



# Mémoire de Master

**Présenté au :**  
**Département :** Génie Électrique  
**Domaine :** Sciences et Technologies  
**Filière :** Electrotechnique  
**Spécialité :** Automatismes Industriels

**Réalisé par :**  
ALOUANE LYES

## Thème

---

**Etude et gestion d'énergie dans un système hybride**

---

**Soutenu le: 18/06/2025**

Devant la commission composée de :

M. OUATAH EL HANAFI	M.C.A	Univ.Bejaia	Président
M. ACHOUR ABDELYAZID	Professeur	Univ.Bejaia	Examineur
Mme. BENSMAIL SAMIA	M.C.B	Univ.Bejaia	Rapporteur

**Année Universitaire : 2024/2025**

Populaire et Démocratique Algérienne République  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



**Déclaration sur l'honneur**  
**Engagement pour respecter les règles d'authenticité scientifique dans**  
**l'élaboration d'un travail de recherche**

Arrêté ministériel n° 1082 du 27 décembre 2020 (\*)  
fixant les règles relatives à la prévention et la lutte contre le plagiat

Je soussigné,

Nom :

A Pouane

Prénom :

lyes

Matricule :

202033005563

Spécialité et/ou Option :

Automatismes industriels

Département :

Génie électrique

Faculté :

Sciences et technologies

Année universitaire :

2024/2025

et chargé de préparer un mémoire de (Licence, Master, Autres à préciser) : Master

Intitulé : Etude et gestion d'énergie dans un  
Système Hybride

déclare sur l'honneur, m'engager à respecter les règles scientifiques, méthodologiques,  
et les normes de déontologie professionnelle et de l'authenticité académique requises dans  
l'élaboration du projet de fin de cycle cité ci-dessus.

Fait à Béjaïa le  
02.07.2025

Signature de l'intéressé

(\*) Lu et approuvé

# *Remerciement*

*Avant tous, Nous remercions ALLAH tout-puissant de nous avoir  
donné le courage et la volonté pour accomplir ce travail.*

*Je tiens, tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à Madame  
BENSMAIL SAMIA, pour sa disponibilité, ses conseils et son  
accompagnement tout au long de ce travail, Merci pour sa confiance  
et son soutien qui m'ont permis d'avancer avec confiance dans la  
réalisation de ce mémoire.*

*Sans oublier de remercier les membres de jury qui me feront  
l'honneur de juger ce travail.*

*Enfin, j'adresse mes plus sincères remerciements à tous mes proches  
et amis. Qui m'ont toujours soutenu et encouragé tout au long de la  
réalisation de ce travail.*

*Merci à tous et à toutes.*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail à :*

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

*A mes très chers parents, pour leurs sacrifices, ils n'ont jamais cessé  
de m'encourager.*

*Que dieu me les garde.*

*A mon frère Housame et ma sœur Thiziri.*

*A mes tantes et mes oncles.*

*A mon très cher amie Chouf Yougorthaine.*

### Notation

- **SEH** Système d'énergie hybride.
- **PV** Photovoltaïque.
- **PAC** Pile à combustible.
- **GPV** Générateur photovoltaïque.
- **P&O** Méthode de perturbation et d'observation.
- **MPPT** Maximum power point tracking (poursuite de point de puissance maximal).
- **PPM** Point de puissance maximale.
- **PEMFC** Proton exchange membrane fuel cell (Pile à combustible à membrane échangeuse de protons).
- **PEM** Proton Exchange Membrane.
- **EDC** Etat de charge.
- **C.S** convertisseur statique.

### Symboles

- **Esref** L'éclairement sous conditions standards [W/m<sup>2</sup>].
- **Es** Ensoleillement [W/m<sup>2</sup>].
- **Tjref** Température sous conditions standards [°C].
- **$T_j$**  La température de jonction de la cellule [°C].
- **$I$**  Le courant de cellule.
- **$q$**  La charge d'électron =  $1.6 * 10^{-19}$ .
- **$I_0$**  Le courant de saturation [A].
- **$K$**  La constante de Boltzmann ( $1.3854 * 10^{-23} JK^{-1}$ ).
- **$E_g$**  Energie de gap.
- **$P_{H2}$**  Pressions partielles à l'interface de l'hydrogène (atm).
- **$P_{O2}$**  Pressions partielles à l'interface de l'oxygène (atm).
- **$P_{H_2O}^{Sat}$**  La pression de saturation d'eau.
- **$Z$**  Est le nombre d'électrons participants à la réaction.
- **$\dot{q}_{chem}$**  L'énergie calorifique ou chimique [J].
- **$\dot{q}_{elec}$**  L'énergie électrique [J].
- **$\dot{q}_{sens+latent}$**  L'énergie calorifique latente et sensible [J].
- **$\dot{q}_{perdue}$**  Les pertes de chaleur [J].

---

## Listes des notation et symboles

---

- $\dot{n}_{H_2,c}$  Le débit molaire d'hydrogène consommé.
- $\Delta G$  L'énergie libre de Gibbs.
- $M_{pac}$  La masse totale de la pile à combustible.
- $C_{pac}$  Capacité thermique.
- $F$  La constante de Faraday (C/mol).
- $r_{H-O}$  Le rapport molaire entre l'hydrogène et l'oxygène dans la réaction.
- $C_{bat}$  La capacité (Ah) nominale de la batterie.
- $Q_{bat}$  La quantité de charge (C) manquante par rapport à  $C_{bat}$ .
- $U_{E-cell}$  La tension aux bornes de la cellule (V).
- $U_{rév}$  La tension réversible de cellule (V).
- $U_{rév}^0$  La tension réversible de la cellule dans les conditions standards (V).
- $K_{rév}$  Le coefficient de température empirique de  $U_{rév}$  (V/°C).
- $C_t$  La capacité thermique globale de l'électrolyseur.
- $\dot{q}_{gen}$  Est la puissance calorifique générée à l'intérieur de l'électrolyseur.
- $\dot{q}_{perte}$  La perte de puissance calorifique.
- $T_{amb}$  Est la température ambiante (°C).
- $\dot{q}_{refroidissement}$  La perte de puissance calorifique due au refroidissement.
- $T_{Cm,e}$  Est la température de l'eau de refroidissement d'entrée (°C).
- $T_{Cm,s}$  Est la température de l'eau de refroidissement de sortie.
- $V_{AHX}$  Est la température de l'eau de refroidissement de sortie.
- $h_{cond}$  Coefficient relatif à l'échange de chaleur en conduction (W/°C).
- $h_{conv}$  Coefficient relatif à l'échange de chaleur en convection (W/ (°C.A)).
- $\dot{n}_{H_2prod}$  Débit de production d'Hydrogène (mole/sec).
- $n_F$  Rendement faradique.
- $V_{act}$  Polarisation d'activation.
- $V_{cons}$  Polarisation de concentration.
- $V_{ohm}$  Polarisation ohmique.
- $P_{anode}$  La pression de l'hydrogène à l'anode.
- $P_{cathode}$  La pression de l'oxygène à la cathode.
- $R_{ohm0}$  La partie constante de résistance ohmique
- $K_{RI}, K_{RT}$  Constantes empiriques.

---

## Listes des notation et symboles

---

- $h$  Le coefficient de transfert de chaleur par convection en  $[W/m^2.K]$ .
- $A$  La surface de chaque cellule dans  $[m^2]$ .
- $N_s$  Le nombre de cellule dans la pile à combustible.
- $P_b$  La pression du réservoir qui est mesurée en (Pascal)
- $P_{bi}$  La pression initiale de réservoir de stockage (Pascal)
- $R$  La constante de gaz universelle ( $J / k \text{ mol} \cdot K$ )
- $T_b$  La température de fonctionnement (K)
- $V_b$  Le volume du réservoir ( $m^3$ )

## Liste des figures

### Chapitre I : Généralités sur les systèmes hybrides

Figure I.1 : Architecture d'un système hybride a bus continu.....	4
Figure I.2 : Architecture d'un système hybride a bus alternatif .....	4
Figure I.3 : Architecture mixtes a bus CC-AC .....	5
Figure I.4 : Effet photovoltaïque à l'échelle de la cellule .....	5
Figure I.5 : Panneau photovoltaïque .....	6
Figure I.6 : Cellules ou modules photovoltaïques en série .....	6
Figure I.7 : Cellules ou modules photovoltaïques en parallèle .....	7
Figure I.8 : Pile à combustible.....	7
Figure I.9 : Principe de fonctionnement de piles à combustible à électrolyte acide (A) ou alcalin (B) .....	8
Figure I.10 : Caractéristiques d'un panneau solaire.....	10

### Chapitre II : Modélisation de différents constituant de SEH

Figure II.1 : Schéma descriptif du système étudié.....	12
Figure II.2 : Schéma équivalent d'une cellule solaire.....	13
Figure II.3 : Schéma de principe d'un convertisseur survolteur.....	14
Figure II.4 : Schéma d'un Hacheur survolteur à $t \in [0, \alpha. T]$ .....	15
Figure II.5 : Schéma d'un Hacheur survolteur à $t \in [\alpha.T, T]$ .....	15
Figure II.6 : Schéma équivalent d'une PEMFC.....	16
Figure II.7 : schéma électrique équivalent de la PAC.....	20
Figure II.8 : Modèle R-C de la batterie.....	22
Figure II.9 : Schéma d'un hacheur Buck-Boost.....	23

### Chapitre III : Optimisation et maximisation de puissance d'un SEH

Figure III.1 : Caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ dans la condition standard.....	27
Figure III.2 : Caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$ dans la condition standard.....	27
Figure III.3 : Influence de la température sur la caractéristique $I_{pv} = f(V_{pv})$ .....	28
Figure III.4 : Influence de la température sur la caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$ .....	29
Figure III.5 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$ .....	29
Figure III.6 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$ .....	30
Figure III.7 : Influence de résistance série la caractéristique $I_{pv}= f(V_{pv})$ .....	30
Figure III.8 : Influence de résistance série la caractéristique $P_{pv}= f(V_{pv})$ .....	31



---

## Liste des figures

---

<b>Figure III.9 :</b> Caractéristique $V_{pac} = f(I_{pac})$ de la pile PEMFC.....	31
<b>Figure III.10 :</b> Caractéristique $P_{pac} = f(I_{pac})$ de la pile PEMFC.....	32
<b>Figure III.11 :</b> Influence de la température $V_{pac} = f(I_{pac})$ .....	33
<b>Figure III.12 :</b> Influence de la température $P_{pac} = f(I_{pac})$ .....	33
<b>Figure III.13 :</b> Caractéristique V-I d'électrolyseur.....	34
<b>Figure III.14 :</b> Influence de la température sur la caractéristique I-V de l'électrolyseur.....	34
<b>Figure III.15 :</b> Diagramme fonctionnel algorithme "perturbation et observation".....	36
<b>Figure III.16 :</b> allure de la puissance sous conditions stables ( $E_s=1000W/m^2$ , $T=25C^\circ$ ).....	37
<b>Figure III.17:</b> allure de la tension sous conditions stables ( $E_s=1000W/m^2$ , $T=25C^\circ$ ). ....	37
<b>Figure III.18 :</b> allure du courant sous conditions stables ( $E_s=1000W/m^2$ , $T=25C^\circ$ ).....	38
<b>Figure III.19 :</b> allure de la puissance en fonction de la tension sous conditions standards....	38
<b>Figure III.20 :</b> consigne de l'ensoleillement variable.....	38
<b>Figure III.21:</b> allure de la puissance pour une variation de l'ensoleillement.....	39
<b>Figure III.22 :</b> allure de la tension de charge pour une variation de l'ensoleillement.....	39
<b>Chapitre IV : Gestion d'énergie du SEH</b>	
<b>Figure IV.1 :</b> concept du système hybride.....	41
<b>Figure IV.2 :</b> Organigramme de gestion d'énergie du système hybride.....	43
<b>Figure IV.3 :</b> Profil de puissance demandée par la charge.....	44
<b>Figure IV.4 :</b> Profile de l'ensoleillement.....	44
<b>Figure IV.5 :</b> Profile de la température.....	45
<b>Figure IV.6 :</b> Allures des puissances (Photovoltaïque, charge, batterie, pile à combustible)... .....	45
<b>Figure IV.7 :</b> La différence entre la puissance $P_{pv}$ et $P_{ch}$ .....	46
<b>Figure IV.8 :</b> l'état de charge de la batterie.....	47
<b>Figure IV.9 :</b> Tension du bus continu.....	47

---

## Liste des tableaux

---

### Liste des tableaux

<b>Tableau I.1 :</b> Les différents types de piles à combustible.....	8
-----------------------------------------------------------------------	---

---

# Sommaire

---

## Sommaire

Introduction générale.....	1
<b>Chapitre I : Généralités sur les systèmes hybrides</b>	
I.1. Introduction.....	3
I.2. Système hybride à énergies renouvelables .....	3
I.2.1. Définition .....	3
I.2.2. Configuration de bus dans les systèmes hybrides.....	3
I.2.2.1. Architecture à bus CC.....	3
I.2.2.2. Architecture à bus AC.....	4
I.2.2.3. Architecture mixtes à bus CC-AC.....	4
I.3. Energie solaire photovoltaïque .....	5
I.3.1. Définition.....	5
I.3.2. Principe de fonctionnement.....	5
I.3.3. Panneau photovoltaïque.....	6
I.3.4. Association des cellules photovoltaïques.....	6
I.3.5. Avantage et inconvénients des systèmes photovoltaïques.....	7
I.4. Pile à combustible.....	7
I.4.1. Définition.....	7
I.4.2. Principe de fonctionnement d'une pile à combustible.....	8
I.4.3. Différents types de piles à combustible.....	8
I.4.4. Avantage et inconvénients de la pile à combustible.....	9
I.5. Les batteries.....	9
I.5.1. Définition.....	9
I.6. Les convertisseurs statiques.....	9
I.6.1. Convertisseur DC/DC (hacheur).....	9
I.6.2. Convertisseur DC/AC (onduleur).....	9
I.6.3. Convertisseur AC/DC (Redresseur) .....	9
I.7. Commande MPPT avec panneaux photovoltaïque .....	10
I.7.1. Principe du MPPT.....	10
I.8. Gestion d'énergie.....	10
I.9. Avantage et inconvénients de système SEH.....	10
I.10. Conclusion.....	11

---

# Sommaire

---

## Chapitre II : Modélisation de différents constituant de SEH

II.1.Introduction .....	12
II.2. Description du système étudié.....	12
II.3. Modélisation du générateur photovoltaïque.....	12
II.4.Modèle d'un hacheur survolteur (Boost).....	14
II.5.Modélisation de la pile à combustible.....	16
II.5.1.Modèle électrochimique de la pile à combustible PEMFC.....	16
II.5.2.Modèle thermique de la pile à combustible .....	18
II.5.3.Modelé électrique dynamique de la PEMFC.....	19
II.5.4.Taux d'hydrogène consommé.....	20
II.6.Modélisation de la batterie .....	22
II.7.Modélisation du hacheur Buck-Boost (abaisseur-élevateur) .....	22
II.8.Modélisation de l'électrolyseur.....	23
II.8.1.Modèle électrochimique.....	23
II.8.2.Modèle thermique.....	24
II.8.3.Débit de production d'Hydrogène .....	25
II.9.Modélisation du réservoir d'hydrogène.....	26
II.10.Conclusion .....	26

## Chapitre III : Optimisation et maximisation de puissance d'un SEH

III.1.Introduction.....	27
III.2.Caractéristiques de panneau photovoltaïque .....	27
III.2.1.Influence de la température.....	28
III.2.2.Influence de l'éclairement.....	29
III.2.3.Influence de la résistance série RS.....	30
III.3.Caractéristique de la pile combustible PEMFC.....	31
III.3.1.Caractéristique tension-densité de courant de la pile PEMFC.....	31
III.3.2.La courbe de puissance .....	32
III.3.3.Influence de la température.....	32
III.4.Caractéristiques d'électrolyseur.....	34
III.4.1.Influence de la Température.....	34
III.5.La Commande MPPT.....	35
III.5.1. Classification des techniques MPPT.....	36
III.5.1.1.Méthode classique .....	36

---

## Sommaire

---

III.5.1.2 Méthode avancées.....	37
III.5.2.Simulation numérique.....	37
III.5.3. Fonctionnement sous des conditions constantes .....	37
III.5.4. Fonctionnement sous conditions variables.....	38
III.5.5.Interpretation des résultats .....	39
III.6.Conclusion.....	40

### **Chapitre IV : Gestion d'énergie du SEH**

IV.1.Introduction .....	41
IV.2.Conception du système hybride (PV/PAC/batterie).....	41
IV.3.Le principe de gestion d'énergie de ce système hybride.....	41
IV.3.1.Interprétation des résultats obtenus par la simulation.....	43
IV.4.Conclusion.....	48
Conclusion générale.....	49



# Introduction générale

### Introduction générale

Aujourd'hui, la demande en énergie ne cesse d'augmenter dans le monde. En parallèle, les sources d'énergies utilisées principalement sont (pétrole, le charbon ou l'uranium) qui sont en train de diminuer et posent de sérieux problème environnementaux à cause des émissions de gaz à effet de serre [1]. Ces problèmes poussent à chercher des alternatives plus propres et plus durable.

Parmi ces alternatives, l'énergie solaire joue un rôle important surtout dans un pays comme l'Algérie qui bénéficie d'un ensoleillement exceptionnelle, en particulier dans le Sahara. Cependant, cette énergie reste intermittente, car elle dépend des conditions métrologiques. Pour l'exploiter au mieux, on utilise des techniques comme le suivi du point de puissance maximale (MPPT) qui permet de produire plus d'électricité selon l'ensoleillement [2].

Pour rendre la production d'électricité plus stable et réponde à la demande a tout moment, il est intéressent d'utiliser un système hybride. Ce type de système combine plusieurs sources d'énergies et de stockage.

Aujourd'hui, les batteries jouent un rôle important dans le stockage de l'énergie produite par les sources renouvelables comme le solaire. Ces technologies permettent d'emmagasiner l'énergie solaire pendant les moments de forts ensoleillements et de la libérer lorsque la production diminue, particulièrement durant la nuit ou par de temps nuageux [1]. Cependant leur capacité et limiter dans le temps. C'est la raison pour laquelle on associe fréquemment leur utilisation avec une pile à combustible, qui utilise l'hydrogène produit par l'électrolyseur. Cette pile permet de produire de l'électricité à la demande. Fournissant donc une alternative aux batteries pour garantir une alimentation stable.

Ce genre de système nécessite une bonne gestion d'énergie pour éviter les pertes, limiter l'usure des composants, et garantir un fonctionnement optimal. C'est dans ce cadre que s'inscrit ce travail.

L'objectif de ce projet et de concevoir une stratégie de gestion d'énergie pour un système hybride composée de (Générateur photovoltaïque, électrolyseur, pile à combustible, batteries).

Dans le premier chapitre, nous présenterons une vue d'ensemble de système de production d'énergie hybride. Ainsi qu'une introduction aux différentes sources utilisées dans le système étudier.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté la modélisation des différentes composantes de notre système SEH, afin de mieux comprendre leurs fonctionnements. Chaque partie a été modélisée pour montrer comment elle fonctionne réellement dans le système.

Le troisième chapitre, est consacré à la présentation des résultats de simulation de chaque sous-système en tenant compte des différentes conditions climatique notamment les variations de température. Les résultats indiquent que le comportement des composants présente une forte non-linéaire, compliquent ainsi la production de l'énergie, pour cela nous avons intégré un contrôleur MPPT afin d'extraire le maximum de puissance disponible.

## **Introduction générale**

---

Enfin, dans le quatrième chapitre nous intégrons l'ensemble des sous système modélisée précédemment pour former un système global de gestion d'énergie (SGE). L'objectif est de faire fonctionner les différents composants du SEH (PV, PAC, batteries), sous une stratégie de gestion bien défini. Nous détaillerons la manière dont le système prend les décisions pour alimenter la charge, stocker l'énergie ou activer la pile à combustible. Selon les besoins et les conditions météorologiques. Ce chapitre présente également les résultats de la simulation, ce qui nous permettra de voir si la stratégie fonctionne bien et si le système est capable de fournir une alimentation stable et efficace.

Nous achèverons ce travail avec une conclusion et perspectives.

A decorative graphic of a scroll with a light gray background and a black outline. The scroll is partially unrolled, with the top and bottom edges showing a light gray interior. The title is centered on the unrolled portion of the scroll.

# **Chapitre I : Généralités sur les systèmes hybrides**



## **I.1. Introduction**

Les énergies renouvelables ont introduit un nouvel aspect dans notre société, générant des challenges sur les plans technologique, économique et sociologique. L'utilisation de ces sources pour produire de l'énergie électrique génère plusieurs démarches, et crée une demande importante sur le marché de l'emploi.

Ces énergies renouvelables ont aussi une importance cruciale pour satisfaire l'augmentation de la demande mondiale en énergie d'écoulant des opérations industrielles dans les pays développés [3].

Dans ce chapitre nous allons présenter une étude générale des systèmes hybrides et leur principe de fonctionnement. Dans notre cas nous avons un système composé de (générateur photovoltaïque, pile à combustible, réservoir d'hydrogène, batterie de stockage) pour cela nous allons nous concentrer sur les composants constituant le système à étudier.

## **I.2. Système hybride à énergies renouvelables**

### **I.2.1. Définition**

Un système hybride à énergie renouvelable se compose d'au moins de deux sources d'énergies renouvelables connectées au bus via des convertisseurs, ce qui permet de réguler la tension et l'intensité du courant fournis par chacune des différentes sources [4]. Un tel système nécessite une stratégie de gestion de flux énergétique qui a pour objectif de répondre à la demande de la charge tout en maximisant, si cela est faisable, la production d'énergie à partir des sources renouvelables et garantissant une qualité optimale.

### **I.2.2. Configuration de bus dans les systèmes hybrides**

Un système hybride de production d'énergie renouvelable intègre diverses sources d'électricité, telles que des panneaux photovoltaïques et une pile à combustible et d'autre, en plus de composants électroniques de puissance et de dispositifs de stockage [5]. On identifie trois architectures à connaître :

- Architecture a bus CC
- Architecture a bus AC
- Architecture mixtes a bus CC-AC

#### **I.2.2.1. Architecture à bus CC**

Dans le système hybride illustré à la figure (I.1), l'énergie fournie par chaque source et centralisée sur un bus en courant continu. Par conséquent, les dispositifs de conversion d'énergie en courant alternatif fournissent initialement leur puissance à un redresseur qui la convertit ensuite en courant continu [7]. Les générateurs sont reliés en série à l'onduleur afin d'approvisionner les charges alternées. L'onduleur est chargé de fournir de l'énergie aux charges alternatives depuis le bus continu.

