REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

**UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA**




**Faculté de Technologie**

**Département du Génie Electrique**

# Mémoire de fin d'études de Master

**Filière** : Génie Eléctrique

**Spécialité** : Réseaux électrique

---

## Gestion optimale d'Energie électrique pour un système hybride PV/PEMFC adapté par contrôle MPPT avec stockage d'hydrogène

---

Présentés par :

BOUAHMED Smail

BOUCHAABA Abou baker

Proposés et Dirigés par :

AMOKRANE Zouhir

MORSLI Abdelkader

**Promotion 2022**

## ملخص

يقدم هذا العمل تحكما وإدارة مثالية لإمداد الطاقة لنظام هجين PV/PAC يتكون من مولد ضوئي وخلية وقود غشائية لتبادل البروتونات(PEMFC) ومحلل كهربائي وخزان لتخزين الهيدروجين.في هذا النظام يتم توفير الحمل بواسطة المولد الكهروضوئي عبر محول التيار الكهربائي(DC-DC) يحكمه نظامMPPT (متتبع نقطة الطاقة القصوى)إذا تجاوزت الطاقة التي توفرها الطاقة الكهروضوئية الطاقة المطلوبة بواسطة الحمل. فسيكون هناك فائض من الطاقة مما يسمح بتزويد المحلل الكهربائي. سيوفر الأخير الهيدروجين الذي سيتم تخزينه في خزان لاستخدامه لاحقا في خلية الوقود(PEMFC)لإنتاج الكهرباء اللازمة لتشغيل الحمل عندما يتعذر عل الكهروضوئية تلبية الطلب تم عرض النماذج الرياضية وخصائص المكونات الرئيسية للنظام.تم وصف استراتيجية التحكم في النظام. تم تنفيذ نمذجة ومحاكاة سلوك النظام الهجين المقترح تحتMatlab/Simulink.



الكلمات المفتاحية:الكهروضوئي. خلية وقود. المحول الكهربائي. هيدروجين.نظام PV/PAC الهجين.إدارة الطاقة



## *Résumé*

Ce travail présente un contrôle et une gestion optimale de l'alimentation d’un système hybride PV-PAC qui est constitué d'un générateur photovoltaïque, d'une pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC), d'un électrolyseur et d'un réservoir de stockage d'hydrogène. Dans ce système, La charge est alimentée par le générateur photovoltaïque via un hacheur (DC-DC) régi par un contrôle MPPT (suivi du point de puissance maximum). Si la puissance délivrée par le photovoltaïque dépasse la puissance requise par la charge, il y aura un excès de puissance qui permet d'alimenter l'électrolyseur. Ce dernier fournira de l'hydrogène qui sera stocké dans un réservoir pour une utilisation ultérieure dans la pile à combustible (PEMFC), pour produire l'électricité nécessaire pour faire fonctionner la charge lorsque le PV est incapable de répondre aux demandes. Les modèles mathématiques et les caractéristiques des principaux composants du système sont présentés. La stratégie de contrôle du système est décrite. La modélisation et la simulation du comportement du système hybride proposés ont réalisées sous MATLAB/Simulink



**Mots-clés :** Photovoltaïque ; Pile à combustible ; Electrolyseur ; Hydrogène **;** Système hybride PV/PAC, gestion d'énergie.

## *Abstract*

This work presents an optimal control and management of the power supply of a PV-PAC hybrid system consisting of a photovoltaic generator, a proton exchange membrane fuel cell (PEMFC), an electrolyzer and a hydrogen storage tank. In this system, the load is supplied by the photovoltaic generator via a chopper (DC-DC) governed by MPPT control (followed by the maximum power point). If the power delivered by the photovoltaic exceeds the power required by the load, there will be an excess of power, which enables the electrolyzer to be supplied. The latter will provide hydrogen, which will be stored in a tank for later use in the fuel cell (PEMFC), to produce the electricity needed to run the load when the PV is unable to meet demand. Mathematical models and characteristics of the main components of the system are presented. The system control strategy is described. The modeling and simulation of the behavior of the proposed hybrid system is carried out under MATLAB / Simulink.


**Keywords:** Photovoltaic; Fuel cell; Electrolyser; Hydrogen; Hybrid PV / PAC system, energy management.

## *Remerciement*

*Nous remercions d'abord Dieu Tout-Puissant pour cette volonté, cette santé et cette patience qu'Il nous a données tout au long de ces années scolaires.*

*Cette thèse a été rendue possible grâce au soutien de nombreuses personnes à qui nous tenons à exprimer notre gratitude.*

*Nous tenons à exprimer notre gratitude au Dr. AMOKRANE ZOUHIR et au Dr. MORSLI ABDEL KADER pour leurs conseils avisés et leur patience à notre égard.*

*Un merci particulier aux membres du jury ainsi qu'aux professeurs qui nous ont fourni les informations nécessaires à la réussite de nos études universitaires.*

*Nous tenons à exprimer notre gratitude aux amis et collègues qui nous ont apporté leur soutien moral et intellectuel tout au long de notre vie.*

*Enfin nous tenons à exprimer notre gratitude à nos parents pour leur confiance et leur soutiens inestimables.*

***Dédicace :***

*C’est avec une grande joie et un immense plaisir que je dédie ce modeste travail qui est le fruit de plusieurs années d’étude aux êtres les plus chères :*

*Mes très chers parents et leurs amours ; soutiens et énormes sacrifices ; que dieu les protèges.*
*Mes chères -parents et mes chères -frères et mes chères sœurs et leurs soutiens.*

*A toute ma famille, qui porte le nom BOUAHMED et KARACH de plus grand au plus petit.*
*Mes chères amies et tous mes autres collègues d’études de loin et de prés. A tous ceux qui me sont chers.*

***SMAIL***

***Dédicace :***

*Je dédie ce modeste travail Aux êtres les plus chères mères à mon cœur Ma mère et mon père, qui m'ont beaucoup soutenu durant mon cursus d'étude et à qui je serai éternellement*

*Reconnaissant :*

- *A mes chères sœurs*
- *A mes frères*
- *A mes amies*

***ABOU BAKER***

## SOMMAIRE

I. Introduction générale……...1

## Chapitre I

I. Introduction……...3

II. Energie solaire photovoltaïque …….....3

II.1. Rayonnement solaire…….3

II.2. Cellule photovoltaïque ……...5

II.2.1 Les différents types de cellules solaires (cellules photovoltaïques) ……6

a) Les cellules monocristallines…….. 6

b) Les cellules poly cristallines ……..6

c) Les cellules ……... 6

III. Système pile à combustible…….7

III.1 Définition……...7

III.2. Principe de fonctionnement d'une pile à combustible……8

III.2.1 Les Composants de la Pile à Combustible ……9

III.2.2 Électrolyte……... 10

III.2.3 Couche Active (Catalyseur) ……10

III.2.4 Couche de Diffusion ……11

III.2.5Plaques Bipolaires ……11

III.2.6 Système Auxiliaires ……12

III.3 Pile à combustible de type à membrane échangeuse de protons (PEMFC)……12

III.4 Avantages et inconvénients des piles à combustible de type PEM…….13

III.4.1 Les avantages ……..13

III.4.1 Les inconvénients…….13

IV. Systèmes hybrides…….14

IV.1. Définition des systèmes hybrides……...14

IV.2 Système hybride photovoltaïque/pile à combustible……...14

IV.2.1 Générateur photovoltaïque……...15

IV.2.1 Les convertisseurs statiques…….15

V. Conclusion…….16

**CHAPITRE II**

I. Introduction…….17

II. Modélisation analytique des différents composants du système hybride PV-PAC……...18

II.1Modélisation du générateur PV…….19

II.2 Interconnexion : convertisseur DC-DC et MPPT……..21

II.3 Modélisation d'une pile à combustible PEM…….23

II.3.1 Modelé électrique dynamique de la PEMFC……..24

II.3.2 Modèle électrochimique de la pile à combustible PEMFC……26

II.3.3 Modèle thermique de la pile à combustible……26

II.4 Modèle d'électrolyseur…….26

II.4.1. Modèle électrochimique…… 27

II.4.2 Modèle thermique…….28

II.5 Système de stockage d'hydrogène…….28

III. Convertisseurs électroniques……29

III.1 Convertisseur DC-DC…….29

IV. Conclusion……...…….30

**Chapitre III**

Introduction……31

II. Simulations de panneau solaire :……32

II.1. Influence de la variation des conditions métrologiques……..32

II.1.1 Influence de température……...32

II.1.2. Influence de l'éclairement……33

II.2. Simulation de PV avec convertisseur boost commandé par MPPT……35

II.2.1 résultats de simulation d'un PV commandent par MPPT…….35

III. Simulations d'une pile PEFMC……37

IV. Conclusion……40

Conclusion générale……...41

Référence

**LISTE DES FIGURES**

Figure I.1: le spectre du rayonnement solaire. ……4
Figure I.2. Structure basique d'une cellule solaire ……..……..…5
Figure I.3: cellules photovoltaïque (a)monocristallines/ (b) poly cristallin/(c) ……...7
Figure I.4: Diagramme de Ragon pour divers dispositifs d'énergie ……8
Figure I.5: Principe de fonctionnement de piles à combustible……...……9
Figure1.6 : Les composants d'une PEMFC…….……..…..…10
Figure I.7: Principe des piles à combustible à électrolyte acide ou alcalin …...……13
Figure I.8 : système hybride complexe …….....14
Figure I.9 : système hybride pile à combustible et photovoltaïque ……...…15

Figure II.1 : concept du système PV/PAC …….……...…….18
Figure II. 2 : électrique équivalent d'une cellule PV …….……....19
Figure II.3 : Caractéristiques V-I et V-P d'un module PV ……..…….….21
Figure II.4 : Hélicoptère de suralimentation …….…….…….…...21
Figure II.5 : Organigramme de perturbation et d'observation ……...……....22
Figure II.6 : Vue en coupe d'une pile à combustible PEM…….23
Figure II.7 : Caractéristiques V-I et V-P d'un module PEMFC……24
Figure II.8 : Vue en coupe de la cellule électrolytique PEM ……...……...……..28

Figure III.1 Caractéristique puissance-tension d'une cellule pour une variation de température…….32
Figure III.2 Caractéristique courant-tension d'une cellule pour une variation de température…….33
Figure III.3 Caractéristique courant-tension d'une cellule pour différent éclairement……33
Figure III.4. Caractéristique puissance-tension d'une cellule pour différent……...……34
Figure III.5 : simulation de PV avec convertisseur boost commandé par MPPT……35
Figure III.6 : puissance d'un PV par commande MPPT……..35
Figure III.7 courants d'un PV par commande MPPT…….36
Figure III.8 : tension d'un PV par commande MPPT……..36
Figure III.9 : simulation d'une pile à combustible avec Hacheur Boost…….37
Figure III.10 : puissance de pile à comestible PEMFC……37

Figure III.11 : courant de pile à combustible PEMFC……38
Figure III.12 : tensions de pile à combustible……..38
Figure III.13 : Organigramme du principe de fonctionnement du système PV- FC……..…..39

# NOMENCLATURE

| | |
|---|---|
| *PV* | Photovoltaïque |
| *PAC* | Pile à Combustible |
| *GPV* | Générateur photovoltaïque |
| *PEMFC* | Pile à combustible du type PEMFC ; Proton Exchange Membrane |
| *DC/DC* | Convertisseur à courant continu |
| *DC/AC* | Onduleur |
| *Vpac* | Tension de sortie de la pile à combustible |
| *Ppac* | Puissance de sortie de la pile à combustible |
| *MPPT* | Algorithme de poursuite de point de puissance maximale |
| $V_{cell}$ | Tension de sortie de la pile à combustible [V]. |
| $E_{Nernst}$ | Tension de Nernst [V] |
| $\eta_{act}$ | Activation surtension [V]. |
| $N_0$ | Nombre de cellules de série dans la pile |
| *R* | Constante des gaz universelle (Rydberg) [j/(kmo1K)]. |
| $\eta_{ohmic}$ | Surtension ohmique [V] |
| *F* | Constante de Faraday [F]. |
| *T* | Température absolue de la pile à combustible [K]. |
| $P_{H_2}$ | Pression partielle d'hydrogène [atm]. |
| $P_{O_2}$ | Pression partielle d'oxygène [atm]. |
| $P_{H_2O}$ | Pression partielle de l'eau [atm]. |
| *I* | Courant de la pile à combustible [A]. |
| *B* | Activation sur tension constante [UN− 1]. |
| C | Activations sur tension constante [V]. |
| $R^{int}$ | Résistance interne[ Ω ]. |
| $N_s$ | Nombre de piles. |
| *U* | Facteur d'utilisation. |

| | |
|---|---|
| $qH_2$ | Débit molaire d'entrée d'hydrogène [kmol/s]. |
| $K_{H_2}$ | Constante molaire de la vanne d'hydrogène [kmol/atm] |
| $V_{an}$ | Volume anodique [m3]. |
| $qH_{2,in}$ | Débit d'entrée d'hydrogène [kmol/s]. |
| $qH_{2,out}$ | Débit de sortie d'hydrogène [kmol/s]. |
| $qH_{2,r}$ | Flux d'hydrogène qui réagit [kmol/s]. |
| $K_r$ | Constante de modélisation [kmol/(s A)] |
| $\tau H_2$ | Constante de modélisation [kmol/(s A)] |
| $\tau H_2O$ | Constante de temps de l'eau [s]. |
| $\tau o_2$ | Constante de temps d'oxygène [s]. |
| $qo_2$ | Débit molaire d'entrée d'oxygène [ k mol / s ] |
| $r_{H-O}$ | Rapport de flux hydrogène-oxygène. |

# INTRODUCTION GENERALE

# INTRODUCTION GENERALE

Cette thèse, s'inscrit dans un contexte de volonté d'apporter plus de connaissances à l'utilisation d'une énergie non polluante (photovoltaïque pour notre part) et à l'utilisation de la pile à combustible dont l'utilisation augmente et peut contribuer avec une part non négligeable à l'électricité dans le monde.

On assiste à un tournant dans la façon dont la communauté internationale appréhende la question de l'énergie. Au cours de ces dernières années, l'utilisation des systèmes verts a progressé. Ce phénomène est dû à la réduction de la production des énergies fossiles et fissiles et à la demande de réduction des émissions de gaz dangereux. Dans le cas contraire, ceci impactera en crescendo sur divers niveaux :

- Des changements climatiques : une élévation du niveau des océans, une menace de la faune, de la flore, une menace de populations en habitat et en nourriture….
- Niveau économique : l'accès à l'énergie est de plus en plus couteux….

Face à ces soucis bien réels, les énergies renouvelables, dont l'énergie photovoltaïque, semblent être une des directions importantes à prendre. En effet, la terre reçoit du soleil une quantité d'énergie propre supérieure à ses besoins et en grande partie sous forme de rayonnement énergétique. Dans cette optique, il est donc primordial de développer et comprendre une des façons permettant d'exploiter ces rayonnements : les cellules photovoltaïques. Aujourd'hui, les dispositifs électrochimiques trouvent aussi de nouvelles applications où une source autonome d'énergie est nécessaire pour alimenter les charges électriques. L'hybridation des dispositifs énergétiques consiste à combiner deux ou plusieurs dispositifs de manière à cumuler les avantages de chacun d'entre eux tout en tenant compte les spécifications de chacun. Le plus souvent, des alimentations électriques diverses comme les systèmes photovoltaïques ou les piles à combustible sont présentes dans ce type de système. Ainsi, dans le souci d'un développement durable, nos travaux se sont naturellement portés sur un générateur photovoltaïque et pile à combustible de type PEMFC (à membrane échangeuse de protons). Il est proposé, dans cette thèse, d'apporter une contribution à la modélisation, à l'optimisation, au contrôle de blocs constituant notre système énergétique. Les travaux que nous avons entrepris ont tout d'abord consisté à étudier, modéliser, dégager les effets de certains paramètres sur les caractéristiques de fonctionnement des divers blocs. La pile à combustible convertit l'énergie chimique directement en énergie électrique. Les générateurs

solaires permettent de générer la puissance à partir de ressource naturelle gratuite (soleil). Un électrolyseur produisant les entrées à la pile à combustible est inséré dans le système global.[1]

Les travaux développés dans cette thèse concernent de prime abord, l'étude des divers blocs en conditions d'utilisation.

