8</b>	Schéma de principe d'une PEMFC	11
<b>Figure I.9</b>	Schéma de principe d'une SOFC	13
<b>Figure I.10</b>	Schéma de principe d'une MCFC	14
<b>Figure I.11</b>	Schéma de principe d'une pile AFC	15
<b>Figure I.12</b>	Schéma de principe d'une pile PAFC	16
<b>Figure I.13</b>	L'utilisation de la pile à combustible aux transports	20
<b>Figure I.14</b>	Quelque exemple des PAC à faible puissance	20
<b>Figure I.15</b>	Applications stationnaires	21
<b>Figure I.16</b>	Applications d'avenir	22
<b>CHAPITRE II</b>		
<b>Figure II.1</b>	Maquette d'expérimentations	27
<b>Figure II.2</b>	Bouteille de stockage H <sub>2</sub> .	28
<b>Figure II.3</b>	Pile à combustible	28

<b>Figure II.4</b>	Convertisseur DC/DC	29
<b>Figure II.5</b>	Module de charge électronique	29
<b>Figure II.6</b>	Détendeur et manomètres	30
<b>Figure II.7</b>	Vanne de purge	30
<b>Figure II.8</b>	Interface de logiciel de fuel cell trainer	31
<b>Figure II.9</b>	Courbe de caractérisation $V=f(I)$	32
<b>Figure II.10</b>	Courbe caractérisation $P=f(I)$	33
<b>Figure II.11</b>	Courbe caractérisation $U=f(I)$ avec différentes gestion d'air	34
<b>Figure II.12</b>	Courbe de la puissance en fonction du courant $P=f(I)$ avec différentes gestion d'air	35
<b>Figure II.13</b>	Courbe de caractérisation $V=f(I)$ avec différentes températures	35
<b>Figure II.14</b>	Courbe de la puissance en fonction du courant $P=f(I)$ avec différentes température	36
<b>Figure II.15</b>	Courbe de consommation d'hydrogène en fonction du courant	37
<b>Figure II.16</b>	Rendement électrique de la PAC	38
<b>CHAPITRE III</b>		
<b>Figure III.1</b>	Véhicule propre à l'hydrogène	41
<b>Figure III.2</b>	Voiture à hydrogène	42
<b>Figure III.3</b>	Système photovoltaïque/ pile à combustible	44
<b>Figure III.4</b>	Vitesse simulée du véhicule	45
<b>Figure III.5</b>	Puissance de charge électrique	45
<b>Figure III.6</b>	Panneaux photovoltaïques	47
<b>Figure III.7</b>	Principe de fonctionnement de cellules photovoltaïque	48
<b>Figure III.8</b>	Générateur hydrogène	48
<b>Figure III.9</b>	Réservoir d'hydrogène	49

## LISTE DES TABLEAUX

<b>TABLEAU</b>	<b>TITRE</b>	<b>PAGE</b>
<b>Chapitre I</b>		
<b>Tableau I.1</b>	Caractéristiques de la pile PEMFC	12
<b>Tableau I.2</b>	Caractéristiques de la pile SOFC	13
<b>Tableau I.3</b>	Caractéristiques de la pile MCFC	14
<b>Tableau I.4</b>	Caractéristiques d'une pile AFC	15
<b>Tableau I.5</b>	Caractéristiques de la pile PAFC	17
<b>Tableau I.6</b>	Tableau des avantages et inconvénients des différents types des piles à combustible	18
<b>Chapitre III</b>		
<b>Tableau III.1</b>	Paramètres techniques de PEMFC 50W	43
<b>Tableau III.2</b>	Données climatiques de la région d'Ouargla (2011-2020)	49
<b>Tableau III.3</b>	Résultats du dimensionnement	52



INTRODUCTION

GENERALE

## INTRODUCTION GENERALE

La consommation mondiale d'énergie observée durant ces dernières décennies est fortement liée au développement de l'industrie. La plus grande partie de l'énergie consommée actuellement provient de l'utilisation des combustibles fossiles tels que le charbon, le pétrole et le gaz naturel. L'utilisation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. Et les études futures indiquent que l'utilisation excessive de ces ressources provoque l'épuisement total de ces réserves. Ce problème d'offre et de demande peut être encore plus dangereux [1, 2].

Les sources d'énergie fossiles, obtenues de notre environnement, tendent à diminuer avec une rapidité relative due à leurs utilisations irrationnelles par l'humanité. La diminution des sources de pétrole, du gaz naturel et des sources naturelles de charbon mène à faire des efforts pour trouver de nouvelles sources d'énergie pour permettre une réduction de l'utilisation de ces sources naturelles de combustible. C'est le souci majeur des tous les pays industrialisés du monde [3, 4].

La reconnaissance des nouvelles sources d'énergie qualifiées de vertes et renouvelables est devenue une nécessité pour le domaine scientifique et technique. Ces énergies non polluantes contribuent à un environnement plus protégé vis-à-vis des émissions dangereuses, que ce soit celles dites à effet de serre ou celles qui dérangent la qualité de l'air [5].

Les énergies renouvelables constituent une solution de substitution. Elles peuvent provenir du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse. A la différence des énergies fossiles, les énergies renouvelables sont des énergies à ressources illimitée et à différentes filières technologiques [6].

L'hydrogène est l'une des sources d'énergie les plus importantes du futur. Parmi les sources d'énergie renouvelables. L'hydrogène est un des vecteurs potentiels d'énergie d'avenir pour le stockage de l'électricité comme évoqué dans la loi sur la transition énergétique. Et peut également être produite à l'aide d'énergies renouvelables comme l'énergie éolienne et solaire. Il est particulièrement intéressant pour valoriser des énergies renouvelables ou pour limiter les impacts environnementaux liés au carbone. Il convient absolument à ce que l'hydrogène devient le vecteur énergétique du futur et cela grâce à la pile à combustible [7].

Une pile à combustible est un appareil qui convertit l'énergie chimique d'un combustible en électricité au travers une réaction chimique contrôlée avec l'oxygène ou d'un autre oxydant. Les piles à combustible se distinguent des batteries et des piles par le fait qu'elles ont besoin

d'un apport constant de combustible pour fonctionner, mais que leur production d'électricité est constante tant que le combustible est approvisionné. La pile à combustible est un générateur de courant à haut rendement énergétique [8].

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. 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.) [9].

Dans ce contexte nous nous sommes intéressés dans ce travail qu'aux piles à membranes échangeuses de protons PEM (Proton Exchange Membrane) 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.

Notre mémoire est réparti en trois chapitres, le première chapitre s'attache présenter un état de l'art sur les piles à combustible le structure, principe de fonctionnement de cette technologie, les différent type de pile à combustible ainsi leur avantage et inconvénient et les applications qui sont envisageables dans les années à venir.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation mathématique d'une pile à combustible type PEMFC et ses caractéristiques.

Le troisième chapitre est réservé à une application d'une pile à combustible de type PEM, on véhicule électrique à l'aide d'énergie photovoltaïque.

Enfin nous allons terminer par une conclusion générale.

# CHAPITRE : I

## *Généralités sur les piles à combustibles*

## I.1 Introduction

Le contexte énergétique actuel, caractérisé par l'appauvrissement des réserves d'énergie fossiles, le réchauffement de la planète en partie dû à l'émission de gaz à effet de serre et le concept de développement durable, suscite l'essor de solutions énergétiques alternatives [10]. Le développement de nouveaux convertisseurs d'énergie, plus efficaces et libérant moins de substances toxiques, tels que la pile à combustible, tend à s'accélérer. Leur diffusion à grande échelle suppose cependant des garanties vis-à-vis de la sécurité et l'environnement [7].

Il existe nombreuses technologies de PAC dans le marché chaque une à ses caractéristiques, ses avantages et inconvénients, le premier chapitre nous présentons la pile à combustible, son principe de fonctionnement, bref historique, ainsi que les types, avantages, inconvénients et nous détaillerons quelques exemples d'applications de cette dernière.

## I.2 Historique générale de la pile à combustible

En 1839, William Grove a effectué la première démonstration de pile à combustible. Il s'agit d'une pile hydrogène/oxygène basse température avec des électrodes en platine et un électrolyte à base d'acide sulfurique dilué. Jusque dans les années 1930, grâce aux travaux de l'ingénieur britannique Francis T. Bacon à Cambridge, en milieu aqueux KOH (température 80 à 200°C, pression gazeuse de quelques atmosphères à 40 atmosphères, électrodes poreuses en nickel et oxyde de nickel).

En 1953, le premier prototype de puissance significatif est réalisé. Le programme spatial américain de la NASA (National Aeronautics and Space Administration) a apporté une série de réalisations technologiques au programme GEMINI à la fin des années 1950 et à la pile à électrolyte polymère solide (SPEFC du General Electric) dans les années 1960, développée par Platt and Whitney (maintenant United Technologies) fabrique des piles alcalines de type bacon utilisées dans les missions lunaires Apollo et maintenant dans la navette spatiale. Parallèlement, Justi et Winsel en Allemagne développent plusieurs piles alcalines kilowatt (AFC), des électrodes au nickel de Raney à grandes surfaces actives (électrodes à double squelette ou DSK) [11].

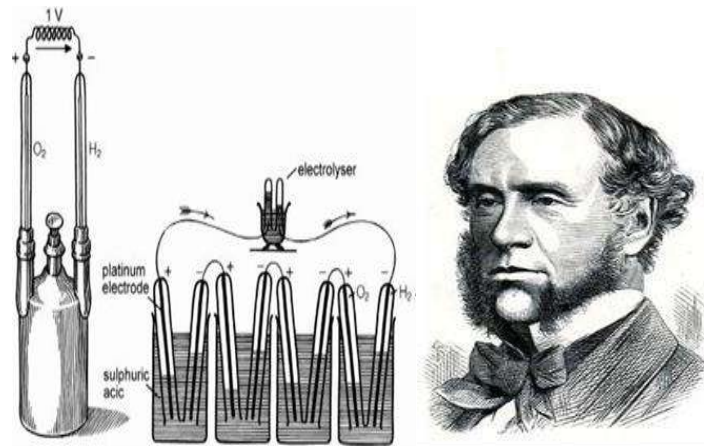


Figure I.1: L'expérience de Sir William, inventeur historique de la pile à combustible [11].

### I.3 Structure d'une pile à combustible

Une pile à combustible est constituée d'un empilement de cellules qui forment un stack. Ces cellules élémentaires sont constituées de l'ensemble électrode-membrane-électrode [12], L'anode est alimentée par un combustible et la cathode alimentée par un comburant et seuls les ions et les gaz sont autorisés à passer pas les électrons. Lorsqu'un atome d'hydrogène atteint la surface de l'anode, il se divise en deux composants, les protons et les électrons. Dans ce cas, les électrons sont forcés à travers un circuit externe pour terminer le cycle de conversion. Une cellule élémentaire d'une PAC fournit une très basse tension environ 1.2V.

Pour avoir une puissance élevée, plusieurs cellules de base doivent être connectées en série pour former un ensemble appelé stack. Les éléments de liaison entre ces cellules sont appelés plaques bipolaires car ils relient le pôle positif d'une cellule au pôle négatif d'une seconde cellule (en série). En plus de cette fonction électrique (collecte du courant produit par chaque cellule de base vers les électrodes de sortie), les plaques bipolaires assurent la circulation, le refroidissement ou le chauffage, et l'assemblage de différents fluides [13].

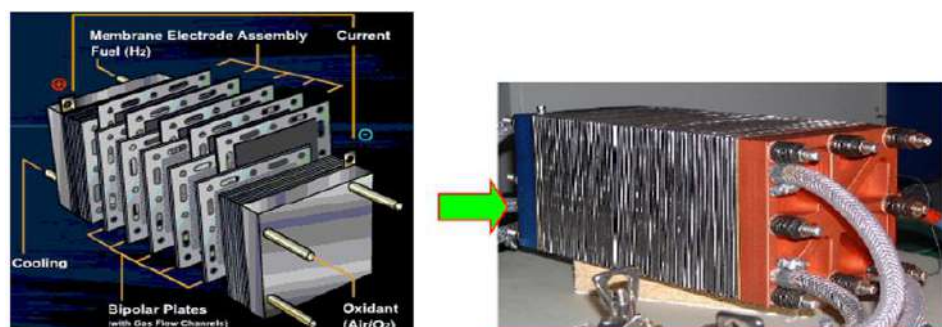


Figure I.2 : Exemple de stack chez ZSW [13].

### I.3.1 Structure d'une cellule élémentaire de PEMFC

#### ➤ **Électrolyte**

Les membranes conductrices de protons sont au cœur des piles à combustible type PEMFC. Leur importance est évidente car ce sont leurs propriétés conductrices Cela régule la recombinaison électrochimique de l'hydrogène et de l'oxygène, et d'où ses performances. Fonctionnement limité en chute ohmique à haute densité courant, principalement lié à la membrane (la résistance de la membrane est liée au rapport de l'épaisseur à la conductivité protonique). En plus, ils doivent montrer bonne propriétés mécaniques et chimique dans des conditions de Fonctionnement, ne pas être perméables aux gaz maintenir une teneur en eau élevée à haute température puisque cela conditionne les propriétés de conduction.

Les membranes ont des groupes acides dans leur structure polymère Les échangeurs de protons (d'où leur nom Proton Exchange Membranes : PEM), généralement Terminer ( $SO_3^-H$ ) ou COOH, Il permet le transfert des protons de l'anode vers la cathode [12].

#### ➤ **Électrodes (anode/cathode)**

Les principales fonctions des électrodes sont :

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

Le catalyseur utilisé dans ce type de pile est du platine pur ou allié à un élément de transition (Cr, Mn, Ni, Co, Fe). En effet, seul ce métal noble possède l'activité électro catalytique suffisante vis-à-vis de la réduction d'oxygène et de l'oxydation de l'hydrogène et peut, de plus, résister durablement à la corrosion (dissolution) dans cet environnement chimique très acide. La teneur en platine varie entre 0,01 et 1 mg/cm<sup>2</sup> d'électrode.

Ces électrodes sont réalisées par dépôt, sur un tissu de carbone conducteur ou sur un feutre, de très petites particules de platine (2 à 3 nanomètres supportées sur des poudres de carbone), de particules de PTFE et d'électrolyte polymère liquide. Elles peuvent être réalisées en plusieurs couches laminées.

Ces électrodes sont assemblées puis collées de part et d'autre de la membrane par pressage à chaud. L'ensemble électrode membrane électrode (EME) a une épaisseur inférieure au millimètre. Cet ensemble EME est intégré entre deux plaques bipolaires [12].

### ➤ Catalyseur

Les catalyseurs sont utilisés pour faciliter, accélérer et augmenter l'efficacité des réactions électrochimiques, mais ne sont pas consommés dans le procédé. Le catalyseur est déposé sur la surface de chaque électrode en contact avec l'électrolyte, ainsi qu'un liant, qui peut être hydrophobe pour faciliter le drainage de l'eau ou hydrophile pour augmenter le contact avec l'électrolyte. L'anode utilise un mélange platine/ruthénium et la cathode utilise du platine seul [13].

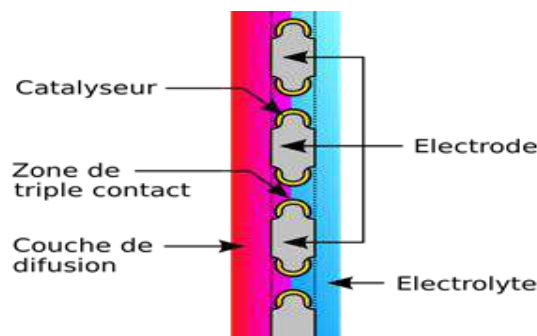


Figure I.3 : Catalyseur du coté anode [13].

### ➤ Couche de diffusion de gaz

Il est fabriqué en fibre de carbone ou en non-tissé pressé, d'une épaisseur comprise entre 0,2 et 0,4 mm et d'une porosité élevée.

Ses fonctions sont :

- Assurer la transition des gaz vers le catalyseur et l'électrolyte.
- Fournir un soutien mécanique au groupement membrane-électrode/catalyseur.
- Garantir la circulation du courant produit vers les électrodes.
- Permettre l'évacuation de l'eau formée.
- Éliminer la chaleur résultant par les réactions [13].



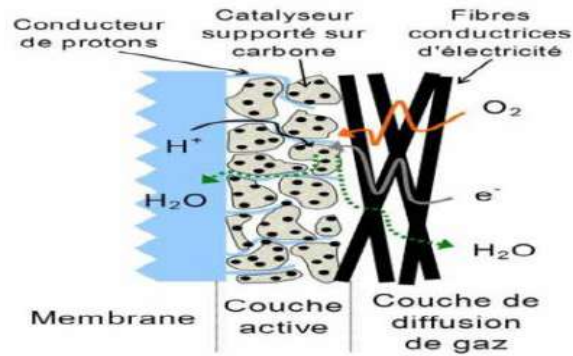


Figure I.4 : Couche de diffusion de gaz [13].

### ➤ Les plaques bipolaires

Les plaques bipolaires sont en contact avec la surface des électrodes et permettent sur toute la surface de l'électrode :

- Collection d'électrons (du courant).
- Distribution et séparation des gaz à l'anode et à la cathode.
- L'évacuation des produits formés (l'eau à l'anode).

Par conséquent, le matériau de la plaque bipolaire doit avoir une certaine conductivité électrique suffisante (supérieure à 10 siemens/cm), étanchéité à l'air supérieure à Membrane échangeuse de protons et bonne inertie chimique vis-à-vis des fluides Présent dans le noyau cellulaire (eau, acide, oxygène...).