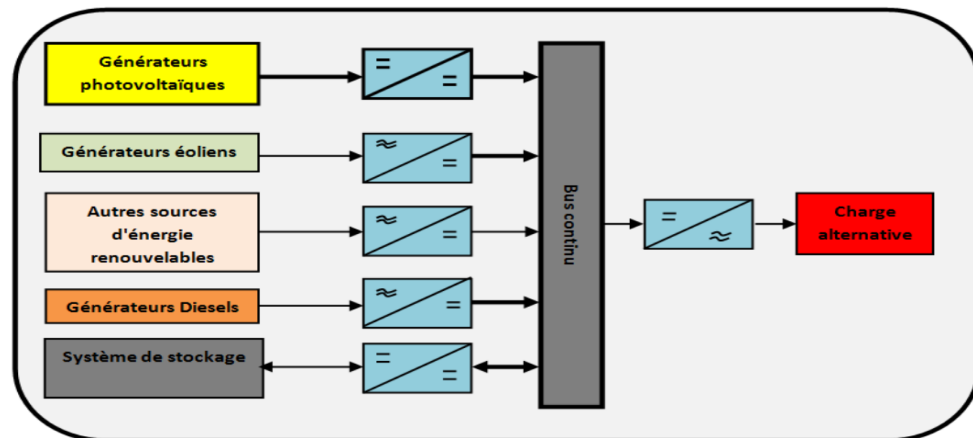


Figure I.1 : Architecture d'un système hybride à bus continu [6].

### I.2.2.2. Architecture à bus AC

Dans cette configuration, l'ensemble des éléments du système hybride sont connectés à la charge alternative, comme illustré sur la figure (I.2). Cette configuration offre de meilleures performances comparées à la précédente, étant donné que chaque convertisseur peut être synchronisé avec son générateur pour pouvoir alimenter la charge de manière indépendante et en même temps que les autres convertisseurs [7]. Cela donne une flexibilité afin que les sources, relativement complexes à cause de leur fonctionnement parallèle, puissent répondre à la demande de la charge en synchronisant les tensions de sortie avec celles de la charge d'énergie.

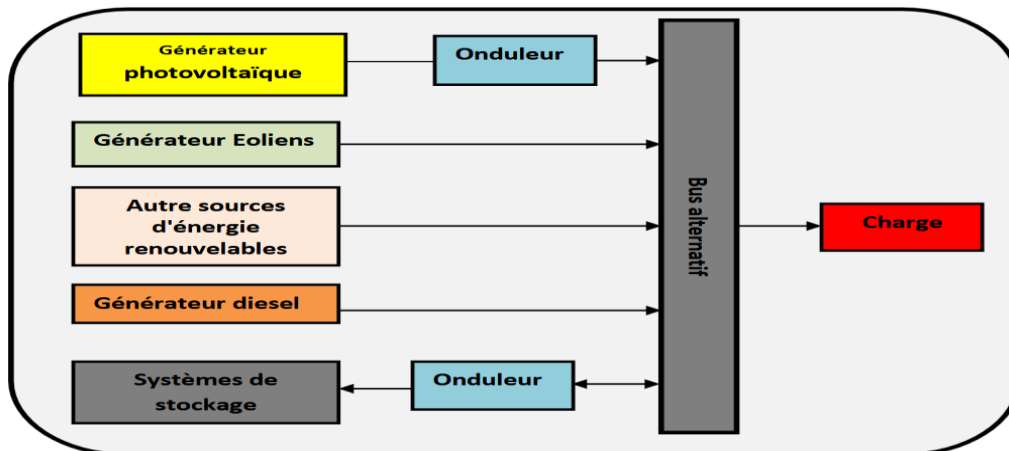


Figure I.2 : Architecture d'un système hybride à bus alternatif [6].

### I.2.2.3. Architecture mixtes à bus CC-AC

La figure (I.3) illustre la configuration comportant deux bus, à courant continu et à courant alternatif. Elle présente des performances améliorées par rapport à les configurations précédentes. Dans ce contexte, les sources d'énergie ont la capacité de fournir directement une portion de la charge en courant alternatif, ce qui favorise l'amélioration de l'efficacité du système et la diminution de la puissance nominale de l'onduleur [7]. Les inverseurs placés entre les deux bus (le redresseur et l'onduleur) peuvent être substitués par un inverseur bidirectionnel, qui fonctionne normalement et effectue la conversion CC-CA (fonctionnement onduleur).

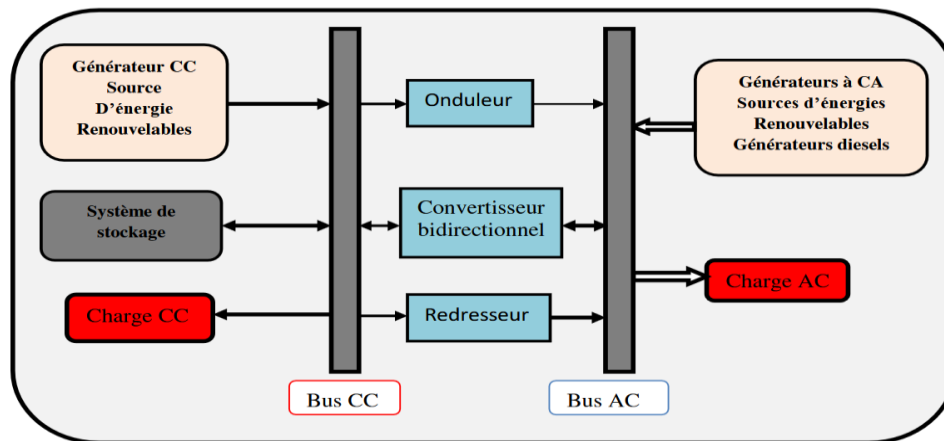


Figure I.3 : Architecture mixte à bus CC-AC [6].

### I.3. Energie solaire photovoltaïque

#### I.3.1. Définition

L'énergie solaire photovoltaïque désigne l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire par une cellule photovoltaïque. Plusieurs cellules sont reliées entre elles et forment un panneau solaire (ou module) photovoltaïque [4]. Plusieurs modules qui sont regroupés dans une centrale solaire photovoltaïque sont appelés champ photovoltaïque. Le terme photovoltaïque peut désigner soit le phénomène physique - l'effet photovoltaïque - ou la technologie associée.

#### I.3.2. Principe de fonctionnement

L'énergie solaire photovoltaïque correspond à l'énergie produite en transformant la lumière en électricité. On obtient cette énergie par l'intermédiaire du phénomène physique connu sous le nom d'effet photovoltaïque. [8] Énoncé par Edmond Becquerel en 1839, le concept est plutôt simple et implique la création d'une différence de potentiel aux extrémités d'une structure constituée de matériau semi-conducteur, résultant de l'absorption de la lumière.

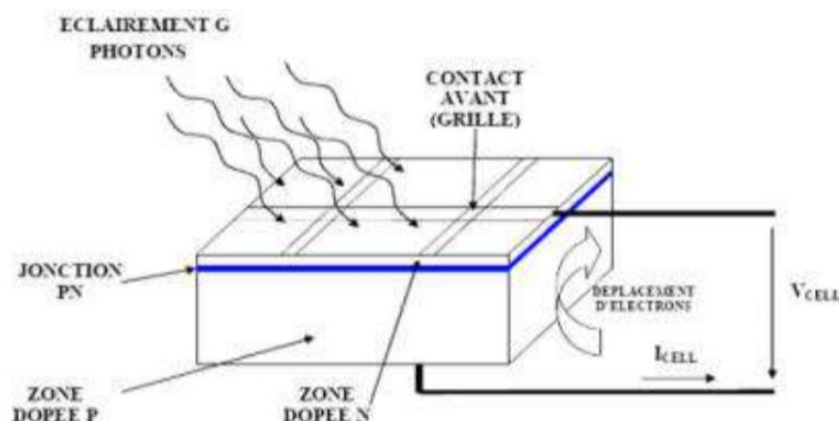


Figure I.4 : Effet photovoltaïque à l'échelle de la cellule [8].

### I.3.3. Panneau photovoltaïque

Un panneau photovoltaïque c'est un ensemble de cellules qui sont connectés en série et en parallèles, qui transforme une portion de l'ensoleillement en énergie thermique ou électrique, via des capteurs solaires thermiques ou photovoltaïques selon le cas [9].

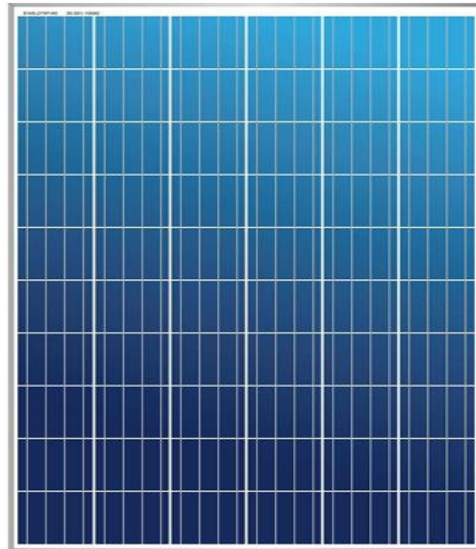


Figure I.5 : Panneau photovoltaïque [9].

### I.3.4. Association des cellules photovoltaïques

#### ❖ Association en série

En raccordant en série des cellules ou des modules identiques, le courant au niveau de la branche demeure constant tandis que la tension augmente de manière proportionnelle au nombre de cellules (modules) connectées en série. La figure (I.6) illustre l'importance de la mise en série de cellules ou modules photovoltaïques identiques [10].

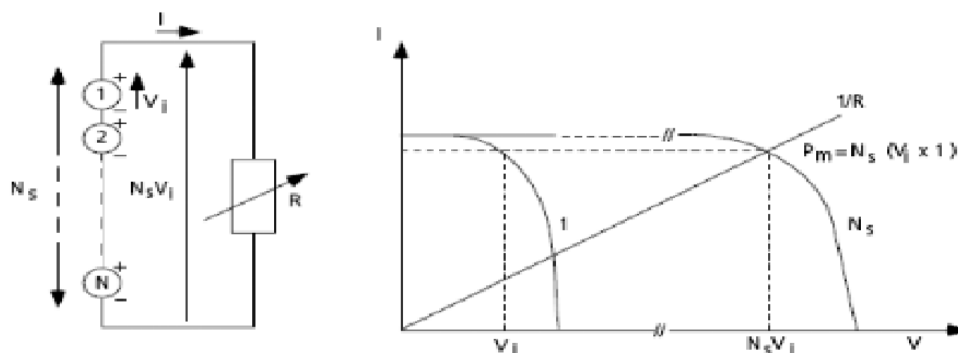


Figure I.6 : Cellules ou modules photovoltaïques en série [10].

#### ❖ Association en parallèle

En branchant des modules identiques en parallèle, la tension de la branche est équivalente à celle de chaque module et l'intensité augmente en proportion du nombre de modules mis en parallèle dans la branche [10]. La figure (I.7) illustre l'avantage de combiner des cellules ou des modules photovoltaïques identiques en parallèle.

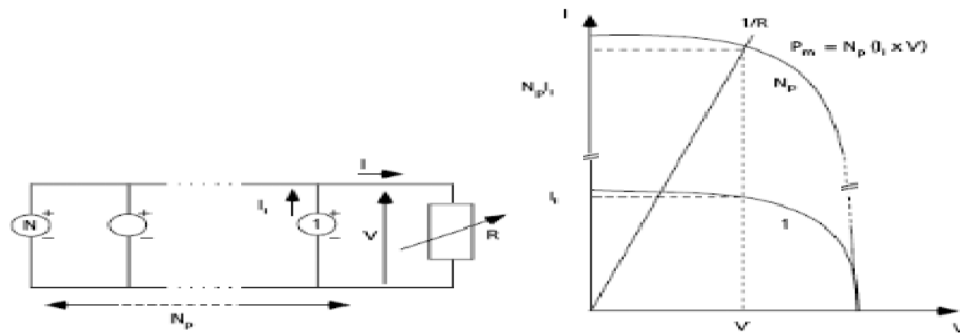


Figure I.7 : Cellules ou modules photovoltaïques en parallèle [10].

### I.3.5. Avantage et inconvénients des systèmes photovoltaïques

#### ➤ Avantage

- Ensoleillement gratuit et renouvelable.
- Leur coût de fonctionnement est très faible.
- Un faible coût d'entretien (ne comporte pas de pièces mobiles).

#### ➤ Inconvénients

- Le non disponibilité de la source d'une façon permanente.
- La fabrication de module photovoltaïque relève de la haute technologie [1].
- L'occupation d'espace pour les installations de grandes dimensionnements.
- Faible rendement.

## I.4. Pile à combustible

### I.4.1. Définition

Une pile à combustible est un appareil électrochimique capable de produire de l'électricité en effectuant une réaction d'oxydation sur l'un des électrodes avec un combustible réducteur (comme le hydrogène)[11], tout en réalisant une réaction de réduction sur l'autre électrode, généralement avec un oxydant comme l'oxygène présent dans l'air.

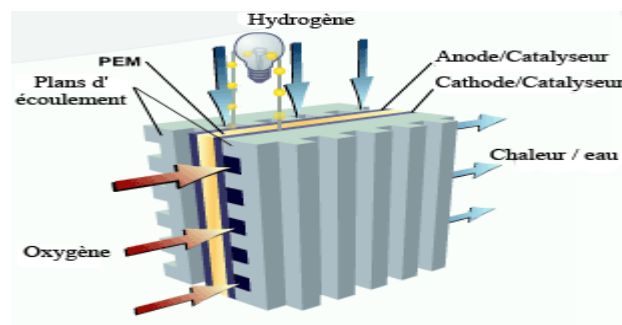
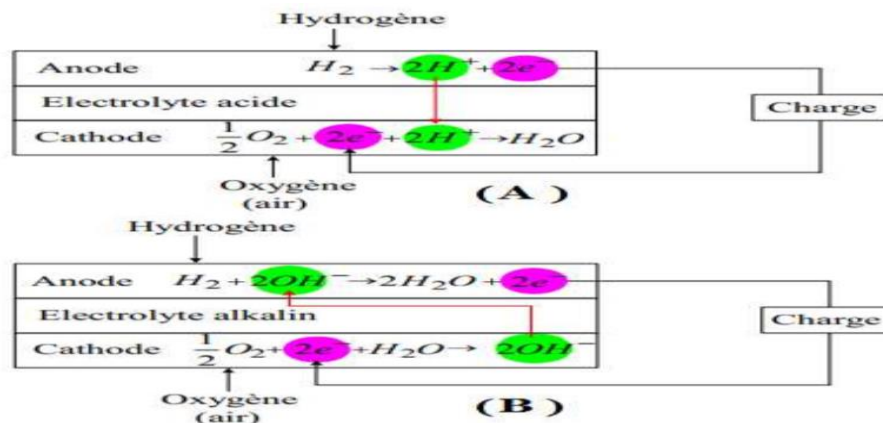


Figure I.8 : Pile à combustible.

### I.4.2. Principe de fonctionnement d'une pile à combustible

Le fonctionnement de la pile à combustible PEM consiste à générer électricité avec résidus (eau et chaleur). Il est fondé sur le processus inverse de l'électrolyse de l'eau. Les équations suivantes illustrent les réactions électrochimiques pendant le fonctionnement d'une pile à combustible PEM [15].

- Réaction anodique:  $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$  ..... (I.1)
- Réaction cathodique:  $\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$  ..... (I.2)
- Réaction globale:  $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$  ..... (I.3)



**Figure I.9 :** Principe de fonctionnement de piles à combustible à électrolyte acide (A) ou alcalin (B) [15].

### I.4.3. Différents types de piles à combustible

Le tableau suivant représente les différents types de pile à combustible :

**Tableau I.1 :** Les différents types de piles à combustible [12].

Acronyme	Nom	Température de Fonctionnement	Electrolyte
PEMFC	Electrolyte Membrane Fuel Cell	50-80°C	Polymère
HT-PEMFC	High Température PEMFC	120-180°C	Polymère
DMFC	Direct Methanol Fuel cell	25-50°C	Polymère
DCFC	Direct Ethanol Fuel Cell	25-50°C	Polymère
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell	700-1000°C	Céramique
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell	650°C	Liquide
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cell	150-200°C	Liquide
AFC	Alkaline Fuel Cell	60-120°C	Liquide

**I.4.4. Avantage et inconvénients de la pile à combustible****➤ Avantage**

- Un rendement de conversion important.
- Les piles à combustible PEMFC produisant de l'électricité en convertissant directement l'énergie chimique en énergie électrique [1].
- Elles sont de construction modulaire.

**➤ Inconvénients**

- Le coût élevé.
- Le poids et le volume.
- Une durée de vie faible.

**I.5. Les batteries****I.5.1. Définition**

Un accumulateur électrochimique, ou batterie, est un dispositif qui transforme l'énergie électrique en énergie chimique potentielle pendant la phase de chargement et convertit cette énergie chimique en énergie électrique lors de la décharge [13]. Ce processus se fait sans rejets polluants, sans nuisances sonores et nécessite peu d'entretien. Elles se distinguent par leur longévité en termes de cycles de charge/décharge, ainsi que par leurs densités d'énergie et de puissance.

**I.6. Les convertisseurs statiques**

Les convertisseurs sont des dispositifs qui transforment la tension continue fournie par les panneaux solaires ou les batteries, afin de l'ajuster à des récepteurs utilisant soit une tension continue différente, soit une tension alternative [13].

**I.6.1. Convertisseur DC/DC (hacheur)**

La mission des convertisseurs de courant continu est de délivrer une tension continue variable dérivée d'une tension continue stable. La tension continue de départ peut provenir d'un réseau alternatif rectifié et filtré, d'une batterie d'accumulateurs ou d'une alimentation stabilisée [13].

**I.6.2. Convertisseur DC/AC (onduleur)**

La fonction principale de l'onduleur est de transformer le courant continu, produit par le générateur solaire, en courant alternatif monophasé ou triphasé. Un onduleur est habituellement conçu pour fonctionner sur une plage assez réduite [12].

**I.6.3. Convertisseur AC/DC (Redresseur)**

Le redresseur contrôlé est le montage le plus élémentaire parmi les dispositifs d'électronique de puissance, et il permet de convertir l'énergie alternative généralement issue du réseau électrique en une énergie quasi continue unidirectionnelle pouvant être dirigée vers les charges à courant continu [12].

### I.7. Commande MPPT avec panneaux photovoltaïque

Un MPPT, ou Maximum Power Point Tracking, est une méthode qui permet de suivre, comme son nom l'indique, le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. On associe généralement les systèmes MPPT aux générateurs photovoltaïques [14].

#### I.7.1. Principe du MPPT

Une commande MPPT, liée à une phase d'adaptation intermédiaire, est conçue pour garantir qu'un générateur photovoltaïque fonctionne de manière à produire constamment sa puissance maximale [14]. Par conséquent, indépendamment des conditions météorologiques (température et luminosité), la gestion du convertisseur positionne le système à son point de fonctionnement optimal ( $V_{mpp}$ ,  $I_{mpp}$ ).

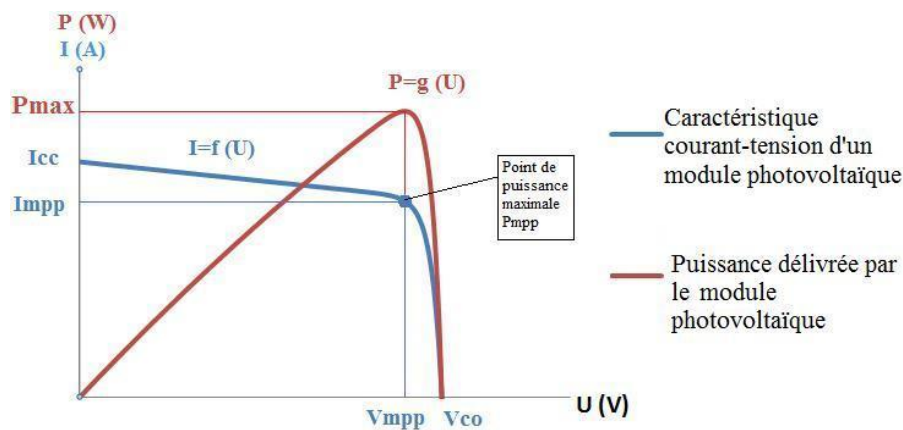


Figure I.10 : Caractéristiques d'un panneau solaire.

### I.8. Gestion d'énergie

La gestion d'énergie désigne l'ensemble des méthodes stratégie et outils mise en œuvre pour maximiser la production, la distribution et l'usage de l'énergie afin de minimiser les pertes, améliorer l'efficacité énergétique et de diminuer les dépenses tout en satisfaisant aux exigences énergétique d'un système hybride.

Nous avons opté pour la gestion énergétique d'un système hybride combinant une chaîne de conversion photovoltaïque et une pile à combustible qui alimentent une charge variable. Le surplus d'énergie générée par le GPV est utilisé pour recharger la batterie qui fait office de notre système de stockage.

### I.9. Avantage et inconvénients de système SEH

#### ➤ Avantage

- Garantir la continuité énergétique.
- Non dépendant d'une seule source d'énergie.
- Flexible, extensible et capable de satisfaire des charges évolutives [6].


#### ➤ Inconvénients

- Plus complexe que les systèmes mono source et nécessite du stockage.
- Coût capitale élevé comparé aux générateurs diesel [1].



**I.10. Conclusion**

Ce chapitre nous a permis de comprendre les bases de fonctionnement d'un système hybride. Nous avons identifié les principaux composants, tels que les sources d'énergie renouvelable, les unités de stockage et les dispositifs de conversion. Chaque élément joue un rôle essentiel dans l'équilibre et la performance du système. L'interconnexion de ces composants permet une gestion d'énergie fiable. Cette base théorique est indispensable pour aborder les étapes suivantes de l'étude.

A decorative graphic of a scroll with a black outline and a light gray fill. The scroll is unrolled in the center, with the top and bottom edges curled up. The text is centered within the unrolled portion.

# **Chapitre II : Modélisation de différents constituent de SEH**

## II.1.Introduction

La modélisation est un outil utilisé pour exprimer le comportement d'un système physique spécifique sous forme d'équations. Dans notre étude, nous allons exposer la modélisation des divers composants d'un système hybride. Cela nous permettra de saisir son fonctionnement.

## II.2. Description du système étudié

Le système que nous allons étudier est constitué de : générateur photovoltaïque (PV), pile à combustible (PAC) et un système de stockage électrique (batteries) et stockage d'hydrogène (réservoir d'hydrogène). Dans ce système, le champ photovoltaïque fournit de l'énergie à la charge. Les batteries et l'électrolyseur emmagasinent l'énergie excédentaire. Lorsque l'énergie solaire ne suffit pas à satisfaire entièrement la demande en électricité, un lien est établi entre la batterie et la pile à combustible.