Pour ce faire, nous avons dégagé plusieurs chapitres pour l'élaboration de ce présent travail

Le chapitre I : présentera une étude menée sur les systèmes PV-hydrogène, ainsi que quelques définitions relatives à ces systèmes.

Le chapitre II : on concentre sur le développement de modèles mathématiques pour chaque composant du système hybride PV-FC proposé. Ainsi, pour valider les modèles développés les plus importants des composants du système, un test de simulation est construit pour un PV connecté à un convertisseur DC-DC et une PEMFC

Le chapitre III : nous présentons un développement du programme de simulation du système hybride PV-PEMFC à l'aide de modèles mathématiques,

# CHAPITRE I : recherche bibliographique du système PV /PEMFC

# I. Introduction

De nos jours, on parle de plus en plus du changement climatique, de la pollution de l'air qui entraîne la dégradation de l'environnement ainsi que la déplétion des ressources d'énergie fossile et fissile qui concerne la sécurité d'approvisionnement de l'énergie.

L'utilisation des ressources fossiles et fissiles est problématique. Notre monde court le risque d'épuisement progressif de ces énergies et leurs conséquences dramatiques sur notre planète, à cause des gaz à effet de serre qui continuent de croitre et induisent des risques importants pour la santé publique. Tous ces problèmes nous amènent à chercher des solutions efficaces et durables comme la promotion de l'utilisation des systèmes d'énergie renouvelable (énergie photovoltaïque), le tout relié à une pile à combustible (PAC). Cela favorise un développement durable et la protection de l'environnement. Bien que l'énergie renouvelable ait l'avantage de ne rejeter aucun polluant dans l'environnement lors de la production d'électricité, elle fait partie de la famille des énergies intermittentes. Sa production n'est pas régie par le rythme de la consommation des usagers, mais par celui de la disponibilité des rayons de la source. Typiquement, la production d'électricité à partir d'énergie solaire ne peut se faire que de jour, d'où la nécessité de stocker une partie de cette énergie pour également disposer d'électricité durant les phases nocturnes. L'hydrogène trouve sa place, premièrement, associé à un réseau d'électrolyseurs et de piles à combustible (PAC), il permet à la fois le stockage d'énergie électrique en énergie chimique et inversement. On devine alors son rôle en tant que vecteur énergétique. L'énergie chimique stockée dans l'hydrogène est transformée en énergie électrique grâce aux piles à combustible.

Dans ce chapitre, études menées sur les systèmes PV-hydrogène, ainsi que quelques définitions relatives à ces systèmes.

# II. Energie solaire photovoltaïque

## II.1. Rayonnement solaire

Le soleil, notre source d'énergie, est un astre de diamètre de 1.4 millions kilomètre et de 5770$^{o}$k de température, tire son énergie des réactions thermonucléaire qui se produisent en permanence au niveau de son noyau, ou chaque seconde de façon irréversible 564 millions de tonnes d'hydrogène fusionnent avec 560 millions de tonnes d'hélium. Ces réactions thermonucléaires permettent au soleil d'envoyer dans toutes les directions de l'espace une quantité d'énergie énorme $3.87x10^{26}$

watt sous forme de rayonnement électromagnétique de longueur d'ondes variantes de 0.22 μm à 10 μm.

Ce rayonnement solaire se propage à la vitesse de la lumière ; il lui faut donc, en moyenne, 499 secondes, soit 8 minutes et 19 secondes, pour atteindre notre atmosphère [2].

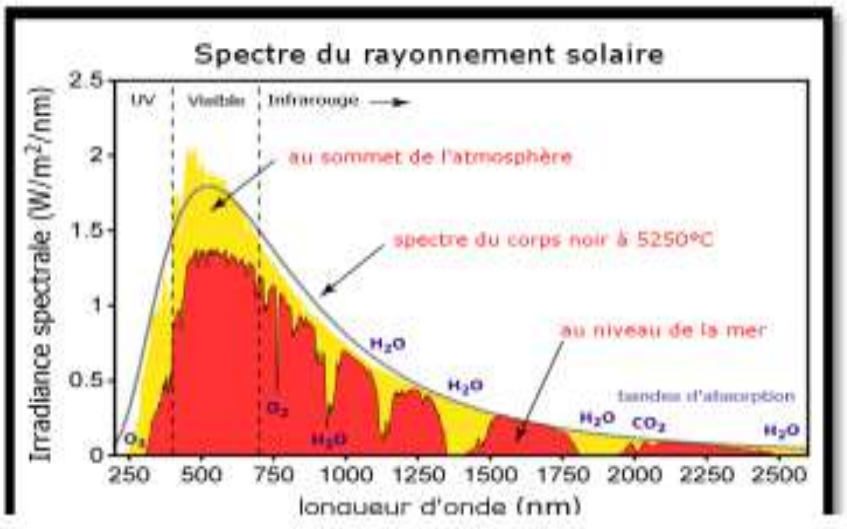



***Figure I.1:*** *le spectre du rayonnement solaire.*

L'énergie solaire reçue par unité de temps à la limite supérieure de l'atmosphère faisant face au soleil est appelée la constante solaire, et elle est estimée à 1367 w/m$^2$ par Claus Fröhlich et Christoph Wehrli du centre radiométrique de Davos (Suisse) [2]. Cette valeur n'est pas vraiment constante, elle varie selon que la terre s'éloigne ou se rapproche du Soleil dans sa rotation autour de ce dernier. Lors de la traversée de l'atmosphère, ce rayonnement de 1367w/m$^2$ diminue du fait de son absorption partielle par les gaz atmosphériques et la vapeur d'eau ou par sa diffusion par les aérosols. Ainsi le flux reçu sur terre est inférieur à sa valeur initiale et dépend de l'angle d'incidence, et donc de l'épaisseur atmosphérique traversée. Plus cette épaisseur est grande plus la puissance du rayonnement diminue.

La trajectoire parcourue par le rayonnement solaire dans l'atmosphère est appelée Masse atmosphérique ou AIR MASS, et notée AM. [1]

Elle est définie par :

$$AM = \frac{1}{sinh} \quad \text{(I-1)}$$

h : représente l'angle entre la position du soleil et horizon

**II.2. Cellule photovoltaïque**

La cellule PV ou encore photopile est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs et transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique. Les cellules photovoltaïques sont constituées :[3]

D'une fine couche semi-conductrice (matériau possédant une bande interdite, qui joule rôle de barrière d'énergie que les électrons ne peuvent franchir sans une excitation extérieure, et dont il est possible de

faire varier les propriétés électroniques) tel que le silicium, qui est un matériau présentant une conductivité électrique relativement bonne, d'une couche antireflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires, d'une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d'un métal conducteur sur le dessous ou anode, les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multicouches réfléchissants justes en dessous du semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement.

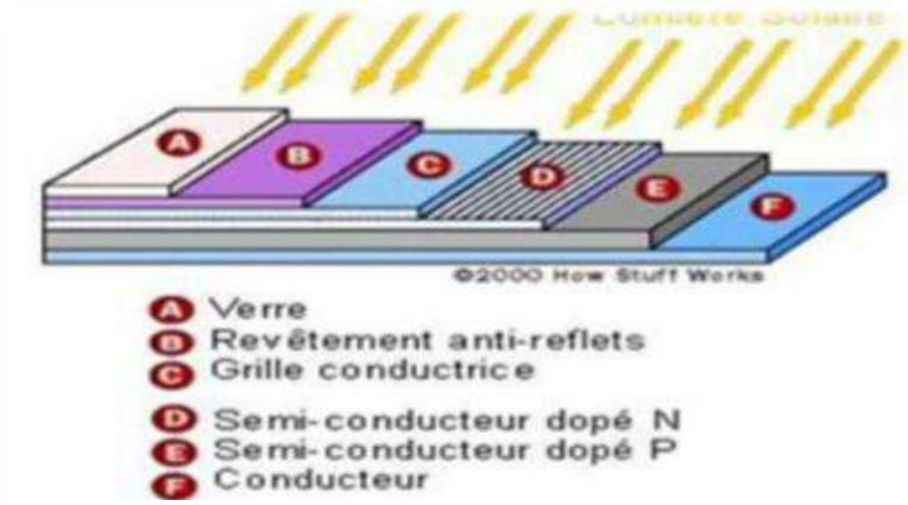



***Figure I.1***. *Structure basique d'une cellule solaire [3]*

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V enfoncions du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température et du vieillissement de la cellule [4].

En associant les cellules PV en série (somme des tensions de chaque cellule) ou en parallèle (somme des intensités de chaque cellule), on peut constituer un générateur PV selon les besoins des applications visé Les deux types de regroupement sont en effet possibles et souvent utilisés afin d'obtenir en sortie des valeurs de tension et intensité souhaités. Ainsi, pour Ns cellules en série, constituant des branches elles- mêmes NP en parallèle, la puissance disponible en sortie du générateur PV est donné par [4].

$$P_{pv} = N_s \cdot V_{pv} \cdot N_p \cdot I_{pv} \quad \text{(I-2)}$$

Avec

$P_{pv}$ : La puissance disponible en sortie du GPV

$V_{pv}$ : La tension a la sortie du GPV

$I_{pv}$ : Le courant de sortie du GPV

**II.2.1 Les différents types de cellules solaires (cellules photovoltaïques) [4]**

Il existe différents types de cellules solaires ou cellules photovoltaïques. Chaque type de cellule est caractérisé par a un rendement et un coût qui lui sont propres. Cependant, quel que soit le type, le rendement reste assez faible : entre 8 et 23 % de l'énergie que les cellules reçoivent. Actuellement, il existe trois principaux types de cellules :

***a) Les cellules monocristallines :***

Elles ont le meilleur rendement (de 12 à 18% voir jusqu'24% en laboratoire) cependant, elles coûtent trop chères dues à leur fabrication complexe.

***b) Les cellules poly cristallines :***

Leur conception est plus facile et leur coût de fabrication est moins important. Cependant leur rendement est plus faible (de 11% à 15% voir jusqu'à19.8 en laboratoire).

***c) Les cellules amorphes* :**

Elles ont un faible rendement (de 5% à 8% voir jusqu'13% en laboratoire), mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé. Elles sont utilisées couramment

dans de petits produits de consommation telle que des calculatrices solaires ou encore des montres. L'avantage de ce dernier type est le fonctionnement avec un éclairement faible (même par temps couvert ou à l'intérieur d'un bâtiment).

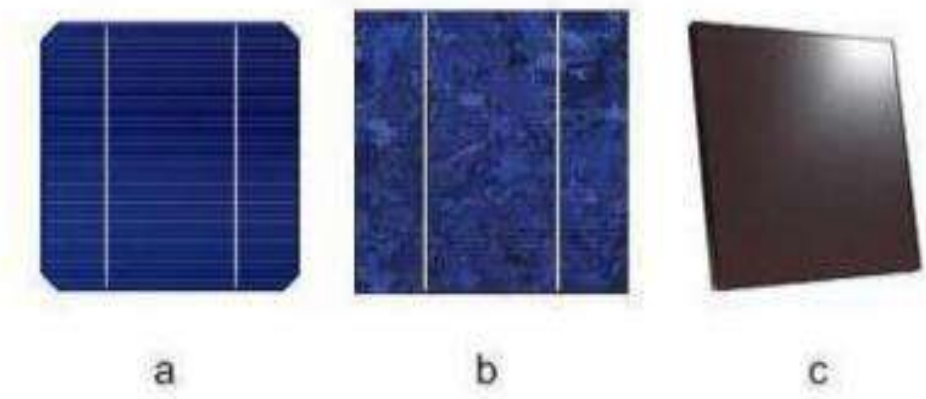



***Figure I.3**: cellules photovoltaïque (a)monocristallines/ (b) poly cristallin/(c) Amorphe*

## III. Système pile à combustible

### III.1 Définition

Une pile à combustible est une pile dans laquelle la génération d'une tension électrique se fait grâce à l'oxydation sur une électrode d'un combustible réducteur (par exemple l'hydrogène) couplée à la réduction sur l'autre électrode d'un oxydant, tel que l'oxygène de l'air [5]. Les piles à combustible sont des moyens de production de l'énergie électrique, considérées comme des sources d'énergie de par leur grande densité d'énergie. Le diagramme de Ragon présenté par la figure (I.4) permettant de comparer les performances énergétiques de déférents dispositifs.

Ce dernier montre que les piles à combustible présentent les densités d'énergie les plus élevées par rapport aux autres dispositifs [6].

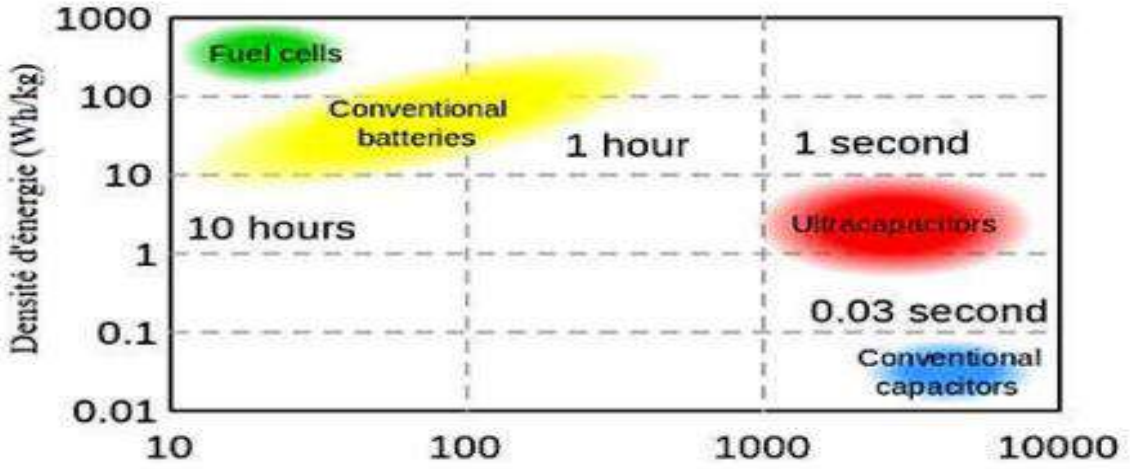



***Figure I**.4: Diagramme de Ragon pour divers dispositifs d'énergie*

### III.2. Principe de fonctionnement d'une pile à combustible

Une pile à combustible est un dispositif qui convertit directement l'énergie chimique en énergie électrique, sans aucun processus thermique ou mécanique externe Il existe divers types de piles à combustible, mais toutes ces piles gardent en commun les caractéristiques suivantes :

❖ Elles sont essentiellement constituées de deux plaques (plaques bipolaires) permettant notamment l'amenée des gaz, la collecte du courant et assurant la tenue mécanique, et de deux électrodes (anode et cathode) séparées par un électrolyte.

❖ Sur l'anode, on déclenche une réaction d'oxydation électrochimique d'un composé hydrogéné (le combustible) [7].