La plaque la plus courante est en graphite avec des canaux de distribution Le gaz est obtenu par usinage. Ces plaques sont disponibles dans le marché, mais le prix très élevé, principalement en raison de l'étape de transformation, il n'est donc pas envisageable applications industrielles. Pour réduire ce coût, deux autres types de plaques bipolaires ont été développés Développer ce sont :

- Plaques bipolaires à base de composites organiques. Ces plaques utiliser des charges (charbon, graphite, etc.) dispersées dans des matériaux thermoplastiques ou Thermodurcissable. Ces charges rendront les plaques bipolaires conductrices bonne résistance mécanique requise pour captation de courant et liants polymères assemblez différents éléments. Le principal avantage est le faible coût Les matériaux de base, en revanche, les canaux de distribution peuvent Obtenu directement par moulage du polymère chargé sur la cavité, sans nécessiter d'étapes d'usinage ultérieures.

- Plaques bipolaires à base de métaux et d'alliages, notamment d'acier Antirouille. Ils possèdent un ensemble de propriétés (résistance mécanique, étanchéité, Conductivité, formabilité et méthode d'assemblage production de masse), ce qui en fait des candidats de choix pour la conception et la production une plaque bipolaire compacte, légère et peu coûteuse. Leur densité est supérieure à Le graphite oblige à les utiliser sous forme de flocons, faciles à passer estampillage. A ces conditions, l'évacuation des calories et le contrôle de la température Grâce à la circulation du fluide, il est possible de s'assurer précisément que le module est en fonctionnement refroidissement interne [12].

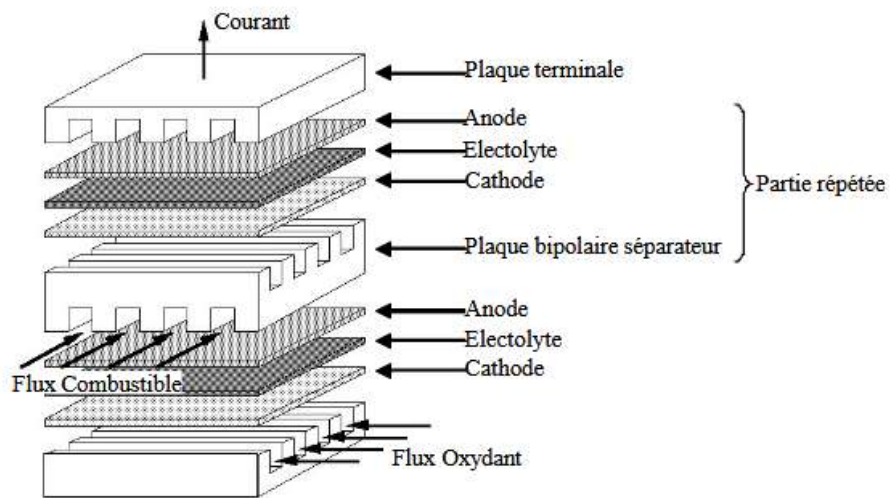


Figure I.5 : Structure d'un empilement de cellule PEMFC [12].

#### I.4 Principe de fonctionnement de la pile à combustible

6 Une caractéristique essentielle des piles à combustible est la charge électrique détermine les taux de consommation d'hydrogène et d'oxygène. Alimentation en gaz à l'anode pour l'hydrogène et la cathode pour l'oxygène. Par conséquent, la structure de la pile à combustible Il y a des entrées de gaz des deux côtés de l'électrolyte.

Les électrolytes peuvent être liquides ou solides, certains à haute Basse température, autre basse température. Les piles à combustible fonctionnant à basse température nécessitent souvent des catalyseurs de métaux précieux, généralement du platine, pour améliorer la réaction des électrodes. La plupart des piles à combustible sont utilisées pour Les applications automobiles utilisent des électrolytes solides à basse température qui conduisent des ions d'hydrogène.

En principe, les piles à combustible peuvent fonctionner en utilisant une variété de carburants et d'oxydants. L'hydrogène est considéré comme le carburant le plus efficace car il a une plus haute réactivité électrochimique que d'autres carburants tels qu'hydrocarbures ou alcools. L'oxygène est un excellent oxydant en raison de sa haute la réactivité et son abondance dans l'air [14].

#### I.4.1 Principe de fonctionnement de la pile à combustible PEMFC

Les membranes en polymère solide sont utilisées comme électrolyte dans les PEMFC. La membrane en polymère est l'acide per-fluoro sulfonique appelé Nafion. Cette membrane polymère est acide par conséquent, les ions sont des ions hydrogène ou des protons. Le PEMFC est alimenté avec de l'hydrogène pur, et l'oxydant est de l'air ou de l'oxygène pur. Les PEMFC sont des piles à combustible à basse température qui conduisent des ions hydrogène. Les PEMFC sont des piles à combustible à basse température qui produisent des ions hydrogène (H<sup>+</sup>), ce qui les rend non flexibles.

Ces piles à combustible sont les plus utilisées dans le secteur des transports parce qu'ils sont à basse température FC, fonctionnant autour de 80 C°, donc ils ont des temps de démarrage et d'arrêt relativement courts. Un autre avantage des PEM est qu'ils ont un rendement et une densité de puissance très élevés dans la classe de taille des moteurs des véhicules. Ces caractéristiques sont bien adaptées à une source d'alimentation du véhicule où la densité de puissance est souhaitée et les demandes de puissance dynamiques sont importantes. Certains des inconvénients du PEMFC comprennent un risque plus élevé d'intoxication au CO et le fait qu'ils nécessitent un refroidissement [15].

Les demi-réactions chimiques pour le PEMFC sont :

Oxydation :



Réduction :



La réaction chimique globale est :



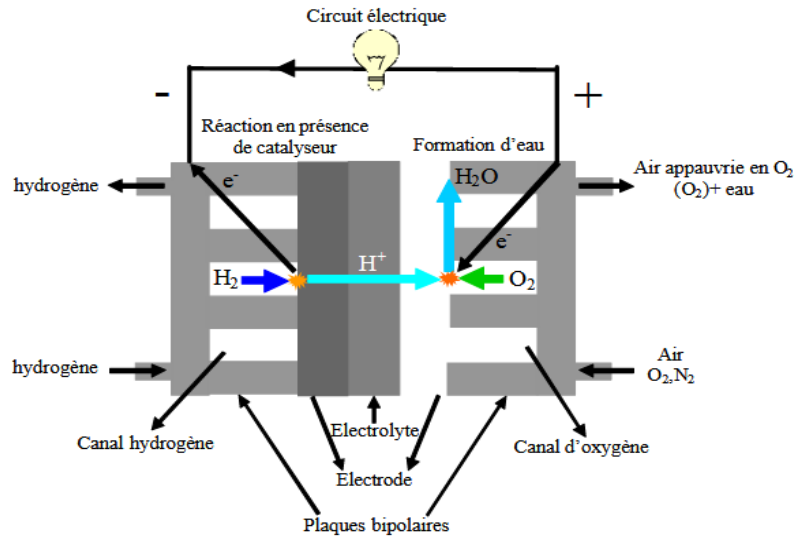


Figure I.6 : Schéma de principe de fonctionnement de PEMFC [12].

### I.5 les types des piles à combustibles

Il existe cinq grandes catégories des piles à combustibles, se caractérisant par la nature de l'électrolyte (solide, acide, base...), du combustible et la température de fonctionnement [16].

Dans notre étude, on va concentrer sur un type spécifique de la pile à combustible qui est la PEMFC (pile à membrane échangeuse des portons).

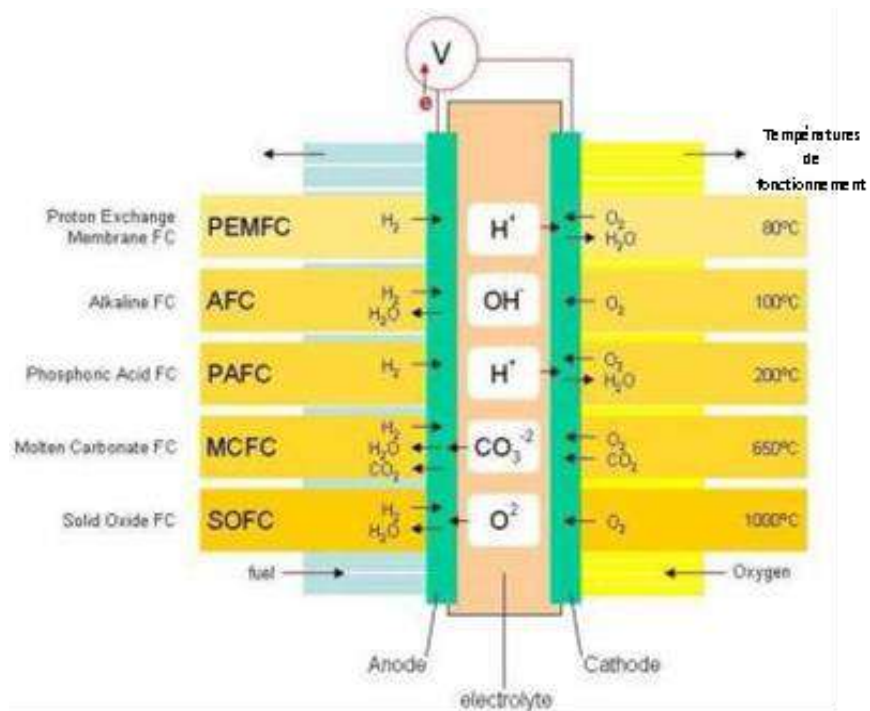


Figure I.7 : Schéma de principe des différents types de piles à combustibles [7].

### I.5.1 Pile à membrane polymère (PEMFC)

La pile à combustible de type PEM est actuellement le type le plus prometteur de piles à combustible pour les applications automobiles et a été utilisée dans la majorité des prototypes construits. Et ce type de pile est actuellement le plus développé aussi [14].

Une PEMFC est une pile à combustible qui fonctionne dans la plage de 50° à 100°C. Le fonctionnement à basse température fournit un courant et une densité de puissance élevés. Cela permet à la cellule d'avoir une conception compacte, un poids léger et un temps de réponse rapide par rapport aux autres piles à combustible. Comme son nom l'indique.

Ce type de pile utilise un électrolyte solide à membrane échangeuse de protons. L'utilisation d'un électrolyte solide a ses avantages. L'étanchéité des gaz d'anode et de cathode est facilitée, ce qui rend la fabrication très économique. Contrairement aux électrolytes liquides, les électrolytes solides ne se corrodent pas facilement, ce qui confère au système une durée de vie plus longue. Mettre en œuvre des efforts de recherche pour améliorer les performances et réduire les coûts [7].

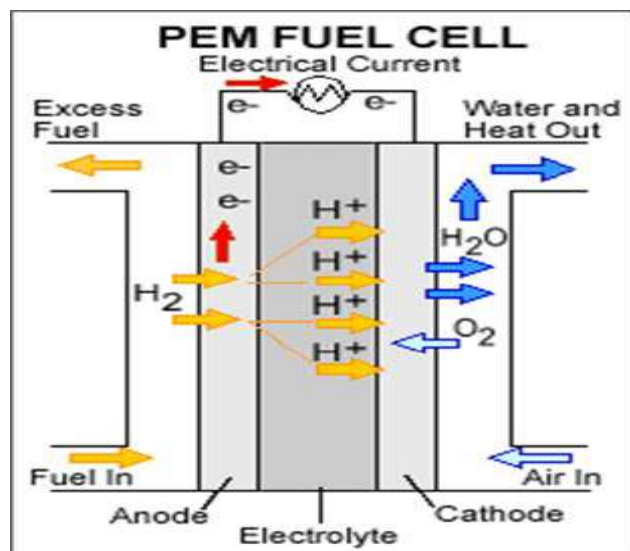


Figure I.8 : Schéma de principe d'une PEMFC [7].

#### I.5.1.1 Caractéristiques de pile PEMFC

Dans ce tableau, nous avons résumé les différentes caractéristiques et les performances de pile à membrane échange proton :

Modèle	PEMFC
Combustible (carburant)	H <sub>2</sub> pur
comburant	O <sub>2</sub>
Electrolyte	Nafion
Electrode	Pt
Puissance	1 W-300KW
Rendement	32-40 %
Durée de vie	60 000- 90 000 heures

Tableau I.1: Caractéristiques de la pile PEMFC [7, 16, 18].

### I.5.2 Pile à oxyde solide SOFC

Ce type de pile présente actuellement un grand intérêt compte tenu de ses performances actuelles et potentielles et de son insensibilité au monoxyde de carbone.

La caractéristique principale des SOFC réside donc dans leur haute température de fonctionnement (600 à 1 000 °C) nécessaire à l'obtention d'une conductivité ionique suffisante de l'électrolyte céramique. Ce niveau de température permet à ces piles d'être beaucoup moins sensibles que les autres aux impuretés. Par exemple, le monoxyde de carbone CO, impureté pour plusieurs types de piles devient au contraire un combustible pour une pile de type SOFC [7, 17].

Le point de fonctionnement est généralement choisi pour donner un bon rendement électrique d'environ 50 à 60 %. Les niveaux de température élevés (600-700°C) de la chaleur perdue permettent de récupérer cette chaleur par couplage avec une turbine à gaz, ce qui entraîne une augmentation significative du rendement, éventuellement suivie d'une récupération de chaleur finale, par exemple pour le chauffage. Il convient également de noter que les températures de fonctionnement élevées et la formation de vapeur d'eau permettent le reformage interne (direct ou indirect) à l'anode des combustibles carbonés (gaz naturel, kérosène, méthanol, etc.). Cette caractéristique a conduit la pile SOFC à être parfois décrites comme des piles au gaz naturel [7].

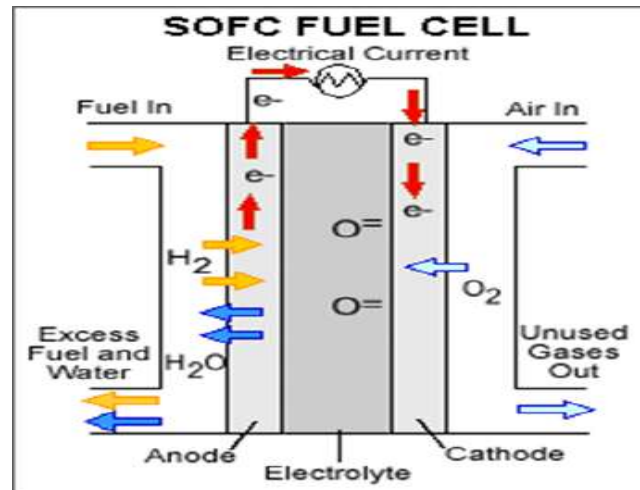


Figure I.9 : Schéma de principe d'une SOFC [7].

### I.5.2.1 Caractéristiques de pile SOFC

Nous résumons les caractéristiques et les performances pour Pile à combustible à oxyde solide dans le tableau suivant :

Modèle	SOFC
Combustible (carburant)	H <sub>2</sub> Pur , CH <sub>4</sub>
comburant	O <sub>2</sub>
Electrolyte	Céramique en dioxy de zirconium
Electrode	Nickel, céramique
Température de fonctionnement	650- 1000 °c
Puissance	1 KW – 10MW
Réaction	Anode: $H_2 + O^{2-} \rightarrow H_2O + 2 e^-$
	Cathode: $1/2 O_2 + 2 e^- \rightarrow O^{2-}$
Rendement	50-55%
Durée de vie	Supérieur à 90 000 heures

Tableau I.2: Caractéristiques de la pile SOFC [7, 16, 18].

### I.5.3 Pile à carbonate fondu MCFC

Ce type de pile fait partie des "pile à électrolyte liquide qui fonctionnent à des températures élevées (environ 650°C)". Cette température élevée permet de manière intéressante de récupérer les calories dégagées à des niveaux de chaleur élevés, notamment le couplage avec les turbines à gaz en aval et le reformage direct des carburants à base d'hydrocarbures à l'anode.

Les MCFC sont les piles à combustible qui résistent le mieux aux impuretés produites par les réactions chimiques. Ce type de pile à combustible est principalement utilisé pour un usage stationnaire et de forte puissance. Cependant, la maintenance est plus importante que le type SOFC [7].

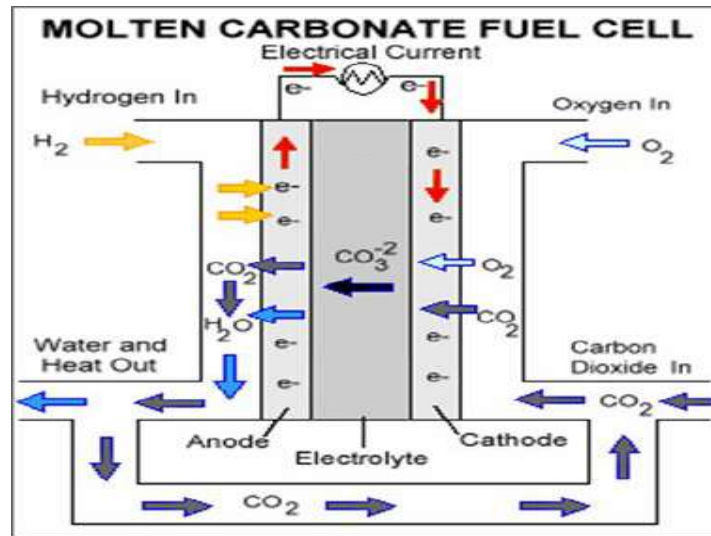


Figure I.10 : Schéma de principe d'une MCFC [7].