Le schéma général du système étudié est présenté ci-dessous :

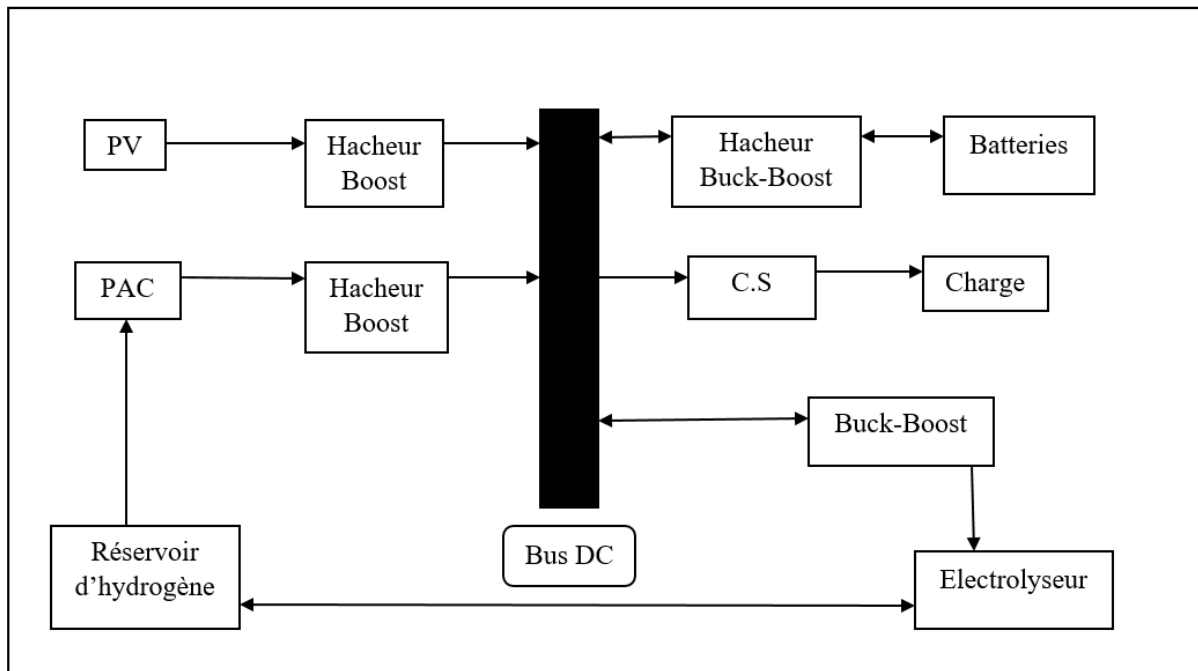


Figure II.1 : Schéma descriptif du système étudié.

## II.3. Modélisation du générateur photovoltaïque

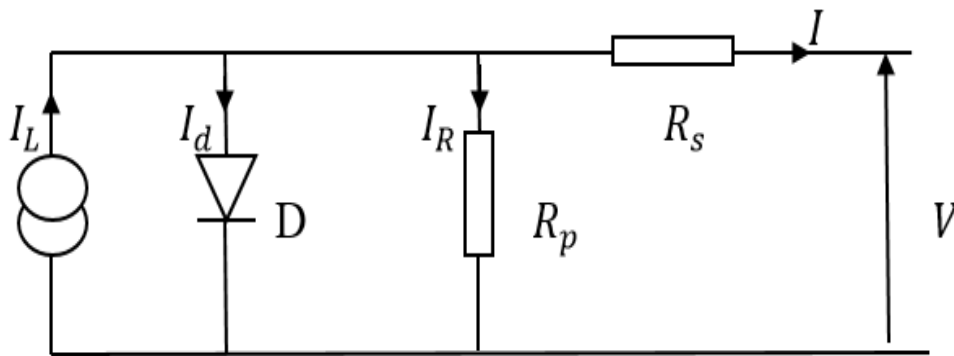
Pour déterminer le modèle du générateur photovoltaïque, il est essentiel d'identifier au préalable le circuit électrique correspondant à cette source. De nombreux modèles mathématiques ont été élaborés pour simuler leurs caractéristiques hautement non linéaires, qui sont une conséquence directe de celles des jonctions semi-conductrices à partir desquelles ils sont fabriqués. Parmi ces modèles, [15] on trouve :

- **Le modèle idéalisé :** Il s'agit du modèle le plus simplifié où la résistance  $R_p$  est généralement très élevée, on la considère donc souvent comme infinie (et par

conséquent on l'ignore). Quant à la résistance  $R_s$ , étant de faible valeur, on la suppose nulle.

- **Le modèle à une diode :** Pour prendre en compte les baisses de tension dans les zones P et N, on doit incorporer une résistance en série  $R_s$  dans le modèle idéalisé, tandis que pour le courant de fuite, une résistance en parallèle  $R_p$  est nécessaire.
- **Le modèle à deux diodes :** Une diode additionnelle placée en parallèle avec la diode du modèle antérieur, permettant de simuler des effets chimiques de recombinaison des électrons.

On a opté pour le modèle à une diode qui prend en considération les variations du courant et de la tension de la cellule photovoltaïque selon les conditions climatiques.



**Figure II.2 :** Schéma équivalent d'une cellule solaire.

D'après la figure (II.2), la loi des nœuds permet à formuler la relation suivante :

$$I = I_L - I_d - I_R \dots\dots\dots \text{II.1}$$

Le photo-courant  $I_{ph}$  est donné par :

$$I_L = P_1 * E_S (1 + P_2 (E_S - E_{Sref}) + P_3 (T_j - T_{jref})) \dots\dots\dots \text{II.2}$$

La température de jonction :

$$T_j = T_a + E_S \left( \frac{N_{oct} - 20}{800} \right) \dots\dots\dots \text{II.3}$$

Le courant de la diode et donné par :

$$I_d = I_0 \left[ \exp \left( \frac{q}{K.A.n_s.T_j} (V + R_s I) \right) - 1 \right] \dots\dots\dots \text{II.4}$$

Le courant de saturation dans la diode :

$$I_0 = P4 * T_j^3 \exp \left( \frac{E_g}{K.T_j} \right) \dots\dots\dots \text{II.5}$$

$$I_R = \frac{V}{R_p} \dots\dots\dots \text{II.6}$$

Ainsi l'équation globale modélisant le générateur PV est la suivante [14]:

$$I = P_1 * E_S (1 + P_2 (E_S - E_{Sref}) + P_3 (T_j - T_{jref}) - P_4 * T_j^3 * \exp\left(\frac{E_g}{K.T_j}\right) * \left[ \exp\left(\frac{q}{K.A.n_S.T_j}\right) * (V - R_S.I) - 1 \right] * \frac{V}{R_p} \dots \dots \dots \text{II.7}$$

Avec :

$E_{Sref}, T_{jref}$  : Représentent respectivement l'éclairement et la température sous conditions standards(STC).

$E_S$  : L'ensoleillement [ $W/m^2$ ].

$T_j$  : La température de jonction de la cellule [ $^{\circ}C$ ].

$I$  : Le courant de cellule.

$V$  : La tension de cellule.

$R_S$  : La résistance série de la cellule [ $\Omega$ ].

$T_a$  : La température ambiante [ $^{\circ}C$ ].

$Q$  : La charge d'électron  $= 1.6 * 10^{-19}$ .

$I_0$  : Le courant de saturation [A].

$K$  : La constante de Boltzmann ( $1.3854 * 10^{-23} JK^{-1}$ ).

$n_S$  : Le facteur de qualité de la diode.

$A$  : Coefficient d'idéalité de la cellule.

$E_g$  : Energie de gap.

#### II.4.Modèle d'un hacheur survolteur (Boost)

Augmenter la tension d'une source, revient à utiliser le hacheur parallèle de type BOOST, aussi connu sous le nom de hacheur survolteur, dont le schéma de fonctionnement est illustré à la figure (II.3). Cet appareil continu-continu d'électronique de puissance permet d'ajuster la tension aux bornes du panneau photovoltaïque afin de parvenir au point de fonctionnement optimal [16].

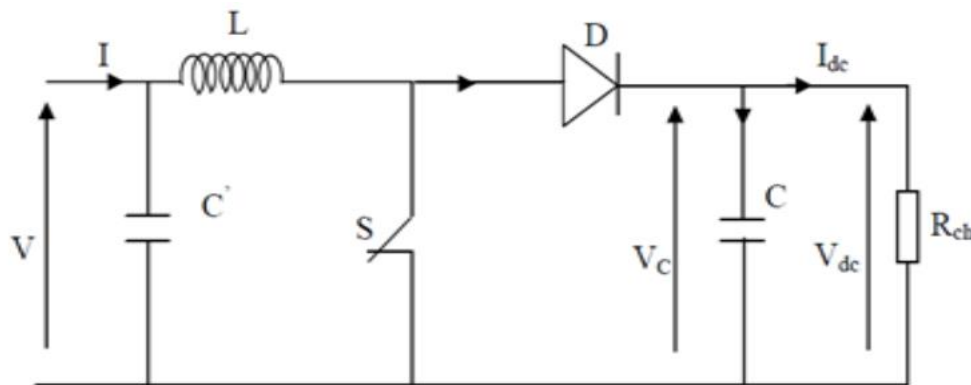
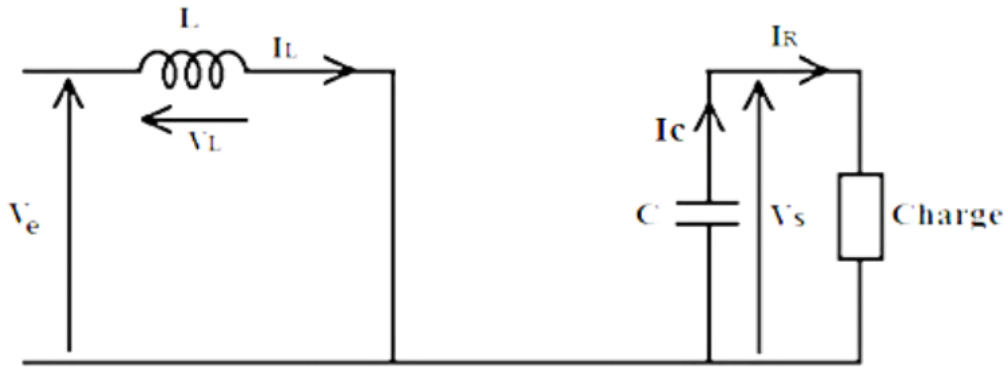


Figure II.3 : Schéma de principe d'un convertisseur survolteur [11].

La figure montre le cycle de fonctionnement, de période de hachage  $T$  qui comporte deux étapes :

- Lorsque l'interrupteur passant et la diode polarisée : Cette phase dure de  $0$  à  $\alpha T$  ( $\alpha$  rapport cyclique, est compris entre  $0$  et  $1$ ).



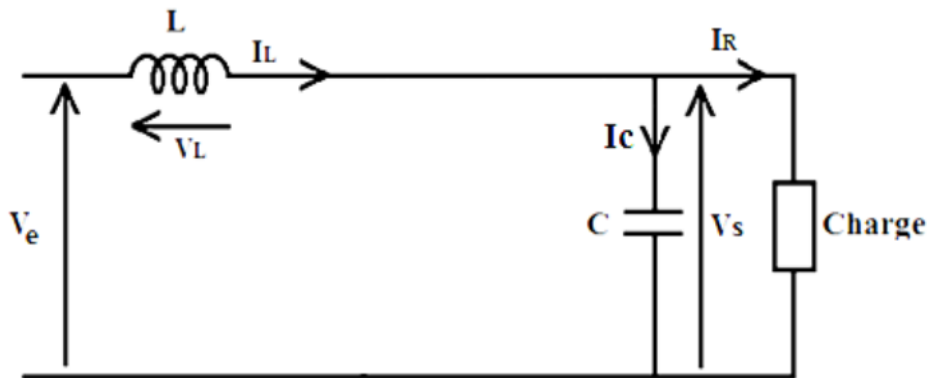
**Figure II.4 :** Schéma d'un Hacheur survolteur à  $t \in [0, \alpha. T]$ .

Le condensateur  $C$  supposé initialement chargé, fournit de l'énergie à la charge et un courant  $I_R$  circule dans cette dernière.

$$V_L = V_e = L \frac{dI_L}{dt} \dots \dots \dots \text{II.8}$$

$$V_S = R \cdot I_R \dots \dots \dots \text{II.9}$$

- Lorsque l'interrupteur est bloquée, la diode devient passant : Cette phase dure de  $\alpha.T$  à  $T$ .



**Figure II.5 :** Schéma d'un Hacheur survolteur à  $t \in [\alpha.T, T]$ .

Avec :  $I_C = I_R$

$$V_L = V_e \cdot V_S \dots \dots \dots \text{II.10}$$

$$I_C = I_L - I_R \dots \dots \dots \text{II.11}$$

On en déduit facilement la tension et l'intensité dans la charge par les équations suivantes [17]:

$$V_S = \frac{1}{1-\alpha} \cdot V_e \dots \dots \dots \text{II.12}$$

$$I_R = (1 - \alpha) I_L \dots \dots \dots \text{II.13}$$

## II.5. Modélisation de la pile à combustible

### II.5.1. Modèle électrochimique de la pile à combustible PEMFC

Dans le processus de la PEMFC, non seulement l'énergie issue de l'hydrogène est transformée en électricité. Mais une partie d'elle est perdue sous trois phénomènes majeurs : pertes d'activation, ohmiques et de concentration, comme montrer sur la figure (II.6) [18].

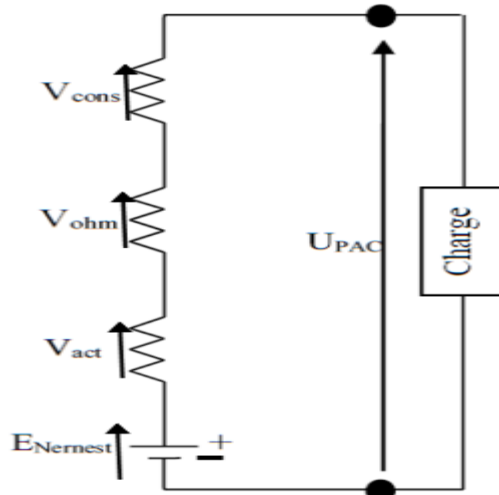


Figure II.6 : Schéma équivalent d'une PEMFC.

On a :

$$U_{pac} = E_{Nernst} - V_{act} - V_{cons} - V_{ohm} \dots \dots \dots \text{II.14}$$

Avec :

$V_{act}$  : Polarisation d'activation.

$V_{cons}$  : Polarisation de concentration.

$V_{ohm}$  : Polarisation ohmique.

L'expression de l'équation de Nernst arrangé avec un calcul numérique se présente comme suit [31]:

$$E_{Nernst} = 1.229 - 0.83 * 10^{-3} * (T - 298.15) + 4.31 * 10^{-5} * \left[ \ln(P_{H_2}) + \frac{1}{2} * \ln(P_{O_2}) \right] \dots \dots \dots \text{II.15}$$

Avec :

$T$  : Température opératoire absolue de la pile (K).

$P_{H_2}$  : Pressions partielles à l'interface de l'hydrogène (atm).

$P_{O_2}$  : Pressions partielles à l'interface de l'oxygène (atm).

Les pressions partielles d'hydrogène et d'oxygène sont [30] :

$$P_{H_2} = 0.5 * P_{H_2O}^{Sat} * \left[ \exp \left( - \frac{1.635.I}{T^{1.334} * \frac{P_{anode}}{P_{H_2O}^{Sat}}} - 1 \right) \right] \dots \dots \dots \text{II.16}$$

$$P_{O_2} = P_{H_2O}^{Sat} * \left[ \exp \left( - \frac{4.192.I}{T^{1.334}} \right) * \frac{P_{Cathode}}{P_{H_2O}^{Sat}} - 1 \right] \dots\dots\dots \text{II.17}$$

Avec :

$P_{anode}$  : La pression de l'hydrogène à l'anode.

$P_{cathode}$  : La pression de l'oxygène à la cathode.

$P_{H_2O}^{Sat}$  : La pression de saturation d'eau.

La pression de saturation d'eau  $P_{H_2O}^{Sat}$  est calculée en appliquant la formule suivante :

$$\log_{10} P_{H_2O}^{Sat} = -2.18 + 2.95 * 10^{-2} T_C - 9.18 * 10^{-5} T_C^2 + 1.44 * 10^{-7} T_C^3 \dots\dots\dots \text{II.18}$$

Avec :

$$T_C = T + 273.15 \dots\dots\dots \text{II.19}$$

T est exprimé en Kelvin, et  $P_{H_2}$  et  $P_{O_2}$  sont exprimés en bar. La tension théorique de l'enthalpie de Nernst et d'environ 1.299 V, valeur qui n'est jamais atteinte même à vide [33].

### ➤ Polarisation d'activation

Les pertes d'activation se produisent au début des réactions chimiques et sont essentiellement dues aux réactions cathodiques [34]. La relation entre les pertes d'activation et la densité de courant et donner par l'équation suivant [19] :

$$V_{act} = \frac{R.T}{a.zF} * \ln \left( \frac{I}{I_0} \right) = T * [a + b * \ln(I)] \dots\dots\dots \text{II.20}$$

D'autre part, une équation empirique pour  $V_{act}$ , qui est donnée en [19], inclut l'ajout d'une constante ( $a_0$ ) à l'équation de la manière suivante :

$$V_{act} = a_0 + (T - 298) * a + T * b * \ln(I) = V_{act1} + V_{act2} \dots\dots\dots \text{II.21}$$

Avec :

$a_0$ , **a** et **b**: constantes empiriques

$V_{act1} = a_0 + (T - 298).a$  : La chute de tension affectée seulement par température interne de la de la pile à combustible.

$V_{act2} = T.b.ln(I)$  : La chute de tension qui dépend à la fois du courant et de la température.

### ➤ Polarisation ohmique

Les pertes ohmiques proviennent de la barrière que constituent les électrodes et les plaques bipolaires à la circulation des électrons, ainsi que de l'électrolyte lors du passage des protons. La chute de tension correspondante s'écrit [20]:

$$V_{ohm} = I.R_{ohm} \dots\dots\dots \text{II.22}$$



$R_{ohm}$  : représente la résistance équivalente de la membrane à la conduction des protons, déterminée en fonction du courant et de la température, selon l'expression suivante [20].

$$R_{ohm} = R_{ohm0} + K_{RI} \cdot I - K_{RT} \cdot T \dots\dots\dots \text{II.23}$$

Avec :

$R_{ohm0}$  : La partie constante de résistance ohmique

$K_{RI}, K_{RT}$  : Constantes empiriques.

### ➤ Polarisation de concentration :

Les chutes de tension par concentration sont dues à un déficit en réactifs. Quand la densité de courant atteint un niveau élevé, la diffusion des gaz à travers les électrodes ne se fait plus assez rapidement pour maintenir la réaction [35]. Ces pertes sont données par la relation suivante [21] :

$$V_{cons} = -\frac{R.T}{z.F} * \ln\left(1 - \frac{I}{I_{lim}}\right) \dots\dots\dots \text{II.24}$$

Avec :

$I_{lim}$  : Courant de limitation ou le courant maximal.

$z$ : est le nombre d'électrons participants à la réaction.

### II.5.2.Modèle thermique de la pile à combustible

Ce modèle sert à calculer la quantité de chaleur générée par la réaction chimique à l'intérieur de la pile à combustible. Cette chaleur influence directement la température de la pile, qui peut augmenter ou diminuer, selon ce que montre l'équation ci-dessous [22] [23] :

$$\dot{q}_{net} = \dot{q}_{chem} - \dot{q}_{elec} - \dot{q}_{sens+latent} - \dot{q}_{perdue} \dots\dots\dots \text{II.25}$$

Avec :

$\dot{q}_{chem}$  : L'énergie calorifique ou chimique [J].

$\dot{q}_{elec}$  : L'énergie électrique [J].

$\dot{q}_{sens+latent}$  : L'énergie calorifique latente et sensible [J].

$\dot{q}_{perdue}$  : Les pertes de chaleur [J].

La quantité d'énergie générée par la réaction chimique est donnée par :

$$\dot{q}_{chem} = \Delta G \cdot \dot{n}_{H_2,c} \dots\dots\dots \text{II.26}$$

Avec :

$\dot{n}_{H_2,c}$ : Le débit molaire d'hydrogène consommé.

$\Delta G$  : L'énergie libre de Gibbs.

L'énergie électrique générée par la pile est déterminée à l'aide de la relation :

$$\dot{q}_{elec} = V_{pac} \cdot I_{pac} \dots\dots\dots \text{II.27}$$

Pendant le fonctionnement, la pile absorbe une partie de la chaleur sous forme sensible et latente, modélisée par l'équation suivante :

$$\dot{q}_{sens+latent} = (\dot{q}_{H_2,c} \cdot C_{H_2} + \dot{n}_{O_2,c} \cdot C_{O_2} + \dot{n}_{H_2O,g} \cdot C_{H_2O,l})(T - T_{amb}) + \dot{n}_{H_2O,g} \cdot H_V \dots \dots \dots \text{II.28}$$

Avec :

$C_{H_2}, C_{O_2}, C_{H_2O,l}$  : Capacités calorifiques spécifiques en [J/mol.K].

$H_V$  : La vaporisation thermique de H<sub>2</sub>O en [J/mol].

$\dot{n}_{H_2O,g}$  : Le débit molaire généré de H<sub>2</sub>O en [mol/s].

$\dot{n}_{O_2,c}$  : Le débit molaire d'oxygène consommé.

La chaleur dissipée vers l'environnement par convection est modélisée par :

$$\dot{q}_{perdue} = h \cdot A \cdot N_s \cdot (T - T_{amb}) \dots \dots \dots \text{II.29}$$

Avec :

$h$  : Le coefficient de transfert de chaleur par convection en [W/m<sup>2</sup>.K].

$A$  : La surface de chaque cellule dans [m<sup>2</sup>].

$N_s$  : Le nombre de cellule dans la pile à combustible.

Quand la pile à combustible fonctionne en régime permanent, sa température reste constante.

Mais lorsqu'elle change d'état en régime transitoire, sa température varie avec le temps selon la formule suivant :

$$M_{pac} * C_{pac} * \frac{dT}{dt} = \dot{q}_{net} \dots \dots \dots \text{II.30}$$

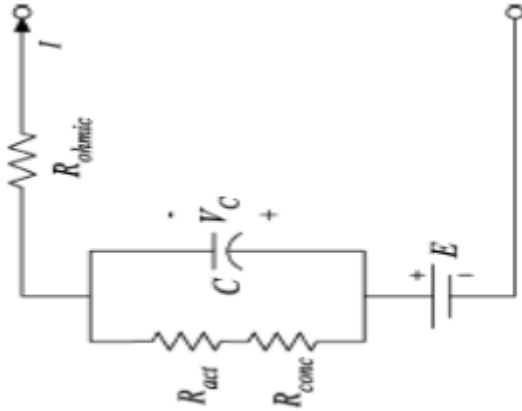
Avec :

$M_{pac}$  : La masse totale de la pile à combustible.