Dans le type d'une pile à hydrogène du type PEMFC à membrane solide acide, deux réactions électrochimiques se produisent successivement :

Réaction anodique : $H2 \rightarrow 2H+ + 2\ e$

-Réaction cathodique : $1/2\ O2 + 2H++ 2\ e- \rightarrow H2O$

Réaction globale : $H2+ 1/2\ O2 \rightarrow H2O$

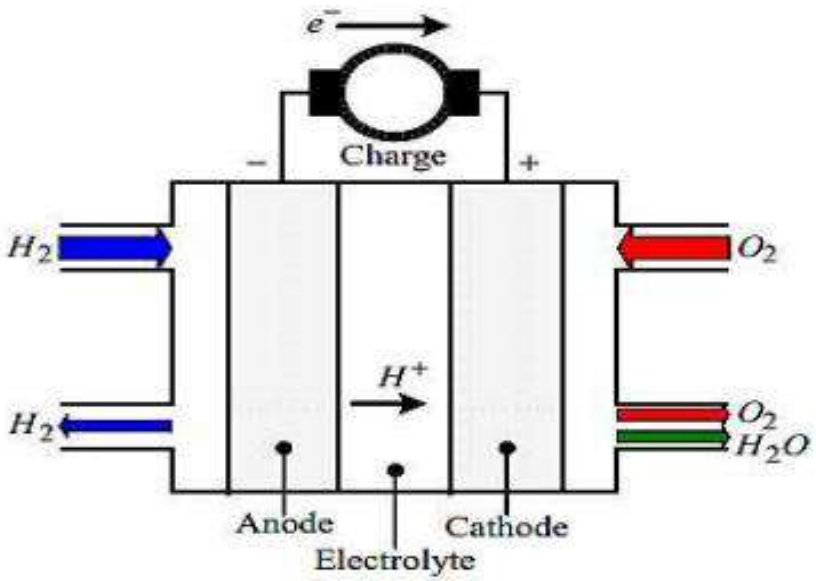



***Figure I.5**: Principe de fonctionnement de piles à combustible à électrolyte acide (A) ou alcalin (B) [6]*

**III.2.1 Les Composants de la Pile à Combustible :[8]**

Pile à combustible PEMFC est constitué d'un collecteur de courant (y compris les canaux de gaz), la couche de diffusion de gaz, et la couche de catalyseur sur côtés anode et cathode ainsi qu'un membrane polymère conductrice d'ions. Réactifs pénétrer dans la cellule par des canaux de gaz, que sont noyées dans les collecteurs de courant (plaque bipolaire).

Les couches de diffusion de gaz (GDL) sont utilisées pour distribuer uniformément les réactifs sur la surface des couches de catalyseur (CLC), ainsi que pour fournir une connexion électrique entre les couches de catalyseur et les collecteurs de courant.

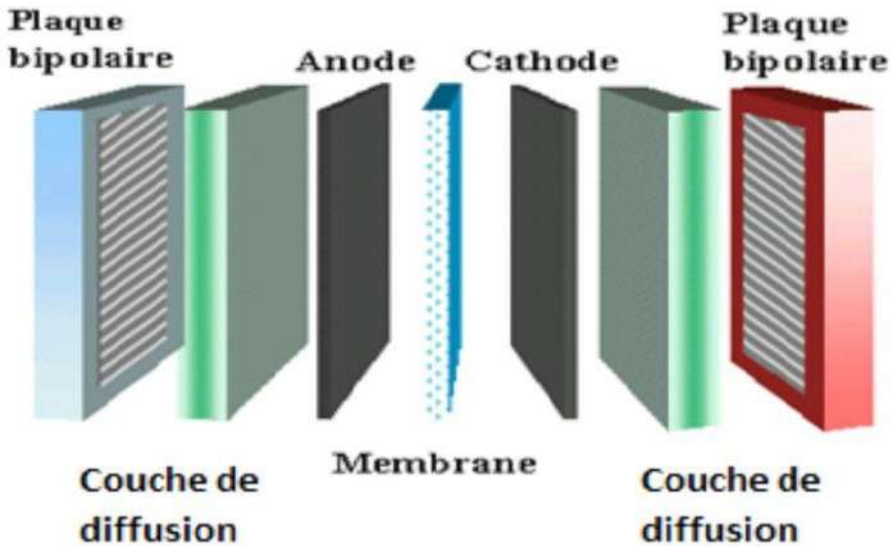



***Figure1.6** : Les composants d'une PEMFC.[8]*

**III.2.2 Électrolyte :[8]**

Un électrolyte est une substance qui permet la dissociation d'un élément en ions chargés négativement et positivement. Le développement de ce composant, membrane conductrice de protons, a été l'élément essentiel des piles PEMFC à partir des années quatre-vingt. Plusieurs propriétés sont demandées à ces polymères :

- Une conductivité protonique plus élevée que possible, afin de limiter les perte s'associées à la chute de tension due à la résistance interne ;
- Une étanchéité suffisante pour empêcher le mélange des réactifs.

Les membranes répondant aujourd'hui à ces spécificités sont composées de macromolécules per fluorées contenant des fonctions acides $S_{O_3}H^+$dont la dissociation en présence d'eau permet la mobilité des protons. Leur température maximale d'utilisation est aux en virons de 85°C.

**III.2.3 Couche Active (Catalyseur) : [8,9]**

La zone active est le siège des deux demi-réactions d'oxydoréduction. C'est la zone de couplage des phénomènes électrique, chimique et de transfert de masse. La condition nécessaire aux

réactions est la coexistence au même point, du gaz réactif, des protons et des électrons. La zone active est donc constituée d'un milieu poly phasique, des pores pour permettre l'alimentation en gaz, de l'électrolyte pour assurer la continuité ionique, du carbone pour la conductivité électronique et du platine pour catalyser la réaction**.**

**III.2.4 Couche de Diffusion :[8]**

C'est une couche poreuse entre la couche de catalyseur et la plaque bipolaire, elle a plusieurs fonctions :

- Fournit un chemin pour les réactifs des canaux d'écoulement à la couche de catalyseur.
- Fournit un chemin pour l'eau produite de la couche de catalyseur aux canaux d'écoulement.
- Relie électriquement la couche de catalyseur à la plaque bipolaire, permettant aux électrons d'accomplir le circuit électrique.
- Sert également à transporter la chaleur produite par les réactions
- Électrochimiques dans la couche de catalyseur à la plaque bipolaire, qui a des moyens pour l'évacuer.
- Fournit un appui mécanique au cœur de la pile (les deux couches de catalyseur et la membrane), et empêche-le défléchir dans les canaux d'écoulement.

**III.2.5Plaques Bipolaires :[8]**

La plaque bipolaire est une barrière étanche qui sépare les cellules d'un empilement, elle doit avoir une bonne conductivité électrique et thermique, inerte chimiquement dans ce milieu très acide et étanche. Les plaques bipolaires ont plusieurs fonctions :

- Relient les cellules en série.
- Séparent les gaz des cellules adjacentes ; donc elles doivent être imperméables aux gaz.
- Fournissent l'appui structurel pour la pile ; donc elles doivent avoir une certaine Rigidité, et doivent être légères.

- Servent au refroidissement de la pile, dont celles doivent avoir une bonne conductivité thermique.
- Logent les canaux d'écoulement

**III.2.6 Système Auxiliaires :[10]**

Les systèmes auxiliaires (refroidissement, contrôle et régulation des flux de gaz et de la pression) assurent le bon fonctionnement de la pile à combustible. En effet, les variations de pression, d'humidité des gaz entrants, ou simplement de leurs débits ont une influence majeure sur les performances de la pile Un système de recirculation de l'hydrogène non consommé du côté anodique peut être intéressant, pour des raisons de coût et de stockage de
L'hydrogène (un des problèmes de la pile à combustible). Des humidificateurs sont souvent nécessaires pour humidifier les gaz en entrée, et diminuer en conséquence la résistance ohmique de la membrane. Enfin, dans la mesure où le monoxyde de carbone et le soufre sont

Des poisons pour les électrodes de la pile, un purificateur peut s'avérer nécessaire après reformage de l'hydrogène.

**III.3 Pile à combustible de type à membrane échangeuse de protons (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. Dans cette thèse, nous nous intéressons exclusivement à ce type de pile à combustible. La structure d'une cellule de pile à combustible de type PEM est représentée dans la figure (I.6). Se déplaçant dans la direction de x, les gaz viennent de canaux gravés dans des plaques bipolaires (épaisseur 1-5 millimètres). De la vapeur d'eau est ajoutée aux gaz pour humidifier la membrane. Les couches de diffusion (100-500 micromètres) assurent une bonne distribution des gaz aux couches de réaction (5-50 micromètres).

Ces couches constituent les électrodes de la cellule où des particules de platine, qui jouent le rôle du catalyseur, ont été déposées dans un support carbone sur la membrane [6].

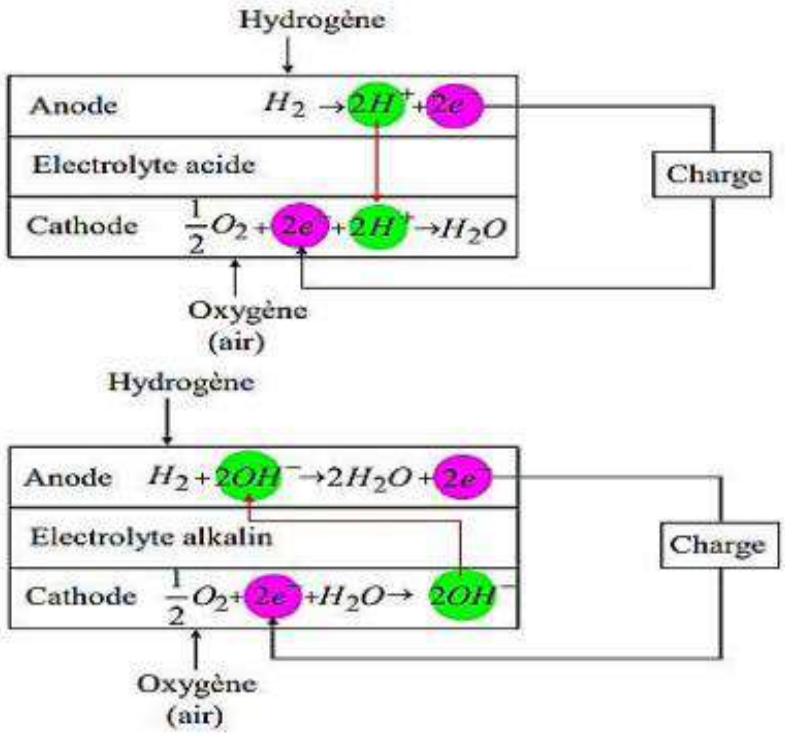



***Figure I.7**: Principe des piles à combustible à électrolyte acide (en haut) ou alcalin (en bas)*

## III.4 Avantages et inconvénients des piles à combustible de type PEM

La pile à combustible présente de nombreux avantages, mais également des points faibles

### III.4.1 Les avantages :

Les avantages les plus importants sont les suivants :

• Très bon rendement énergétique (supérieur à 50%).

• Protection de l'environnement.

• Silencieuse.

• Fonctionnement à basse température [11].

### III.4.1 Les inconvénients

Les principaux points faibles de la pile à combustible sont :

• Le coût élevé.

• La durée de vie [11]

# IV. Systèmes hybrides

## IV.1. Définition des systèmes hybrides

Un système d'énergie hybride est défini comme une installation qui utilise deux ou plus des technologies de la génération d'énergies. Les sources d'énergie renouvelable, comme le photovoltaïque, ne délivrent pas une puissance constante. Leur association avec des sources différentes permet d'obtenir une production électrique continue. Les systèmes d'énergie hybrides sont généralement autonomes par rapport aux grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans les régions isolées [12].

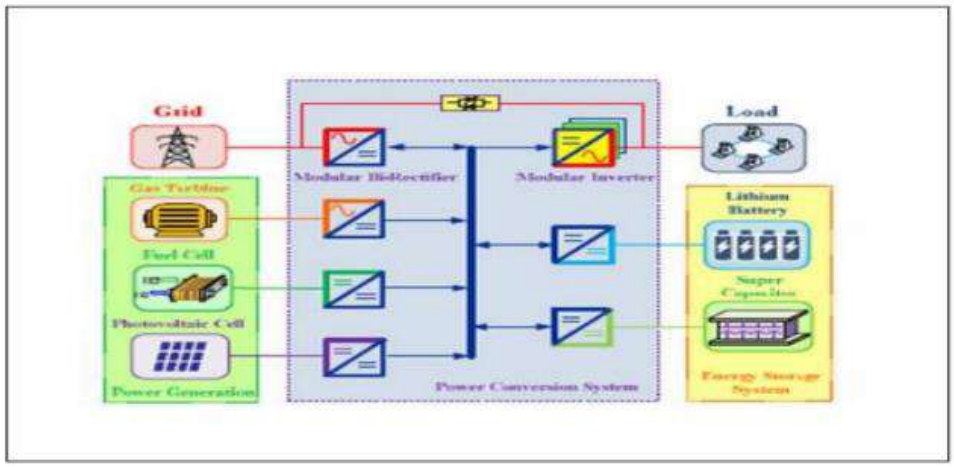



***Figure I.8 :*** *système hybride complexe [13]*

## IV.2 Système hybride photovoltaïque/pile à combustible

L'installation photovoltaïque doit être raccordée avec une autre source d'énergie, pour qu'il soit possible de satisfaire la charge durant la nuit ou par temps nuageux. Ces systèmes alimentent soit des maisons, soit des villages. Différent type de stockage existe comme un banc de batterie et un électrolyseur d'hydrogène.

Un banc de batteries est un dispositif de stockage qui est largement disponible dans le marché et elle est la plus intéressante car elle peut alimenter une charge pour un durée plus importante mais parfois elle ne peut pas satisfaire la charge en cas d'absence d'énergie photovoltaïque L'avantage

d'un système hybride par rapport à une pile à combustible seul ou pile à combustible photovoltaïque seul est d'assurer la continuité de l'alimentation en énergie électrique [12].

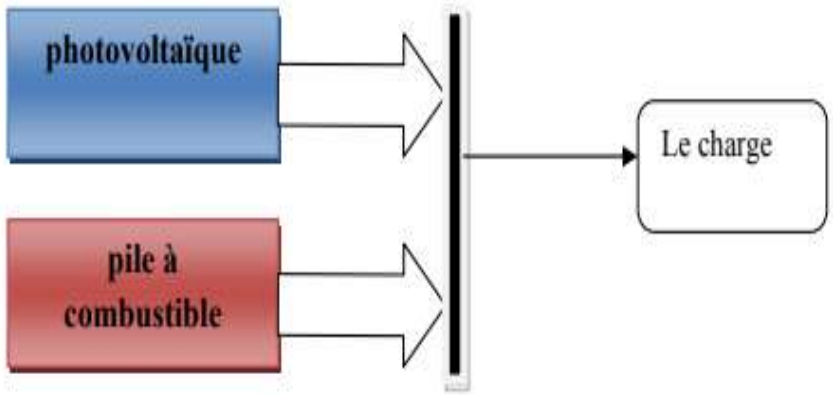



***Figure I.9** : système hybride pile à combustible et photovoltaïque*

Aléatoire de ces ressources et, d'autre part, de constituer un complément ou une alternative aux groupes électrogènes diesel utilisés généralement pour la génération d'énergie électrique dans les régions isolées. Ce système hybride fonctionne surtout en mode autonome dans des sites ou l'approvisionnement en carburant diesel ou le raccordement au réseau électrique est difficile, voire même impossible.

Ce système hybride est composé de :[14]

**IV.2.1 Générateur photovoltaïque**

C'est un système complet assurant la production et la gestion de l'électricité fournie par les capteurs photovoltaïques. L'énergie est stockée dans des accumulateurs et/ou transformée en courant alternatif suivant le type d'application.

**IV.2.1 Les convertisseurs statiques**

Les convertisseurs sont des appareils servent à transformer la tension continue fournie par les panneaux ou les batteries pour l'adapter à des récepteurs fonctionnant en une tension continue différente ou une tension alternative.

## V. Conclusion

La disponibilité des combustibles de qualité adéquate. Les piles à combustible sont en passe d'évoluer du cap de la recherche et des projets pilotes vers des premières applications industrielles et ces performances doivent encore être améliorées. Dans ce chapitre, nous avons réalisé une description globale d'une pile à combustible de type PEMFC.