### I.5.3.1 Caractéristiques de pile MCFC

Le tableau suivant représente les caractéristiques et les performances de pile à combustible à carbonate fondu :

Modèle	MCFC
Combustible (carburant)	H <sub>2</sub> Pur, CH <sub>4</sub> , biomasse
comburant	O <sub>2</sub>
Electrolyte	Sels fondus liquide, potassium
Electrode	Nickel
Température de fonctionnement	600-660°c
Puissance	50 Kw-10Mw
réaction	Anode $H_2 + (CO_3)^{-2} \rightarrow H_2O + CO_2 + 2 e^-$
	Cathode: $CO_2 + 2 e^- + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow (CO_3)^{-2}$
Rendement	50-60%
Durée de vie	20 000-30 000 heures

Tableau I.3: Caractéristiques de la pile MCFC [7, 16, 18].



### I.5.4 Pile alcaline AFC

Piles AFC Les piles à combustible alcalines sont l'un des plus anciens dispositifs à pile à combustible [17]. C'est type de pile dont développement est plus ancien (1932). La NASA l'a sélectionné au début des années 1960 pour les futurs vols habités d'Apollo et de la navette spatiale. Le principe de fonctionnement est très simple : il s'agit d'une oxydoréduction, électrochimique et contrôlée, d'hydrogène et d'oxygène, avec production simultanée d'électricité, d'eau et de chaleur [7].

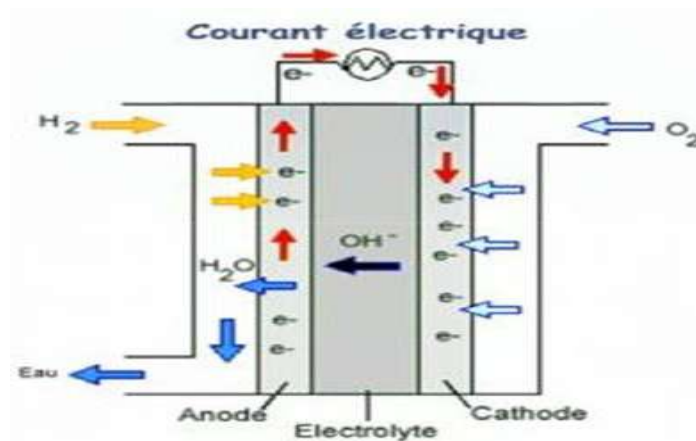


Figure I.11: Schéma de principe d'une pile AFC [7].

#### I.5.4.1 Caractéristiques de pile

Ce tableau représente les caractéristique et performances de pila à combustible alcaline :

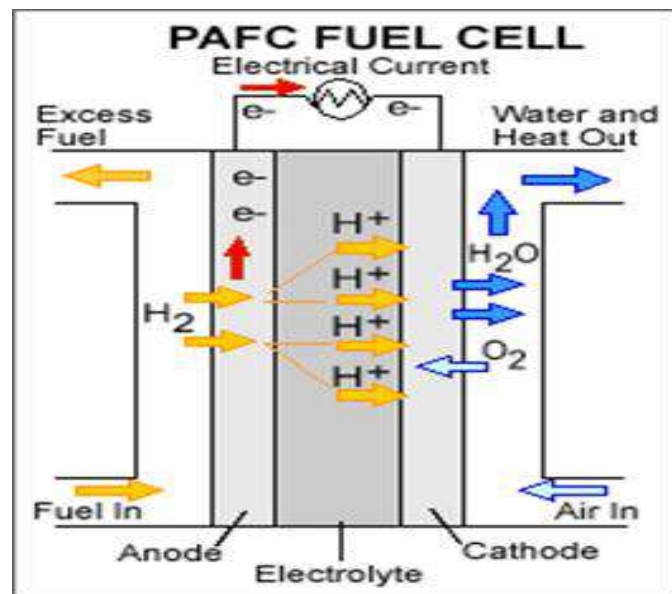
Modèle	AFC
Combustible (carburant)	H <sub>2</sub> Pur
comburant	O <sub>2</sub>
Electrolyte	KOH
Electrode	Pt, Ag
Température de fonctionnement	25-260°C
Puissance	1w-10Kw
Réaction	Anode : $H_2 + 2 OH^- - Ni \rightarrow 2 H_2O + 2 e^-$ Cathode: $\frac{1}{2} O_2 + 2 e^- + H_2O - Ag \rightarrow 2 OH^-$
Rendement	55-60%
Durée de vie	5000-8000 heures

Tableau I.4: Caractéristiques d'une pile AFC [7, 16,18].

### I.5.5 Pile à acide phosphorique PAFC

Le PAFC est une pile basse température dans une gamme de 190 à 210 °C ayant un électrolyte sous forme liquide. La forte concentration en acide augmente la conductivité de l'électrolyte et réduit la corrosion des électrodes en carbone [7].

La pile à combustible à acide phosphorique est le système le plus avancé dans le développement et la commercialisation. Elle est principalement utilisée pour des applications stationnaires, en tant que générateur électrique. Des centrales électriques de type PAFC, avec une puissance fournie comprise entre 5 et 20 MW, ont été installées dans différents endroits dans le monde pour fournir de l'électricité, du chauffage et de l'eau chaude à certains villages, usines ou hôpitaux. [17].



10

Figure I.12 : Schéma de principe d'un PAFC [7].

#### I.5.5.1 Caractéristiques de pile PAFC

Dans ce tableau, nous avons résumé les différentes caractéristiques et les performances de pile à combustible à acide phosphorique :

Modèle	PAFC
Combustible (carburant)	H <sub>2</sub> Pur
comburant	O <sub>2</sub>
Electrolyte	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> (Acide phosphrique concentré)
Electrode	Pt
Température de fonctionnement	150-210 °c
Puissance	1 w-300Kw
Réaction	Anode: H <sub>2</sub> → 2 H <sup>+</sup> + 2 e <sup>-</sup> Cathode: $\frac{1}{2}$ O <sub>2</sub> + 2 e <sup>-</sup> + 2 H <sup>+</sup> → H <sub>2</sub> O
Rendement	36-45%
Durée de vie	30 000-60 000 heures

Tableau I.5: Caractéristiques de la pile PAFC [7, 16,18].

## I.6 Avantages et inconvénients des piles à combustibles

Les avantages des piles à combustible sont nombreux. Ecologiquement, ce générateur est parfait, la pile à combustible produit sans bruit de l'énergie électrique et thermique, à des rendements élevés, ne produisant que de l'eau et ne rejetant aucun gaz à effet de serre. Mais les piles à combustible ne sont pas une technologie mature. De nombreux points restent à étudier et à améliorer : fiabilité, durée de vie, prix, développement commercial.

Il existe nombreuses technologies de PAC chaque une à ses avantages et ses inconvénients, le tableau ci-dessous représente liste des avantages et inconvénients des différentes piles à combustibles :

Type de pile	Avantage	inconvénients
<b>PEMFC</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fonctionnement à basse température, donc démarrage rapide.</li> <li>• Electrolyte solide.</li> <li>• Bon fiabilité.</li> <li>• Bon comportement aux basses températures (jusqu'à -30 °c).</li> <li>• Petite taille.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nécessite un catalyseur précieux (platine-ruthénium).</li> <li>• La membrane électrolyte protonique chère et limitée en température d'utilisation (80°C).</li> <li>• La sensibilité au CO (moins de 10ppm requis)</li> <li>• Composants couteux.</li> </ul>
<b>SOFC</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Une bonne fiabilité.</li> <li>• Des rejets thermiques à une température élevée (vers 600-700°C).</li> <li>• Pas de catalyseurs précieux</li> <li>• Peut utiliser des combustibles carbonés.</li> <li>• Fabrication potentiellement simple.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Les hautes températures nécessitent des matériaux non-standards.</li> <li>• Supporte mal la variation de température.</li> <li>• Température élevée.</li> </ul>
<b>MCFC</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Une température élevée (vers 600°C).</li> <li>• Excellent rendement.</li> <li>• Toléré le CO.</li> <li>• Support le gaz naturel.</li> <li>• Pas des métaux précieux.</li> <li>• Reformage interne.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Catalyseurs précieux.</li> <li>• Problèmes de corrosion (électrolyte liquide).</li> <li>• Technologie onéreuse.</li> </ul>
<b>AFC</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fonctionne dans une large gamme de température (25 à 260°C).</li> <li>• Performances élevées (vitesse des réactions chimique).</li> <li>• Catalyseurs non précieux.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Electrolyte liquide et corrosif.</li> <li>• Durée de vie courte (8000 h).</li> <li>• Volume important.</li> <li>• Intolérant au CO<sub>2</sub> .</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tolère CO.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Besoin d' O<sub>2</sub> pur.</li> <li>• Mauvaise rendement thermique.</li> <li>• Nécessite de traiter l'électrolyte l'extérieur de la pile pour le purger de l'eau issue de la réaction électrochimique la réaction.</li> </ul>
<b>PAFC</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Relativement tolérante au CO.</li> <li>• Commercialement disponible et durée de vie longue et retour d'expérience.</li> <li>• Application pour cogénération (rendement de 85 % en cogénération).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Composants coûteux.</li> <li>• Problèmes de corrosion.</li> <li>• Faible densité d'énergie.</li> </ul>

Tableau I.6 Tableau des avantages et inconvénients des différents types des piles à combustibles [7, 16].

## I.7 Applications des piles à combustibles

La pile à combustible est utilisée pour remplacer les piles et batteries actuelles [16]. Les PAC ont été utilisées dans plusieurs domaines d'application on cite :

### I.7.1 Transport

Les PAC sont utilisées pour le transport depuis le 18ème siècle, et les physiciens Jacques Charles et Noel Robert ont fait un voyage aérien dans un ballon appelé "aérostat à gaz hydrogène". Il peut également être utilisé pour la propulsion dans le domaine des transports. Pour la propulsion fusée (Ariane V). Convient aux voitures, avions, trains, vélos et bateaux (sous-marins).

Les piles à combustible jouent un rôle important dans la propulsion des sous-marins car elles sont plus autonomes que les batteries conventionnelles. De plus, ils fonctionnent plus discrètement. Par conséquent, ils fournissent des sous-marins militaires.

L'utilisation de l'hydrogène n'est pas encore maîtrisée et l'expérience est au stade de prototype. D'autre part, il existe de nombreuses opportunités pour les piles à combustible [16].



Figure I.13: L'utilisation de la pile à combustible aux transports [13, 19, 20].

### I.7.2 Application portables

Les piles à combustible sont également utilisées dans le secteur portable pour remplacer les batteries de grande puissance. Qu'il s'agisse d'un téléphone portable, d'un ordinateur portable ou d'une tablette tactile, leur autonomie est fortement augmentée grâce à la pile à combustible [16].



Figure I.14 : Quelques exemples de PAC à faible puissance [13, 21].

### I.7.3 Application stationnaires

Les piles à combustible peuvent également être une source d'énergie délocalisée. Les domaines d'application sont la production collective et la production individuelle. Les performances dépendent de la taille de l'installation. De petites unités sont utilisées pour le



chauffage domestique. Ils fournissent également de l'eau chaude et de l'électricité, appelée cogénération (récupération de chaleur en plus de l'électricité). L'électricité produite est pour son propre usage. Le surplus est transmis au réseau sans comptage. La production totale est estimée à un peu plus de 80% [16].

Le marché stationnaire décentralisé est relativement vaste puisqu'il englobe conjointement :

- Les applications domestiques pour un particulier ou un secteur résidentiel avec chauffage collectif.
- Les applications industrielles en moyenne industrie.
- Les bâtiments spécifiques type administrations, hôpitaux, piscine...etc.

Ainsi, de nombreuses piles de faible puissance (quelques kW) sont apparues depuis quelques années, et ont été placées en test dans des habitations, des sites isolés et des bâtiments administratifs. Parallèlement, d'autres prototypes de moyenne puissance utilisés en mode de cogénération (quelques centaines de kW) ont été installés aux USA.



Figure I.15: Applications stationnaires [22, 23].

#### I.7.4 Innovations et applications futures

L'utilisation des piles à combustible peut être améliorée de diverses manières. Dans un premier temps, des procédés de production d'hydrogène à partir de panneaux photovoltaïques peuvent être développés. Les chercheurs expérimentent la photosynthèse artificielle ou couplent des cellules solaires simples et des photoanodes. L'efficacité actuelle de la conversion de la lumière du soleil en hydrogène est de 5% .

Ce couplage pile à combustible/panneau solaire permet de convertir l'eau en oxygène et en hydrogène selon le principe de l'électrolyse. Par conséquent, l'appareil peut alimenter l'appareil indépendamment. Une application spécifique de cette approche est la plateforme Myrte

en Corse. La plateforme est constituée de panneaux solaires (3700 mètres carrés) associés au système de production et de stockage d'hydrogène.

Un autre principal objet de recherche concerne la diminution de prix du catalyseur car le platine est extrêmement coûteux. C'est pourquoi des études sont menées pour réussir à le récupérer afin de le recycler. Il existe aujourd'hui des procédés industriels permettant sa récupération, ils sont basés sur l'hydrométallurgie (consiste à séparer et récupérer des métaux) et produisent des gaz toxiques en grande quantité. Les nouveaux traitements se basent sur l'hydrométallurgie car l'impact environnemental est plus faible. L'utilisation d'autres catalyseurs comme le cobalt est envisagée, il est beaucoup moins cher mais le rendement est nettement inférieur.

Le problème du stockage du dihydrogène est également un vecteur de recherche important. En plus des réserves conventionnelles, la société MCFy d'énergie propose de stocker l'hydrogène sous forme solide. Cela réduit le volume occupé et réduit le risque d'explosion. Une autre solution consiste à utiliser une galette d'hydrure de magnésium qui évite ces risques puisque l'absorption d'hydrogène et la désorption endothermique n'ont plus besoin d'être sous pression. Cependant, l'hydrogène n'est pas libéré assez rapidement dans les piles à combustible, des solutions doivent donc être développées pour surmonter ce problème [16].



Figure I.16 : Applications d'avenir.

## I.8 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre la partie théorique de PAC, ont étudié leur histoire, principe, structure...etc.



On voit aussi les différents types de piles à combustible (PEMFC, SOFC, AFC, PAFC, MEFC) et on remarque que chaque type est différent de l'autre en principe, caractéristiques et leurs avantages et inconvénients et en domaine d'application.

Cette technologie présente de nombreux avantages : fiabilité, durabilité, sans pollution, sans bruit. Les inconvénients majeurs sont leur prix important et le faible rendement impliquant des surfaces importantes. Mais il y a des efforts de recherche qui sont mis en œuvre pour augmenter les performances et diminuer le coût, aussi bien de la pile elle-même que de ses périphériques.

# CHAPITRE : II

*Modélisation et caractérisation de la pile*

*PEMFC*

## II.1 Introduction

Aujourd'hui, la pile PEMFC à suscitent l'engouement des chercheurs car elles présentent de nombreux avantages. Tout d'abord, ces piles ont la capacité de produire une quantité non négligeable d'électricité, d'eau et de la chaleur. De plus, les réactifs de la pile sont le dioxygène présent naturellement dans l'atmosphère et le dihydrogène qui lui par contre à besoin d'être produit. Sa production est donc un enjeu majeur pour la mise en place de la pile à combustible [16].

L'objectif de ce chapitre est de présenter la modélisation mathématique de PAC et faire une description du banc d'essai et ses performances, on va présentons les composent et leur fonctionnement en détaille ensuite on va tracer les courbes caractéristiques (tension, courant et puissance) et les courbe d'influences, finalement on doit parler sur les rendements dans la pile à combustible et comment calculer.

## II.2 Modélisation mathématique de la pile

La potentielle thermodynamique théorique d'un PEMFC est d'environ 1,23 à la pression atmosphérique avec une température de 25° [24]. Mais, lorsque la charge est connectée au FC, la tension FC diminuera par rapport à la tension théorique en raison des phénomènes de polarisation, ainsi que des pertes ou des baisses de tension causées par l'irréversibilité du système [25]. On peut distinguer trois formes de polarisation : polarisation d'activation, polarisation de résistance et polarisation de concentration. La tension de la pile à combustible ( $V_{PAC}$ ) est exprimée comme suit [26] :

$$V_{PAC} = n * (E_{nernst} - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc}) \quad (II.1)$$

Où  $n$  est le nombre de cellules élémentaires dans la pile,  $E_{nernst}$  est la tension de Nernst (V),  $V_{act}$  est la polarisation d'activation (V),  $V_{ohm}$  est la polarisation de résistance (V) et  $V_{conc}$  est la polarisation de concentration (V).

### II.2.1 Tension d'alimentation

Est une potentielle thermodynamique réversible de chaque pile à combustible. Cela représente la tension sans charge du PEM. Cette tension est exprimée comme suit [27] :

$$E_{nernst} = \frac{\Delta G}{2.F} - \frac{\Delta S}{2.F} (T - T_{ref}) + \frac{R.T}{2.F} \left[ \ln(P_{H_2}^*) + \frac{1}{2} \ln(P_{O_2}^*) \right] \quad (II.2)$$

Où  $\Delta G$  est le changement d'énergie libre (J/k.mol),  $\Delta S$  est le changement d'entropie (J/k.mol),  $F$  est le constant faraday (C/k.mol),  $T$  est la température de fonctionnement du PEM (k),  $T_{ref}$  est la température de référence (k) et  $R$  est la constante de gaz universelle (J/k.mol).