$C_{pac}$  : Capacité thermique.

### II.5.3. Modelé électrique dynamique de la PEMFC

Dans une pile à combustible PEM, il se passe un phénomène intéressant appelé "double couche chargée". Quand l'hydrogène arrive à l'anode, il se sépare en électrons et en protons. Les électrons partent dans le circuit externe pour aller vers la cathode, pendant que les protons traversent la membrane. À la cathode, ils se retrouvent en même temps. Cette rencontre crée deux couches de charges opposées, un peu comme si on formait un mini condensateur. Cette accumulation de charges génère une tension, qu'on appelle tension d'activation ou de concentration. Ces tensions prennent un petit moment à se mettre en place, car elles dépendent de la vitesse des réactions chimiques [22]. En revanche, la perte due à la résistance interne de la pile, appelée chute ohmique, se produit tout de suite dès que le courant commence à circuler.



**Figure II.7** : schéma électrique équivalent de la PAC.

On considère  $V_c$  comme la tension dynamique aux bornes de la capacité électrique équivalente  $C$ , d'après les annotations de la figure (II.7) l'équation de tension de la cellule peut s'écrire comme suit :

$$V_{pac} = E_{Nernst} - V_c - V_{ohmic} \dots \dots \dots \text{II.31}$$

$$\frac{dV_c}{dx} = \frac{1}{C} i_{Fc} - \frac{1}{\tau} V_c \dots \dots \dots \text{II.32}$$

Avec  $\tau$  la constante de temps pour le circuit RC qui donner par :

$$\tau = C(R_{act} + R_{cons})$$

L'effet de "double couche chargée" est pris en compte dans la modélisation en utilisant la variable  $V_c$  à la place des concentrations  $n_{act2}$  et  $n_{cons}$ . Cette approche permet de calculer la tension de sortie de la pile à combustible. Qui s'avère maintenant être :

$$V_{pac} = E_{Nerst} - V_{act1} - V_{ohm} - V_c \dots \dots \dots \text{II.33}$$

#### II.5.4.Taux d'hydrogène consommé

Dans un système à pile à combustible, l'hydrogène est consommé à partir d'un réservoir en fonction de la puissance demandée par le système. Pour adapter la quantité d'hydrogène utilisée en fonction de la puissance de sortie de la pile, on utilise une méthode de régulation par rétroaction.

Le lien entre le courant généré par la pile et le débit molaire d'hydrogène nécessaire peut s'écrire comme [25] :

$$\dot{n}_{H_2,c} = \frac{N_s \cdot I}{2F \cdot U} \dots \dots \dots \text{II.34}$$

Avec :

$N_s$  : Le nombre de cellules de la pile

$I$  : Le courant de la pile à combustible (A)

$F$  : La constante de Faraday (C/mol)

$U$  : Le facteur d'utilisation.

Lorsqu'un gaz comme l'hydrogène passe à travers une vanne, la relation entre son débit et sa pression partielle est donnée par :

$$\frac{q_{H_2}}{P_{H_2}} = K_{H_2} \dots \dots \dots \text{II.35}$$

Pour déterminer le comportement du débit molaire d'hydrogène, on tient compte de trois termes : l'entrée, la sortie, et la quantité ayant réagi. On peut modéliser cela avec l'équation suivante [36] :

$$\frac{d}{dt} P_{H_2} = \frac{R.T}{V_{ano}} (q_{H_2,in} - q_{H_2,out} - q_{H_2,r}) \dots \dots \dots \text{II.36}$$

Le débit d'hydrogène qui réagit dans la pile pour produire de l'électricité peut être exprimé comme suit :

$$q_{H_2,r} = \frac{N_0.I}{2F} = 2K_r.I \text{ OU } K_r = \frac{N_0}{4F} \dots \dots \dots \text{II.37}$$

En utilisant la transformée de Laplace et les équations précédentes, on peut calculer la pression partielle de l'hydrogène avec cette relation [37] :

$$P_{H_2} = \frac{\frac{1}{K_{H_2}}}{1 + \tau_{H_2}P} (q_{H_2,in} - 2K_r.I) \text{ et } \tau_{H_2} = \frac{V_{ano}}{K_{H_2}.R.T} \dots \dots \dots \text{II.38}$$

Avec :

$\tau_{H_2}$  : La valeur du temps de réponse en seconde du système associée au débit d'hydrogène.

$K_{H_2}$  : La constante molaire de la valve d'hydrogène (mol/atm).

De manière similaire, les pressions partielles de l'eau et de l'oxygène sont données par :

$$P_{H_2O} = \frac{\frac{1}{K_{H_2O}}}{1 + \tau_{H_2O}P} 2K_r \text{ et } \tau_{H_2O} = \frac{V_{ano}}{K_{H_2O}.R.T} \dots \dots \dots \text{II.39}$$

Pour l'oxygène :

$$P_{O_2} = \frac{\frac{1}{K_{O_2}}}{1 + \tau_{O_2}P} (q_{O_2,in} - K_r) \text{ et } \tau_{O_2} = \frac{V_{cath}}{K_{O_2}.R.T} \dots \dots \dots \text{II.40}$$

Le débit molaire d'entrée d'oxygène est :

$$q_{O_2} = \frac{q_{H_2}}{r_{H-O}} \dots \dots \dots \text{II.41}$$

Avec :

$q_{O_2,in}$  : Le débit molaire d'entrée d'oxygène.

$P_{O_2}, P_{H_2O}$  : Les pressions partielles de l'oxygène et de l'eau.

$r_{H-O}$  : Le rapport molaire entre l'hydrogène et l'oxygène dans la réaction.

## II.6.Modélisation de la batterie

On utilise le schéma électrique (II.8) pour la modélisation d'une batterie.

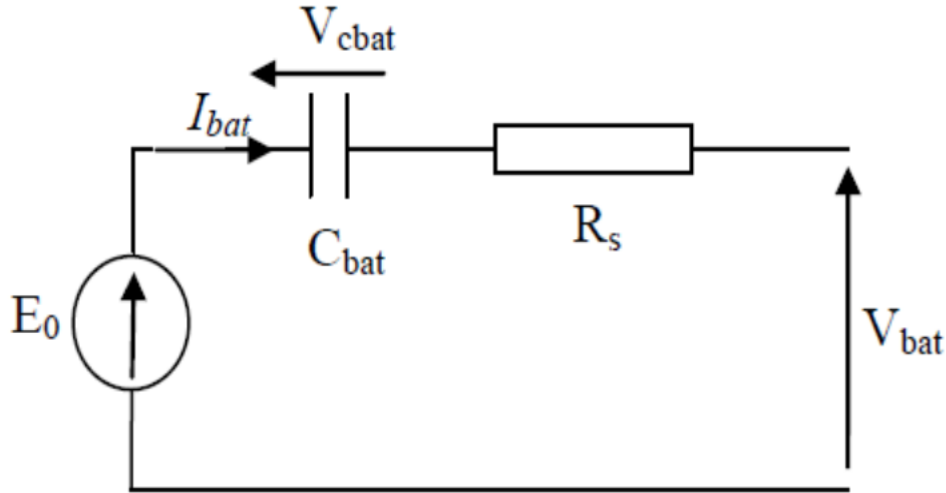


Figure II.8 : Modèle R-C de la batterie.

Ce modèle intègre une tension à vide de la batterie ( $E_0$ ) pour illustrer sa tension l'orsque aucun courant n'est présent. Un condensateur est utilisé pour modéliser la capacité interne de la batterie ( $C_{bat}$ ) et une résistance interne ( $R_s$ )

La tension aux bornes de la batterie [26], exprimée par :

$$V_{bat} = E_0 - R_s \cdot I_{bat} - V_{cbat} \dots \dots \dots \text{II.42}$$

On définit aussi l'état de charge (EDC) de la batterie par :

$$EDC = 1 - \frac{Q_{bat}}{C_{bat}} \dots \dots \dots \text{II.43}$$

Tel que :

$$Q_{bat} = I_{bat} \cdot t_{bat} \dots \dots \dots \text{II.44}$$

$$C_{bat} = \frac{Q_{bat}}{V_{bat}} \dots \dots \dots \text{II.45}$$

Avec :

$C_{bat}$  : La capacité (Ah) nominale de la batterie.

$Q_{bat}$  : La quantité de charge (C) manquante par rapport à  $C_{bat}$ .

## II.7.Modélisation du hacheur Buck-Boost (abaisseur-élevateur)

Le convertisseur Buck-Boost est un type de convertisseur qui permet d'inverser la tension, en s'appuyant sur le stockage d'énergie dans une inductance. La particularité de ce montage est que la tension de sortie a toujours un signe opposé à celle d'entrée [25]. Son fonctionnement repose sur deux phases :

- Quand le transistor est fermé, le courant augmente dans la bobine (l'inductance), ce qui permet de stocker de l'énergie sous forme magnétique.

- Ensuite, lorsque le commutateur s'ouvre, la tension dans l'inductance s'inverse et l'énergie accumulée est transférée vers la charge à travers la diode.

La figure (II.9) représente la structure d'un hacheur de type Buck-Boost

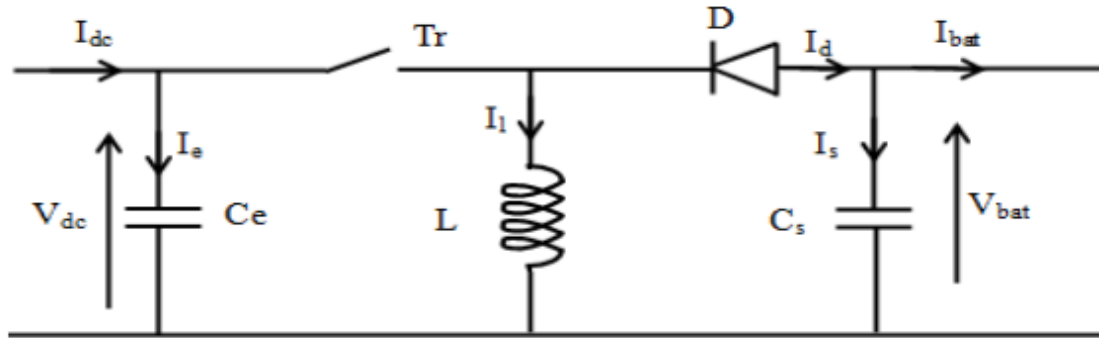


Figure II. 9 : Schéma d'un hacheur Buck-Boost

La tension moyenne aux extrémités de l'inductance étant nulle, l'équation qui représente le comportement de la batterie en mode conduction continue est donnée par [27] :

$$V_{bat} = -\frac{\alpha}{(1-\alpha)} V_{dc} \dots\dots\dots \text{II.46}$$

Si nous supposons que l'énergie transférée entre la batterie et le bus est conservée, alors nous pouvons écrire :

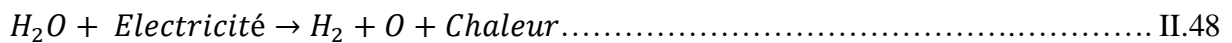
$$I_{bat} = -\frac{(1-\alpha)}{\alpha} I_{dc} \dots\dots\dots \text{II.47}$$

## II.8.Modélisation de l'électrolyseur

### II.8.1.Modèle électrochimique

Un électrolyseur est un appareil qui se sert de l'énergie électrique pour provoquer des réactions chimiques. Dans le cadre de notre étude, les électrolyseurs employés effectuent l'électrolyse de l'eau afin de générer de l'hydrogène.

L'équation globale de la réaction électrochimique dans un électrolyseur est illustrée ci-dessous :



Les caractéristiques (tension-courant) d'un électrolyseur sont définies de la manière suivante [28] [38]:

$$U_{E-cell} = U_{rév} + \frac{r_1+r_2.T}{A}.I + s . \ln\left(\frac{t_1+\frac{t_2}{T}+\frac{t_3}{T^2}}{A}.I + 1\right) \dots\dots\dots \text{II.49}$$

Avec :

$U_{E-cell}$  : La tension aux bornes de la cellule (V).

$U_{rév}$  : La tension réversible de cellule (V).

$r_1, r_1$  : Les paramètres de résistance ohmique ( $\Omega.m^2$ ,  $\Omega. m^2/^{\circ}C$ ).

$s, t_1, t_2, t_3$  : Les paramètres de surtension (V), ( $m^2.A^{-1}$ ), ( $m^2.^{\circ}C. A^{-1}$ ), ( $m^2.^{\circ}C^2/ A^{-1}$ ).

$A$  : l'aire de l'électrode cellulaire ( $m^2$ )

**I :** est le courant (A) d'électrolyseur.

**T :** la température de la cellule (°C).

**$U_{rév}$  :** Est défini par le changement de l'énergie libre de Gibbs associé au processus électrique, comme illustré ci-dessous.

$$U_{rév} = -\frac{\Delta G}{zF} \dots\dots\dots \text{II.50}$$

Avec :

**z :** le nombre de molécules transférées par molécule d'hydrogène, qui égale à 2.

**$\Delta G$  :** l'énergie libre de Gibbs (J/mol)

**F :** la constante de Faraday (96.487 C/K.mol)

**$U_{rév}$**  Peut être exprimée par une équation empirique comme :

$$U_{rév} = U_{rév}^0 - K_{rév}(T - 25) \dots\dots\dots \text{II.51}$$

Avec :

**$U_{rév}^0$  :** La tension réversible de la cellule dans les conditions standards (V)

**$K_{rév}$  :** Le coefficient de température empirique d' $U_{rév}$  (V/°C)

Dans le contexte d'un électrolyseur composé de cellules en série, la tension de sortie est définie par :

$$U_E = n_c \cdot U_{E.cell} \dots\dots\dots \text{II.52}$$

## II.8.2.Modèle thermique

La température joue un rôle essentiel dans le bon fonctionnement de l'électrolyseur, car elle impacte directement ses performances. En général, la variation de température dépend de l'équilibre entre la chaleur produite à l'intérieur de l'électrolyseur et celle qui est évacuée vers l'extérieur.

Le bilan énergétique global peut être exprimé comme [29] :

$$C_t \frac{dT}{dt} = \dot{q}_{gen} - \dot{q}_{perte} - \dot{q}_{refroidissement} \dots\dots\dots \text{II.53}$$

Avec :

**$C_t$  :** La capacité thermique globale de l'électrolyseur.

**T :** est la température en Kelvin.

**$\dot{q}_{gen}$  :** est la puissance calorifique générée à l'intérieur de l'électrolyseur. Elle peut être écrite

Comme :

$$\dot{q}_{gen} = n_c(V - V_{th}).I \dots\dots\dots \text{II.54}$$

Avec :

$$V_{th} = -\frac{\Delta H}{2F}, \text{ est la tension thermique} \dots\dots\dots \text{II.55}$$

$\dot{q}_{perte}$  : La perte de puissance calorifique. Elle peut être déterminée par :

$$\dot{q}_{pert} = \frac{1}{R_T} (T - T_{amb}) \dots\dots\dots \text{II.56}$$

$R_T$  : est résistance thermique de l'électrolyseur (°C/W).

$T_{amb}$  : est la température ambiante (°C).

$\dot{q}_{refroidissement}$  : La perte de puissance calorifique due au refroidissement, peut être exprimée

Par :

$$\dot{q}_{refroidissement} = C_{cm}(T_{cm,s} - T_{cm,e}) \dots\dots\dots \text{II.57}$$

$C_{cm}$  : Est la capacité thermique de l'eau de refroidissement (J/°C).

$T_{cm,e}$  : Est la température de l'eau de refroidissement d'entrée (°C).

$T_{cm,s}$  : Est la température de l'eau de refroidissement de sortie, peut être exprimée :

$$T_{cm,s} = T_{cm,e} + (T - T_{cm,e})(1 - \exp(-\frac{V_{AHX}}{C_{cm}})) \dots\dots\dots \text{II.58}$$

Avec :

$V_{AHX}$  : Est la température de l'eau de refroidissement de sortie, peut être exprimée :

$$V_{AHX} = h_{cond} + h_{conv} \cdot I \dots\dots\dots \text{II.59}$$

$h_{cond}$  : Coefficient relatif à l'échange de chaleur en conduction (W/°C).

$h_{conv}$  : Coefficient relatif à l'échange de chaleur en convection (W/ (°C.A)).

## II.8.3.Débit de production d'Hydrogène

La quantité d'hydrogène produite par un électrolyseur peut être estimée à partir du courant qui travers, en utilisent la relation suivant [28]:

$$\dot{n}_{H_2prod} = n_F \cdot \frac{N_c \cdot I}{2F} \dots\dots\dots \text{II.60}$$

Avec :

$\dot{n}_{H_2prod}$  : Débit de production d'Hydrogène (mole/sec).

$n_F$  : Rendement faradique.

Rendement Faradique: est le rapport entre la quantité réelle et théorique de production maximale d'hydrogène. Un empirique l'expression pour la représentation de l'efficacité faraday est donnée par [28] :

$$n_F = \frac{(\frac{I}{A})^2}{f_1 + (\frac{I}{A})^2} f_2 \dots\dots\dots \text{II.61}$$

$f_1, f_2$ : ( $mA^2, Cm^{-4}$ ) , ( $mA2cm^{-4}$ ), paramètres de calcul du rendement Faradique, Objectif de La Ventilation électrolyseur pour maintenir une température constante du système.



### II.9. Modélisation du réservoir d'hydrogène

On peut stocker l'hydrogène sous forme gazeux comprimée ou liquide dans des réservoirs grâce à diverses méthodes, telles que le stockage physique de l'hydrogène. Cette technique de stockage est utilisée pour calculer la pression de stockage d'hydrogène, couplée au débit, comme dicté par l'équation suivante [30] :

$$P_b - P_{bi} = Z \cdot \frac{q_{H_2} \cdot R T_b}{M_{H_2} \cdot V_b} \dots \dots \dots \text{II.62}$$

Avec :

**$P_b$**  : La pression du réservoir qui est mesurée en (Pascal)

**$P_{bi}$**  : La pression initiale de réservoir de stockage (Pascal)

**$R$**  : La constante de gaz universelle (J / k mol · K)

**$T_b$**  : La température de fonctionnement (K)

**$V_b$**  : Le volume du réservoir ( $m^3$ )

**$T$**  : la température

**$Z$**  et le facteur de compressibilité en fonction de la pression comme indiqué dans l'équation suivant:

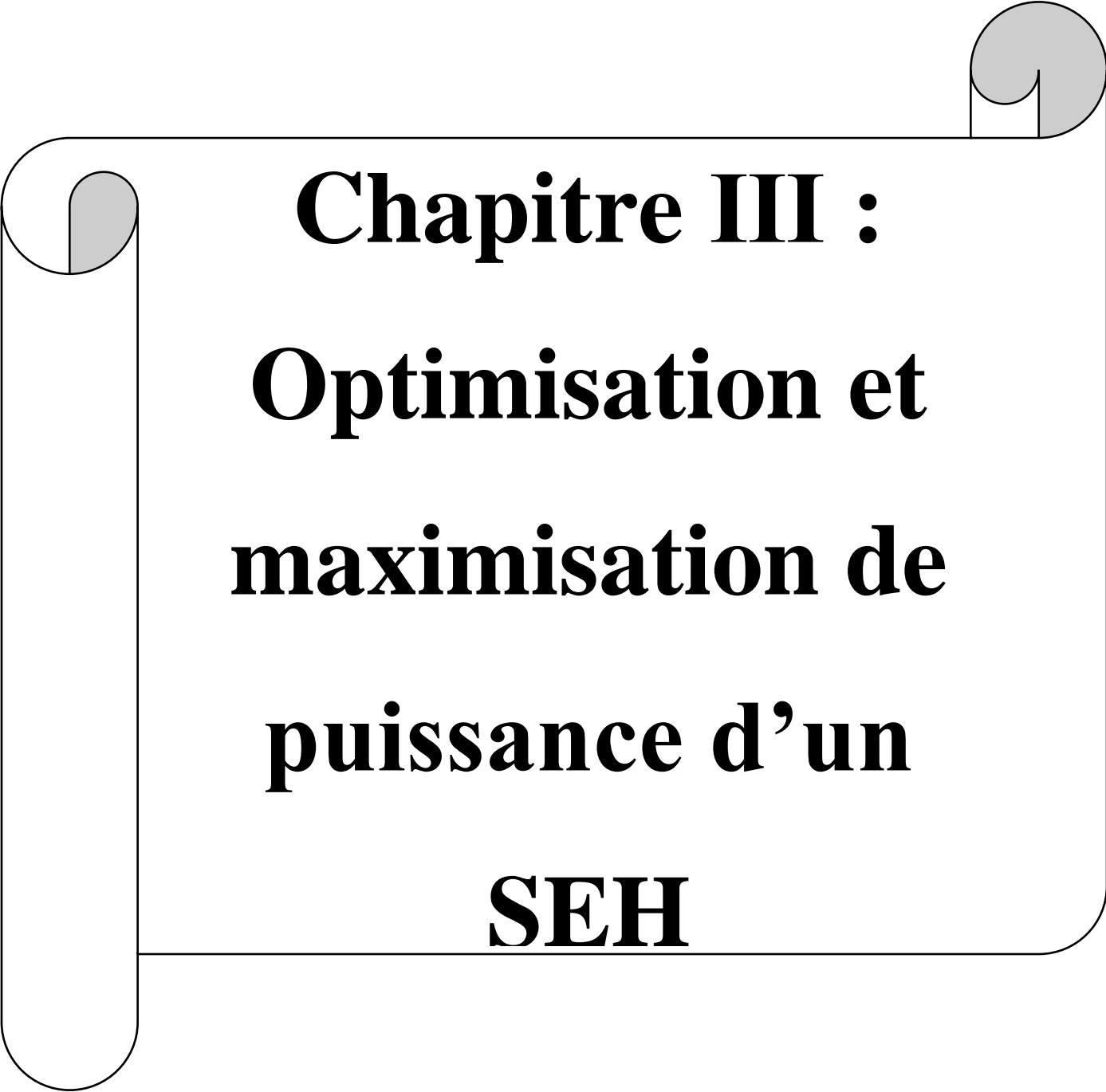
$$Z = \frac{P \cdot V_m}{R \cdot T} \dots \dots \dots \text{II.63}$$

Où  **$P$**  et  **$V_m$**  sont respectivement la pression et le volume molaire.