# CHAPITRE II : modélisation des composants du système PV PEMFC

## I. Introduction

Actuellement, les demandes énergétiques du monde augmentent continuellement alors que la production d'énergie repose en grande partie sur une ressource limitée de plus en plus rare, qui est le pétrole. C'est pourquoi, il apparaît nécessaire de trouver d'autres solutions pour pallier ce manque d'énergie compte tenu d'une contrainte nécessitant l'utilisation d'un mode de production d'énergie abordable, propre et respectueux de l'environnement [15].

Persistant de stockage d'énergie dans ce contexte, il apparaît que l'énergie électrique renouvelable devient un dénouement pour tous les problèmes de la production d'électricité ce qui prouve l'apparition de l'énergie solaire comme vecteur de production d'électricité jusqu'à aujourd'hui [16]

Malgré le respect de cette source renouvelable à l'environnement et à notre mode de vie, elle n'est toujours pas en mesure de se substituer convenablement à l'énergie domestique et industrielle en raison du caractère intermittent de l'énergie solaire dans les conditions d'exploitation (rayonnement solaire et température) et du problème Le système hybride PV-FC (photovoltaïque-pile à combustible) ou PV-Hydrogène est une solution innovante qui répond aux enjeux soulevés par le contexte énergétique actuel. Ce système contient une source d'énergie renouvelable présentée par un panneau PV, un électrolyseur pour générer de l'hydrogène et de l'oxygène lorsque le PV fournit un surplus d'énergie et inversement lorsque la demande dépasse la capacité PV, une pile à combustible consomme du gaz du système de stockage pour fournir le manque de puissance dans la charge.[17]

Le système hybride PV-FC (photovoltaïque-pile à combustible) ou PV-Hydrogène est une solution innovante qui répond aux enjeux soulevés par le contexte énergétique actuel. Ce système contient une source d'énergie renouvelable présentée par un panneau PV, un électrolyseur pour générer de l'hydrogène et de l'oxygène lorsque le PV fournit un surplus d'énergie et inversement lorsque la demande dépasse la capacité PV, une pile à combustible consomme du gaz du système de stockage pour fournir le manque de puissance dans la charge.

Ce chapitre se concentre sur le développement de modèles mathématiques pour chaque composant du système hybride PV-FC proposé. Ainsi, pour valider les modèles développés les plus importants des composants du système, un test de simulation est construit pour un PV connecté à un Convertisseur DC-DC et une PEMFC (pile à combustible à membrane échangeuse de protons),

dans l'environnement MATLAB-Simulink.

## II. Modélisation analytique des différents composants du système hybride PV-PAC

Le schéma fonctionnel définissant le système hybride PV-FC proposé est illustré à la Fig. 1. Ce système est composé d'un générateur photovoltaïque (GPV) et d'une pile à combustible PEM comme sources d'électricité, d'un électrolyseur, d'un convertisseur DC-DC, d'un réservoir de stockage d'hydrogène et d'une charge variable alimentée par le système photovoltaïque via un convertisseur boost contrôlé par un Système MPPT (suivi du point de puissance maximale).

En fait, la charge est fournie par un générateur PV via un convertisseur Boost (DC-DC), contrôlé par la technique MPPT. Si la puissance délivrée par le photovoltaïque dépasse la puissance requise, il y aura un surplus de puissance qui permettra d'alimenter l'électrolyseur. Ce dernier fournira de l'hydrogène à stocker dans un réservoir, pour une utilisation éventuelle dans la pile à combustible (PEMFC), pour générer l'électricité de charge nécessaire lorsque le PV est incapable de répondre à la demande de puissance de charge.

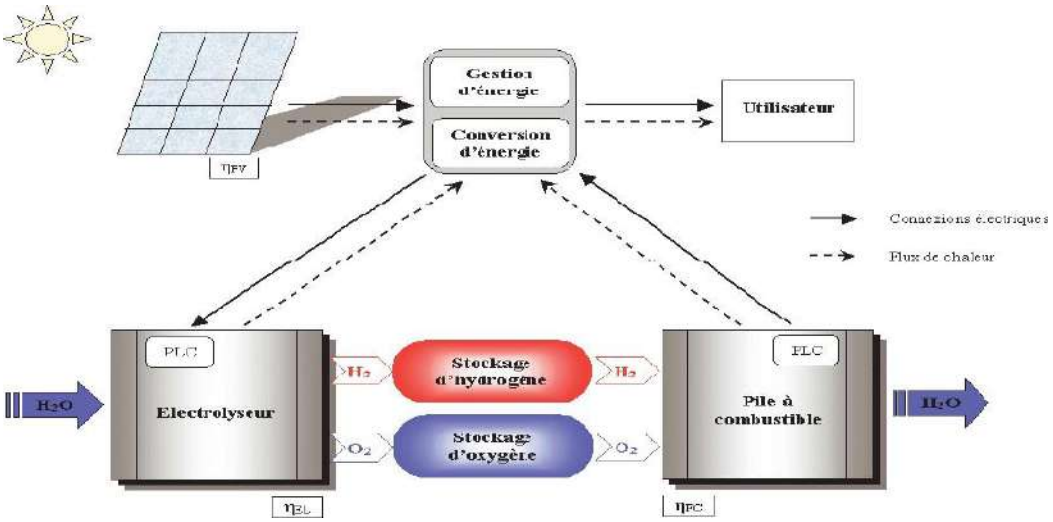



***Figure II.1** : concept du système PV/PAC*

## II.1Modélisation du générateur PV

Un générateur PV est un ensemble d'équipements mis en œuvre pour exploiter l'énergie photovoltaïque afin de répondre aux exigences de charge. Il consiste en un ensemble de modules PV en parallèle et/ou en série permettant d'obtenir une puissance souhaitée, un courant de cellule de court-circuit $I_{CC}$et une tension en circuit ouvert $V_{CO}$. A son tour, un module photovoltaïque est l'association d'un ensemble de cellules solaires en parallèle et/ou en série. Il est important de noter que la variation de la température et du rayonnement solaire a de grandes influences sur la tension et le courant du générateur PV [18]

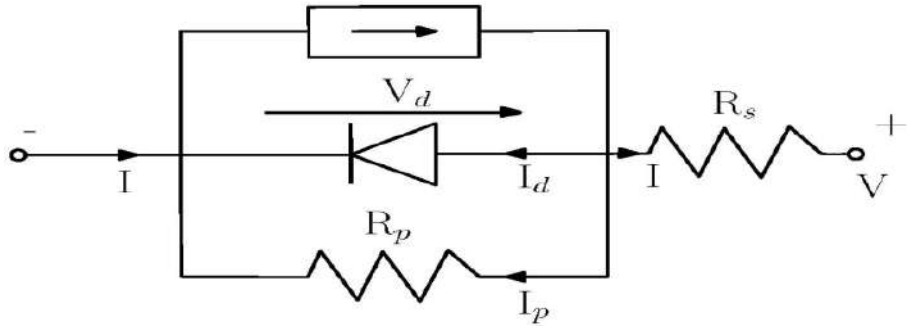



***Figure II. 2** : électrique équivalent d'une cellule PV*

L'expression du courant de sortie est donnée comme suit [19]

$$I = I_{sc} - I_d - I_p \quad \text{(II-1)}$$

Où :

$$I_P = \frac{V + R_s I}{R_p} \quad \text{(II-2)}$$

Et

$$I_d = I_0 \left[ exp\left(\frac{qV_d}{KT}\right) - 1 \right] \quad \text{(II-3)}$$

Où :

$$V_d = \frac{V + R_s I}{a} \quad \text{(II-4)}$$

Par conséquent, le modèle mathématique de la caractéristique courant-tension d'une cellule PV devient :

$$I = I_{sc-}I_0\left[exp\left(\frac{q(V+IR_s)}{aKT}\right)-1\right]-\frac{(V+IR_s)}{R_p} \quad \text{(II-5)}$$

L'expression du photo courant $I_{sc}$est donné par :

$$I_{sc} = \frac{R_p+R_s}{R_P}I_{pv} \quad \text{(II-6)}$$

Si nous supposons $I_{sc}=I_{pv}$condition généralement utilisée pour optimiser le fonctionnement du programme accompagnant la simulation PV [6], on obtient

$$I = I_{pv-}I_0\left[exp\left(\frac{(V+IR_s)}{V_t a}\right)-1\right]-\frac{(V+IR_s)}{R_p} \quad \text{(II-7)}$$

Où :

$$V_t = \frac{N_s KT}{q} \quad \text{(II-8)}$$

Le courant généré par le PV$I_{pv}$dépend directement du rayonnement solaire et est également influencé par la température selon l'équation suivante [20] :

$$I_{pv} = [I_{pv,n} + K_1(T-T_n)]\frac{G}{G_n} \quad \text{(II-9)}$$

Selon les équations (II-3) et (II-4), le courant de diode est donné par :

$$I_d = I_0\left[exp\left(\frac{V+IR_s}{V_t a}\right)-1\right] \quad \text{(II-10)}$$

Où :

$$I_0 = \frac{I_{sc}+K_i(T-T_n)}{exp\left(\frac{V_{co,n}+K_i(T-Tn)}{aV_t}\right)-1} \quad \text{(II-11)}$$

Si nous fixons$I_m$comme :

$$I_m = I_{pv} - I_d \quad \text{(II-12)}$$

On obtient :

$$I_m = \left(I_{pv}N_{pp}\right) - I_0 N_{pp} exp\left[\frac{qTN_{ss}}{aKN_s}\left(V+\frac{IR_s}{N_{pp}}N_{ss}\right)-1\right] \quad \text{(II-13)}$$

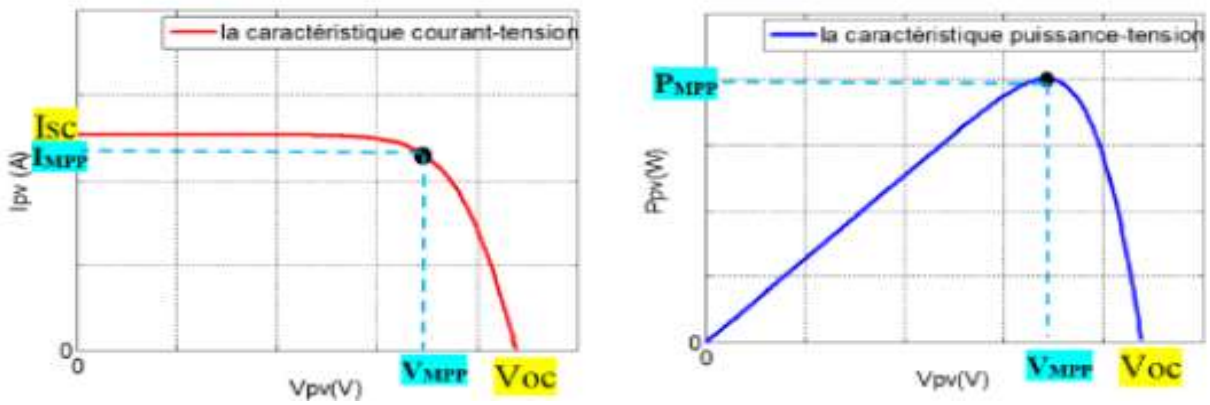



***Figure II.3*** *: Caractéristiques V-I et V-P d'un module PV*

## II.2 Interconnexion : convertisseur DC-DC et MPPT

La température et l'intensité du rayonnement solaire sont deux facteurs importants affectant le maximum de puissance générée par un panneau solaire. En effet, ce dernier peut fournir le maximum de puissance dans des conditions spécifiées et le point de fonctionnement dépend de la température, de la charge et de l'ensoleillement. Pour cette raison, une adaptation de la charge avec le PV est nécessaire pour fournir le maximum de puissance disponible quelles que soient les conditions climatiques. Pour effectuer cette adaptation, un convertisseur DC-DC (hacheur) contrôlé par un algorithme de suivi Maximum Power Point Tracking (MPPT) doit être inséré. Le convertisseur utilisé dans cette étude est un hacheur parallèle boost permettant la conversion d'une tension d'entrée en une tension de sortie plus élevée.

La figure 5 illustre le schéma électrique du convertisseur utilisé.

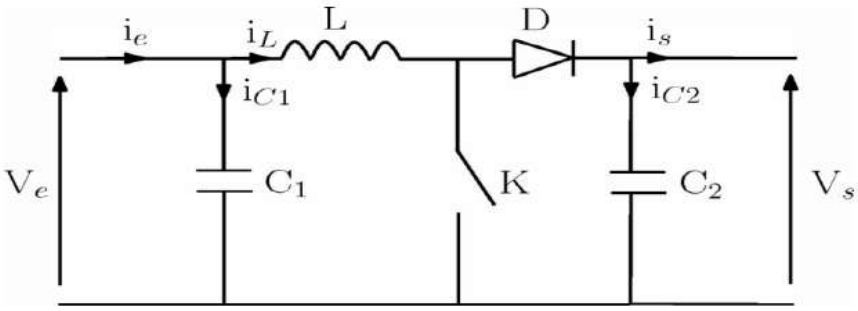



***Figure II.4*** *: Hélicoptère de suralimentation*

La commande MPPT est basée sur un algorithme itératif qui permet de trouver le point de fonctionnement du système photovoltaïque afin d'obtenir le maximum de puissance générée sans interrompre le fonctionnement du système. Cette méthode est basée sur une maximisation permanente de la puissance générée et non sur des valeurs de référence prédéfinies [21]. Mesures du courant$I_{pv}$la tension$V_{pv}$ et la puissance $p_{pv}$du système photovoltaïque sont utilisées par diverses méthodes suivant le maximum de point de puissance telles que la méthode de perturbation et d'observation (P&O), l'incrément de telles que la méthode de perturbation et d'observation (P&O), l'incrément de conductance ( $Inc\ Cond$ ) et *Hill Climbing* [22].

Dans ce travail, la méthode de perturbation et d'observation (P&O) sera utilisée en raison de sa simplicité car elle ne nécessite que des mesures de courant et de tension. La structure de l'algorithme donnée sur la figure II.5 représente la méthode (P & 0).

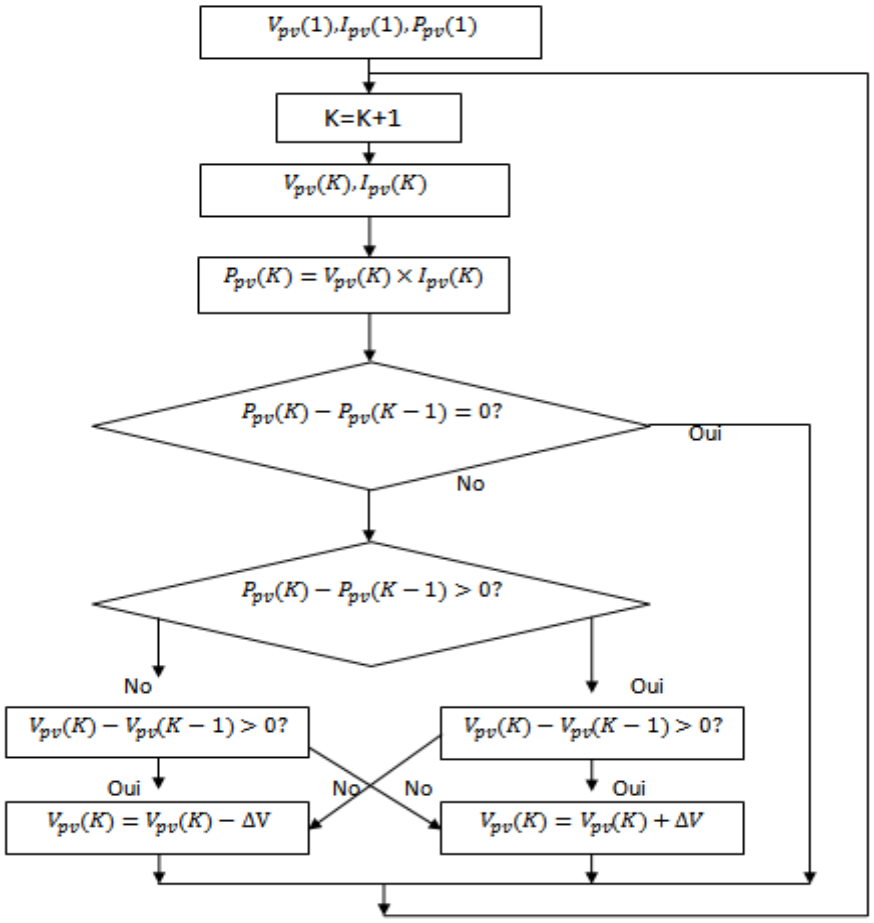



***Figure II.5*** *: Organigramme de perturbation et d'observation.*

### II.3 Modélisation d'une pile à combustible PEM

Le principe de base du fonctionnement de la pile à combustible repose sur l'électrolyse inverse de l'eau : l'hydrogène entre dans la pile par le côté anode et l'oxygène par le côté cathode. Ces gaz sont amenés aux électrodes par la diffusion des couches conductrices qui permettent l'alimentation en gaz de toute la surface des électrodes et un contact électrique entre la couche réactive et la plaque bipolaire permettant [23].