Lorsque nous substituons la valeur standard température et pression, l'équation devient simplifiée comme suit [26] :

$$E_{nernst} = 1.229 - 0.85 \times 10^{-3}(T - 298.15) + 4.31 \times 10^{-5} \times T \times \ln\left(P_{H_2}^* \sqrt{P_{O_2}^*}\right) \quad (II.3)$$

$$P_{H_2}^* = 0.5 \times RH_a \times P_{H_2O}^{sat} \left( \frac{1}{\frac{RH_a \times P_{H_2O}^{sat}}{P_{anode}} \exp\left(\frac{1.635 \left(\frac{I_{PAC}}{A}\right)}{T^{1.334}}\right)} - 1 \right) \quad (II.4)$$

$$P_{O_2}^* = RH_c \times P_{H_2O}^{sat} \left( \frac{1}{\frac{RH_c \times P_{H_2O}^{sat}}{P_{cathode}} \exp\left(\frac{4.192 \left(\frac{I_{PAC}}{A}\right)}{T^{1.334}}\right)} - 1 \right) \quad (II.5)$$

$$\log_{10}(P_{H_2O}^{sat}) = 2.95 \times 10^{-2}(T - 273.15) - 9.19 \times 10^{-5}(T - 273.15)^2 + 1.44 \times 10^{-7}(T - 273.15)^3 - 2.18 \quad (II.6)$$

Lorsque  $P_{H_2}^*$  est la pression fractionnée à l'interface de l'hydrogène (atm),  $P_{O_2}^*$  est la pression fractionnaire à l'interface de l'oxygène (atm),  $RH_a$  est l'humidité relative à l'anode,  $RH_c$  est l'humidité relative à la cathode,  $P_{anode}$  est la pression de l'hydrogène à l'anode(atm),  $P_{cathode}$  est la pression de l'oxygène à la cathode (atm) et  $P_{H_2O}^{sat}$  est la fraction mole de saturation de l'eau dans le gaz humidifié.

### II.2.2 Surtension d'activation

À de faibles densités de courant, associées à l'énergie d'activation nécessaire pour démarrer la réaction entre les gaz, l'oxygène à la cathode [28]. La relation entre les pertes d'activation et la densité actuelle présentée par Amphlett est donnée comme suit :

$$V_{act} = -[\xi_1 + \xi_2 \cdot T + \xi_3 \cdot T \cdot \ln([CO_2^*]) + \xi_4 \cdot T \cdot \ln(I_{PAC})] \quad (II.7)$$

$$[CO_2^*] = \frac{P_{O_2}^*}{5.08 \times 10^6 \cdot e^{(-498/T)}} \quad (II.8)$$

Où  $\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4$  est les coefficients paramétriques appropriés à chaque modèle physique de la PEM, le  $CO_2^*$  est le foyer d'oxygène sur la zone du catalyseur ( $mol/cm^3$ ) et  $I_{PAC}$  est le courant de fonctionnement de la PEM (A) [29].

### II.2.3 Surtension ohmique

À des densités de courant moyennes, causées par des pertes ohmiques dues à la résistance électrique des différents éléments de la PEM (électrolyte, électrodes) [30]. Nous pouvons exprimer en utilisant la loi d'Ohm par l'équation suivante :

$$V_{ohm} = I_{PAC} \cdot (R_m + R_c) \quad (II.9)$$

$$R_m = \frac{\rho_M \cdot l}{A} \quad (\text{II. 10})$$

$$\rho_M = 181.6 \cdot \frac{\left[ 1 + 0.03 \cdot \left( \frac{I_{PAC}}{A} \right) + 0.062 \left( \frac{T}{303} \right)^2 \left( \frac{I_{PAC}}{A} \right)^{2.5} \right]}{\left[ \lambda_{H_2O/SO_3^-} - 0.643 - 3 \cdot \left( \frac{I_{PAC}}{A} \right) \right] \cdot \exp \left[ 4.18 \frac{(T-303)}{T} \right]} \quad (\text{II. 11})$$

Lorsque  $R_C$  est la résistance de contact équivalente à la conduction des électrons ( $\Omega$ ),  $R_m$  est la résistance équivalente de la membrane à la conduction des protons ( $\Omega$ ),  $l$  est l'épaisseur de la membrane ( $\mu m$ ),  $A$  est la zone active de la PEM ( $cm^2$ ),  $\rho_M$  est la résistivité qualitative de la membrane ( $\Omega \cdot cm$ ) et  $\lambda_{H_2O/SO_3^-}$  est la teneur en eau de la membrane [29].

### II.2.4 Surtension de concentration

Également appelée polarisation de concentration se produit à des densités de courant élevées, causée par la variation de la concentration des réactifs (hydrogène ou oxygène) sur les électrodes, en particulier à la cathode [30]. Ces pertes sont données par la relation suivante :

$$V_{con} = -b \cdot \ln \left( 1 - \frac{J}{J_{max}} \right) \quad (\text{II. 12})$$

Où  $J$  est la densité de courant ( $A/cm^2$ ),  $J_{max}$  est la plus grande densité de courant ( $A/cm^2$ ) et  $b$  est la constante électrochimique (V) [31].

## II.3 Caractérisation de la PEMFC

### II.3.1 Plateforme de la caractérisation expérimentale

Après comprendre les propriétés et les dimensions du système de pile à combustible, nous avons mené des expériences au niveau LAGE du Laboratoire de Génie Electrique du Centre de Recherche Scientifique de l'Université de Kasdi Merbah Ouargla.

#### II.3.1.1 Maquette d'expérimentations (Fuel Cell Trainer)

Fuel Cell Trainer est le meilleur système pédagogique existant sur le marché pour enseigner la technologie de la pile à combustible. Fuel Cell Trainer d'Heliocentris convient parfaitement à l'enseignement des principes fondamentaux des systèmes à pile à combustible. Ses nombreuses capacités d'exploitation et son guide d'expérimentation en font un système de formation complet, aussi bien pour les enseignants (démonstration) que pour les étudiants.

Le système est très rapidement opérationnel, La conception modulaire du Fuel Cell Trainer permet aux utilisateurs d'étudier chaque composant de façon individuelle, puis dans son ensemble pour analyser le fonctionnement global d'un système d'alimentation à pile à combustible [32].

Le système contient :

- Piles à combustible PEM 50 W (refroidies par air, cathode ouverte).
- Interface USB.
- Afficheurs pour visualiser toutes les grandeurs.
- Logiciel intuitif et pédagogique.
- Mode automatique pour l'enregistrement.
- Instantané des valeurs et l'affichage des courbes.
- Mode manuel pour un relevé point par point.
- Supports pédagogiques complets.

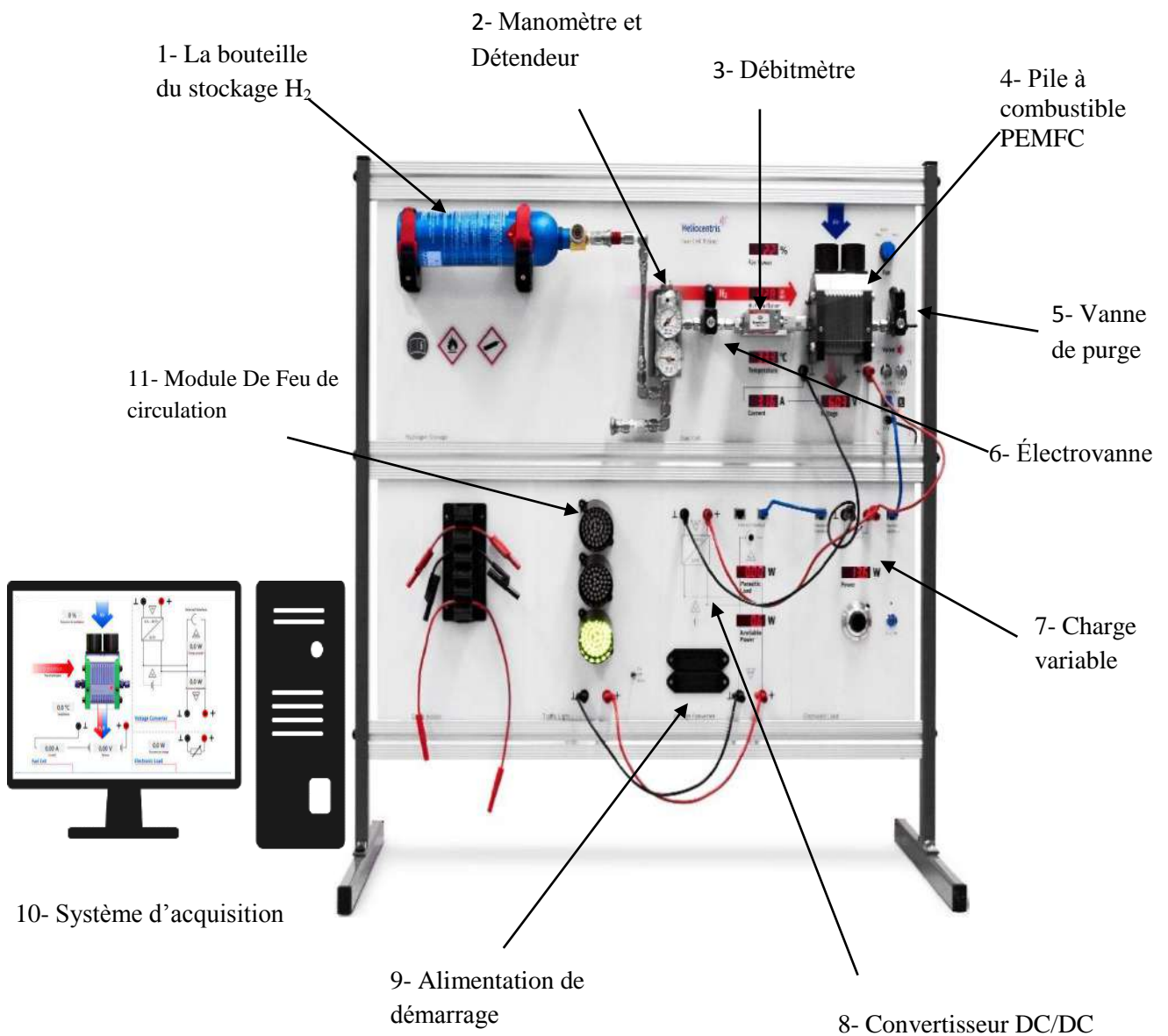


Figure II.1 : Maquette d'expérimentations.

Le système qui a été présenté dans la figure (II.1) est un système conçu la production de l'énergie électrique à l'aide d'une pile à combustible PEMFC de 50 W. Cette dernière est alimentée par l'hydrogène solaire. Les différents dispositifs et d'auxiliaires de ce système seront présentés par les sous-systèmes ci-dessous :

- **Module de stockage H2**

Le réservoir à hydrures métalliques avec régulateur de pression à deux étages assure l'alimentation sécurisée en hydrogène de la pile à combustible de 50 W.



Figure II.2 : Bouteille de stockage H2.

- **Module de pile à combustible**

Comprenant un bloc de piles à combustible PEM de 50 W, un contrôleur, un débit mètre d'hydrogène, une vanne de purge et un ventilateur réglable. Les cinq afficheurs permettent d'observer l'évolution de la température, le courant, la tension, le débit H2 et le débit d'air.

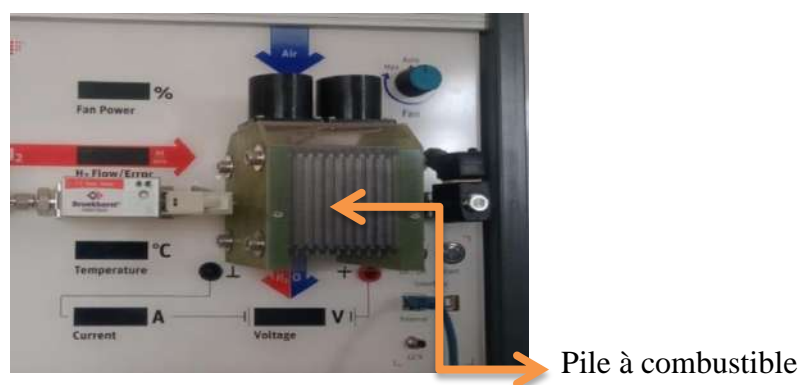


Figure II.3 : Pile à combustible.

- **Module de convertisseur DC/DC**

Ce module convertit la tension de sortie de la pile à combustible en une tension régulée de 12 V, autorisant l'alimentation d'une charge 12 V. Il comprend des afficheurs permettant de mesurer la charge, les pertes parasites et la puissance disponible.

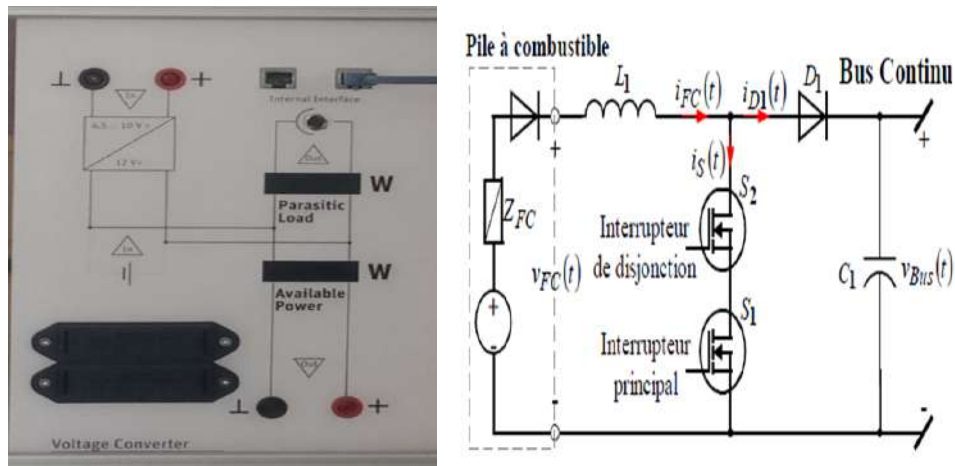


Figure II.4 : Convertisseur DC/DC.

- **Module de charge électronique**

La charge électronique permet à l'utilisateur de faire varier le courant et d'examiner ses effets sur le système. Elle peut être contrôlée manuellement ou via le logiciel.



Figure II.5 : Module de charge électronique

- **Module de feu de circulation**

Le module de feu de circulation, comme charge de 12 V avec trois modes de fonctionnement.

- **Détendeur**

Est un dispositif qui assure la réduction de la pression, donc le débit aussi.

- **Manomètre**

Est un dispositif consisté à mesurer la pression d'entrée de la pile à combustible et la bouteille qui stocke l'hydrogène.



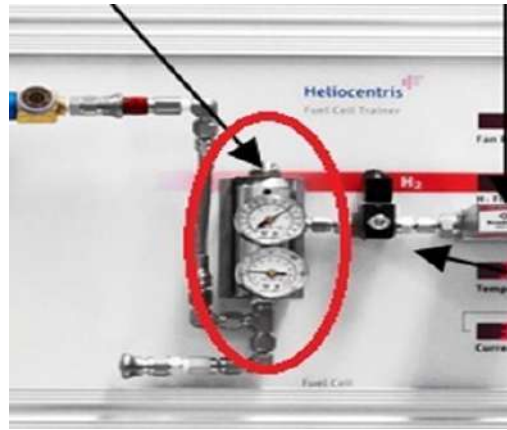


Figure II.6 : Détendeur et manomètres.

- **Ventilateur**

Qui assure le refroidissement de stack de la pile à combustible.

- **Vanne de purge**

Afin d'assurer le bon fonctionnement de la pile elle doit être pure à l'intérieur du stock, quand il est nécessaire, il y a une purge de divers gaz dans l'air parce que nous avons besoin seulement d'oxygène.

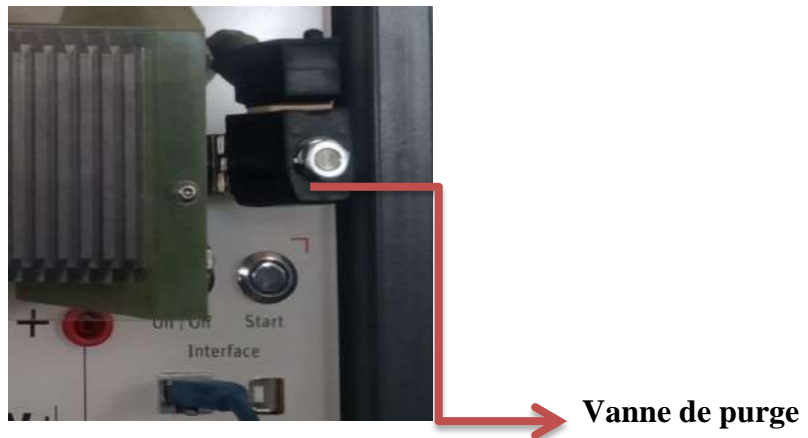


Figure II.7 : Vanne de purge.

- **Électrovannes** : qui assurent l'alimentation de la pile à combustible par l'hydrogène, ou bien l'inverse.

- ❖ **Accessoire**

Les accessoires sont des dispositifs ou des éléments complémentaires du système, soit les éléments de canalisation, commande, mesure...etc.

- **Kit de connexion H2**

Régulateur de pression pour les bouteilles de gaz comprimé standard de 200 bar afin de remplir le réservoir à hydrures métalliques.