### II.10. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons modélisé les principaux éléments du système hybride (Générateur photovoltaïque, pile à combustible, batterie, réservoir d'hydrogène, l'électrolyseur, et les convertisseurs utilisé). Cette modélisation nous permet de comprendre comment chaque composant fonctionne.

À la lumière de ces modèles nous allons étudier dans le prochain chapitre les différentes caractéristiques de générateur photovoltaïque, pile à combustible et l'électrolyseur.

A decorative graphic of a scroll with a black outline and a light gray fill. The scroll is partially unrolled, with the top and bottom edges curved. The text is centered on the unrolled portion.

# **Chapitre III :**

## **Optimisation et maximisation de puissance d'un SEH**

### III.1.Intoduction

Dans les systèmes d'énergie renouvelable, le suivi du point de puissance maximale (MPPT) est indispensable pour optimiser la production. Parmi les méthodes les plus utilisées, la P&O se distingue par sa simplicité et son faible coût.

Dans ce chapitre nous allons commencer par étudier les caractéristiques de chaque composant de système SEH puis nous développerons un algorithme PO sous Matlab Simulink afin d'extraire le maximum de puissance de générateur photovoltaïque.

### III.2.Caractéristiques de panneau photovoltaïque

En utilisant le modèle développé dans le deuxième chapitre et les paramètres donnée dans le tableau (annexe1). Les figures (III.1), (III.2) représente les caractéristiques  $I_{pv}(V_{pv})$  et  $P_{pv}(V_{pv})$  de module photovoltaïque pour les conditions climatiques standard ( $E=1000 \text{ W/m}^2$ ,  $T_c=25^\circ\text{C}$ ).

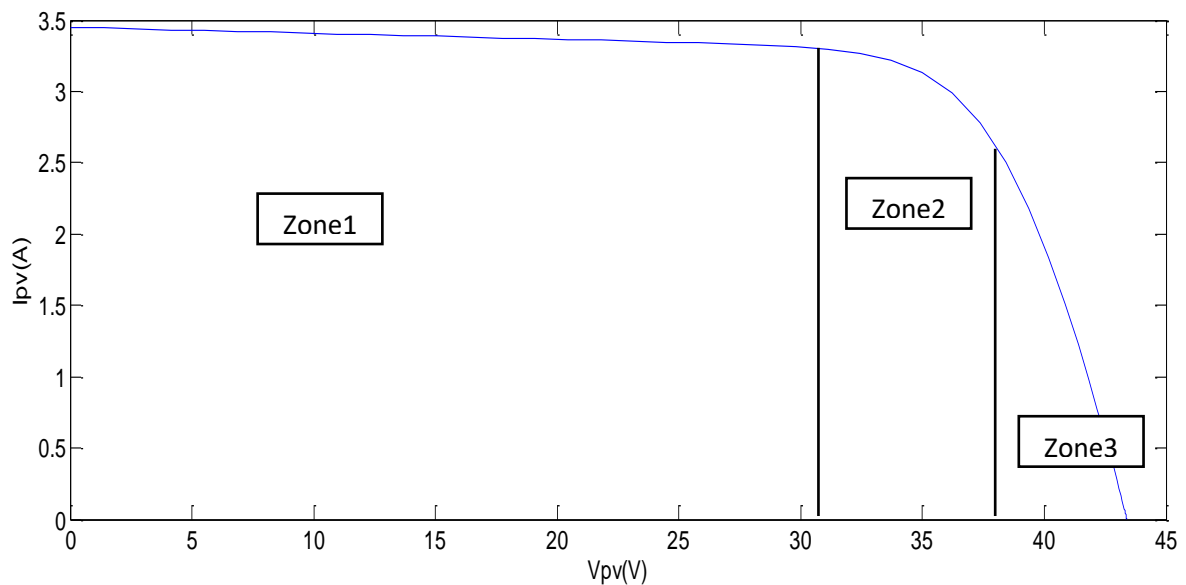


Figure III.1 : Caractéristique  $I_{pv}(V_{pv})$  dans la condition standard.

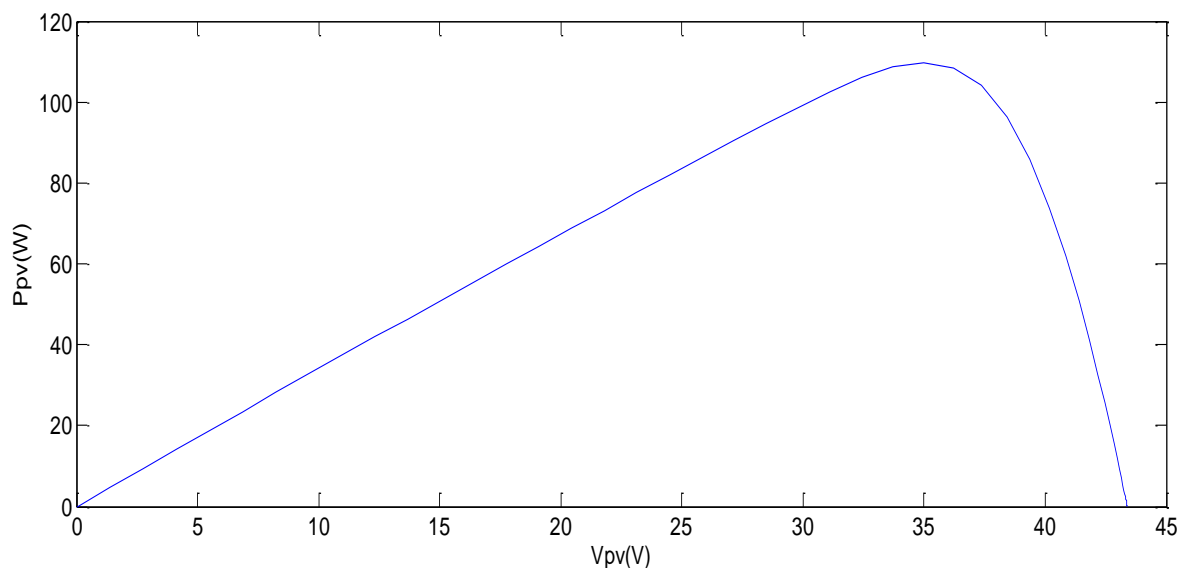


Figure III.2 : Caractéristique  $P_{pv}(V_{pv})$  dans la condition standard.

On remarque à partir des caractéristiques (courant-tension) du module photovoltaïque qu'il dispose de trois zones de fonctionnement qui sont :

**Zone (1) :** Dans cette région, le module photovoltaïque agit comme un générateur de courant, ou le courant reste quasiment constant quelle que soit la tension.

**Zone (2) :** Qui se caractérise par une variation de courant correspondante à une tension quasi stable, dans ce cas, le générateur peut être considéré comme un générateur de tension.

**Zone (3) :** Correspond au coude de la caractéristique, la région intermédiaire en les deux zones précédentes, elle représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur, ou le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé.

### III.2.1. Influence de la température

L'impact de la température est important et a des conséquences pour la conception des panneaux et des systèmes photovoltaïques. La température est un facteur essentiel car les cellules sont exposées à l'irradiation solaire, qui peut les réchauffer, de plus une portion de rayonnement produite n'est pas transformée en énergie électrique et se disperse sous forme de chaleur. Afin de voir l'impact de la température, nous avons établi les courbes  $I_{pv}(V_{pv})$  et  $P_{pv}(V_{pv})$  comme les figure (III.3) (III.4) pour diverses températures, tout en maintenant un niveau d'ensoleillement constant  $E=1000 \text{ W/m}^2$ .

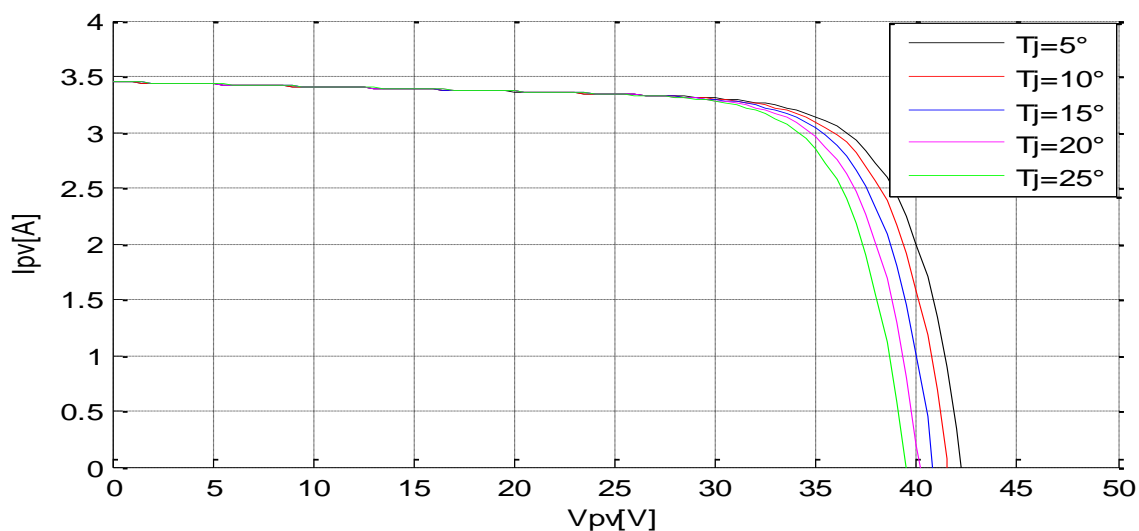
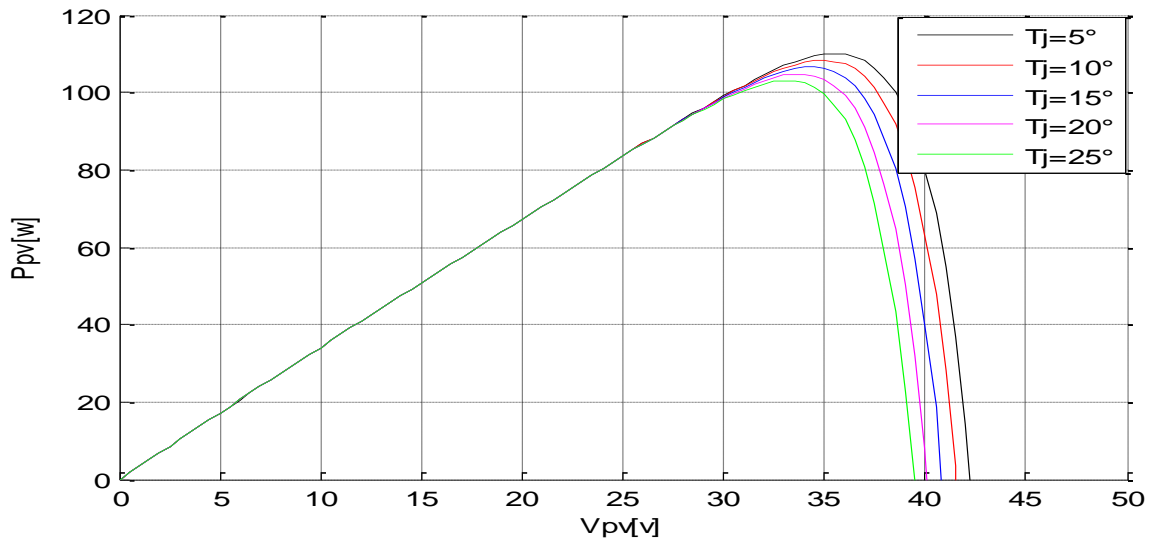


Figure III.3 : Influence de la température sur la caractéristique  $I_{pv} = f(V_{pv})$

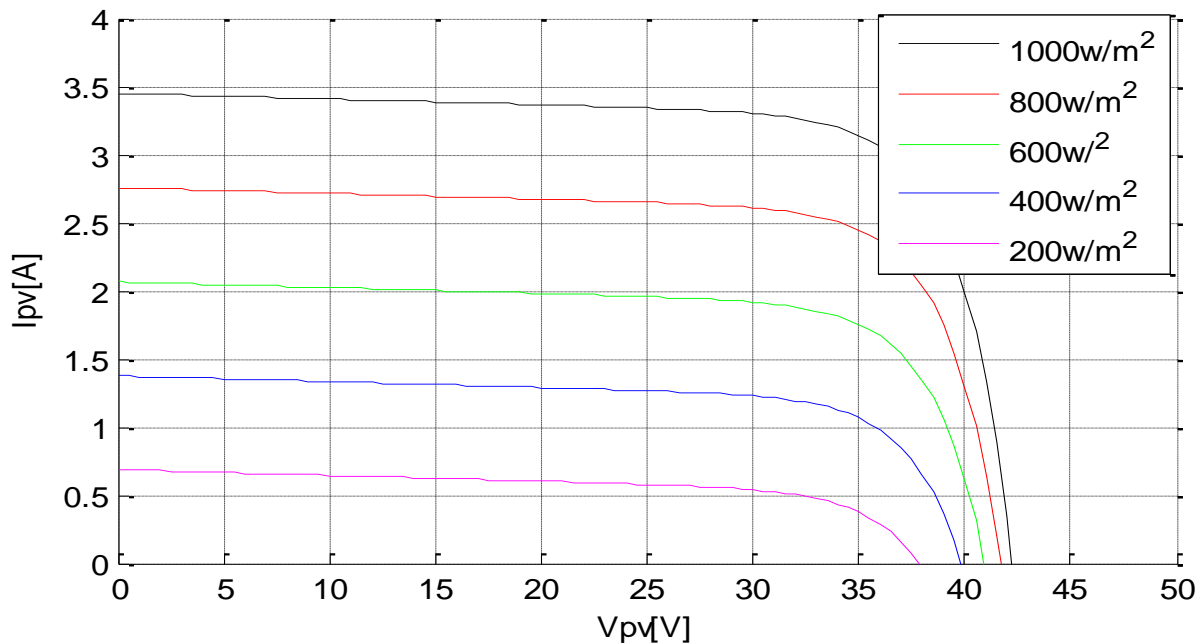


**Figure III.4 :** Influence de la température sur la caractéristique  $P_{pv}=f(V_{pv})$

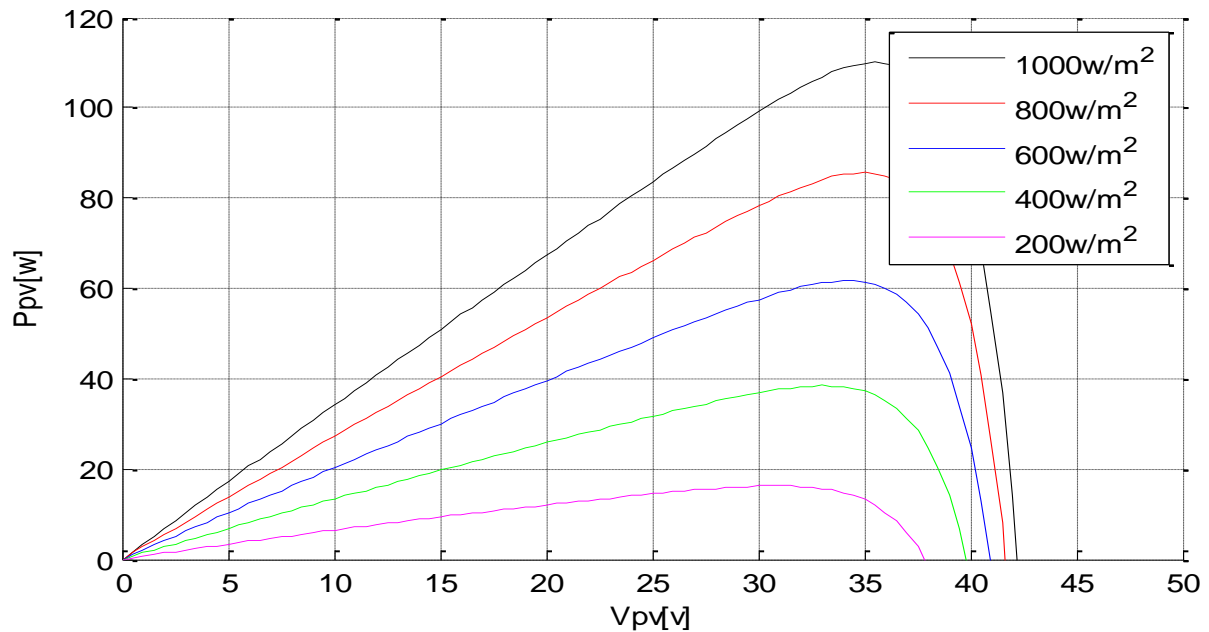
On remarque que lorsque la température augmente, la courante photogénéré augment très légèrement alors que la tension de circuit ouvert diminue considérablement.

## III.2.2. Influence de l'éclairement

La production d'énergie électrique par un panneau dépend de l'éclairement qu'il capte sur sa surface. Les figures (III.5) (III.6) qu'on voit ci-dessous représentent les caractéristique  $I_{pv}(V_{pv})$ ,  $P_{pv}(V_{pv})$ , de cellule PV en fonction de la variation d'éclairement à une température constante  $T=25^\circ\text{C}$ .



**Figure III.5 :** Influence de l'éclairement sur la caractéristique  $I_{pv}=f(V_{pv})$



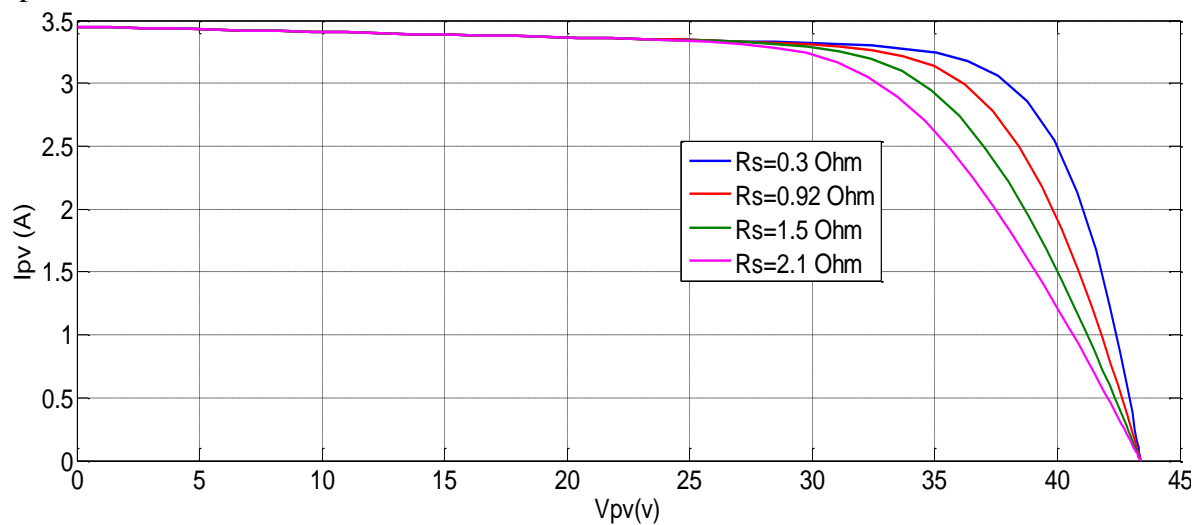
**Figure III.6 :** Influence de l'éclairement sur la caractéristique  $P_{pv}=f(V_{pv})$

On remarque que la variation de l'éclairement influe visiblement sur le courant de court-circuit et peu sur la tension de circuit ouvert par conséquent la variation de proportionnellement à l'éclairement.

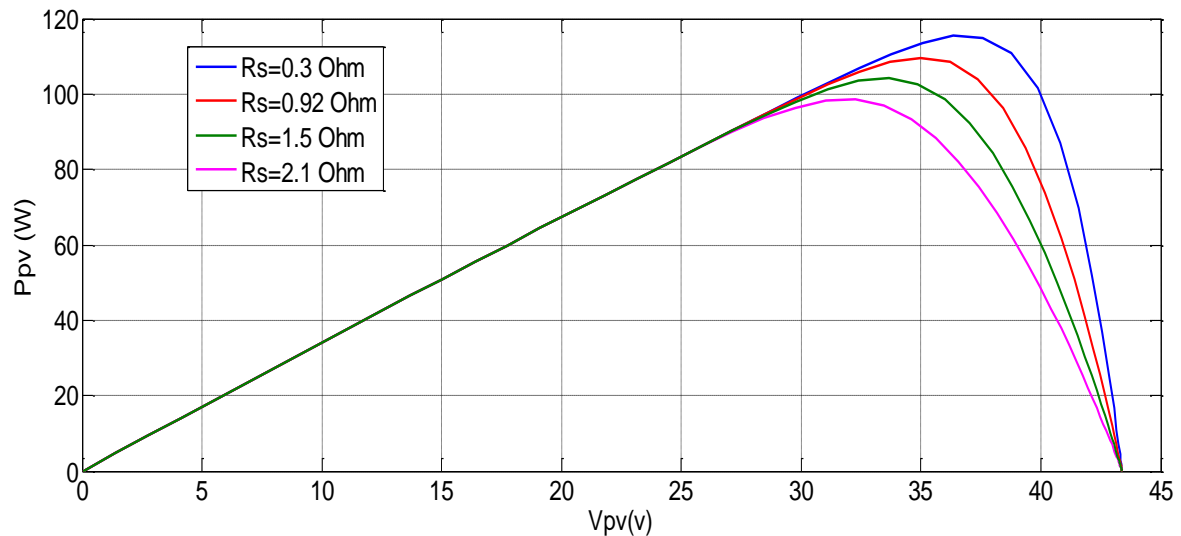
## III.2.3. Influence de la résistance série $R_S$

Dans certaines situations, la valeur de la résistance série peut être très faible. On peut ajuster cette résistance et anticiper l'impact de sa modification sur les résultats de module PV.

Les figures (III.7) (III.8) qu'on voit ci-dessous représentent les caractéristiques  $I_{pv}(V_{pv})$ ,  $P_{pv}(V_{pv})$ , provoquent une déviation de la pente du point de puissance maximale. On remarque que L'augmentation de la résistance série se traduit par une diminution de pente de la courbe de puissance.