La pile à combustible PEM est considérée comme la pile la plus prometteuse en raison de sa faible température de fonctionnement qui permet un démarrage rapide et une bonne gestion thermique [24]

La figure II.6montre diverses réactions pour une pile à combustible PEM alimentée avec un gaz d'anode contenant de l'hydrogène et un gaz de cathode contenant de l'oxygène%

.

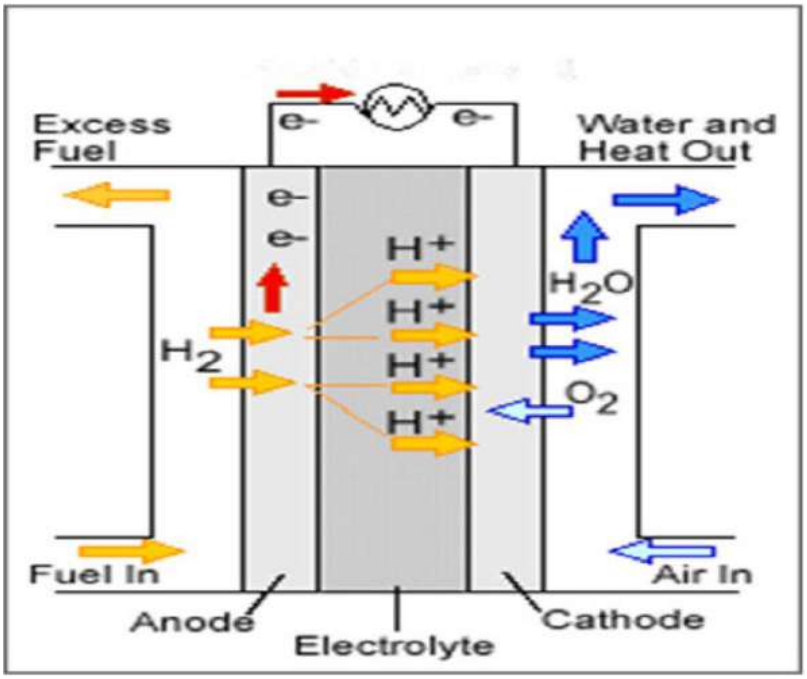



***Figure II.6 :*** *Vue en coupe d'une pile à combustible PEM.*

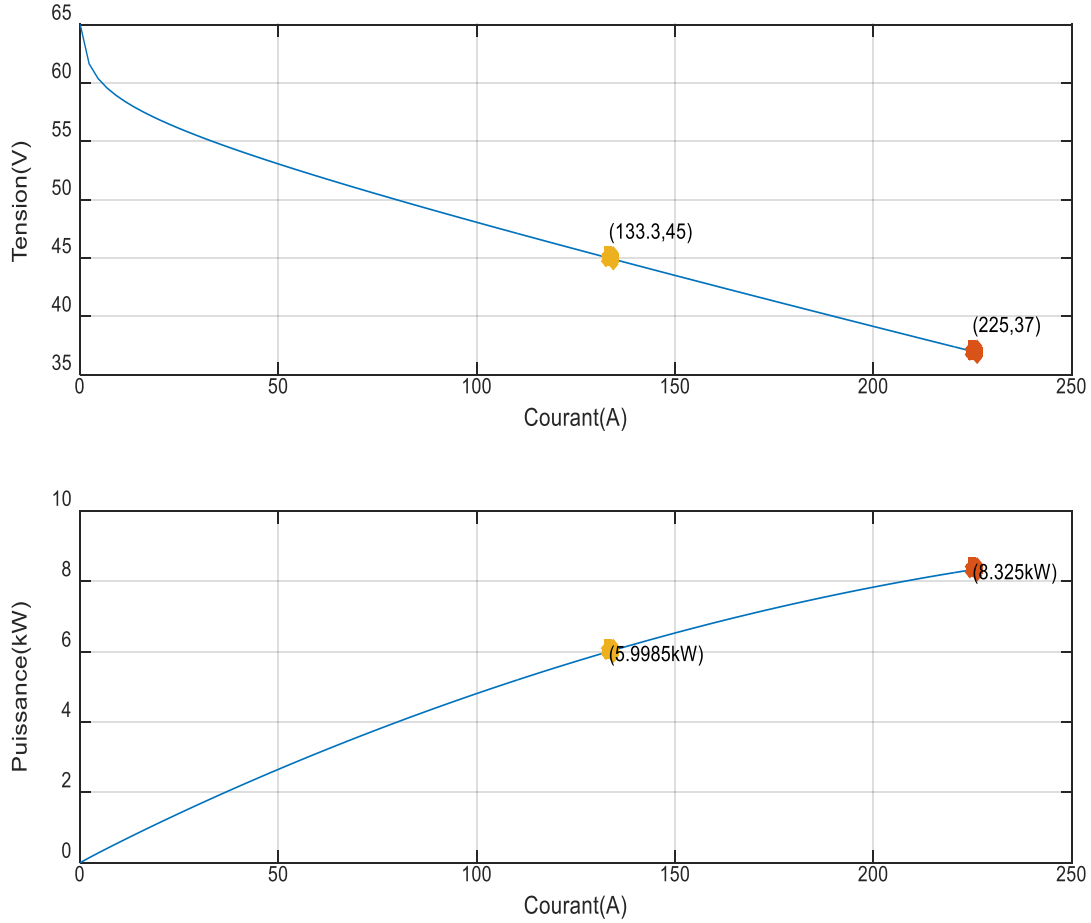



***Figure II.7*** *: Caractéristiques V-I et V-P d'un module PEMFC*

Anode:

$$H_2 \quad 2\,H^+ + 2e^- \tag{II-14}$$

Cathode:

$$O_2 + 2H^+ + 2e^- \quad \rightarrow \quad H_2O \tag{II-15}$$

Globalement :

$$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \quad \rightarrow \quad H_2O + \text{ énergie électrique +chauffage} \tag{II-16}$$

**II.3.1 Modelé électrique dynamique de la PEMFC**

Afin de simuler la pile à combustible PEM, différents modèles ont été proposés. Dans cette étude, une version améliorée du modèle PEMFC incorporant le concept de courant de rétroaction décrit dans [23] et [25] est utilisée. Ce modèle est construit en utilisant la relation entre la tension de sortie et la pression partielle d'oxygène, d'hydrogène et d'eau.

Pendant l'exploitation, le potentiel $V_{FC}$de la pile PEMFC diminue à partir du potentiel d'équilibre thermodynamique$E_{Nernst}$. Cela est dû aux pertes irréversibles de tension ohmique et d'activation,$\eta_{act}$ et $\eta_{ohmic}$

Par conséquent, la tension de sortie FC peut être exprimée comme suit [29] :

$$V_{cell} = E_{Nernst} + \eta_{act+}\eta_{ohmic} \quad \text{(II-17)}$$

Où :

$$E_{Nernst} = N_0 \left[E_0 + \frac{RT}{2F} log\left(\frac{P_{H_2} P_{O_2}^{0.5}}{P_{H_2O}}\right)\right] \quad \text{(II-18)}$$

Les pertes de tension d'activation résultent du transfert et de la rupture des électrons, et de la formation de liaisons chimiques dans l'anode et la cathode, elle est donnée par :

$$\eta act\eta_{act} = -B\ lnCI \quad \text{(II-19)}$$

La chute de tension ohmique est due à la résistance de la membrane polymère et à la résistance de l'électrode et de la plaque collectrice lors du transfert des électrons, elle s'exprime par :

$$\eta ohmic = -Rint\eta_{ohmic} = R^{int}\text{I} \quad \text{(II-20)}$$

Le système de pile à combustible consomme de l'hydrogène qui est obtenu à partir du réservoir de stockage en fonction de la demande de la puissance. Pendant les conditions de fonctionnement, pour contrôler le débit d'hydrogène en fonction de la puissance de sortie du système FC, une stratégie de contrôle par rétroaction est utilisée. Pour réaliser ce contrôle, le courant de sortie FC est ramené à l'entrée lors de la conversion de l'hydrogène sous forme molaire [26].

La quantité d'hydrogène requise par le FC du réservoir de stockage est donnée par

$$qH_{2,ref} = \frac{N_0 N_s I}{2FU} \quad \text{(II-21)}$$

La relation entre le débit molaire du gaz à travers une vanne et sa pression partielle peut être donnée par [26] :

$$\frac{qH_2}{PH_2} = K_{H_2} \quad \text{(II-22)}$$

Pour un débit molaire d'hydrogène, il y a trois facteurs importants : le débit entrant, le débit de sortie et le débit réagi [11]. La relation entre ces facteurs peut être donnée par :

$$\frac{d}{dt}P_{H_2} = \frac{RT}{V_{an}}\left(qH_{2,in} - qH_{2,out} - qH_{2,r}\right) \quad \text{(II-23)}$$

Pour un débit molaire d'hydrogène, il y a trois facteurs importants : le débit entrant, le débit de sortie et le débit réagi [27].

La relation entre ces facteurs peut être donnée par :

$$qH_{2,r} = \frac{N_0 I}{2F} = 2K_r I \quad \text{(II-24)}$$

Où Kr est une constante donnée par [29] :

$$K_r = \frac{N_0}{4F} \quad \text{(II-25)}$$

L'application de la transformée de Laplace aux équations II-22 et II-24 permet d'exprimer la pression partielle d'hydrogène comme [26] :

$$P_{H_2} = \frac{\frac{1}{K_{H_2}}}{1+\tau H_2 p}\left(qH_{2,in} - 2k_r I\right) \quad \text{(II-26)}$$

Où

$$\tau H_2 = \frac{V_{an}}{K_{H_2} RT} \quad \text{(II-27)}$$

De même, les pressions partielles d'oxygène et d'eau ($P_{H_2}$, $P_{H_2O}$) sont exprimés par :

$$P_{H_2O} = \frac{\frac{1}{K_{H_2P}}}{1+\tau H_2 oP} 2K_r \text{(II-28)} P_{O_2} = \frac{\frac{1}{k_{O_2}}}{1+\tau o_2}(qO_2 - K_r) \quad \text{(II-29)}$$

Où

$$q_{O_2} = \frac{qH_2}{r_{H-O}} \quad \text{(II-30)}$$

### II.3.2 Modèle électrochimique de la pile à combustible PEMFC

$$E_{Nernst} = -\frac{\Delta G^{\circ}}{zF} + \frac{\Delta S}{zF}(\mathrm{T}-T_0) + \frac{R.T}{zF}\ln\left(\frac{P_{O_2}^{0.5}.P_{H_2}^{1}}{P_{H_2O}^{1}}\right) \quad \text{(II-31)}$$

L'expression de l'équation de Nernst arrangé avec un calcul numérique se présente comme suit :

$$E_{Nernst} = 1.229-0.85\cdot 10^{-3}\,(\mathrm{T}-298.15) + 4.31\cdot 10^{-5}\cdot T\cdot[\ln(P_{H_2}) + \frac{1}{2}\ln(P_{O_2})] \quad \text{(II-32)}$$

Les pressions partielles d'hydrogène et d'oxygène sont [28]:

$$P_{H_2} = 0.5\, P_{H_2O}^{sat}\left[\left(exp\left(-\frac{\frac{1.635\cdot I}{A}}{T^{1.334}}\right)\cdot\frac{P_{anode}}{P_{H_2O}^{sat}} - 1\right]\right. \quad \text{(II-33)}$$

$$P_{O_2} = P_{H_2O}^{sat}\left[exp\left(-\frac{\frac{4.192\cdot I}{A}}{T^{1.334}}\right)\cdot\frac{P_{cathode}}{P_{H_2O}^{sat}} - 1\right] \quad \text{(II-34)}$$

### II.3.3 Modèle thermique de la pile à combustible

$$\dot{q}_{net} = \dot{q}_{chem} - \dot{q}_{elec} - \dot{q}_{sens+latent} - \dot{q}_{perdue} \quad \text{(II-35)}$$

L'énergie libérée par réaction chimique est calculée par

$$\dot{q}_{chem} = \Delta G\ \cdot \dot{\eta}_{H_{ZC}} \quad \text{(II-36)}$$

La chaleur sensible et latente absorbée pendant le processus peut être estimée par l'équation suivante :

$$\dot{q}_{sens+latent} = (\dot{q}_{H_{Z,C}}\ \cdot C_{H_2} + \dot{\eta}_{O_{z,c}}\cdot C_{O_2} + \dot{\eta}_{H_2O,g}\cdot C_{H_2O,l})(\mathrm{T} - T_{amb}) + \dot{\eta}_{H_2O,g}\cdot\ H_v \quad \text{(II-37)}$$

## II.4 Modèle d'électrolyseur

L'électrolyse de l'eau est sa décomposition en molécules d'hydrogène et d'oxygène, comme le montre la figure 4. Pour produire des réactions électrochimiques aux deux électrodes, une tension de polarisation est appliquée à la cellule électrochimique [29].

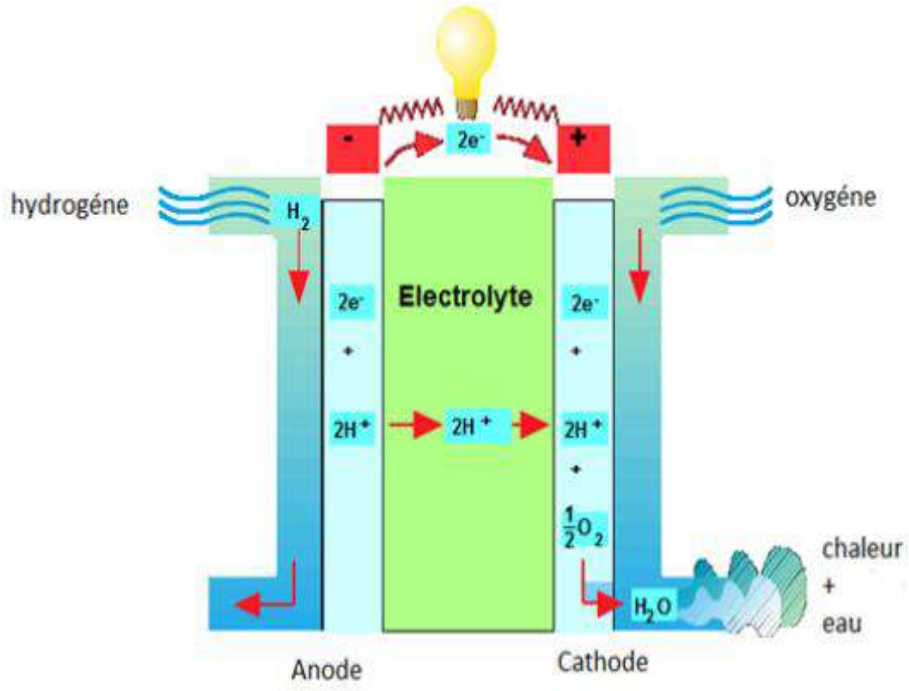



***Figure II.8 :*** *Vue en coupe de la cellule électrolytique PEM.*

Anode:

$$H_2O \rightarrow 2H^+ + \frac{1}{2}O_2 + 2e^- \quad \text{(II-38)}$$

Cathode

$$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2 \quad \text{(II-39)}$$

Globalement :

$$H_2O \rightarrow H_2 + \frac{1}{2}O_2 \quad \text{(II-40)}$$

Dans cette étude, un modèle simple d'électrolyseur est développé.