➤ **Câbles électriques de connexion :**

Qui sont divisées en deux types, de puissance et commande, les câbles de commande assurent le fonctionnement des électrovannes lors du démarrage à travers une batterie externe ou par les batteries du système.

➤ **Détecteur de fuite d'hydrogène:**

Est un dispositif pour mesurer la quantité dans l'air, si cette quantité égale à ou supérieure à 100 PPM, donc il va actionner avec une alarme visuelle, vibrante et sonore.

[32].

### II.3.1.2 Système d'acquisition

Le logiciel est conçu pour faciliter le contrôle du système, l'acquisition de donnée et la représentation graphique des données recueillies. Ses fonctions principales est :

» Visualisation du système physique, idéale pour les présentations et les expériences dans le cadre d'un travail de groupe.

» Affichage numérique et graphique en temps réel des paramètres système débit d'hydrogène, température de la pile à combustible, courant et tension...etc.

» Mode Expérimentation automatique autorisant l'enregistrement et l'affichage des courbes de manière automatique.

» Mode Expérimentation manuel, pour l'enregistrement des points et l'analyse approfondie de profils de charge et de plusieurs facteurs influents, tels que la température ou l'alimentation en oxygène [32].

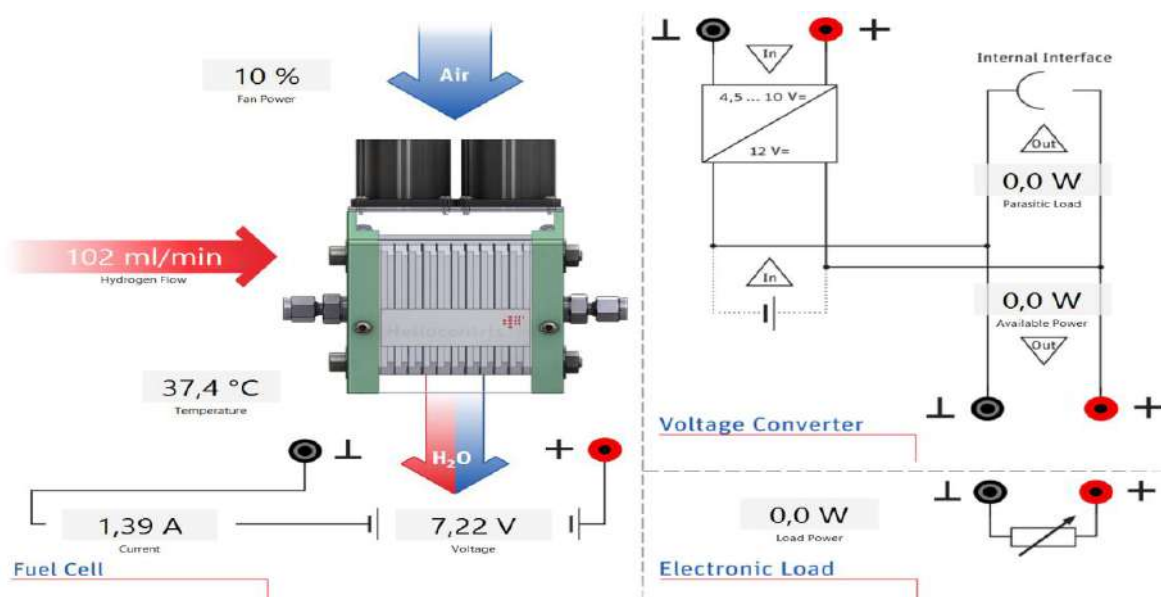


Figure II.8 : Interface de logiciel de fuel cell trainer [32].

## II.4 Courbe caractéristique tension-courant

A l'aide des données stockées dans le système d'acquisition, les caractéristiques tension-courant (V-I) de la pile à combustible (Heliocentris FC50) ont été tracées comme illustré à la figure (II.9).

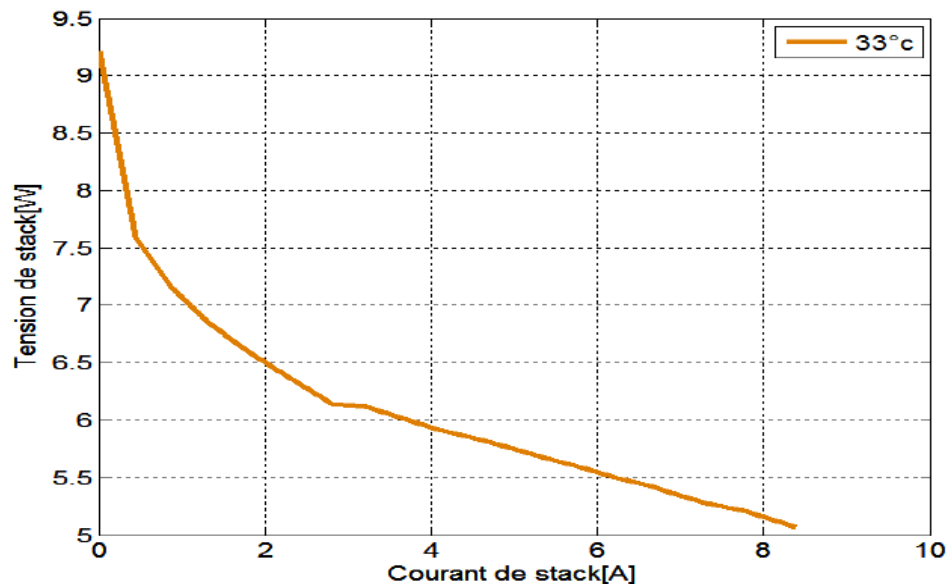


Figure II.9 : Courbe de caractérisation  $V = f(I)$ .

La Figure (II.9) présente une tension en circuit ouvert de l'ordre de 9,21V, on constate que la tension de la cellule est inversement proportionnelle avec le courant due aux pertes internes de la cellule. On peut distinguer sur la courbe caractéristique de la pile PEMFC, trois zones de polarisation, de 0 à 0,44 A environ zone de polarisation d'activation due au transfert de charges à l'interface électrode/électrolyte (dus la lenteur de la réaction chimique a la surface de l'électrode), de 0,44 à 2,81 environ zone de polarisation de résistance qui est la résultante de la résistance électrique des différents éléments de la pile et surtout de l'électrolyte. 2,81 à 8.39 environ zone de polarisation de diffusion qui dépend de la concentration de l'électrolyte autour des électrodes. La valeur maximale atteinte au cours de cette étude était de 8,39A. Cette valeur correspond presque à la limite de courant que la cellule peut fournir.

## II.5 Courbe caractéristique puissance-courant

A l'aide des données stockées dans le système d'acquisition, les caractéristiques puissance-courant (P-I) de la pile à combustible (Heliocentris FC50) ont été tracées comme illustré à la figure (II.10).

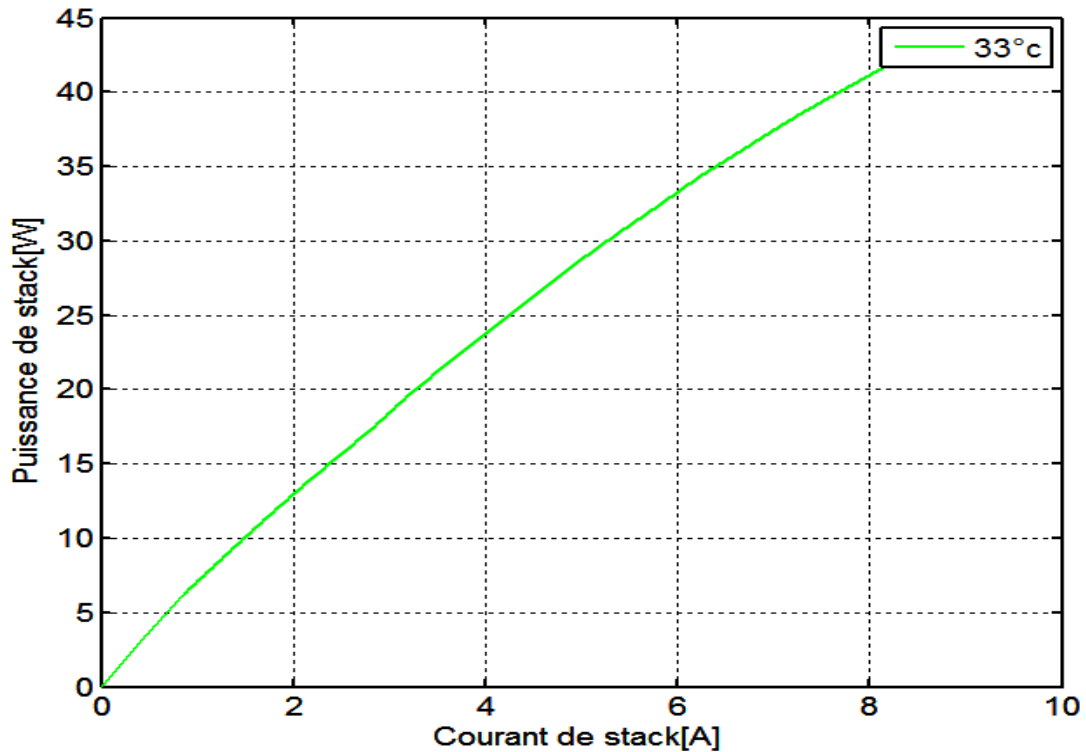


Figure II.10 : Courbe caractérisation  $P=f(I)$ .

Nous remarquons que la puissance d'une pile à combustible augmente progressivement pour passer par un maximum à un certain temps mais généralement elle diminue de nouveau. Et un courant de 8,39 A pour la pile produite à environ 42 W. Le point le plus élevé de la courbe n'est pas le point de fonctionnement de la pile, c'est-à-dire qu'il ne peut pas fonctionner à sa puissance maximale, car le rendement de la cellule est faible et la production d'eau augmente et la température augmente à ce point, ce qui rend difficile le pilotage de la pile. Nous avons également remarqué qu'il existe une différence entre la puissance de sortie et la puissance de la pile en raison des pertes consommées par les auxiliaires de PAC.

## II.6 Influence de l'alimentation en air sur la courbe de tension

A l'aide des données stockées dans le système d'acquisition, la caractéristique de l'alimentation en air -courant (P-I) de la pile à combustible (Heliocentris FC50) ont été tracées comme illustré à la figure (II.11).

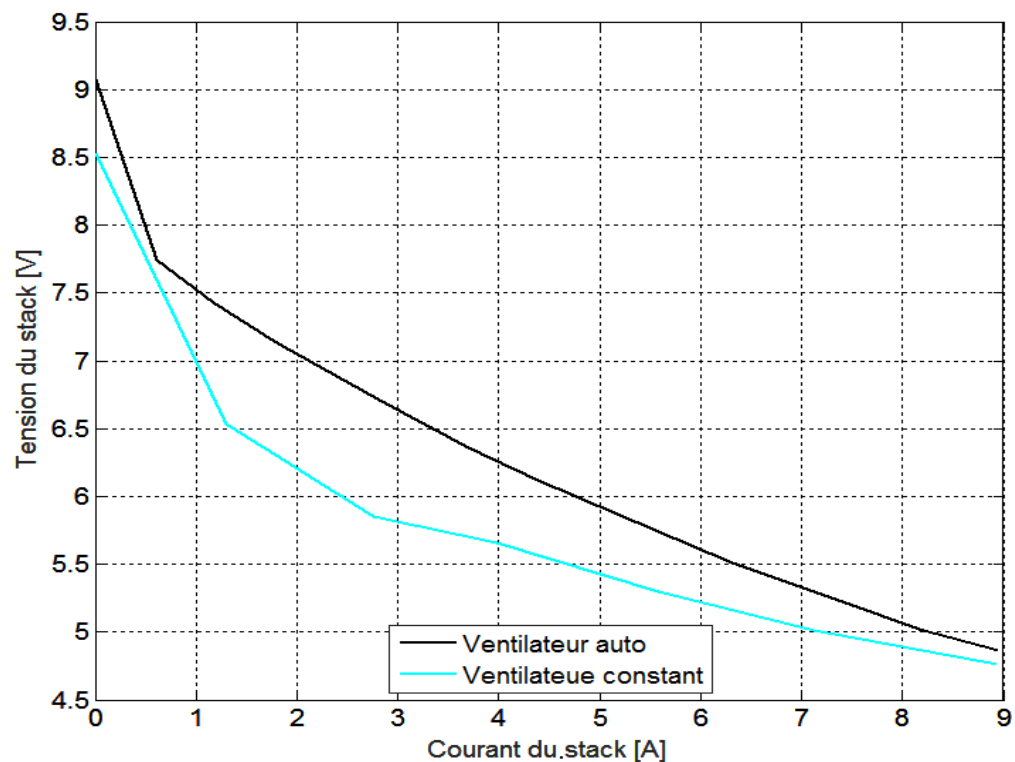


Figure II.11 : Courbe de caractérisation  $U = f(I)$  avec différentes gestion d'air.

Nous savons que les ventilations assurant l'entrée de l'air dans la pile, permettent le refroidissement de celle-ci. Le système de pilotage peut régler la vitesse du ventilateur. Dans une première expérience, nous avons ajusté l'air de 5 % et dans la deuxième nous avons assuré la gestion de l'air automatiquement. Nous remarquons que la chute de tension dans la courbe de ventilateur constant 5% est supérieure au courbe ventilateur auto, cette chute de tension à cause de le manque de quantité d'air nécessaire, En conclure que lorsque le courant augment le besoin d'air augment aussi. Car lors de la génération d'un courant plus important, une plus grande quantité d'hydrogène entre dans la pile à combustible où la pile a besoin de plus d'air pour réagir avec cette quantité.

## II.7 Influence de l'alimentation en air sur la courbe de puissance

A l'aide des données stockées dans le système d'acquisition, la caractéristique de l'alimentation en air -puissance de la pile à combustible (Heliocentris FC50) ont été tracées comme illustré à la figure (II.12).

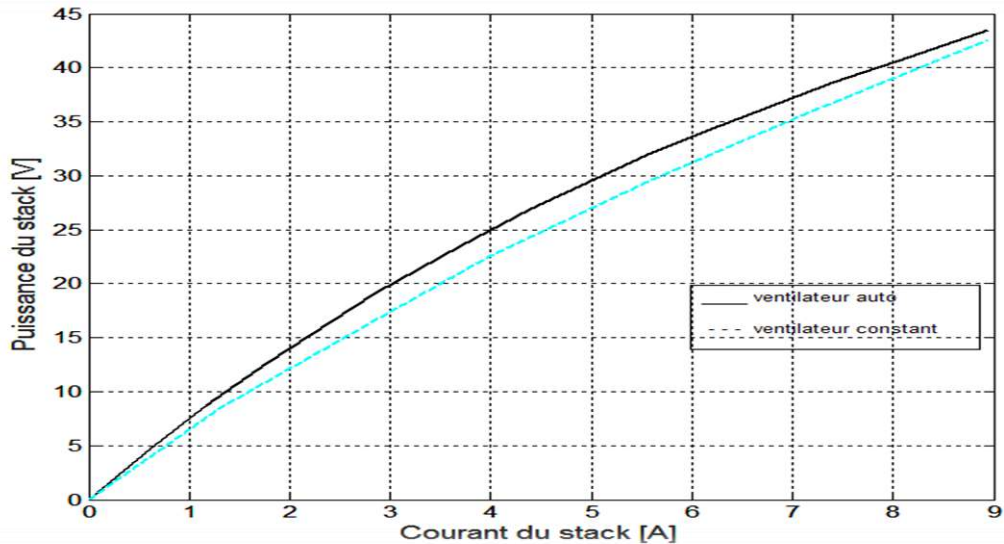


Figure II.12 : Courbe caractérisation  $P = f(I)$  avec différentes gestion d'air.

Nous remarquons que la courbe de puissance courant avec ventilation de 5% est située à une position inférieure à la courbe avec ventilation auto. Ce décalage à cause de la déférence entre l'air intérieur dans les deux cas. Donc on peut dire pour une bonne performance de la pile ont utilisé la ventilation auto.

## II.8 Influence de la température sur la courbe de tension

La Figure (II.13) montre les courbe U-I de la pile à combustible à différentes températures.

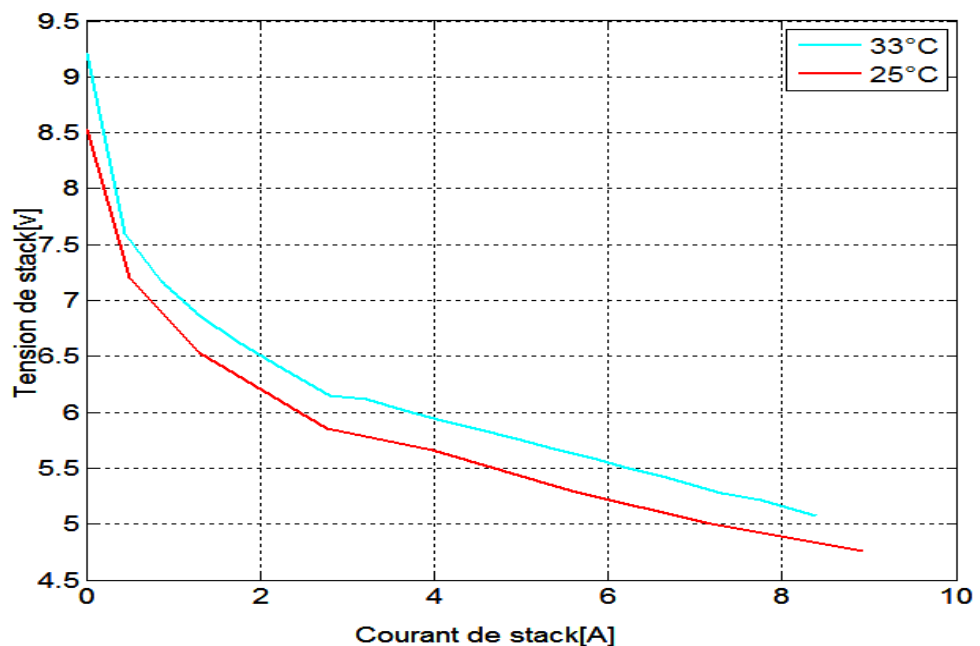


Figure II.13: Courbe de caractérisation  $V = f(I)$  avec différentes températures.