**Figure III.7 :** Influence de résistance série la caractéristique  $I_{pv}= f(V_{pv})$



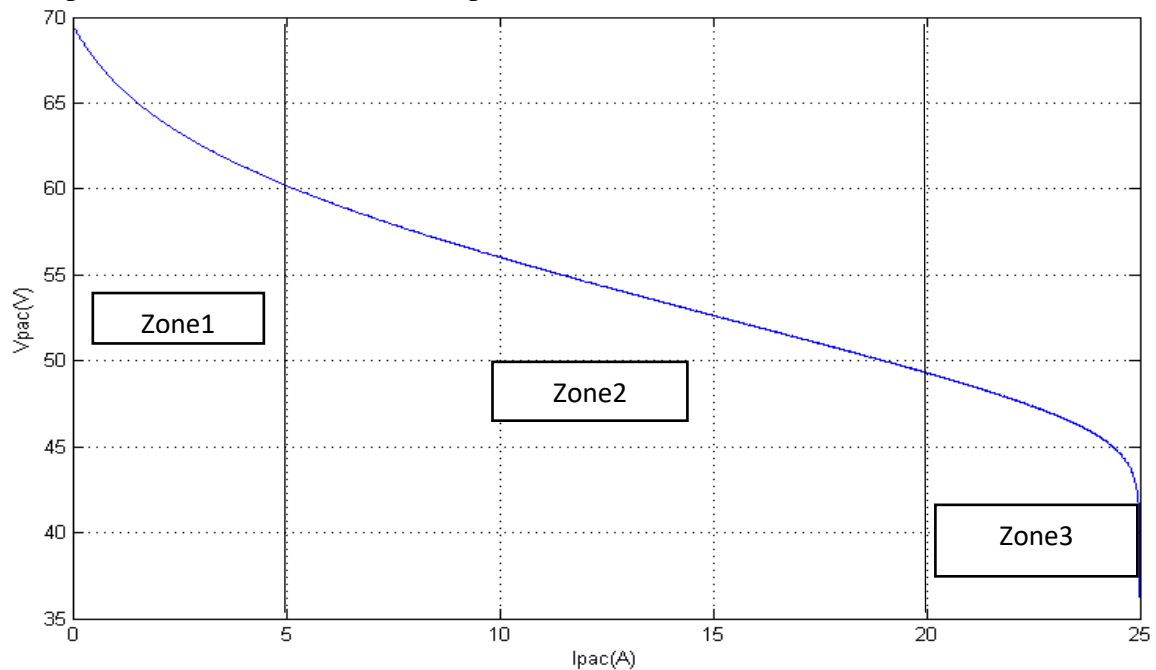
**Figure III.8 :** Influence de résistance série la caractéristique  $P_{pv} = f(V_{pv})$

D'après ces résultats, nous remarquons que la résistance série provoque des pertes localisés dans le panneau photovoltaïque, ce qui engendre la délocalisation de point de puissance maximale.

## III.3.Caractéristique de la pile combustible PEMFC

### III.3.1.Caractéristique tension-densité de courant de la pile PEMFC

La figure (III.9) représente la variation de la tension de sortie en fonction de de courant .cette courbe indique que les caractéristiques de la pile sont non linéaire, chaque augmentation du courant entrainant une diminution de la tension .sur la courbe caractéristique V-I de la pile, a une température constante de 25°C, on peut identifier tris zones distinctes.



**Figure III.9 :** Caractéristique  $V_{pac} = f(I_{pac})$  de la pile PEMFC

La première zone à faible densité de courant représente les polarisations d'activation de l'anode et de la cathode, un phénomène crucial pour les densités de courant basses.

La deuxième zone présente un comportement résistif face à des densités de courant moyennes, illustrant ainsi une linéarité. On attribue principalement cette résistance au déplacement des protons à travers la membrane. Par conséquent, les autres composants de la cellule, tels que les diffuseurs et les plaques bipolaires, possèdent une conductivité électronique élevée puisqu'ils sont souvent fabriqués en carbone et présentent une faible chute de potentiel.

La troisième zone à forte densité de courant associée à la contrainte de diffusion et d'inondation n'est pas mentionnée. Ces phénomènes orientent la variation de la pression des diverses espèces à l'intérieur des canaux de la pile à combustible, et ils sont attribuables au transfert dominante du gaz. Il ne faut pas utiliser cette zone en fonctionnement, car le fait de la noyer dégrade considérablement les performances de la pile.

### III.3.2. La courbe de puissance

La figure (III.10) représente la variation de la caractéristique densité de Puissance-Densité de courant, de la pile à combustible PEMFC

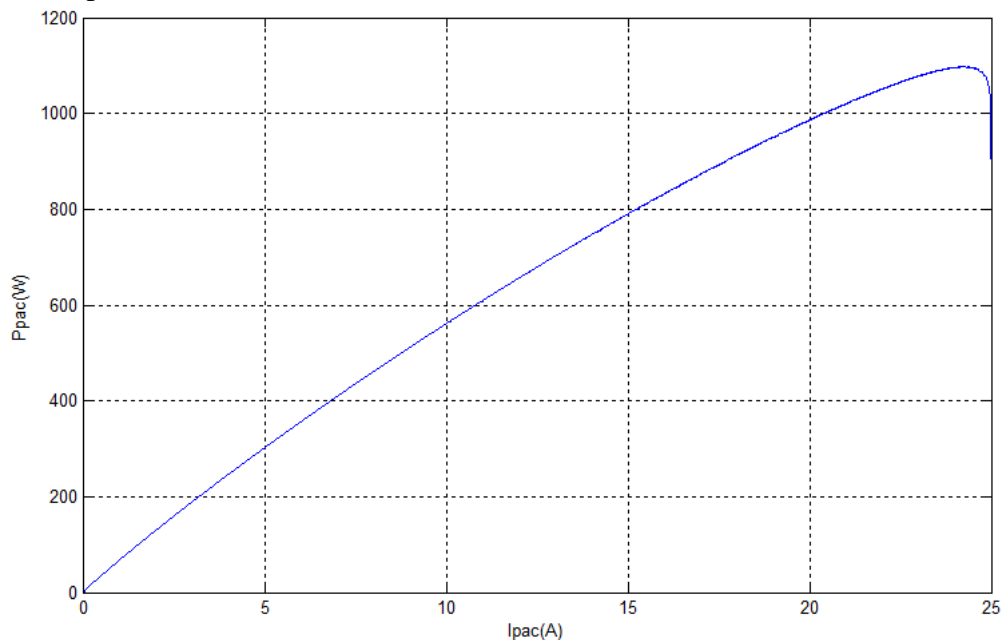


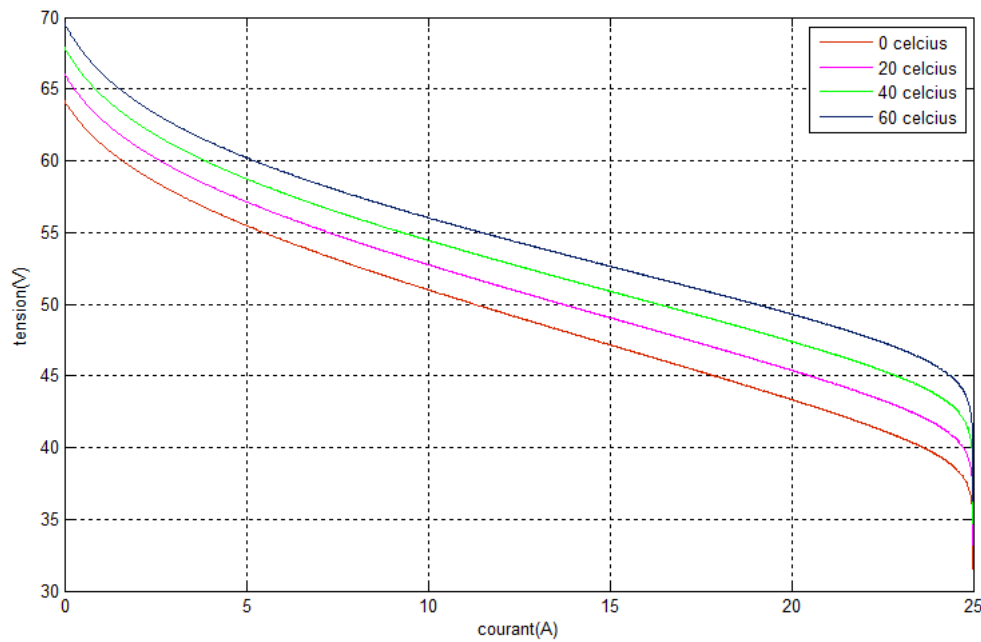
Figure III.10 : Caractéristique  $P_{pac} = f(I_{pac})$  de la pile PEMFC

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

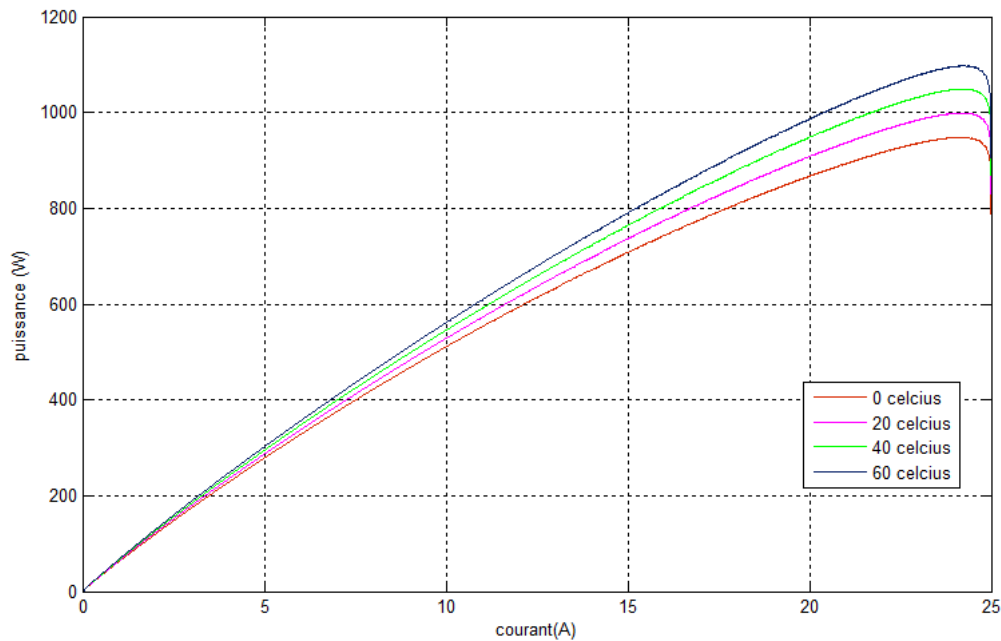
### III.3.3. Influence de la température

L'impact de la variation des paramètres d'entrée de la pile sur son fonctionnement optimal. Les figures qu'on voit ci-dessous représentent les caractéristiques V-I et P-I pour diverses températures  $t=0, 20, 40, 60$  elles illustrent l'impact de la variation de la température ambiante sur la tension et la puissance de la pile à combustible.





**Figure III.11 :** Influence de la température  $V_{pac} = f(I_{pac})$



**Figure III.12 :** Influence de la température  $P_{pac} = f(I_{pac})$

D'après la figure (III.11), on constate qu'il existe un lien proportionnel entre la température et la tension. En effet, l'élévation de la température génère une augmentation de la tension, car cette dernière entraîne une diminution de la résistance ohmique de l'électrolyte. La figure (III.12) illustre comment la densité de puissance varie en fonction des changements de température.

D'une part, l'augmentation de température facilite l'accélération des réactions électrochimiques (vitesse) aux électrodes et contribue ainsi à réduire les pertes d'activation. Par ailleurs, elle optimise la diffusion des gaz au sein des électrodes et favorise l'accroissement du courant limite de la pile. Finalement, elle aide à réduire les pertes ohmiques dans la membrane par l'amélioration de sa conductivité ionique.

### III.4.Caractéristiques d'électrolyseur

La figure (III.13) illustre le changement de la tension en fonction du courant sous une température fixe  $T = 25\text{ C}^\circ$ . Selon cette courbe indiquant que les caractéristiques (V-I) d'un électrolyseur est non linéaires.

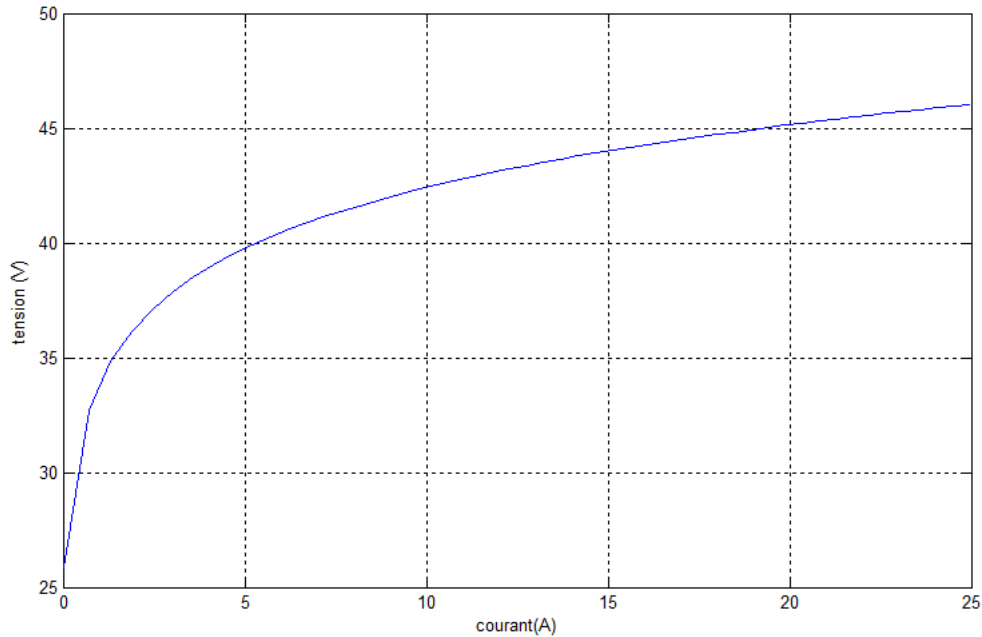


Figure III.13 : Caractéristique V-I d'électrolyseur

#### III.4.1.Influence de la Température

L'électrolyseur est réactif aux variations de température. Pour évaluer son impact, nous avons représenté les caractéristiques  $I_{pv}$ - $V_{pv}$  comme indiqué à la figure (III.14), pour diverses températures.

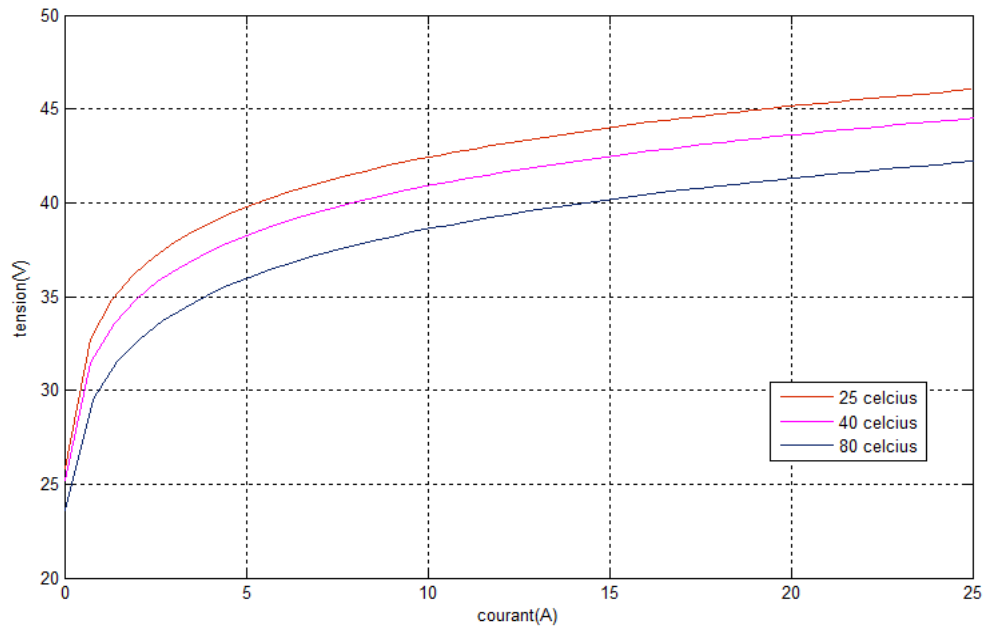


Figure III.14 : Influence de la température sur la caractéristique I-V de l'électrolyseur

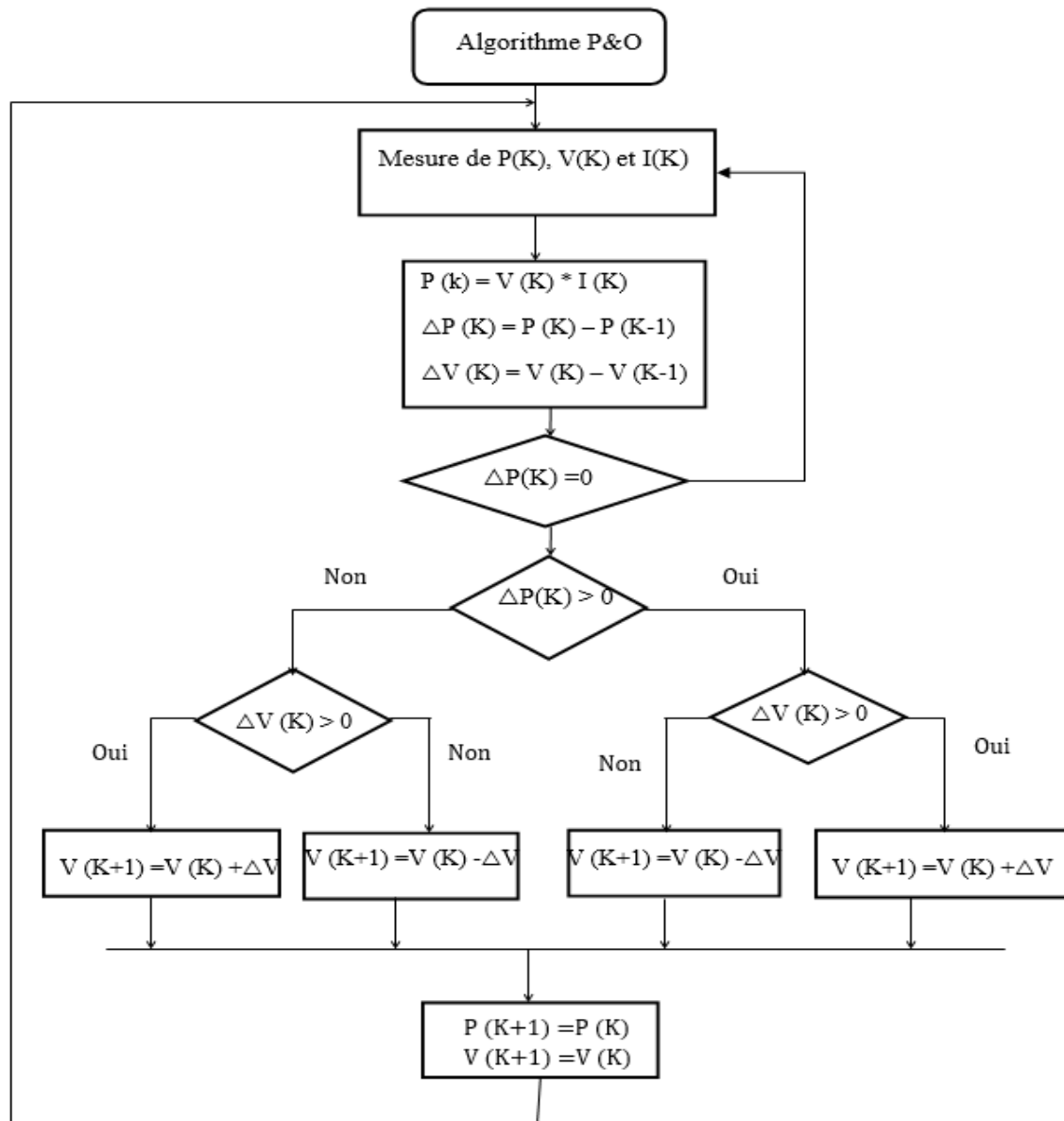
On remarque que lorsque la température de fonctionnement de l'électrolyseur augmente, la tension de sortie de ce dernier diminue

### III.5. La Commande MPPT

La technique Perturb and observe (P&O) est l'une des méthodes MPPT les plus utilisées pour optimiser la production d'énergie solaire. Elle permet de trouver le point de puissance maximale (Maximum Power Point-MPP) en effectuant une série des mesures et de comparaison simples. Cette technique est pratiquement une approche analytique (d'essai et d'erreurs) [39]. L'algorithme mesure à chaque instant la tension et le courant délivré par le panneau photovoltaïque puis on déduit la puissance instantanée, cette puissance actuelle notée  $P(k)$  est ensuite comparée à la puissance mesurée au cycle précédent  $P(k-1)$  [35].

- Si la puissance a augmentée, cela indique que le système se dirige vers le MPP, et la perturbation (généralement une variation de tension) est poursuivie dans la même direction
- Si la puissance diminue cela indique un déplacement du MPP dans cette situation la direction de la perturbation est inversée pour corriger le trajet et de se rapprocher à nouveau du point optimal.

La figure (III.15) illustre l'organigramme de l'algorithme (P&O). Elle montre les différentes étapes du processus de mesure, de calcul et de prise de décision en fonction de l'évolution de la puissance.



### III.5.1. Classification des techniques MPPT

Dans les systèmes photovoltaïques le suivi de point de puissance maximale (MPPT) est essentiel pour optimiser la production d'énergie, plusieurs méthodes ont été développées qu'on peut classer en deux catégories sont :

#### III.5.1.1.Méthode classique

Ces techniques sont généralement simples à mettre en œuvre, surtout dans les systèmes à petite échelle, elles reposent souvent sur les calculs directs à partir des mesures de tension et de courant. Parmi les plus utilisées :

- Perturb and Observe (P&O).
- Incrémental Conductance.
- Méthode du courant de court-circuit partiel.
- Méthode de la tension en circuit ouvert partiel.