### II.4.1. Modèle électrochimique

$$U_{E_cell} = U_{rev} + \frac{r_1 + r_2 T}{A} I + S\, ln\left(\frac{t_1 + \frac{t_2}{T} + \frac{t_3}{T^2}}{A} I + 1\right) \quad \text{(II-41)}$$

$$U_{rev} = -\frac{\Delta G}{zF} \quad \text{(II-42)}$$

Où $U_{rev}^{0}$est la tension réversible de la cellule dans les conditions standards $K_{rev}$ (V), et est le coefficient de température empirique de $U_{rev}$ (V/°C). Les cellules d'électrolyseur, comme pour les cellules d'une pile à combustible, sont connectées en série, par conséquent, le courant est le même et la tension est donnée par [30]

$$U_E = n_c \cdot U_{E.cell} \quad \text{(II-43)}$$

**II.4.2 Modèle thermique**

$$C_t \frac{dT}{dt} = \dot{q}_{gen} - \dot{q}_{perte} - \dot{q}_{refroidissement} \quad \text{(II-44)}$$

La puissance calorifique générée à l'intérieur de l'électrolyseur. Elle peut être écrite comme :

$$\dot{q}_{gen} = n_c(V - V_{th}) \cdot I \quad \text{(II-45)}$$

Avec$V_{th} = \frac{-\Delta H}{2F}$ est la tension thermique, elle est égale 1.482 dans les conditions standard

Selon la loi de Faraday, le taux de production d'hydrogène dans une cellule d'électrolyseur est directement proportionnel au courant électrique de son circuit équivalent [30] :

$$\eta_{H_2} = \frac{\eta_F n_c i_e}{2F} \quad \text{(II-46)}$$

$\eta_F$Est le rendement Faraday qui est le rapport entre le taux réel et le taux théorique de production d'hydrogène dans l'électrolyseur. Elle s'exprime par [29] :

$$\eta_F = 96.5exp\left(\frac{0.09}{i_e} - \frac{75.5}{i_e^2}\right) \quad \text{(II-47)}$$

## II.5 Système de stockage d'hydrogène

La quantité d'hydrogène formée par l'électrolyseur est stockée directement dans un réservoir. Ce dernier contient la différence entre la quantité d'hydrogène produite par l'électrolyseur et la quantité consommée par la pile à combustible. Le modèle de stockage d'hydrogène calcule la pression du réservoir en utilisant la relation des gaz parfaits [29].

La dynamique de stockage est obtenue comme suit [29] :

$$P_r - P_{ri} = z\frac{N_{H_2} R T_r}{M_{H_2} V_r} \quad \text{(II-48)}$$

## III. Convertisseurs électroniques

### III.1 Convertisseur DC-DC

Les convertisseurs DC-DC utilisés pour les applications PV et PAC peuvent être non isolants ou isolants. Le convertisseur non isolant est utilisé lorsque la tension doit être augmentée ou diminuée et aucune isolation diélectrique n'est requise. Les convertisseurs d'isolement sont utilisés lorsque l'isolement et un taux de conversion élevé sont requis [31].

Le générateur photovoltaïque et la pile à combustible sont connectés au bus DC via un convertisseur BOOST pour élever leur tension de sortie. La relation entre l'entrée et la sortie du convertisseur DC-DC est définie comme les équations suivantes [32] :

$$P_{PV-DC} = \eta_{DC-DC} \cdot P_{PV} \quad \text{(II-49)}$$

$$P_{PAC-DC} = \eta_{DC-DC} \cdot P_{PAC} \quad \text{(II-50)}$$

Afin de valider les modèles développés, un test de simulation a été construit pour un PV connecté à un convertisseur DC-DC et une pile à combustible PEM.

## IV. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit et modélisé différents composants du système hybride PV-FC proposé en définissant des équations mathématiques associées à chaque composant du modèle et nous avons implémenté et simulé la PEMFC et le PV connecté à une charge via un convertisseur DC-DC. Dans l'environnement MATLAB-Simulink et nous avons discuté de l'extraction du maximum de puissance du PV.

# CHAPITRE III : simulation du système hybride PV/PEMFC

## I. Introduction

Il est bien connu que la demande d'électricité ne cesse d'augmenter. Ensuite, la non disponibilité de cette ressource oblige à rechercher de nouvelles solutions pour pallier ce manque d'énergie. Parmi les solutions proposées par les chercheurs, les petits boitiers électriques implantés à proximité des charges qu'ils doivent alimenter [33].

Cette forme de production est intéressante tout en utilisant des sources d'énergie renouvelables telles que le vent, le soleil et les piles à combustible car elle n'a pas d'effets nocifs sur l'environnement [15].

Les systèmes de production utilisant des sources d'énergie renouvelables nécessitent un mode de stockage d'énergie pour compenser les variations de puissance disponibles. Dans ce contexte, l'hydrogène a été choisi comme mode de stockage primaire pour les systèmes d'énergies renouvelables ce qui rend ces systèmes hybrides très prometteurs pour l'avenir énergétique [17].

Ces systèmes sont destinés à être des solutions respectueuses de l'environnement car ils tentent de maximiser l'utilisation des sources d'énergie renouvelables sans nuire à l'environnement. Cependant, il est encore incapable de remplacer adéquatement l'énergie industrielle et domestique en raison du caractère intermittent de l'énergie solaire dans les conditions d'exploitation (température et rayonnement solaire) et du problème persistant du stockage de l'énergie [17].

Une méthode pour surmonter ces problèmes consiste à intégrer des systèmes photovoltaïques à d'autres sources d'énergie telles que la pile à combustible pour assurer une alimentation continue 24 heures sur 24 malgré les conditions météorologiques. Ces systèmes sont dits hybrides combinant une source d'énergie renouvelable (photovoltaïque) et de l'hydrogène [35].

L'objectif principal du présent travail concerne le développement et la simulation d'un système d'alimentation hybride PV-FC autonome composé d'un générateur photovoltaïque (GPV) et d'une pile à combustible PEM (PEMFC) comme sources d'électricité, d'un électrolyseur, d'un DC-convertisseur DC et un réservoir de stockage d'hydrogène. Une charge variable est fournie par le système photovoltaïque via le convertisseur élévateur contrôlé par un MPPT (suivi du point de puissance maximum) [36].

Dans le cas où la puissance délivrée par le photovoltaïque dépasse la puissance demandée par la charge, il y aura un surplus de puissance qui permet d'alimenter l'électrolyseur. Ce dernier fournira

de l'hydrogène qui sera stocké dans un réservoir pour une utilisation ultérieure dans la pile à combustible (PEMFC), pour générer la puissance électrique nécessaire à la charge lorsque le PV est incapable de répondre aux demandes de la charge.

Dans ce chapitre, nous présentons un développement du programme de simulation du système hybride PV-FC dans l'environnement Matlab-Simulink à l'aide de modèles mathématiques, qui a été défini, avec une analyse détaillée de son comportement. Des résultats de simulation sont présentés pour montrer l'efficacité du système hybride global proposé.

## II. Simulations de panneau solaire :

### II.1. Influence de la variation des conditions métrologiques.

Pour confronter un peu plus notre modèle à la réalité, il est nécessaire d'étudier comment certains paramètres, tels que l'éclairement, la température.

#### II.1.1 Influence de température.

Les figures III.1et III.2 représentent l'évolution du courant, tension et puissance en fonction de température.

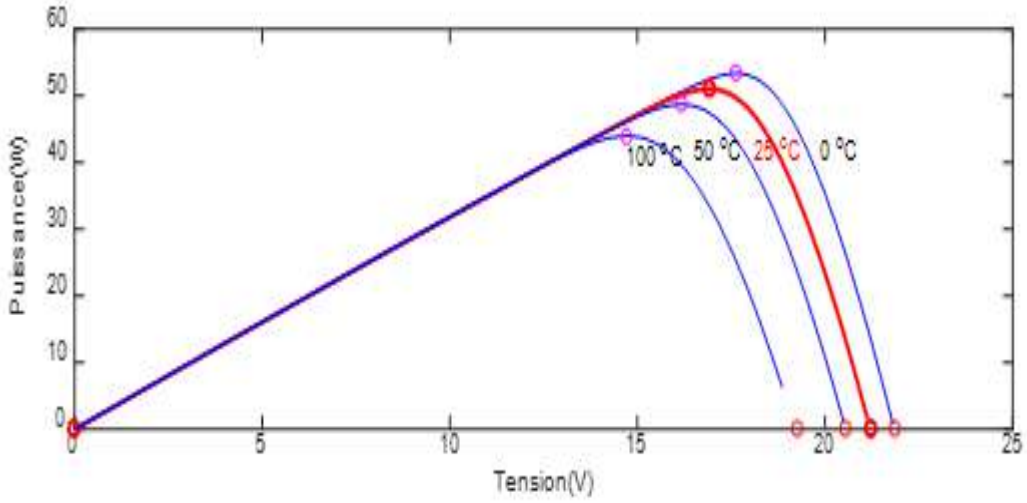



***Figure III.1*** *Caractéristique puissance-tension d'une cellule pour une variation de température.*

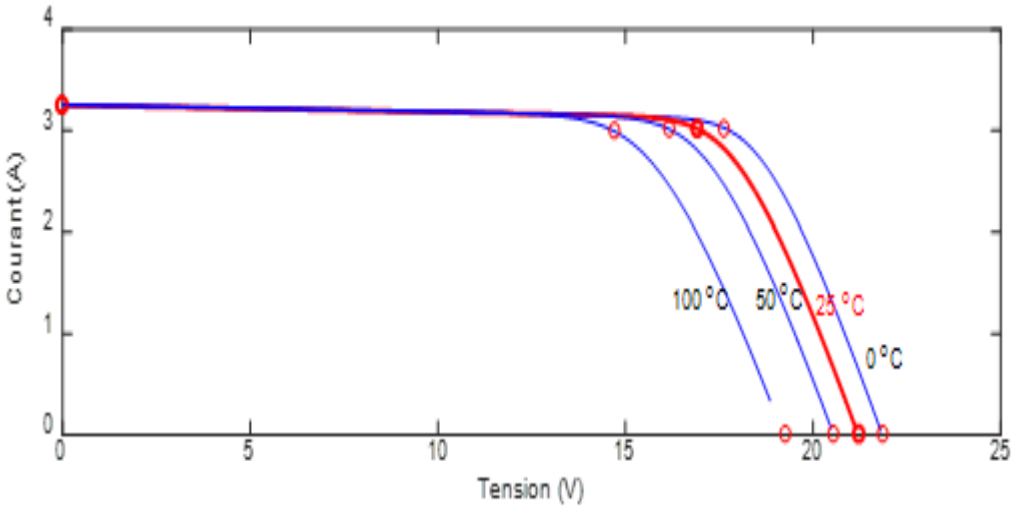



**Figure III.2** Caractéristique courant-tension d'une cellule pour une variation de température.

On remarque Figure III.1. Figure III.2 : lorsque la température augmente, la tension, à vide diminue alors que le courant augmente. Par contre la puissance fournie varie très diminue.

**II.1.2. Influence de l'éclairement.**

Les figures III.3 et III.4 montrent cette influence.

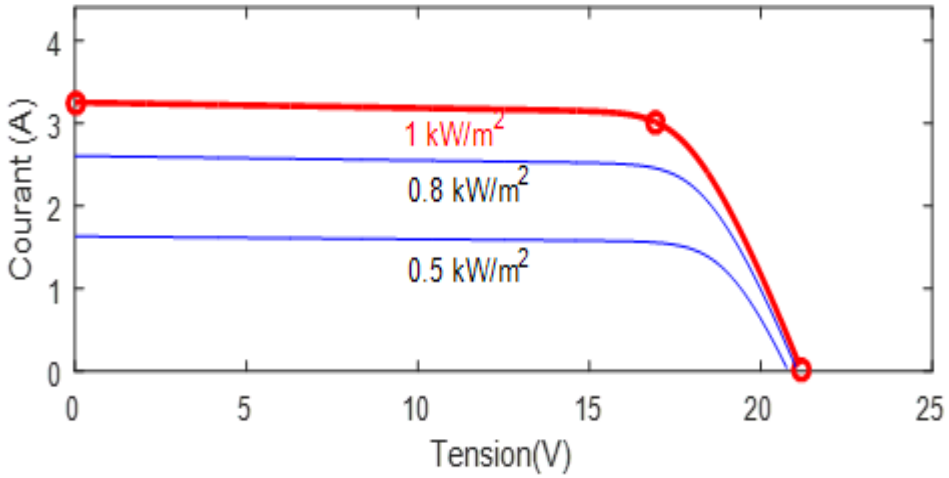



***Figure III.3*** *Caractéristique courant-tension d'une cellule pour différent éclairement.*

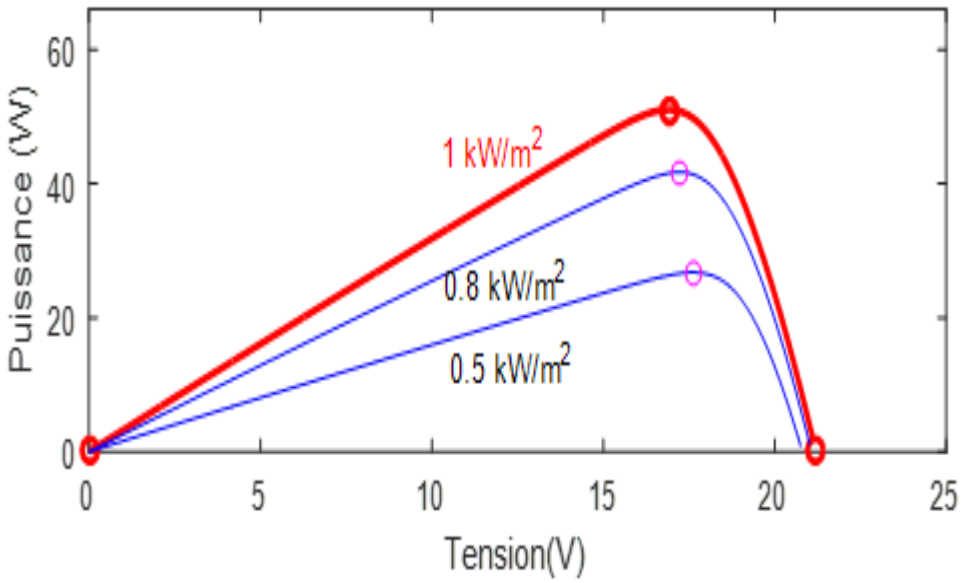



***Figure III.4.*** *Caractéristique puissance-tension d'une cellule pour différent.*

Pour différent niveau d'éclairement, on remarque que la tension maximale correspondant à la puissance maximale ne varie que très peu contrairement au courant maximal qui augmente fortement avec l'éclairement.