La figure (II.13), représente les caractéristiques de la pile à combustible pour deux températures différentes. En remarque que la courbe  $T_1 = 33^\circ\text{C}$  est situé à une position supérieur que la courbe de  $T_2 = 25^\circ\text{C}$  on peut dire que l'augmentation de température amélioré les performances de la pile à combustible. Car la réaction chimique qui se produit dans la pile est soumis à un procédé catalytique, qui est toujours accéléré par des températures élevées, par lequel aussi la réaction totale peut survenir plus rapidement.

## II.9 Influence de la température sur la courbe de puissance

La figure si dessus représente l'effet de température sur la courbe puissance.

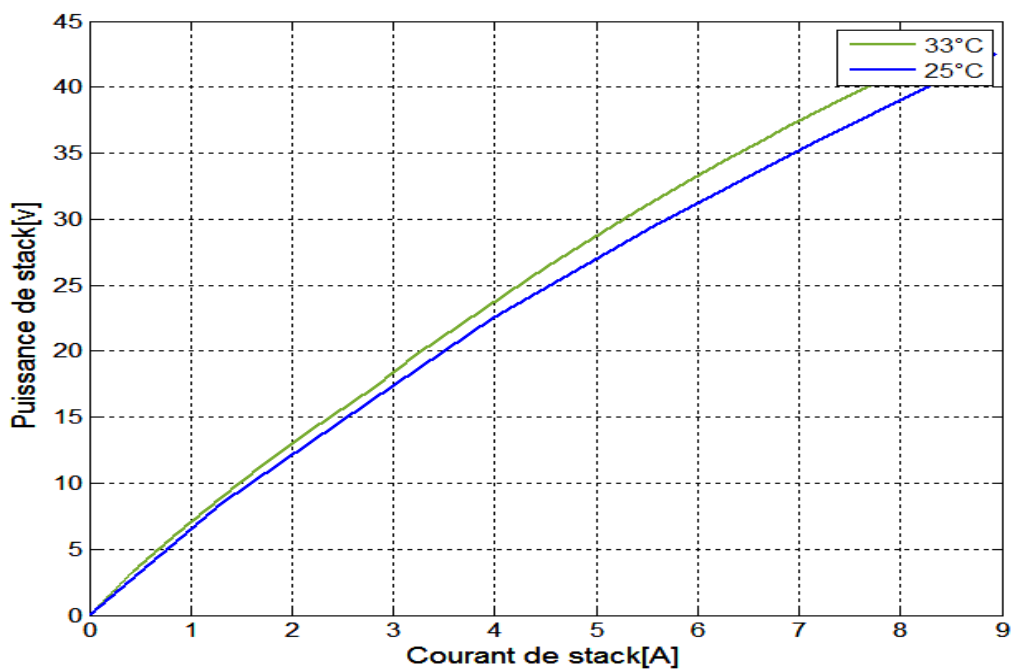


Figure II.14 : Courbe caractérisation  $P = f(I)$  avec différentes température.

En remarque que la courbe de puissance courant à température  $25^\circ\text{C}$  est situé à une position inférieur que la courbe de  $33^\circ\text{C}$ . Donc la relation entre la puissance et la température relation parce que linéaire lorsque la température augment la puissance augment aussi.

## II.10 Courbe caractéristique hydrogène-courant

En utilisées les données stockées pour calculer la relation entre le courant de la pile combustible et la consommation d'hydrogène, comme le montre la Figure (II.15).

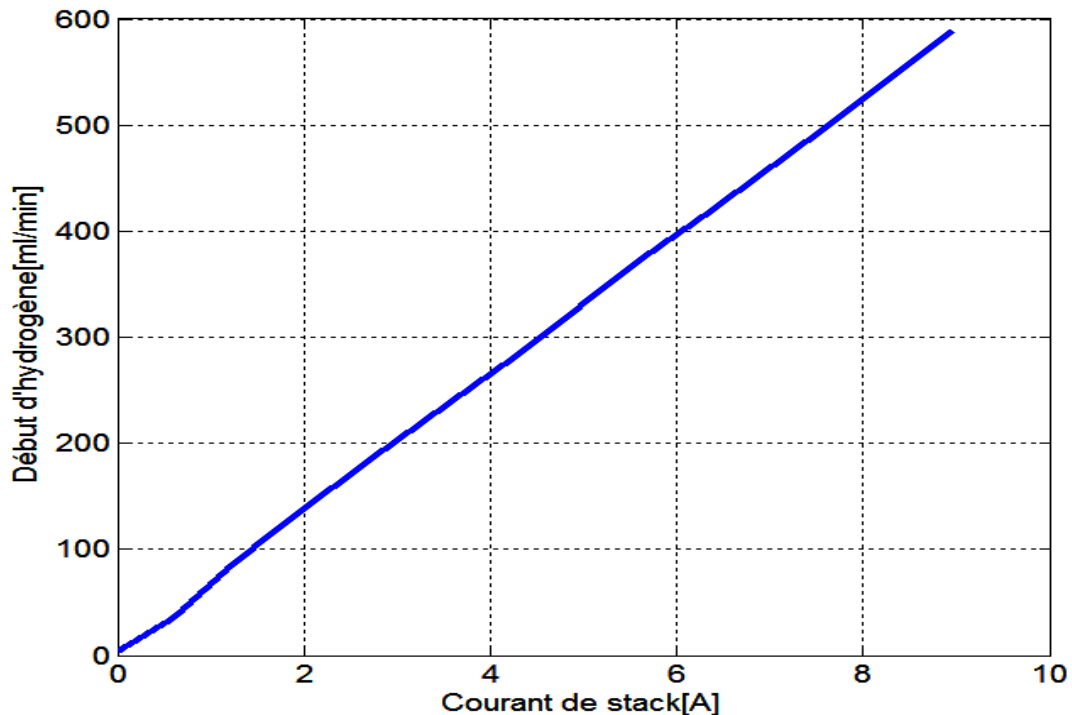


Figure II.15: Courbe de consommation d'hydrogène en fonction du courant.

En déduisant de la figure (II.15) nous notons que le débit de l'hydrogène est proportionnellement variable avec le courant (relation linéaire). Il y a 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.

## II.11 Rendement d'une pile à combustible

En définissant le rendement électrique  $\eta_{\text{élec}}$  d'une pile à combustible PEMFC comme le rapport entre l'énergie électrique produite sur l'énergie chimique consommée, en cas où l'eau formée est liquide, le rendement maximal du PEM à 25°C est 83% en cas de la vapeur d'eau est 95%. Une évolution typique de ce rendement électrique dans nos travaux est représentée sur la figure (II.16). Sur cette figure on voit que le rendement électrique le plus élevé peut être obtenu pour des courants inférieurs à 2,5A, donc pour de faibles puissances électriques. Afin d'obtenir la puissance électrique la plus élevée, il est nécessaire de travailler à des valeurs de courant plus élevées, ce qui compromet le rendement électrique.



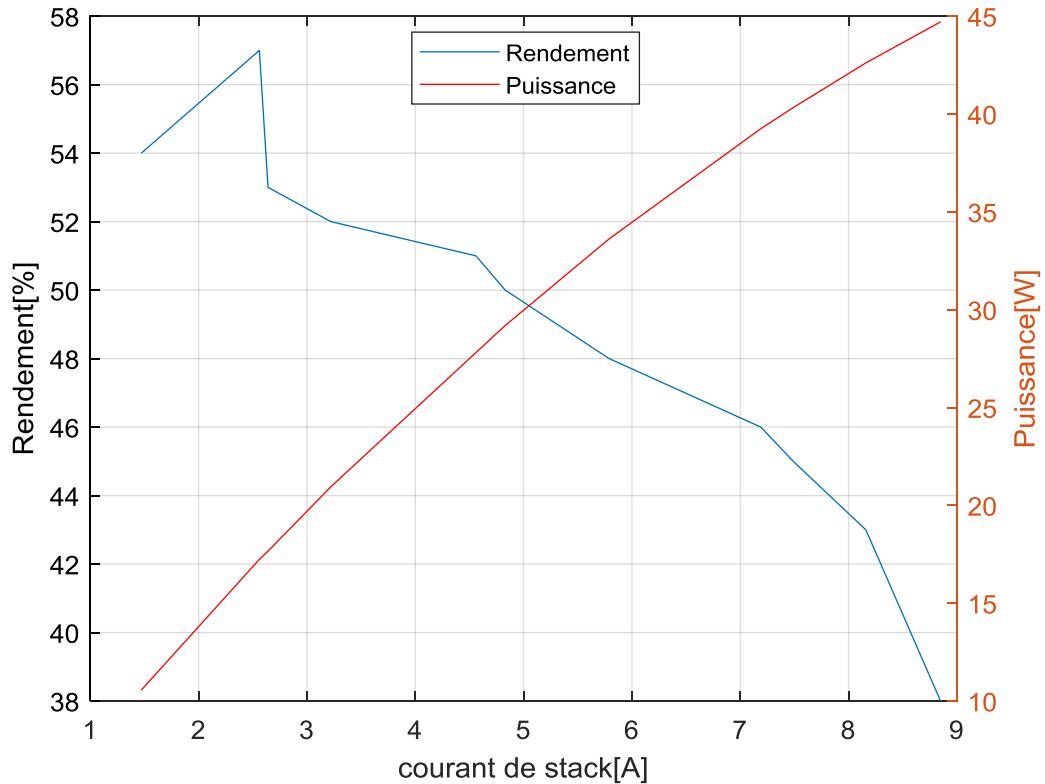


Figure II.16: Rendement électrique de la PAC.

La figure (II.16) 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. Donc Dans la conception des piles à combustible, il est nécessaire de choisir entre un rendement maximum ou la puissance maximale.

### II.12 Rendement du stack

Le rendement de pile à combustible PEM il se calcul comme suite, en fonction de la puissance produite  $P_{stack}$  et celle fournie  $P_{in}$ . La puissance de sortie  $P_{stack}$  est le produit de la tension  $V_{stack}$  et le courant  $I_{stack}$  de la pile à combustible, elle est donnée par :

$$P_{stack} = V_{stack} * I_{stack} \tag{II.13}$$

La puissance d'entrée  $P_{in}$  est le produit du pouvoir calorifique inférieur PCI et le débit molaire de l'hydrogène  $V_{H_2}$ , elle est donnée comme suit :

$$P_{in} = PCI * V_{H_2} \tag{II.14}$$

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

$$\eta_{stack} = \frac{P_{stack}}{P_{in}} = \frac{V_{stack} * I_{stack}}{PCI * V_{H_2}} \tag{II.15}$$

Sachant que:  $PCI = 10800 \text{ KJ/m}^3$

### II.13 Rendement de la tension

Le rendement de tension est la relation entre la tension de la cellule et la tension de référence [33] :

$$\eta_V = \frac{V_{\text{stack}}}{a * V_{\text{rev LHV}}} \quad (\text{II.16})$$

### II.14 Rendement du courant

L'efficacité du courant est égale à la relation entre le courant de la pile et théoriquement courant possible [33] :

$$\eta_I = \frac{I_{\text{stack}}}{I_{\text{th}}} \quad (\text{II.17})$$

Le courant théoriquement possible se calcule comme suite :

$$I_{\text{th}} = \frac{V * F * Z}{a * V_m} \quad (\text{II.18})$$

Avec :

$$F = 9.6648 * 10^4 \text{ [C/mol]}$$

$$V_m = 22.4 \text{ l/mol}$$

Z= le nombre d'électrons par conversion de molécule dans la réaction.

### II.15 Conclusion

Dans ce chapitre, en premiers lieu nous avons appris les équations mathématiques que caractérisent les piles à combustibles PEM, et ont essayé de caractériser expérimentalement un système de pile à combustible, PAC. Par le traçage des caractéristique courant-tension de la pile pour différentes températures et aussi nous avons traces la caractéristique puissance-courant, par la suite nous avons traçais l'influence avec différents paramètres. Ces courbes donnent une image plus claire de la compréhension de la performance des piles à combustible de sorte que les meilleures conditions doivent être remplies pour que ces cellules puissent travailler au meilleur rendement.

Le chapitre prochain on doit essayer d'appliquer la PEMFC en véhicule électrique.

# CHAPITRE : III

## *Application de la PEMFC dans les véhicules électriques*

### III.1 Introduction

Compte tenu des problèmes de pollution causés par les véhicules fossiles par leur émission de gaz, il est nécessaire de chercher des moyens de faire face à ce fléau. Les experts sont à la recherche de sources d'énergie alternatives et propres. Les voitures à hydrogène sont l'une de ces solutions.

Les véhicules à hydrogène sont un type de véhicule basé sur des carburants alternatifs à base d'hydrogène pour l'énergie. Les véhicules à hydrogène comprennent les fusées spatiales à hydrogène, ainsi que les voitures et autres véhicules de transport. L'énergie est générée en convertissant l'énergie chimique de l'hydrogène en énergie mécanique, soit en faisant réagir l'hydrogène avec de l'oxygène dans une pile à combustible pour alimenter des moteurs électriques, soit en brûlant de l'hydrogène dans un moteur à combustible interne [34].

Dans ce chapitre, nous étudierons et analyserons l'application de la pile à combustible dans les voitures à hydrogène dans la région d'Ouargla. Dans cette région, il n'y a pas de stations de production d'hydrogène, nous avons étudié et dimensionné une petite station solaire pour produire de l'hydrogène.

### III.2 Véhicule à hydrogène

Au cours des dernières années, les constructeurs automobiles ont reconnu la nécessité de protéger l'environnement et de conserver les ressources naturelles. Ils ont pris les devants en développant de nouvelles technologies de groupe motopropulseur plus propres, plus efficaces et plus accessibles aux consommateurs sur les marchés mondiaux.

Avec les avantages des piles à combustible comme zéro pollution et très efficace par rapport au moteur des véhicules automobiles d'aujourd'hui, cette technologie représentera une nouvelle ère dans l'industrie automobile. Les piles à combustible à bord du véhicule produisent de l'électricité par un procédé chimique utilisant de l'hydrogène et de l'oxygène de l'air, avec zéro émission.

L'hydrogène est l'élément le plus abondant dans l'univers. Il est lui-même renouvelable, et peut également être produit à l'aide d'énergies renouvelables comme l'énergie solaire et éolienne. Utilisé avec succès et en toute sécurité dans les processus industriels depuis des générations. Récemment, l'attention s'est tournée vers la limitation du réchauffement

L'hydrogène permettant la transformation énergétique nécessaire a été reconnue. L'énergie à base d'hydrogène pourrait:

- Permettre l'intégration à grande échelle des énergies renouvelables pour la production d'électricité.
- Distribuer l'énergie entre les secteurs et les régions.
- Agir comme tampon pour accroître la résilience du système énergétique.
- décarbonater la consommation d'énergie industrielle.
- Aider à décarbonater le chauffage et l'électricité des bâtiments.
- Fournir des matières premières propres à l'industrie.
- Décarbonater le transport [35].



Figure III.1: Véhicule propre à l'hydrogène.

### III.2.1 DÉFIS DE LA FCV

Tous les défis, techniques et autres, doivent être surmontés avant les véhicules à pile à combustible sera une solution de recharge concurrentielle et fructueuse pour les consommateurs.

- Stockage à bord de l'hydrogène : Difficile de stocker suffisamment d'hydrogène à bord d'un FCV pour lui permettre de voyager aussi loin qu'un véhicule conventionnel sur un réservoir plein de carburant.
- Fonctionnement par temps froid : Peut également être problématique puisque les systèmes à pile à combustible contiennent toujours de l'eau, à la fois comme sous-produit et pour humidifier la pile à combustible, qui peut geler à basse température.

- Acheminer l'hydrogène aux consommateurs : Le vaste système utilisé pour acheminer l'essence des raffineries aux stations-service locales ne peut servir au transport et au stockage de l'hydrogène. Il faudra de nouvelles installations et de nouveaux systèmes pour acheminer l'hydrogène aux consommateurs, ce qui exigera beaucoup de temps et d'argent.
- Coût : Les fabricants devront trouver des moyens efficaces et rentables de produire des FCV et les systèmes de piles à combustible qu'ils utilisent.
- Sécurité : L'hydrogène, comme l'essence ou tout autre carburant, présente des risques pour la sécurité et doit être manipulé avec prudence Concurrence avec d'autres technologies : Les fabricants continuent d'améliorer l'efficacité des moteurs à essence et diesel, et des hybrides à essence électrique gagnent en popularité [35].

Tous les défis, techniques et autres, doivent être surmontés avant les véhicules à pile à combustible sera une solution de recharge concurrentielle et fructueuse pour les consommateurs. Les grands constructeurs automobiles dirigent vers l'hybridation pour minimiser ces défis.