### III.5.1.2 Méthode avancées

Ces techniques utilisent l'intelligence artificielle, les modèles mathématiques ou des stratégies d'optimisation plus complexes. Bien qu'elles soient plus efficaces dans des conditions dynamiques, elles nécessitent davantage de ressources de calcul. Parmi les plus utilisées :

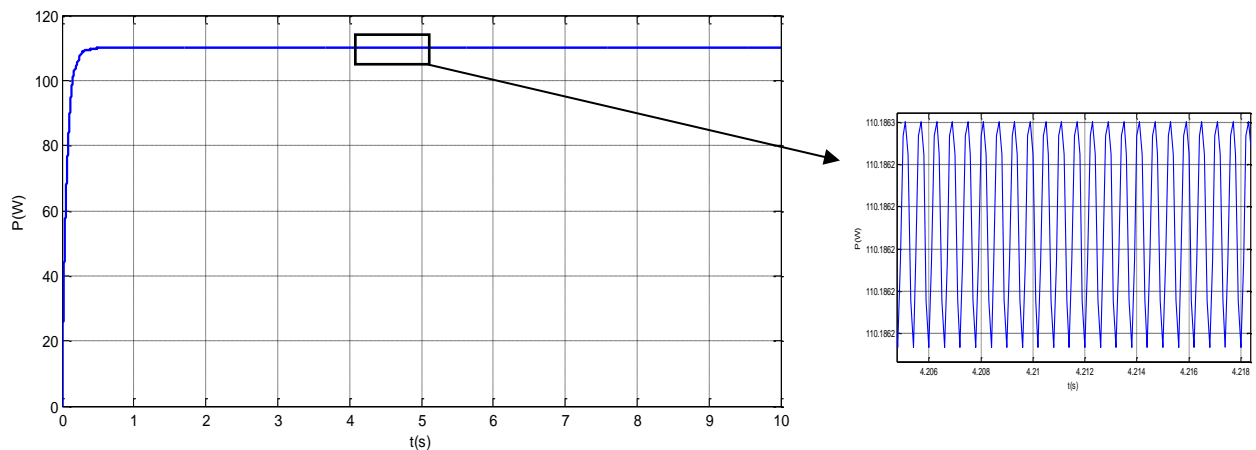
- Réseaux de neurones artificiels (ANN).
- Logique floue.
- Optimisation par essaims particulaires (PSO) ou algorithmes génétiques.

### III.5.2.Simulation numérique

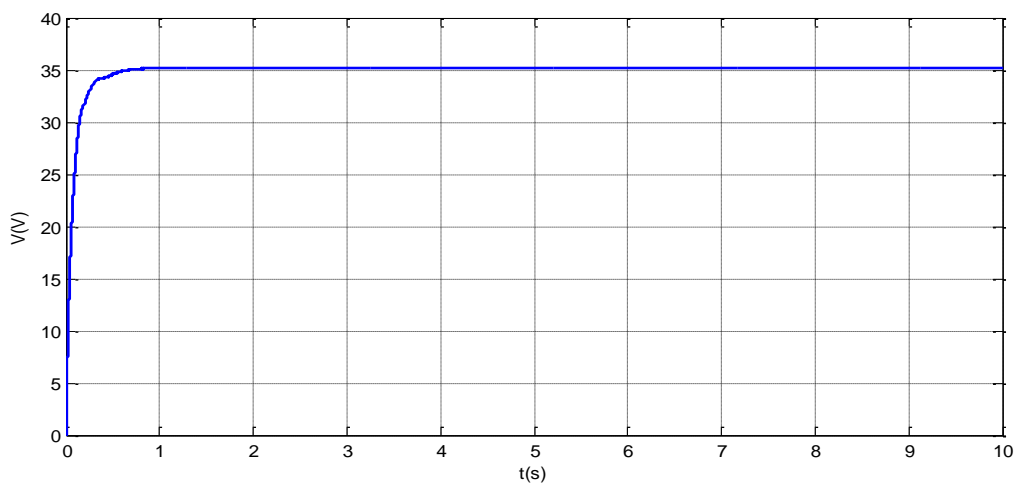
Afin d'évaluer les performances de l'algorithme (P&O) et sa capacité à suivre efficacement le point de puissance maximal, nous avons réalisé une série de simulation sous Matlab Simulink en soumettant le système à un profil d'ensoleillement fixe et variable. Le système étudie un générateur photovoltaïque autonome, constitué d'un panneau solaire de 110W alimente une charge résistive de 70W. L'objectif est d'évaluer les performances du contrôleur.

### III.5.3. Fonctionnement sous des conditions constantes

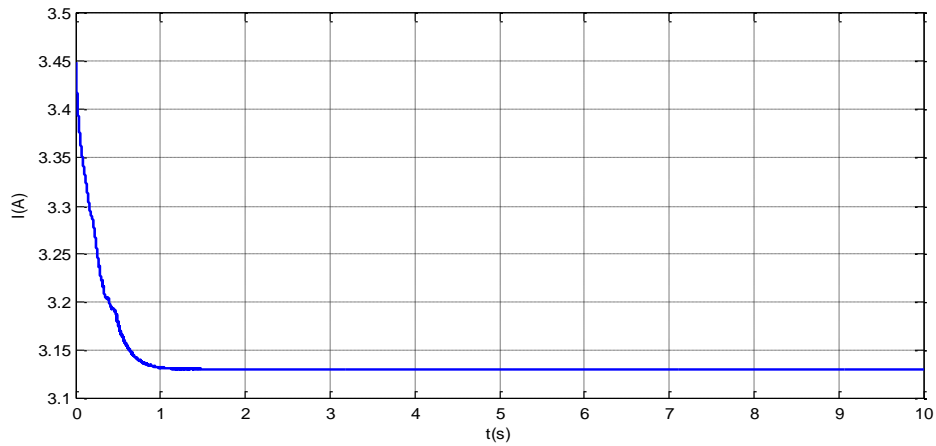
Dans ce test la température et l'ensoleillement sont maintenus constants ( $T=25^{\circ}\text{C}$ ,  $E_s=1000\text{W/m}^2$ ).



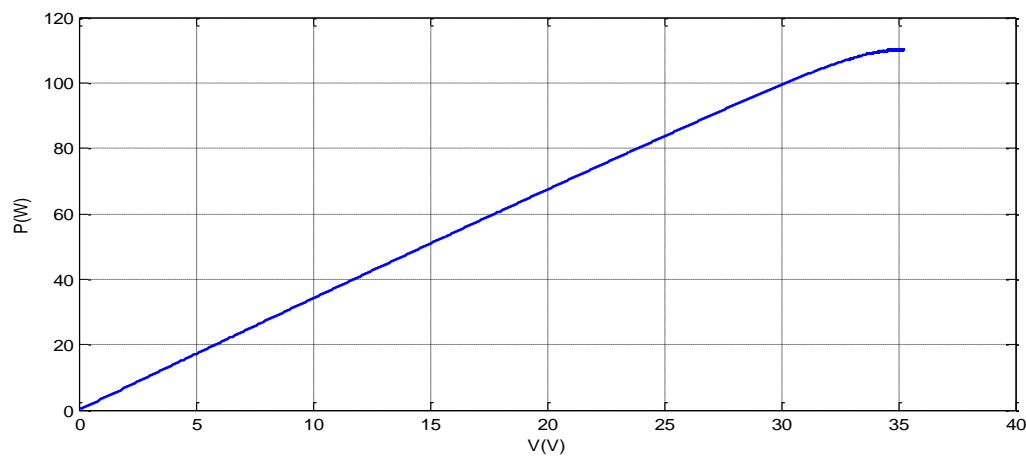
**Figure III.16 :** allure de la puissance sous conditions stables ( $E_s=1000\text{W/m}^2$ ,  $T=25^{\circ}\text{C}$ ).



**Figure III.17:** allure de la tension sous conditions stables ( $E_s=1000\text{W/m}^2$ ,  $T=25^{\circ}\text{C}$ ).



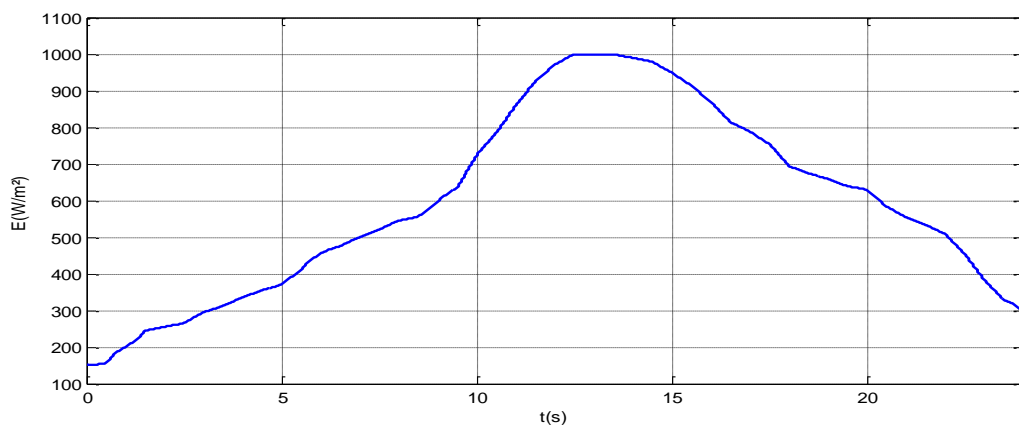
**Figure III.18 :** allure du courant sous conditions stables ( $E_s=1000\text{W/m}^2$ ,  $T=25\text{C}^\circ$ ).



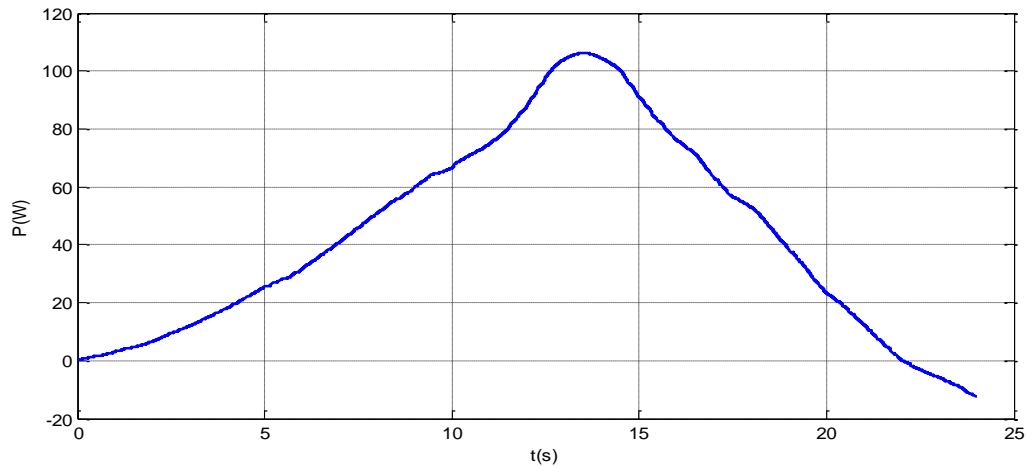
**Figure III.19 :** allure de la puissance en fonction de la tension sous conditions standards

### III.5.4. Fonctionnement sous conditions variables

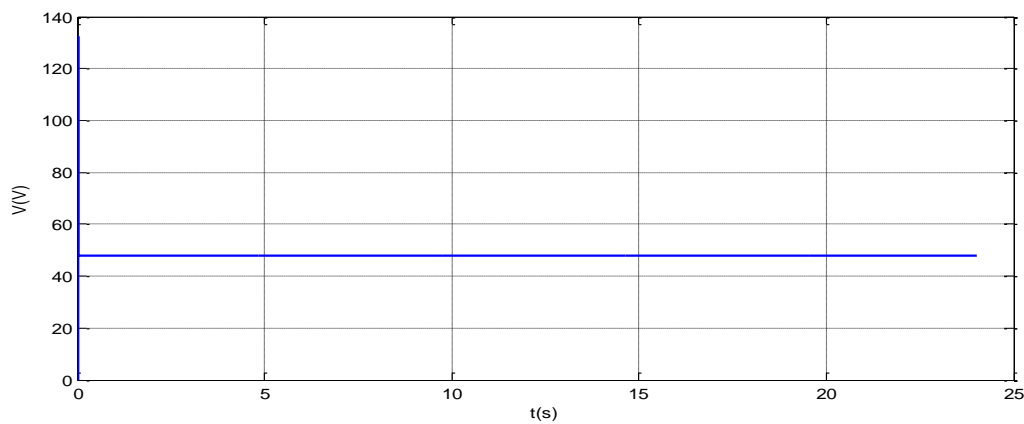
Pour voir le comportement du système face aux changements de l'éclairement on va lui faire subir le test dont le profil d'ensoleillement est donné par la figure III.20 :



**Figure III.20 :** consigne de l'ensoleillement variable.



**Figure III.21:** allure de la puissance pour une variation de l'ensoleillement.



**Figure III.22 :** allure de la tension de charge pour une variation de l'ensoleillement.

### III.5.5.Interprétation des résultats

Les figures (III.17, III.19) illustrent le comportement du contrôleur MPPT dans des conditions standards ( $E_s=1000\text{W/m}^2$ ,  $T=25^\circ\text{C}$ ).

L'analyse de la courbe de puissance (figure III.16) montre que la puissance maximale (110W) est atteinte rapidement, avec un temps de réponse de 0.275 s. cependant, des oscillations en régime permanent sont observées dues à la perturbation périodique de signal de commande caractéristique de la méthode (P&O), ce qui causera des pertes de puissance.

La tension de sortie (figure III.17) et le courant (figure III.18) arrive à leur valeur optimal de 43.5V et 3.15A respectivement puis se stabilisent dans le temps.

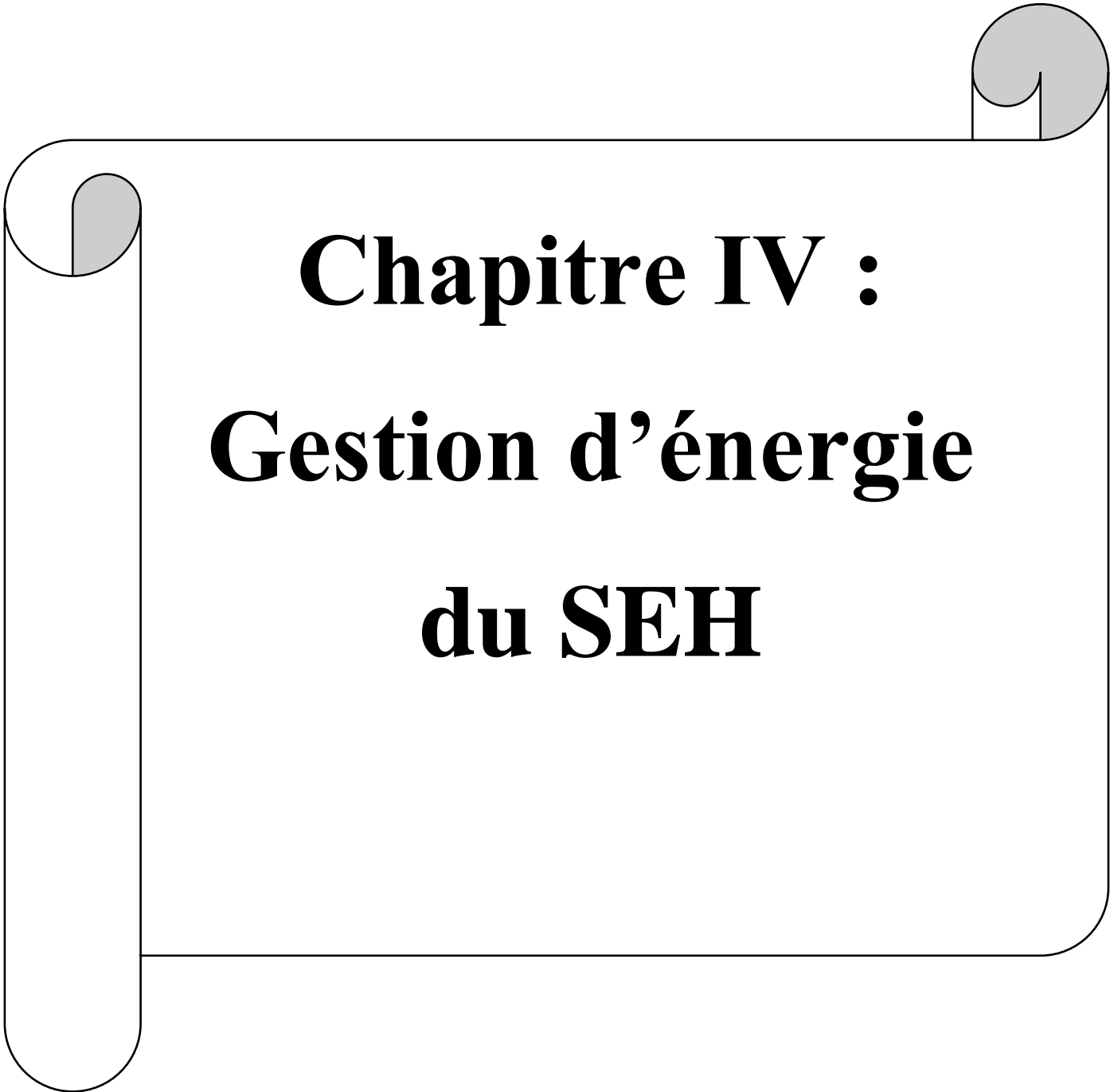
Sous des conditions d'ensoleillement variable les figures (III.21), (III.22) montrent la réponse du contrôleur MPPT.

La figure (III.21) montre que la puissance suit fidèlement l'évolution de l'ensoleillement, démontreront la capacité de contrôleur à s'adapter aux variations rapides de la ressource solaire. La figure (III.22) confirme que la tension de la charge reste stable malgré les grandes variations de l'énergie produit. Cela signifie que même en présence de variation brusque liée à la nature aléatoire de l'ensoleillement, le système assure une alimentation continue et fiable de la charge.

### **III.6.Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons utilisé les modèle mathématique développer en chapitre 2, afin de simuler le comportement de générateur photovoltaïques, la pile à combustible et l'électrolyseur, sous différents conditions (température, ensoleillement) de fonctionnent. Les résultats obtenus montrent la nature non linéaire des sources utilisées, pour remédier à ce problème dans le cas de GPV qui' est considéré comme source principale nous avons utilisé une technique de maximisation de puissance (P&O). Les résultats ont montré que cette méthode est simple, rapide et efficace face aux variations climatiques. La simulation des différents éléments du système (PV, PEMFC, batterie, électrolyseur) a également confirmé leur bon fonctionnement.



A decorative graphic of a scroll with a light gray background and a dark gray border. The scroll is partially unrolled, with the top and bottom edges showing a dark gray shadow. The text is centered on the unrolled portion of the scroll.

# **Chapitre IV :**

## **Gestion d'énergie**

### **du SEH**

### IV.1.Introduction

Notre système est basé sur une combinaison de plusieurs sources d'énergies (les panneaux photovoltaïques, pile à combustible et les batteries), ce qui nécessite un gestionnaire d'énergie permettant de contrôler le fonctionnement des différents constituants, ce gestionnaire est basé sur un algorithme de sept modes de fonctionnement et qui prend en considération la puissance produite par GPV considéré comme la source principale, la puissance demandée par la charge et l'état de la charge du système de stockage qui est constitué de batteries un réservoir d'hydrogène alimentant une PAC via l'électrolyseur. Le but de ce système est d'alimenter la charge sans interruption quel que soit les conditions météorologiques.

### IV.2.Conception du système hybride (PV/PAC/batterie)

Dans le système étudié (figure (IV.1)) le champ PV alimente directement la charge. Lorsque la puissance PV est supérieure à la demande le surplus est utilisé pour charger les batteries, et d'autre part utilisé pour produire H<sub>2</sub>. En cas de manque d'énergie solaire le système utilise d'abord l'énergie stocké dans les batteries. Puis si nécessaire active la pile à combustible pour maintenir l'alimentation de la charge.

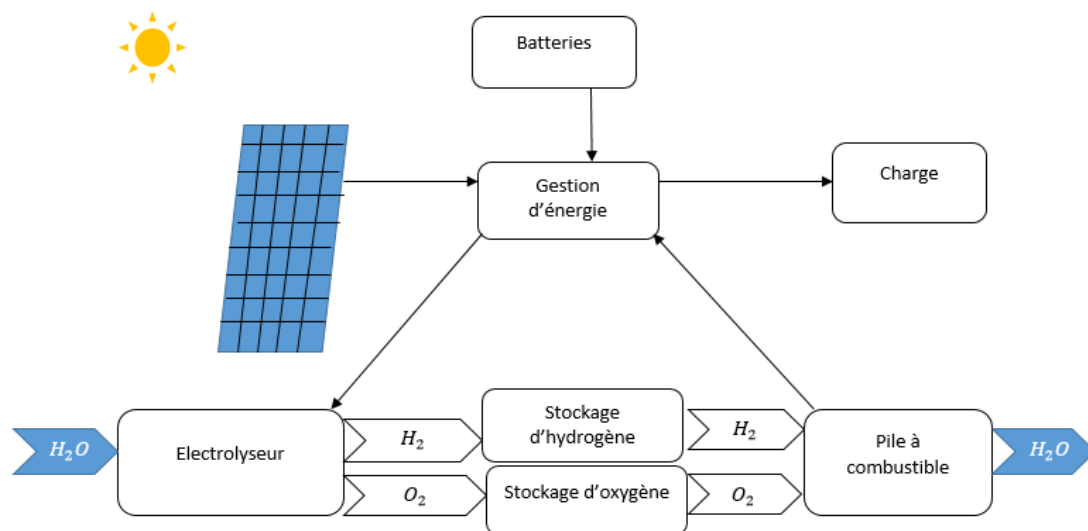


Figure IV.1 : concept du système hybride.

### IV.3.Le principe de gestion d'énergie de ce système hybride

La stratégie de gestion de l'alimentation permet de diriger le surplus de puissance généré par le PV vers la charge des batteries ou l'électrolyseur. En cas d'insuffisance de production solaire les batteries préviennent si non la PEMFC rentre en jeu afin de maintenir une alimentation continue de la charge.

Dans ce contexte nous avons proposé 7 modes de fonctionnement permettant de balayer toute les situations possibles peut recentrées pendant le fonctionnement.

#### Mode 1 :

$P_{PV} = P_{ch}$  : La charge sera alimentée directement par le GV.

**Mode 2 :**

$\Delta P > 0, SOC \geq SOC_{max}, NH_2 \geq NH_{2\ Qmax}$  : La charge sera alimentée par le Gv et le surplus alimente la charge supplémentaire.

**Mode 3 :**

$\Delta P > 0, SOC \geq SOC_{max}, NH_2 < NH_{2\ Qmax}$  : La charge sera alimentée par le Gv et le surplus sera utilisé pour produire l'hydrogène.

**Mode 4:**

$\Delta P < 0, SOC < SOC_{min}, QH_2 \geq QH_{2\ Qmin}$  : Le générateur ne pourra pas alimenter la charge et les batteries sont déchargées on a appelle la PAC pour compléter le déficit d'énergie.

**Mode 5 :**

$\Delta P < 0, SOC < SOC_{min}, QH_2 < QH_{2\ Qmin}$  : La charge sera détachée.

**Mode 6 :**

$\Delta P > 0, SOC < SOC_{max}$  : La charge sera alimentées par le Gv et le surplus est utilisé pour charger la batterie.

**Mode 7 :**

$\Delta P < 0, SOC \geq SOC_{min}$  : Le générateur ne pourra pas alimenter la charge donc on appelle la batterie pour compléter le déficit d'énergie.