## II.2. Simulation de PV avec convertisseur boost commandé par MPPT.

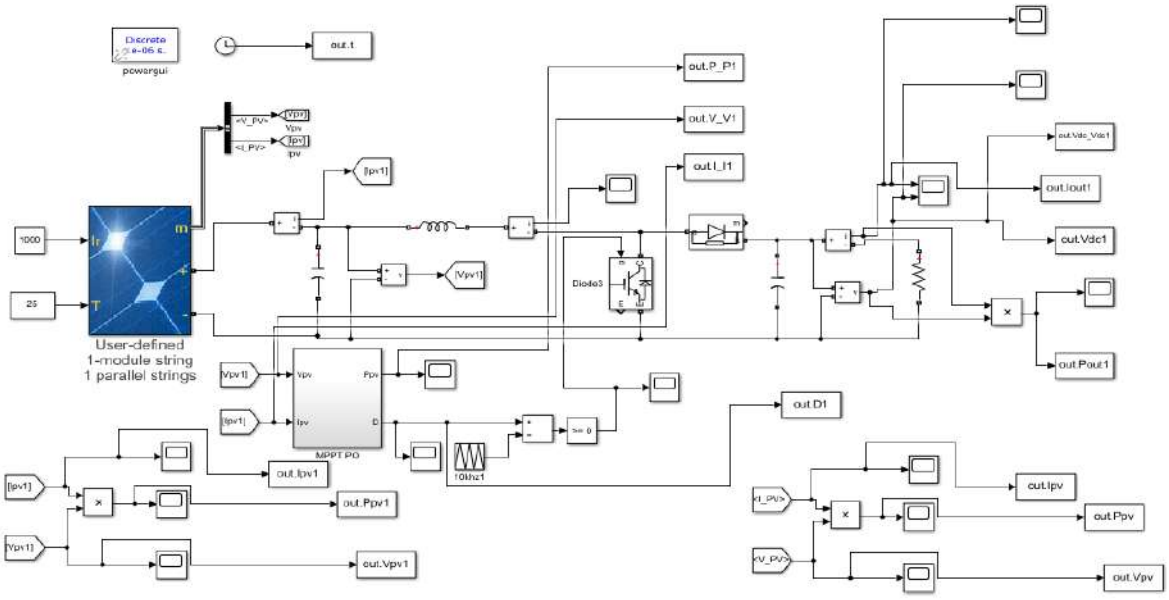



***Figure III.5 : simulation*** *de PV avec convertisseur boost commandé par MPPT.*

Cette simulation représenté le panneau solaire l'entre c'est un température et éclairement et les sortie tension le courant, ce dernier alimenté un convertisseur boost commandé par Commande MPPT.

### II.2.1 résultats de simulation d'un PV commandent par MPPT

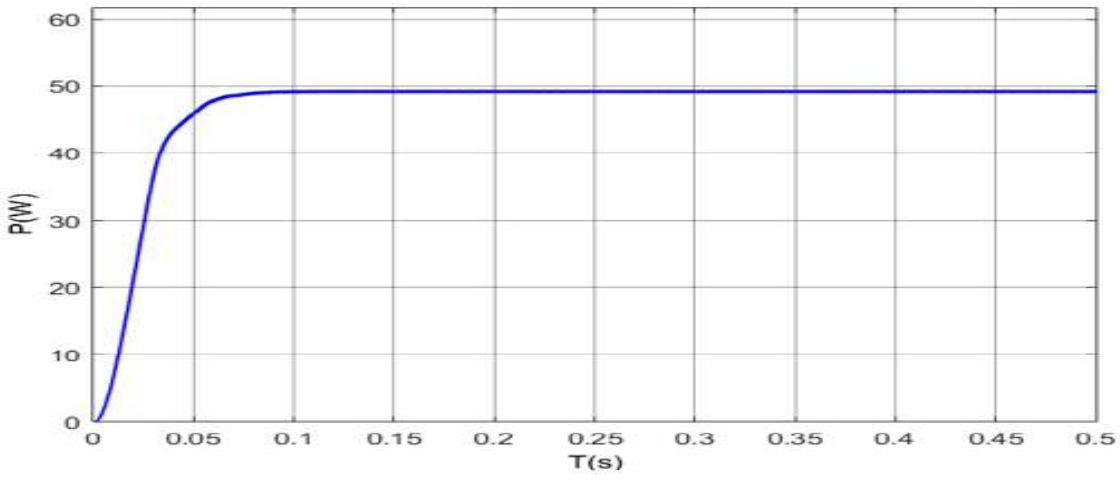



***Figure III.6*** *: puissance d'un PV par commande MPPT.*

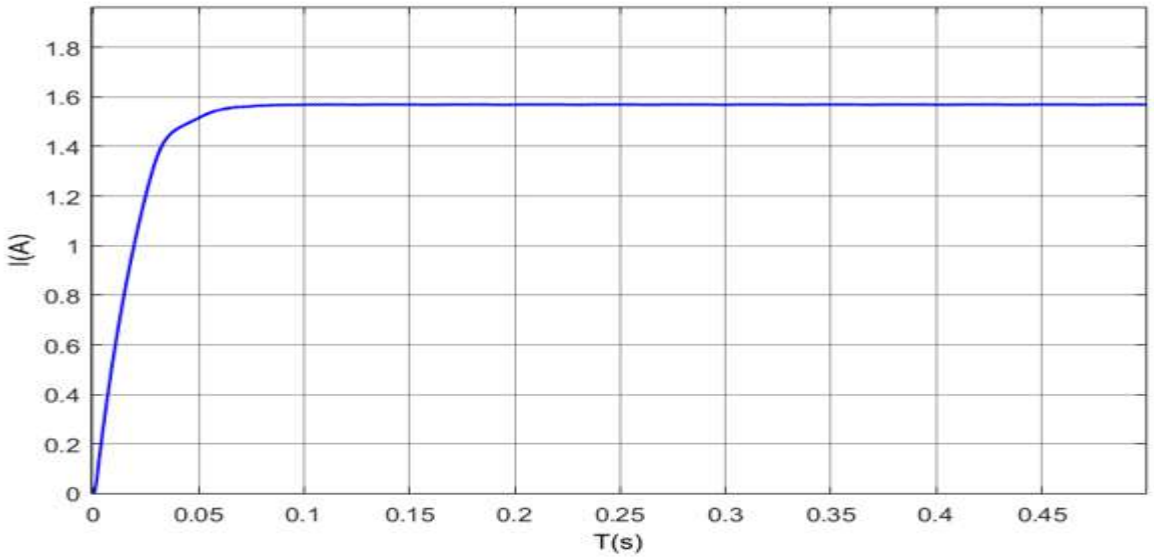



***Figure III.7*** *courants d'un PV par commande MPPT*

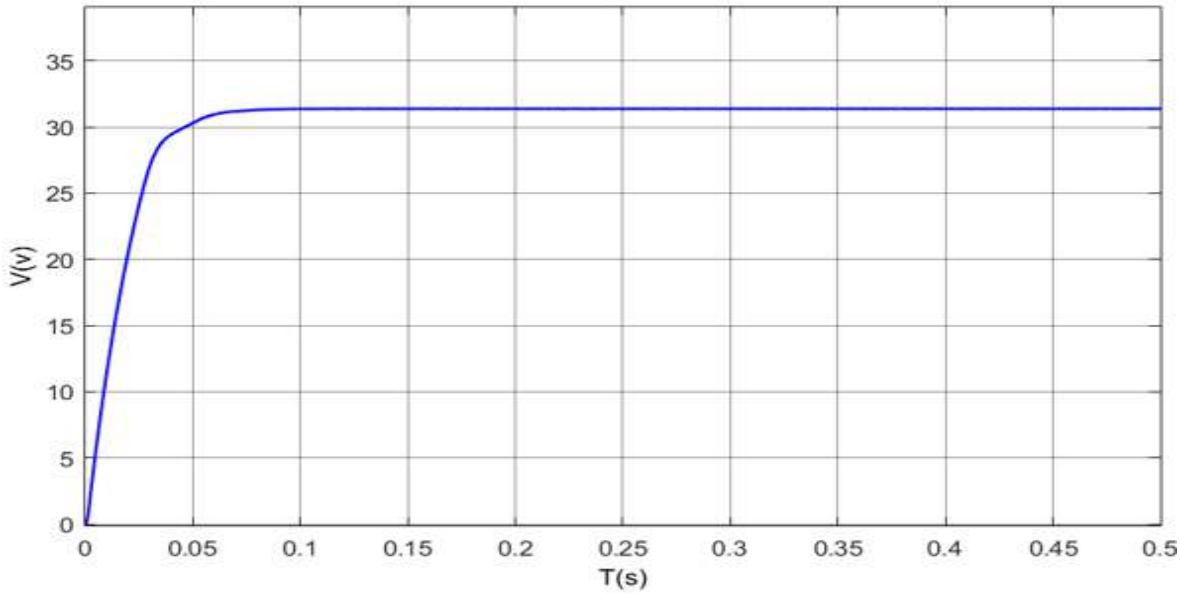



***Figure III.8*** *: tension d'un PV par commande MPPT.*

On remarque Figure III.7 Figure III.8 Figure III.9 : puissance et courant et tension d'un PV par commande MPPT est constante. P=49.8W, V=31.7, I=1.57A

## III. Simulations d'une pile PEFMC

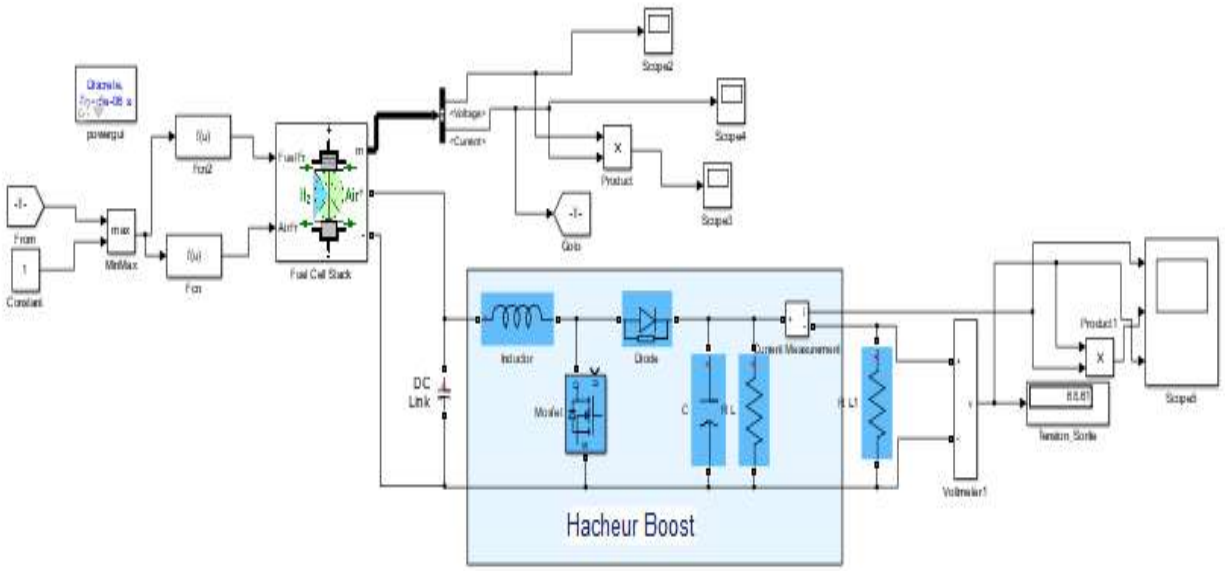



***Figure III.9 :*** *simulation* d'une pile à combustible avec Hacheur Boost

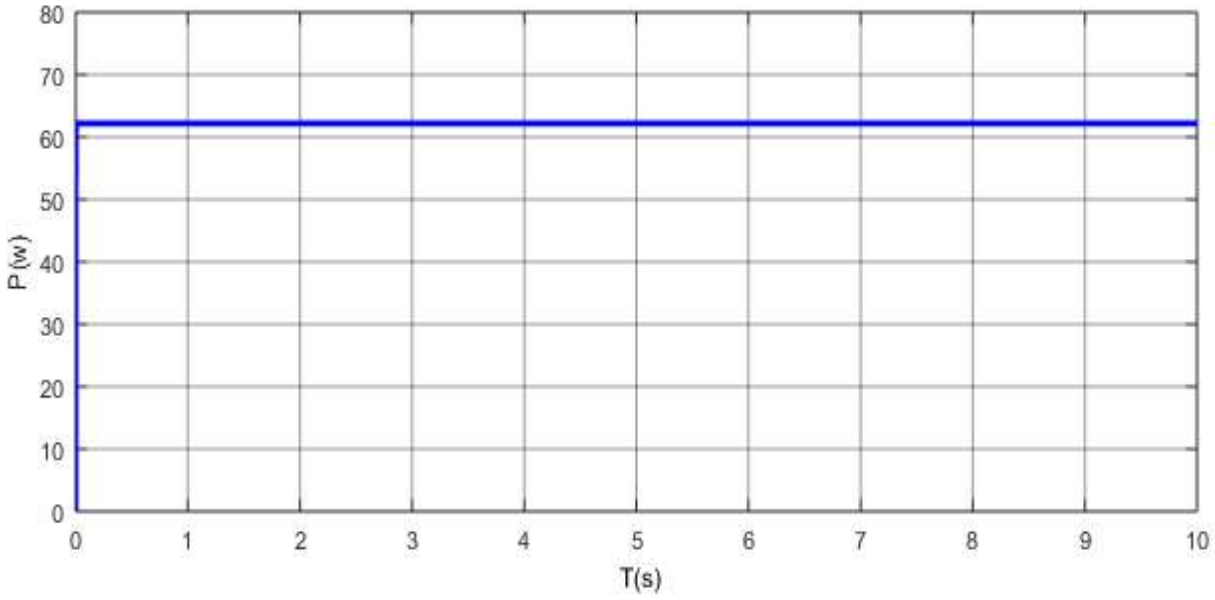



***Figure III.10*** *: puissance de pile à comestible PEMFC*

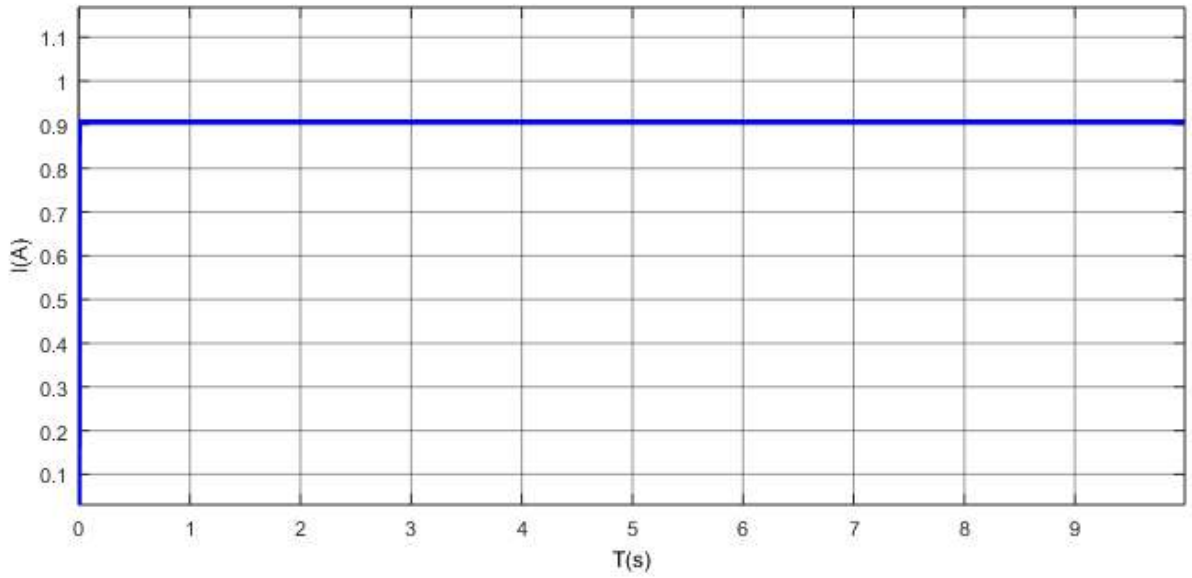



***Figure III.11*** *: courant de pile à combustible PEMFC*

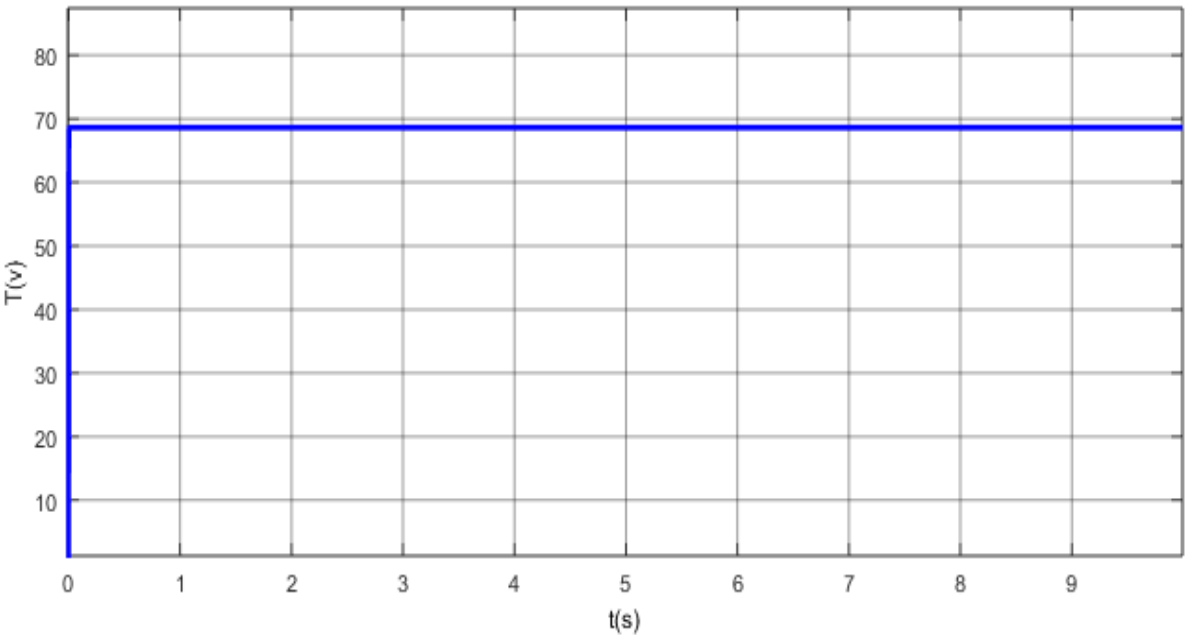



***Figure III.****12 : tensions de pile à combustible*.

On remarque Figure III.10 Figure III.11 Figure III.12 : puissance et courant et tension d'un pile à combustible est constante. P=62.1W, V=69V, I=0.9A

Le schéma fonctionnel illustré à la Figure III.13 Explique le principe de fonctionnement du système hybride PV-FC proposé.