Figure III.2: Voiture à hydrogène.

### III.3 Nouveau cycle européen de conduite

Le NCEC se compose de deux profils de charge partielle. Jusqu'à  $t=780$  s, le cycle urbain élémentaire (ECE-15- Urban Driving Cycle) est reproduit quatre fois à une vitesse maximale de 50 km/h. Entre  $780 \text{ s} < t < 1180 \text{ s}$ , le cycle extra-urbain (EUDC- Extra Urban Driving Cycle) est reproduit.

### III.3.1 Hypothèse d'étude

L'exemple de véhicule simulé possède une puissance du moteur de 30 kW. Donc, la puissance électrique simulée du véhicule est convertie du [kW] en [W] sur le Fuel Cell FC50 Tableau (1).

Paramètres techniques de PEMFC-50 W	
Stack paramètres	valeur
Nombres de la cellule singulière	10
Puissance maximale [W]	50
Cellule sectionnelle brute [cm <sup>2</sup> ]	25
$I_{\max}$ [A]	10
Epaisseur de la membrane [um]	27
Température de fonctionnement maximum [°C]	50
Pression d'anode nominale [bar]	0.6 +/- 0.1

Tableau III.1: Paramètres techniques de PEMFC 50W.

### III.4 Analyse d'un véhicule à pile à combustible

Notre système sert à alimenter un véhicule à pile à combustible dans la vie d'Ouargla alimentée par hydrogène solaire photovoltaïque présenté dans la figure suivante :

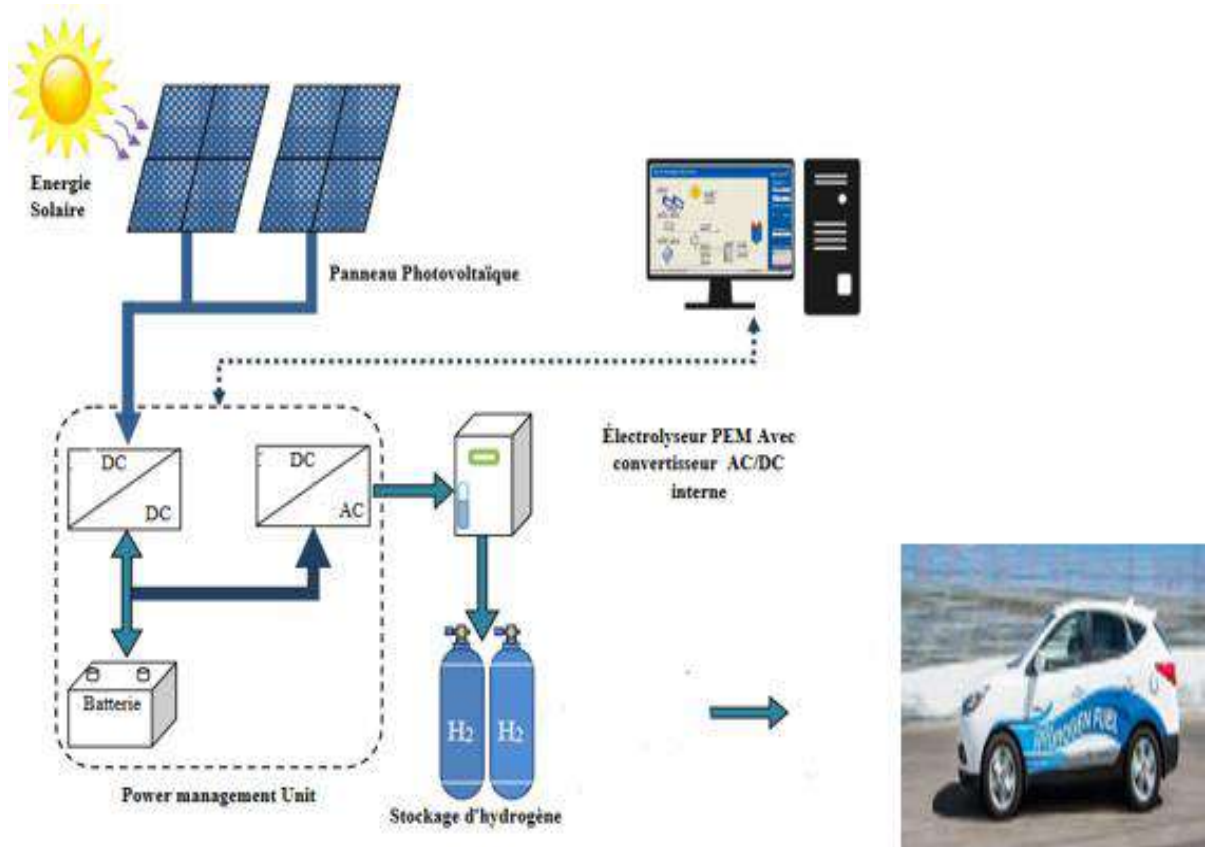


Figure III.3 : Système photovoltaïque/ pile à combustible.

Cette figure présente un système photovoltaïque et pile à combustible. Le système s'appuie sur des panneaux photovoltaïques pour produire un courant électrique grâce à la lumière de soleil. Cette courant passant par l'analyseur d'eau pour séparer l'oxygène et l'hydrogène. Cet hydrogène est stocké dans des réservoirs spéciaux qui, à leur tour, alimente la pile à combustible du véhicule. Le système est également équipé d'une batterie qui stocke un courant électrique pour une utilisation pendant la nuit pour assurer la production d'hydrogène tout au long de la journée.

#### III.4.1 Détermination de la profile de charge du véhicule

- La vitesse simulée du véhicule selon le nouveau cycle européen de conduite, est présenté comme suite :



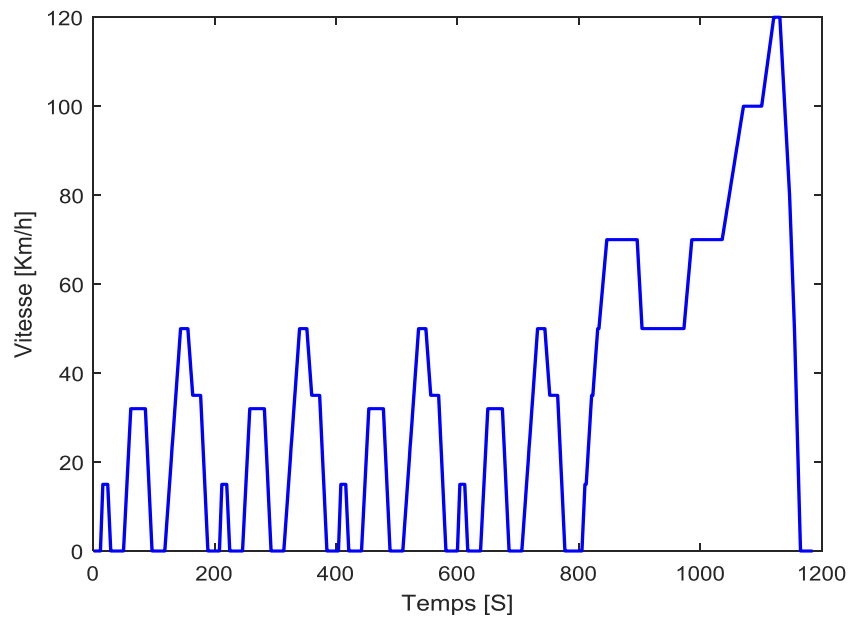


Figure III.4 : Vitesse simulée du véhicule

Pour faire le dimensionnement on suppose que le distance totale égale 11016.63 m durent une temps de 1180 s, la vitesse moyenne presque 33.6 Km/ h, la vitesse maximale est 120 Km/h. l'automobile arrête 14 fois la durée moyenne d'arrêt environ 17.21 s.

- Le diagramme de la puissance de charge électrique (véhicule), est une charge variable qui change (0 à 30 KW) comme le montre le diagramme suivant :

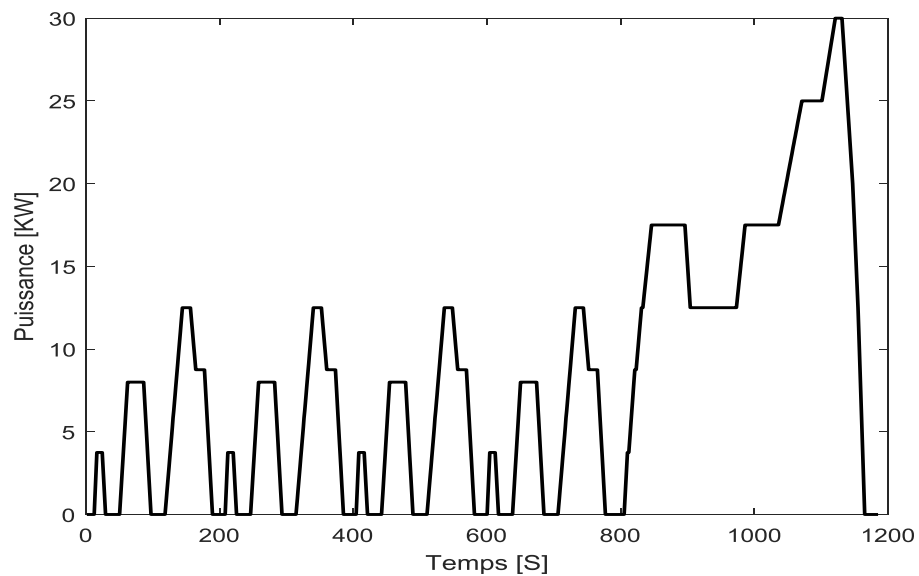


Figure III.5 : Puissance de charge électrique

Comme nous avons dites précédemment, l'exemple de véhicule simulé possède une puissance du moteur de 30 KW. La puissance électrique simulée du véhicule est convertie du [kW] en [W] sur la pile à combustible FC50.

### III.4.2 La consommation d'énergie

La consommation d'énergie électrique pendant le cycle de conduite, une distance d'environ 11016.63 m est parcourue, calculer comme suivant :

Méthode 1 :

$$E = \int_0^{1200} p \text{ charge } dt \quad (\text{III.1})$$

Méthode 2 :

Au niveau du FC50 à partir la figure (II.10), (Caractéristique I-P) une énergie d'environ 9 Wh est transformée pendant le profil de charge.

### III.4.3 La consommation d'hydrogène

A partir la figure (II.15) (Caractéristique I-H2) une énergie d'environ 9 Wh, implique une consommation d'hydrogène de 0,3 l/min.

Par l'utilisation du facteur de conversion : 1 W du FC50 = 1 kW du véhicule simulé. Donc pour le véhicule simulé, on obtient une consommation d'énergie électrique de 9 kWh et une consommation d'hydrogène de 300 l/min.

$$\eta_{FC} = \frac{E_{\text{éle}}}{E_{H_2}} \quad (\text{III.2})$$

$$\eta_{FC} = 0.5 \text{ (Pour } p = 30 \text{ W sur FC50)} \quad (\text{III.3})$$

$$E_{H_2} = \frac{9 \text{ Wh}}{0.5} = 18 \text{ Wh} \quad (\text{III.4})$$

Par l'utilisation du facteur de conversion

$$E_{H_2} = 18 \text{ kWh}$$

$$E_{H_2} = 64.8 \text{ MJ}$$

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

Volume de l'hydrogène consommé par la pile à combustible :

$$V_{H_2} = \frac{E_{H_2}}{PCI} = 6 \text{ m}^3 \quad (\text{III.5})$$

## III.5 Dimensionnement d'une mini station de production d'hydrogène solaire

### III.5.1 Energie solaire

#### III.5.1.1 Définition

L'énergie solaire photovoltaïque (ou énergie photovoltaïque ou EPV) est une énergie électrique produite à partir du rayonnement solaire grâce à des panneaux ou des centrales solaires photovoltaïques. Elle est dite renouvelable, car sa source (le Soleil) est considérée comme inépuisable à l'échelle du temps humain. En fin de vie, le panneau photovoltaïque aura produit 20 à 40 fois l'énergie nécessaire à sa fabrication et à son recyclage.

#### III.5.1.2 Panneau photovoltaïque

Un panneau solaire est un dispositif convertissant une partie du rayonnement solaire en énergie thermique ou électrique, grâce à des capteurs solaires thermiques ou photovoltaïques respectivement [36].



Figure III.6: Panneaux photovoltaïques.

#### III.5.1.3 Principe de fonctionnement des panneaux solaire

Un matériau comme le silicium possède la propriété de générer de l'électricité quand il reçoit la lumière du soleil, c'est l'effet photovoltaïque, découvert par Becquerel en 1839.

Le silicium est capable de créer de l'électricité lorsqu'il reçoit la lumière du soleil, c'est ce que l'on appelle l'effet photovoltaïque. Ce dernier est appliqué dans les cellules photovoltaïques.

L'énergie des photons de la lumière solaire est transmise aux électrons du matériau semi-conducteur. Puis, les électrons se mettent en mouvement et génèrent un courant électrique diffusé par une grille métallique très fine. Chaque cellule crée une petite quantité d'électricité. La lumière solaire et la durée d'exposition conditionnent ainsi la production d'un module photovoltaïque [36].

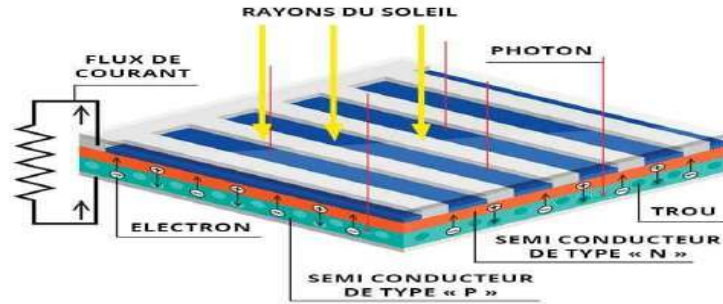


Figure III.7: Principe de fonctionnement de cellules photovoltaïque.

Pour cela dans cette section nous déterminons l'énergie consommée par l'électrolyseur, la puissance du générateur photovoltaïque et la capacité de batterie associée à installer, à partir des données d'ensoleillement du lieu d'Ouargla.

### III.5.2 Dimensionnement de la charge (électrolyseur)

L'électrolyseur utilise comme une charge électrique dans cette étude, pour produire de l'hydrogène nécessaire.

L'électrolyse est un processus d'échange au cours duquel l'énergie électrique est transformée en énergie chimique. La technique de l'électrolyse, consistant à faire passer un courant électrique dans l'eau pour craquer l' $H_2O$  en  $H_2$  et  $O_2$  semble plus vertueuse. À condition que l'électricité produite soit décarbonée, sans quoi, on reste dans la zone grise. Pour avoir de l'hydrogène vert il faut donc utiliser uniquement de l'électricité issue d'énergies renouvelables. Sans  $CO_2$  donc. Pareil pour l'hydrogène rose. Mais l'anxiété liée aux centrales nucléaires et au traitement de leurs déchets radioactifs [37].

Le dimensionnement d'un système de production d'hydrogène, pour le but de fournir de l'hydrogène pour la pile à combustible qui alimente les véhicules électriques toute la journée.

- En choisi pour notre étude le model PEM 1920W:



Figure III.8 : Générateur hydrogène P= 1920 W.

Les caractéristiques techniques de l'électrolyseur PEM 1920 W qui nous avons choisi dans l'annexe (Tab 1).

- Le réservoir d'hydrogène a choisi (MHS-400)\*3.



Figure III.9: Réservoir d'hydrogène.

Les caractéristiques techniques de réservoir dans l'annexe (Tab 2).

Avant d'étudier un système d'énergie renouvelable, il faut étudier le potentiel climatique de la région :

### III.5.3 La base des données climatiques de station de METO (2020)

La durée d'insolation de (2020) de l'ONM d'Ouargla. La valeur moyenne annuelle de la durée d'insolation pendant (2020) présenté dans ce tableau :

Paramètres Mois	T MIN (C°)	T MAX (C°)	T MOY (C°)	V (m/s)	H (%)	EVP (mm)	P (mm)	INS (h)
<b>Janvier</b>	4,58	19,41	12,00	7,90	52,30	101,09	2,09	255,36
<b>Février</b>	6,43	20,94	13,69	9,30	45,90	122,08	3,53	242,05
<b>Mars</b>	10,44	25,47	17,96	10,30	40,95	188,74	5,98	267,8
<b>Avril</b>	15,65	31,04	23,35	10,80	34,10	247,06	1,78	285,29
<b>Mai</b>	20,35	35,65	28,00	11,00	28,05	317,86	2,52	312,36
<b>Juin</b>	24,95	40,58	32,77	10,30	24,50	373,11	0,22	225,18
<b>Juillet</b>	28,13	43,99	36,06	9,30	20,90	456,96	0,13	315,33
<b>Aout</b>	27,46	42,5	34,98	9,70	24,65	392,37	0,36	338,9
<b>Septembre</b>	23,78	38,57	31,18	9,30	32,85	277,82	3,97	268,81
<b>Octobre</b>	17,31	31,1	24,21	8,40	39,60	215,96	3,59	269,84
<b>Novembre</b>	10,56	24,4	17,48	7,70	48,80	130,28	2,75	243,08
<b>Décembre</b>	5,83	19,53	12,68	7,40	57,95	88,84	3,74	234,58
<b>Moy/ Cumul</b>	16,28	31,09	23,70	9,28	37,55	2912,17*	30,66*	3258,58*

Tableau III.2 : Données climatiques de la région d'Ouargla (2011-2020).