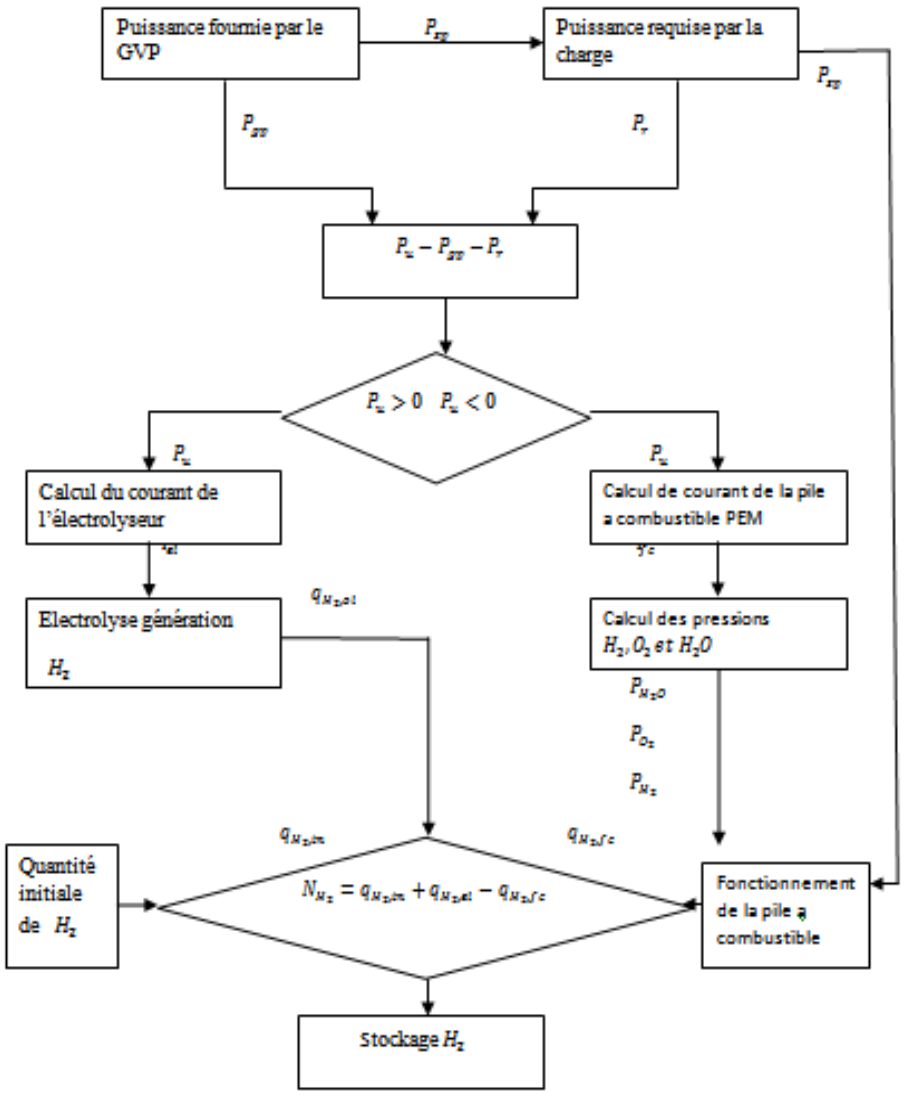



***Figure III.13*** *: Organigramme du principe de fonctionnement du système PV- FC*

## IV. Conclusion

Dans ce chapitre, un système hybride PV-FC autonome a été décrit et simulé. La puissance disponible du GPV dépend fortement des conditions environnementales. Pour pallier l'incapacité du système PV, ce dernier a été intégré à un système de pile à combustible, un électrolyseur et un système de stockage d'hydrogène. Un modèle de simulation détaillé a été développé qui permet de concevoir et d'analyser des systèmes hybrides PV-FC avec différents niveaux de puissance et paramètres. Le comportement dynamique du système hybride est testé dans des conditions variables de rayonnement solaire et de demande de charge. Le système développé présente d'excellentes performances pour la simulation d'une journée complète ou de périodes plus longues.

# CONCLUSION GENERALE

# CONCLUSION GENERALE

Le travail présenté par le texte ci-avant permet d'appréhender l'aspect électrique de composantes d'un système à énergie renouvelable basé essentiellement sur un générateur photovoltaïque et pile à combustible. Cette présente étude s'intègre dans un souci de développement de systèmes écologiques pour la fourniture d'électricité. Une analyse dédiée au contrôle de la puissance crête fournie par le générateur photovoltaïque est élaborée. Elle a été basée sur la méthodologie des plans d'expérience. L'impact des différents agents a été dégagé ainsi que l'interaction qui existe entre eux. Une vue globale sur la pile à combustible a été élaborée, suivie de sa modélisation. Nous nous sommes intéressés à la pile à combustible à membrane échangeuse de protons.

Le chapitre 01 : présenter une étude menée sur les systèmes PV-hydrogène, ainsi que quelques définitions relatives à ces systèmes.

Le chapitre 02 : présenter une décrit et modélisé différents composants du système hybride PV-FC proposé en définissant des équations mathématiques associées à chaque composant du modèle et nous avons implémenté et simulé la PEMFC et le PV connecté à une charge via un convertisseur DC-DC. Dans l'environnement MATLAB-Simulink et nous avons discuté de l'extraction du maximum de puissance du PV.

Le chapitre 03, présenté le système hybride PV-FC autonome a été décrit et simulé. Un modèle de simulation détaillé a été développé qui permet de concevoir et d'analyser des systèmes hybrides PV-FC avec différents niveaux de puissance et paramètres. Le comportement dynamique du système hybride est testé dans des conditions variables de rayonnement solaire et de demande de charge.

## Références

[1] : ZERHOUNI M'HAMED HOUARI « Intitulé Contribution á la modélisation et au contrôle d'un système á base de cellules photovoltaïques et de piles á combustible » Thèse de Doctorat : Electronique Université d'ORAN /2017

[2] : AnneLabouret & col « les bases de l'énergie photovoltaïque », Cellules solaires 5e Edition, 2005, 19-21.

[3] : LAROUI Rachid < Modélisation et simulation d'un système multi-sources Photovoltaïque-éoliendiesel dans la région d'Adrar >Université Ahmed Draya Adrar 2015

[4] : HELALI KAMELIA< Modélisation D'une Cellule Photovoltaïque : Etude Comparative> UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU 2012

[5] : RAUGEI Marco, « Le retour énergétique sur l'investissement énergétique (EROI) du photovoltaïque : méthodologie et comparaisons avec les cycles de vie des combustibles fossiles », Brookhaven National Laboratory, 2012

[6] : MOHAMMEDI Messaoud « *Gestion D'énergie Pour Une Chaine Multi Sources* », thèse doctorat, université Mohamed Khider Biskra, 10juillet 2016.

[7] : MEZZAI Sonia, TADJINE Katia « Étude D'un Système Hybride (Eolien Photovoltaïque) » Mémoire de fin Cycle, Université Abderrahmane Mira-Bejaia, 2015.

[8] : Tamrabet Monsaf, Influence Des Ecoulements Des Gaz Dans Les Canaux Sur La Consommation Des Réactifs Dans Une Pile A Combustible De Type PEMFC, Mémoire Magistère En Génie Mécanique, Université De Batna 07 Juillet 2010.

[9]: Maher A.R. Sadiq Al-Baghdadi, PEM fuel cell modeling, Department of Mechanical Engineering, International Technological University, 115 Dollis Hill Lane, London NW2 6HS, UK, 2007 Nova Science Publishers.

[10] : Florent Brèque, Modélisation Du Transport De Masse Dans Une Pile A Combustible De Type PEM et Etude De L'humidification Interne De La Pile, Mémoire Présenté L'université Du Québec A Trois-Rivières, Septembre 2008.

[11] : PACLISAN Dana-Maria « *Optimisation Par La Modélisation De L'expérimentation Vibratoire Des Systèmes Pile A Combustible Pour Le Transport Terrestre* », Thèse de DoctoratUniversité de Technologie de Belfort-Montbéliard École Doctorale Sciences pour L'ingénieur et Microtechniques, 9 septembre 2013

[12]: F. Mohammed M. Khaireddine<<Etude et gestion d'un systémehybride>>, Mémoire MASTER,07/07/2019

[13]: Haijin Li: High-Reliability Long-Backup-time Super UPS with Multiple Energy Sources.'Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2013 IEEE

[14] : J.Royer, T.Djiako, E.Schiller et B.S.Sy, « Le pompage photovoltaïque manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens », Université d'Otatawa , 1998.

[15]: S.Busquet, D. Mayer, R. Metkemeijer, Development of a clean standalone power system integrating PY, fuel cell and electrolyser, Proceedings of the Photovoltaic Hybrid Power Systems conference, Aix en Provence, 7-9 September, 2000.

[16]: YSukamongkol, S. Chungpaibulpatana, W. Ongsakul, A simulation model for predicting the performance of a solar photovoltaic system with alternating current loads, Renewable Energy 2002;27(2):23758.

[17]: J. J. Hwang, W R. Chang, F B. Weng, A. Su, and C K. Chen, Development of a small vehicular PEM fuel cell system, International Journal of Hydrogen Energy, vol. 33, no. 14, pp. 3801-3807, 2008.

[18]: Kalogirou, Soteris, Solar energy engineering: processes and systems / 1st ed., Academic Press 2009.

[19]: Masoum MAS, Dehbonei H, Fuchs EF, Theoretical and experimental analyses of photovoltaic systems with voltage and current-based maximum power-point tracking, IEEE Transactions on Energy Conversion 2002;17(4):51422.

[20]: D. Sera, R. Teodorescu and P Rodriguez, PV panel model on datasheet value, ISIE 2007, IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2007, pp.2392-2396.

[21]: D Sera. R Teodorescu, T Kerekes, Teaching Maximum Power Point Trackers Using a Photovoltaic Array Model with Graphical User Interface, Institute of Energy Technology, Aalborg University, Denmark. December 2008.

[22]: T.Esram, P. L. Chapman, Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques, IEEE Transactions On. Energy Conversion. Vol. 22, pp. 439-449. Jun. 2007.

[23]: M. Y El-Sharkh, A. Rahman, M. S. Alam, P. C Byrne, A. A. Sakla, and T. Thomas, A dynamic model for a stand-alone PEM fuel cell power plant for residential applications, International Journal of Power Sources, Department of Electrical and Computer Engineering, University of South Alabama, USA, 2004.

[24]: S.M. Sharifi Asl, S. Rowshanzamir, M.H. Eikani, Modelling and simulation of the steady-state and dynamic behaviour of a PEM fuel cell, International Journal of Power Sources, School of Chemical Engineering, Iran University of Science and Technology (lUST), Tehran, Iran, 2010.

[25] : Uzunoglu M, Alam MS, Dynamic modeling, design and simulation of a combined PEM fuel cell and ultra-capacitor system for stand alone residential applications, IEEE Transactions on Energy Conversion 2006;21(3):76775.

[26]: M.Uzunoglu, O.C Onar. M.S. Alam, Modeling, control and simulation of a PV/FC/UC based hybrid power generation system for stand-alone applications, International Journal of Renewable Energy, Department of Electrical and Computer Engineering. University of South Alabama. USA, 2009.

[27]: Padulles J. Ault GW. McDonald JR, An integrated SOFC plant dynamic model for power systems simulation, International Journal of Power Sources, 2000.

[28]: Shakti Singh, Prachi Chauhan, MohdAsimAftab, Ikbal Ali, S. M. Suhail Hussain, Taha Selim Ustun. « CostOptimization of a Stand-AloneHybridEnergy System with Fuel Cell and PV ». Energies 2020, 13, 1295.

[29]: HalukGrgn, Dynamic modeling of a proton exchange membrane (PEM) electrolyzer, International Journal of Hydrogen Energy. vol. 31, no. 1, pp. 2938, Istanbul,Turkey, 2006.

[30]: ØysteinUlleberg « Modeling of advancedalkalineelectrolyzers: a system simulation approach », International Journal of HydrogenEnergy, 28 (2003).

[31] GitanjaliMehta, Vinod Kumar Yadav. « Design of Photovoltaic and Fuel CellsbasedDistributedGenerationSystem : Entire System Survey ». 2018 International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON) GalgotiasUniversity, GreaterNoida, UP, India. Sep 28-29, 2018

[32]: YasuhitoHidaka, Koji Kawahara. « Modeling of a Hybrid System of Photovoltaic and Fuel cell for OperationalStrategy in Residential Use ».47th International Universities Power Engineering Conference (UPEC).2012

[33]: N.Tlili, B. Neili and F Ben Salem, "Modeling and Simulation of Hybrid System Coupling a Photovoltaic Generator, a PEM Fuel Cell and an Electrolyzer (Part 2)," submitted to theThird Int. Conf on Systems. Signals and Devices (SSD'14), Castelldefels-Barcelona, Spain, February 2014.

[34]: M.Khemariya, A. Mittal, Modeling and Simulation of different components of a standalone Photovoltaic and PEM Fuel Cell Hybrid System, International Journal on Emerging Technologies, Department of Energy, Maulana Azad National Institute of Technology, Bhopal (MP), 2010 .

[35]: MJ Khan et MT Iqbal, Dynamic modelling and simulation of a small wind fuel cell hybrid energy system, International Journal of Renewable Energy, Faculté de génie, Memorial University of Newfoundland, St. John's, T.-N., Canada A1B3X5, 2005.

[36]: N.Femia, G. Ptrone, G. Spagnuolo et M. Vitelli, Optimization of Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking Method, IEEE Transactions On Power Electronics, Vol.20, No. 4, pp. 16-19, mars 2004 .