Avec :

T MAX: Température moyenne maximale (°C)

T MIN: Température moyenne minimale (°C)

T MOY: Température moyenne (°C)

V: vitesse de vent (m/s)

H: humidité relative(%)

EVP: Evaporation (mm)

P: précipitations (mm)

INS: Insolation (h)

### III.5.4 L'énergie consommée par l'électrolyseur

Le principal défi dans la conception de systèmes renouvelables tels que le système de production d'électricité photovoltaïque est l'alimentation crédible du consommateur dans des conditions atmosphériques variables. La somme de la consommation d'énergie électrique par l'électrolyseur et PEM pendant une journée, qui est calculée par l'équation suivante.

- Temps de fonctionnement de l'électrolyseur

On va choisir deux électrolyseurs de type PEM 1920 W, donc  $P_{ele}$  égal 3.84 KW.

$$t = \frac{V_{H_2}}{Q} \quad (III.6)$$

Sachant que :

$$V_{H_2} = 6 \text{ m}^3$$

$$Q = 0.45 \text{ m}^3/\text{h} * 2$$

$$t = 6.66 \text{ h}$$

$$E_c = P_{ele} * t_{ele} = 25.5744 \text{ KWh} \quad (III.7)$$

### III.5.5 La puissance crête du générateur

Pour produire cette énergie, il sera nécessaire d'installer un générateur (panneaux solaires) d'une puissance égale à  $P_c$ . Cette puissance, dénommée puissance crête, dépend de l'irradiation de la région où est située l'installation. On applique la formule suivante :

$$P_c = \frac{E_c}{K * E_i} = \frac{25574.4}{0.75 * 5.88} = 5799.18 \text{ W/m}^2 \quad (III.8)$$

Avec :

$$E_i = 5.88 \text{ KWh/m}^2/\text{j}$$

$$K = 0.75$$

### III.5.6 Nombre des panneaux

On choisit le module de puissance crête 240 W. Les caractéristiques techniques de module dans l'annexe (Tab 3).

Pour calculer le nombre des panneaux on applique la formule suivante :

$$N_m = \frac{P_c}{P_m} = 5799.18/240 \approx 24 \text{ modules} \quad (\text{III.9})$$

$$NS = \frac{V_{ch}}{V_{opt}} = 2.63 \approx 3 \text{ Modules} \quad (\text{III.10})$$

$$NP = \frac{N_m}{N_S} \approx 8 \text{ Modules} \quad (\text{III.11})$$

$$N_{modules} = NS * NP = 24 \text{ Modules} \quad (\text{III.12})$$

### III.5.7 Dimensionnement des batteries

$$C_{20} = \frac{E_c * j_{aut}}{R_T * P_d * V} = 1480 \text{ Ah} \quad (\text{III.13})$$

Avec :

$j_{aut}$ : Nombre de jours d'autonomie /  $N = 2$  jours

$R_T$ : Coefficient réducteur de la température

$P_d$  : Profondeur de décharge maximale

$V_{Tr}$ : Tension de travail 48 (V)

#### III.5.7.1 Nombre des batteries

On choisit le modèle de batterie AGM 225 Ah 12 V. Les caractéristiques techniques de batterie dans l'annexe (Tab 4).

$$C_{20} \leq N_b * C_{20} \text{ batterie} \quad (\text{III.14})$$

$N_b$ : Nombre de branche des Batteries

$$N_b = \frac{C_{20}}{C_{20} \text{ batterie}} = 6.57 \approx 7 \text{ branches} \quad (\text{III.15})$$

$$N_s = \frac{V_{Tr}}{V_b} = 4 \text{ batteries en série} \quad (\text{III.16})$$

### III.5.8 Dimensionnement des régulateurs

Pour assurer le bon fonctionnement du système, k qui régule la charge et adapte la batterie, Il y a deux éléments principaux à prendre en compte. La tension entre les panneaux-batteries et l'intensité maximale du régulateur. Les caractéristiques techniques de régulateur dans l'annexe (Tab 5).

### III.6 Résultats de dimensionnement

Après le dimensionnement de système de production d'hydrogène solaire ont obtenu les résultats suivants :

Paramètre	Résultats
Energie consommée par l'électrolyseur	25.5744 KWh
Puissance crête du générateur $P_G$	5799.18 $W_C$
Nombre de panneaux en série $N_S$	3 Module
Nombre de panneaux en parallèles $N_P$	8 Module
Nombre des batteries en série $N_s$	4 batteries
Nombre de branches des batteries $N_b$	7 Branches

Tableau III.3: Résultats de dimensionnement de système de production d'hydrogène solaire.

### III.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une analyse d'un véhicule à pile à combustible dans la ville d'Ouargla à l'aide de leur profile de charge après sa on faire une étude de dimensionnement d'une mini station produite l'hydrogène à l'aide des données climatiques de la région d'Ouargla et les besoins en énergie électrique de notre charge ainsi que les caractéristiques techniques des composants de système dans le but d'une bonne gestion de l'énergie électrique.



# CONCLUSION GENERALE

## Conclusion générale

La pile à combustible (PAC) est connue depuis longtemps comme un convertisseur d'hydrogène en énergie (électrique + thermique) possédant de bons rendements, les recherches sur cette technologie se développent partout dans le monde de manière considérable.

Dans ce mémoire, nous avons présenté les résultats de caractérisation expérimentale au laboratoire d'une pile PEMFC, dans le but d'utiliser cette pile dans un système photovoltaïque autonome intégrant un système des piles à combustibles, qui assure l'alimentation en électricité d'une charge finale qui est une voiture électrique.

Comme deuxième étape nous avons fixé par simulation notre charge (la voiture électrique). Ensuite nous avons établi une méthodologie de calcul pour le dimensionnement de générateur photovoltaïque, qui assure l'approvisionnement en électricité de l'électrolyseur pour la production d'hydrogène qui alimente la PAC.

Enfin en introduisant les caractéristiques techniques nécessaires des composants de système ainsi que les valeurs des rayonnements globaux du site d'Ouargla et les besoins en énergie électrique de notre charge. Afin d'assurer une bonne gestion de l'énergie électrique produite par le système photovoltaïque qui assure la production d'hydrogène nécessaire pour le fonctionnement de la voiture électrique.

Comme perspective, les résultats que nous avons reçus montrent un faible rendement global de système, mais la nécessité de fonctionnement de jour et nuit et à long distances prouvent la nécessité de développement de ce type de système.

Références

bibliographiques

## Références bibliographiques

- [1] D. Amine, "Contrôle de la Puissance d'un Générateur Photovoltaïque pour le Pompage Solaire," Thèse de Doctorat Es-Sciences, Université d'Oran, 2013.
- [2] N. Kenfer, "Contribution au développement et expérimentation d'un collecteur hybride photovoltaïque- thermique dans la zone de Ouargla ", Thèse de doctrate, Université Kasdi Merbah Ouargla 2021.
- [3] B.Chaouki, B.Tarek "Optimisation floue neuronale et génétique d'un système photovoltaïque connecté au réseau ", Mémoire ingénieurs.Biskra, 2007.
- [4] B.Omar, C.Idris, " L'intégration du photovoltaïque Au Réseau électrique Problèmes et Perspectives", Mémoire ingénieurs. Biskra, 2006.
- [5] Bilal.Abderzzak, "Introduction aux phénomènes de transferts dans la pile à combustible pemfc", iste editions, london, 2018.
- [6] Z.Ammar, " Etude et dimensionnement d'une installation photovoltaïque au niveau d'un puits de gaz.", Mémoire master 2, Université Abderrahmane Mira de Bejaya, 2012.
- [7] S. Pique, "Stationary fuel cell: international and national regulatory and standard context, potential risks. Study report," 2017.
- [8] R. Momirlan et T. Veziroglu, "Recent directions of world hydrogen production", Ren. Sust. EnergyRev. 3 (1999) 219. DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE TOULOUSE Soutenu le 03 OCTOBRE 2008.
- [9] L.Arab, Z.Chebbi " Etude et simulation d'une pile à combustible de type PEM", Mémoire master 2, Université Akli Mohandj de Bouira , 2016.
- [10] J. Labbé, "L'Hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d'électricité pour systèmes photovoltaïques isolés," École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2006.
- [11] R. Momirlan et T. Veziroglu, " Recent directions of world hydrogen production", Ren. Sust. EnergyRev. 3 (1999) 219. DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE TOULOUSE Soutenu le 03 OCTOBRE 2008.
- [12] J. LACHAIZE, "Etude des stratégies et des structures de commande pour le pilotage des systèmes énergétiques à Pile à Combustible (PAC) destinés à la traction," thèse doctorat ,2004.

- [13] A. Z KOUACHE, L. RAHOUMA "Contribution à la modélisation optimale des piles à combustible de type PEM par utilisation des méthodes méta-heuristiques", Mémoire de Master 2, Université Kasdi Merbah d'Ouargla, 2020.
- [14] P. Thounthong, "Conception d'une source hybride utilisant une pile à combustible et des super condensateurs," Institut National Polytechnique de Lorraine-INPL, 2005.
- [15] Y. Manoharan et al, "Hydrogen fuel cell vehicles; current status and future prospect," vol. 9, no. 11, p. 2296, 2019.
- [16] J.-F. Fauvarque, "Les piles à combustible et leurs applications," in Annales De Chimie Science Des Matériaux, 2001, vol. 26, no. 4, pp. 1-8: Elsevier.
- [17] K. W. Friede, "Modélisation et caractérisation d'une pile à combustible du type PEM," Vandoeuvre-les-Nancy, INPL, 2003.
- [18] S. Busquet, "Etude d'un système autonome de production d'énergie couplant un champ photovoltaïque, un électrolyseur et une pile à combustible: réalisation d'un banc d'essai et modélisation," École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2003.
- [19] site web: <https://www.boatindustry.fr/article/36518/yanmar-teste-sa-pile-a-hydrogene-sur-un-bateau-de-plaisance> .
- [20] Site web: <https://www.moniteurautomobile.be/actu-auto/decryptage/hydrogene-oui-non.html> .
- [21] Site web : <https://www.clubic.com/actualite-10996-ordinateur-portable-avec-une-pile-a-combustible.html> .
- [22]. Site web : <https://energies.airliquide.com/resources-planet-hydrogen/stationary-uses> .
- [23]. Site web : <https://www.bossard-sa.fr/areva/> .
- [24] F. Amrouche, B. Mahmah, M. Belhamel, and H. J. R. d. é. r. Benmoussa, "Modélisation d'une pile à combustible PEMFC alimentée directement en hydrogène-oxygène et validation expérimentale," vol. 8, no. 2, pp. 109-121, 2005.
- [25] A. Boucetta, "Modélisation 2D d'une pile à combustible type PEMFC pour une application embarquée," , Thèse de Doctorat , Université mohamed khider Biskra, 2019.

- [26] M. Danoune, A. Djafour, Y. Wang, and A. J. I. J. o. H. E. Gougui, "The Whale Optimization Algorithm for efficient PEM fuel cells modeling," vol. 46, no. 75, pp. 37599-37611, 2021.
- [27] A. DJERIOUI, "Etudes des stratégies et des structures de commande pour les systèmes d'Electro-générateurs à Pile à Combustible," Thèse de Doctorat, Université de M'sila, 2018.
- [28] M. Boudellal, "La pile à combustible: structure, fonctionnement, applications", Dunod, 2007.
- [29] W. Gong and Z. J. E. A. o. A. I. Cai, "Parameter optimization of PEMFC model with improved multi-strategy adaptive differential evolution," vol. 27, pp. 28-40, 2014
- [30] V. Reguillet, "Caractérisation d'un système pile à combustible en vue de garantir son démarrage et fonctionnement à température ambiante négative," Université de Franche-Comté, 2013.
- [31] . A. J. R. E. El-Fergany, "Extracting optimal parameters of PEM fuel cells using Salp Swarm Optimizer," vol. 119, pp. 641-648, 2018.
- [32] Heiocentris full cell trainer, "50 w fuel cell trainer système", [https://tehlabs.com/sites/default/files/14704-FCT\\_Brochure\\_EN\\_WEBB.pdf](https://tehlabs.com/sites/default/files/14704-FCT_Brochure_EN_WEBB.pdf).
- [33] Ahmed Zohir Kouache, Ahmed Djafour, "Mathematical modeling and characterization of the PEM fuel cell" 13<sup>th</sup> international exergy , energy and environment symposium (IEEES-13), March 14-17, 2022 , Saudi Arabia.
- [34] Site wib : <https://www.aljazeera.net/news/scienceandtechnology/2021/6/5>
- [35] Y. Manoharan *et al.*, "Hydrogen fuel cell vehicles; current status and future prospect," vol. 9, no. 11, p. 2296, 2019.
- [36] M.Omar, A.Dahlsi, «Etude et simulation de système hydride photovoltaïque et pile à combustible», Mémoire master 2, Université Ahmed Draia Adrar, 2021.
- [37] Site web: <https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89lectrolyse>

## Annexes

### Annexe1 : Caractéristiques techniques d'électrolyseur PEM 1920 W

#### PEM électrolyseur

<b>H<sub>2</sub> Taux de production</b>	0.45 m <sup>3</sup> /h
<b>Tension nominale</b>	48 V
<b>Puissance nominale</b>	1920 W
<b>Pression de fonctionnement</b>	15 bars
<b>Courant de fonctionnement</b>	40 A
<b>Température de fonctionnement</b>	70 ° C
<b>Nombre de cellules</b>	26

### Annexe 2 : Caractéristiques techniques de réservoir

<b>Réservoir de stockage d'hydrure métallique</b>	<b>MHS-400</b>
<b>TN température nominal</b>	25 °C
<b>Ps (max .autorisée) niveau selon DGRL**)</b>	10 bar
<b>Température de fonctionnement</b>	5-55° C
<b>Température ambiante</b>	5-30° C
<b>Min. capacité 10 bar (25°C)</b>	400 NL
<b>H2 pureté</b>	5.0
<b>Début nominale convention d'air</b>	3NL/min
<b>Poids totale</b>	4.2 Kg
<b>Longueur flacon + valve</b>	330 mm
<b>Type connecteurs</b>	Parker QC4
<b>Diamètre</b>	102 mm

### Annexe 3 : caractéristiques techniques de panneau

<b>Panneau JM-SP</b>	
Type	PERC, all black
Puissance maximale	240 W
Tension maximale	18.24 V
Courant maximale	13.2 A

### Annexe 4 : Caractéristiques de batterie Deka 8G8D AGM

Capacité en C20	Tension	Coefficient réducteur de la température	Profondeur de décharge maximale
225 Ah	12 V	90 %	80 %

### Annexe 5 : Caractéristiques techniques de régulateur

<b>Le régulateur</b>	
Paramètres	Valeur
Tension de système	48 V
Températures ambiant - 10°C... + 60°C	/
Courant du panneau	140 A
Courant de consommateur	70 A
Tension à vide du panneau PV	< 100 V
Consommation propre	14 mA
Poids	10 Kg



## Résumé

Le monde d'aujourd'hui est témoin d'un intérêt considérable dans le domaine des énergies renouvelables afin de réduire le taux de pollution des énergies non renouvelables. Les piles à combustible d'aujourd'hui attirent beaucoup d'intérêt de la part des chercheurs pour devenir l'une des futures sources d'énergie. Dans ce travail, nous offrons une application de pile à combustible dans le domaine des véhicules électriques, nous avons d'abord discuté les généralités des types de pile à combustible ainsi que la modélisation mathématique de la pile à combustible et sa caractérisation et Deuxièmement, nous avons étudié et analysé le véhicule à hydrogène à partir d'une pile à combustible de 50 W en plus de dimensionner une source de production d'hydrogène dans la région d'Ouargla, et de transmettre que tous les résultats étaient encourageants à utiliser dans la région.

**Mots clé :** PEMFC; Caractérisation; Hydrogène; Véhicule électrique

## ملخص

يشهد العالم اليوم اهتماما كبيرا بمجال الطاقات المتجددة بغية الحد من معدل تلوث الطاقات غير المتجددة. تجذب خلايا الوقود اليوم قدرًا كبيرًا من الاهتمام من الباحثين لتصبح احد مصادر الطاقة المستقبلية. في هذا العمل، نقدم تطبيقًا لخلية الوقود في مجال السيارات الكهربائية، ناقشنا أولاً عموميات أنواع خلايا الوقود بالإضافة إلى النمذجة الرياضية لخلية الوقود وتوصيفها. ثانياً قمنا بدراسة و تحليل السيارة الهيدروجينية انطلاقاً من خلية وقود غشاء التبادل البروتوني ذات القدرة 50 واط، بالإضافة الى تحجيم محطة لأنتاج الهيدروجين في منطقة ورقلة، حيث أن جميع النتائج كانت مشجعة لاستعمال التطبيق في المنطقة.

**الكلمات المفتاحية :** خلية وقود غشاء تبادل البروتون; التوصيف ; الهيدروجين; مركبة كهربائية

## Abstract

The world today is witnessing considerable interest in the field of renewable energies in order to reduce the rate of pollution from non-renewable energies. Today's fuel cells attract significant interest from researchers to become the future energy source. In this work, we present an application for fuel cell in the field of electric vehicles. We first discussed the generalities of fuel cell types as well as the mathematical modeling of the PEMFC fuel cell and its characterization. Second, we studied and analyzed the hydrogen vehicle from a 50 W fuel cell in addition to sizing a source of hydrogen production in a region Ouargla, and transmitting that all the results were encouraging to use in the region.

**Keywords:** PEMFC; Characterization; Hydrogen; Electric Vehicle