L'organigramme qui récapitule les modes de fonctionnement est donné par la figure (IV.2)

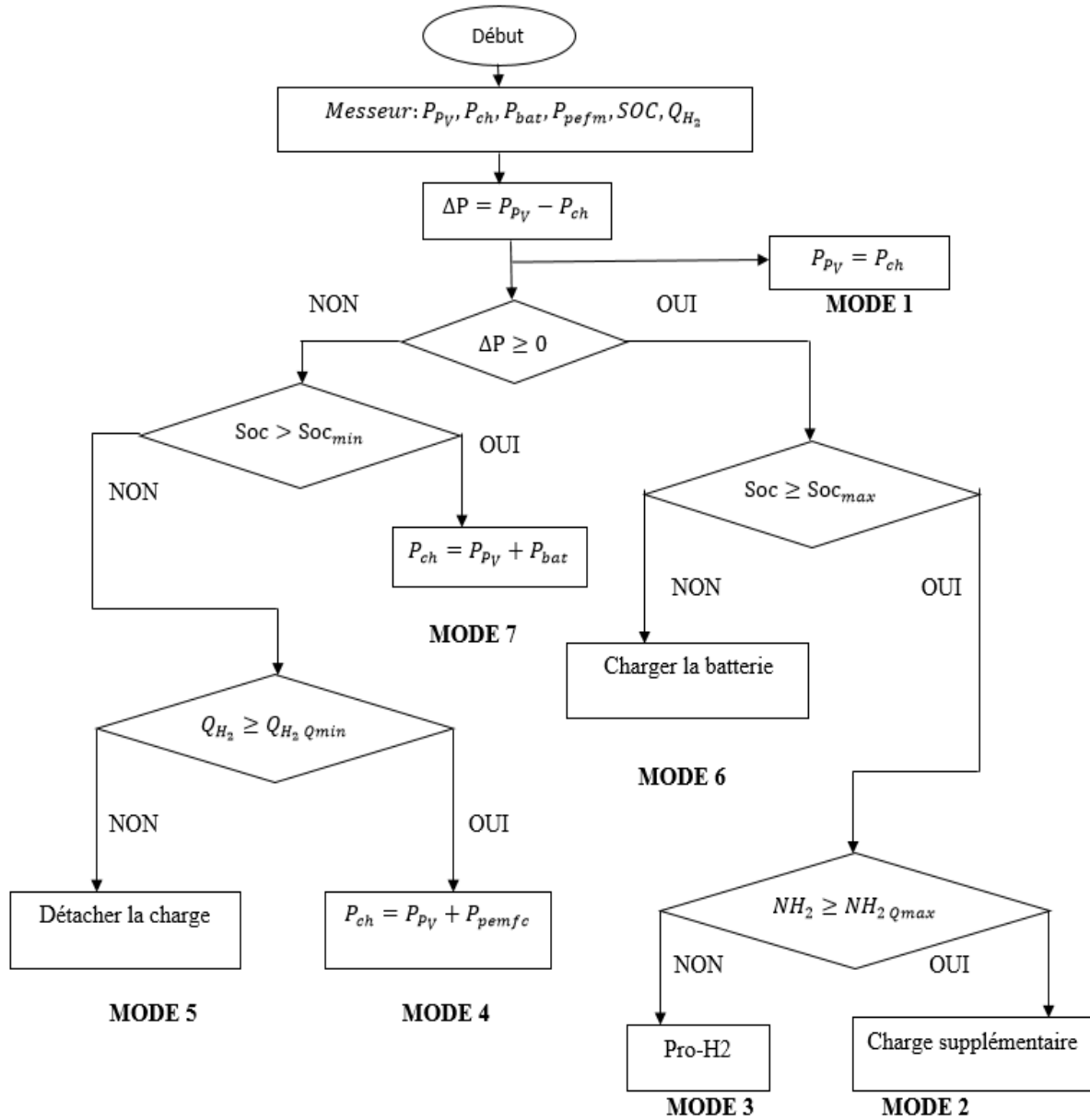


Figure IV.2 : Organigramme de gestion d'énergie du système hybride

#### IV.3.1. Interprétation des Résultats de simulation

Notre système est constitué de 10 panneaux (SM110), une pile à combustible 12 batteries connectées en série afin d'assurer une alimentation continu sans interruption de la charge.

On a intégré les profils nécessaires : profil de la charge (Figure IV.3), Profile de l'ensoleillement (Figure IV.4), Profile de la température (Figure IV.5). Correspondant à deux journées assez différentes (une journée d'été et l'autre d'hiver).

Après, on a lancé la simulation avec un intervalle de temps 48 seconde, ce qui représente en réalité une durée de 48 h dans notre système.

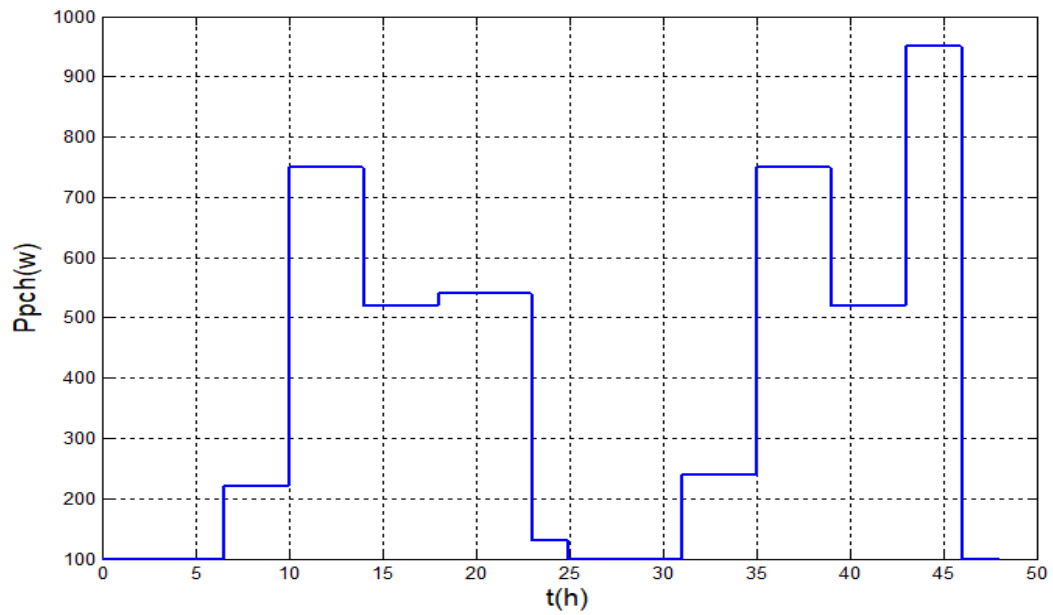


Figure IV.3 : Profil de puissance demandée par la charge.

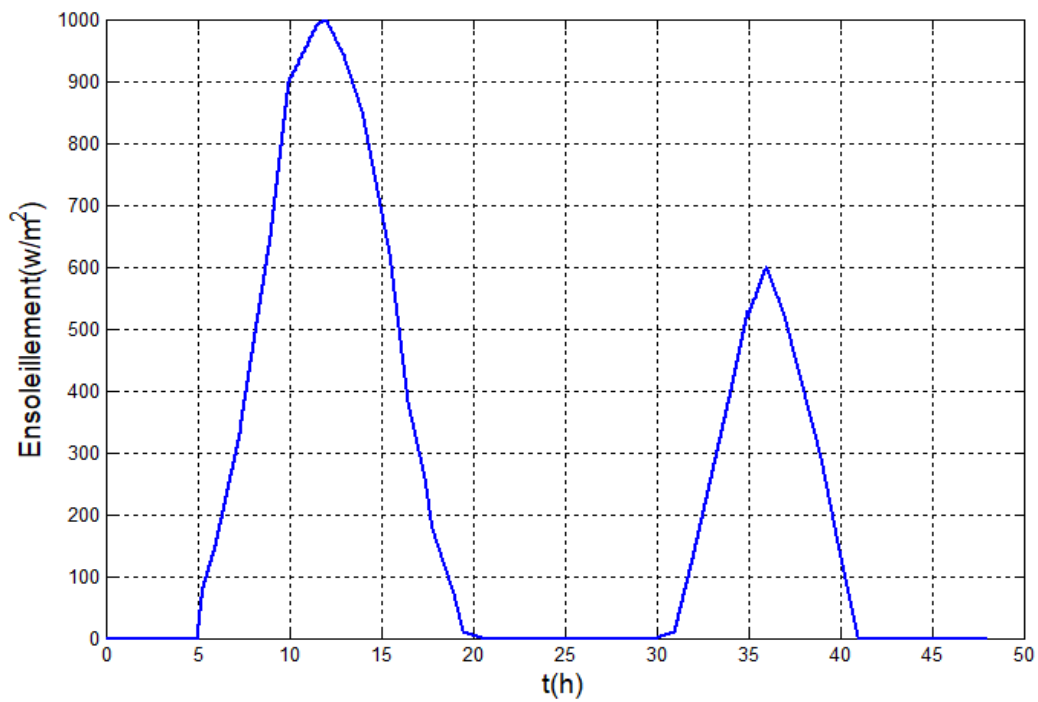


Figure IV.4 : Profile de l'ensoleillement.

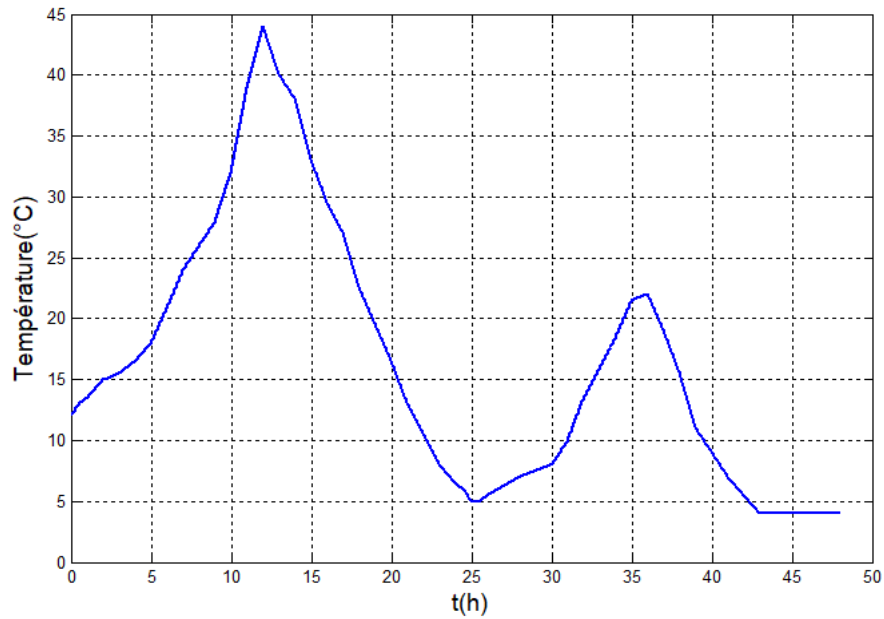


Figure IV.5 : Profile de la température.

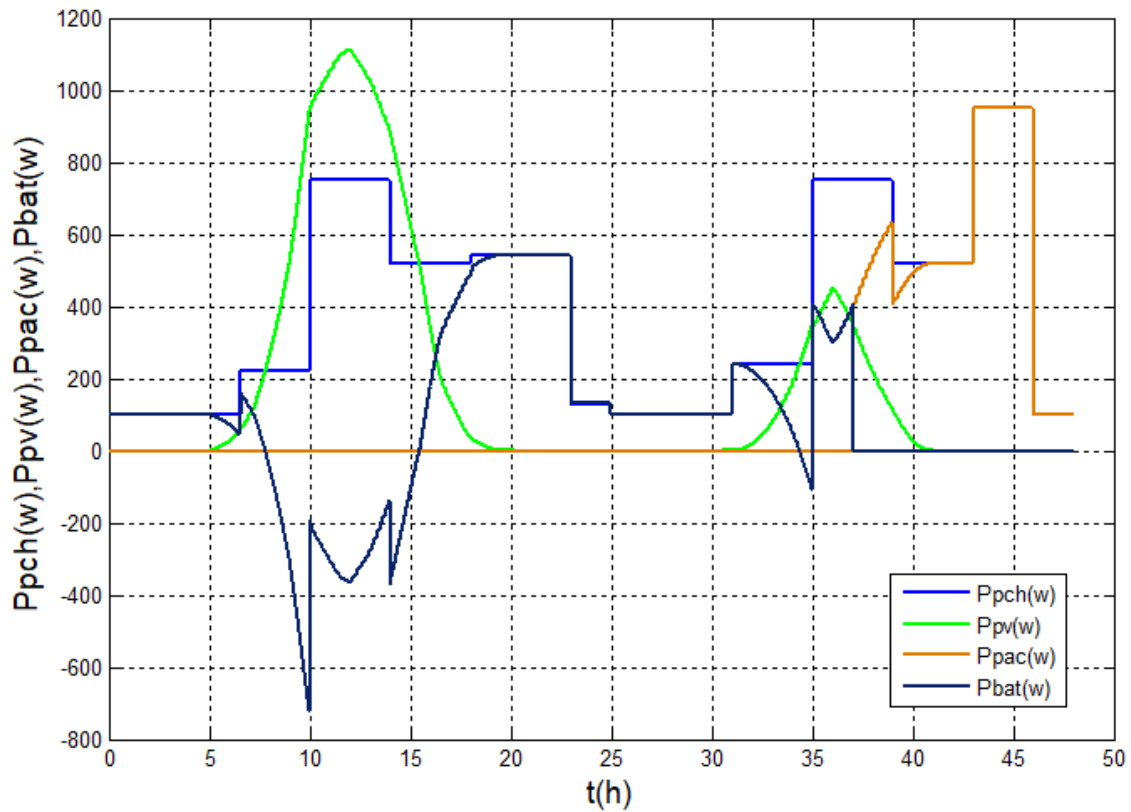


Figure IV.6 : Allures des puissances (Photovoltaïque, charge, batterie, pile à combustible).

La figure (IV.6) représente les puissances ( $P_{pv}$ ,  $P_{pch}$ ,  $P_{bat}$ ,  $P_{pac}$ ) totales fournies par le système hybride.

D'après la figure (IV.6.), nous déduisons les différentes phases :

Phase1  $t \in [0, 5]$  : Pour une journée d'été l'ensoleillement commence vers 5h, donc la puissance des panneaux photovoltaïques égale à 0, dans ce cas la charge sera alimentée par les batteries.

Phase2  $t \in [5, 7]$  : L'ensoleillement commence à apparaître le système de gestion détecte cette phase, mais la puissance photovoltaïque est insuffisante pour satisfaire la demande de la charge et l'état de batteries est supérieure à 30%, dans ce cas les deux puissances s'ajoutent.

Phase3  $t \in [7, 17]$  : L'ensoleillement atteint son point maximum dans cette phase, ce qui est suffisant pour répondre à la demande de la charge et le surplus sert à charger les batteries.

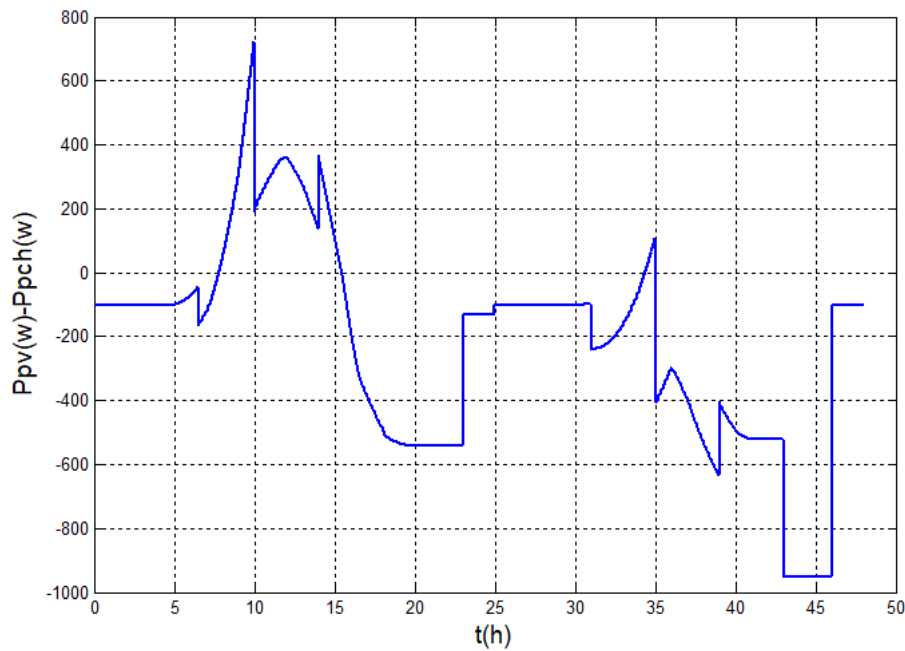
Phase4  $t \in [17, 19]$  : Dans cette phase la puissance photovoltaïque n'est pas suffisante pour satisfaire la demande de la charge, Dans ce cas les batteries ont intervenu pour compléter le déficit.

Phase5  $t \in [19, 31]$  : La puissance des panneaux photovoltaïques est égale à 0, dans ce cas la charge sera alimentée par les batteries.

Phase6  $t \in [31, 37]$  : L'ensoleillement commence à apparaître mais la puissance photovoltaïque n'est pas suffisante pour répondre aux besoins de la charge, donc les batteries ont intervenu pour compléter le déficit.

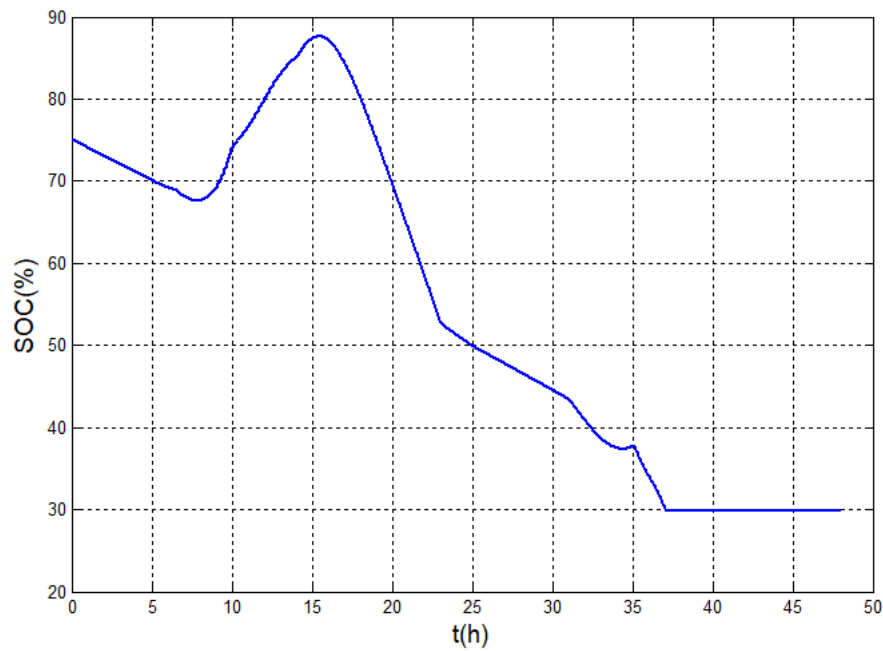
Phase7  $t \in [37, 40]$  : Dans cette phase la puissance photovoltaïque n'est pas suffisante pour répondre aux besoins de la charge, et les batteries sont déchargées, on fait appel à la pile à combustible pour compléter le déficit.

Phase8  $t \in [40, 48]$  : Dans cette phase la puissance photovoltaïque est égale à 0 et les batteries sont déchargées, dans ce cas la charge sera alimentée par la pile à combustible.



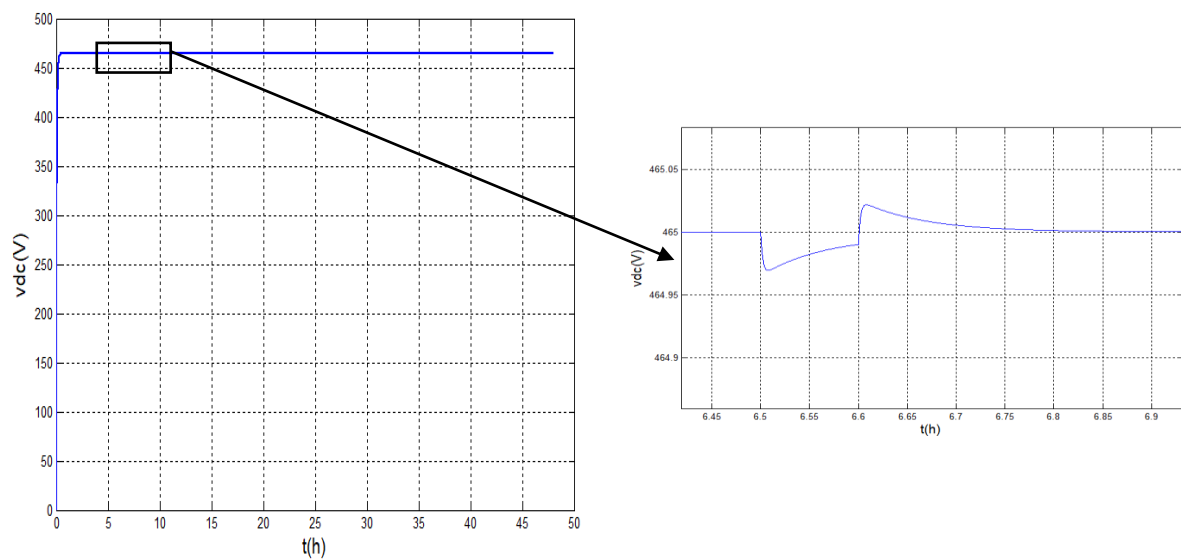
**Figure IV.7 :** La différence entre la puissance  $P_{pv}$  et  $P_{ch}$ .

On remarque dans la figure (IV.7) la différence entre la puissance produite par  $P_{pv}$  et la puissance demandée par la charge.



**Figure IV.8 :** l'état de charge de la batterie.

Dans la figure (IV.8) on remarque l'état de charge de la batterie selon la puissance produit par le générateur, tout en restant entre (30%-90%) de la charge totale de la batterie.



**Figure IV.9 :** Tension du bus continu.

On remarque sur la figure (IV.9) l'allure de bus continu qui reste quasiment constant, et varie peu avec les variations climatiques.



**IV.4.Conclusion**

Dans ce chapitre, et au vu des résultats obtenus, nous pouvons constater que le gestionnaire d'énergie répond efficacement aux exigences imposées. Il fait preuve d'une grande flexibilité face aux variations climatiques. Le système parvient à s'adapter en temps réel aux différentes conditions. Ainsi, l'alimentation de la charge est assurée de manière continue et stable. Ces performances confirment la fiabilité du système hybride proposé.

A decorative scroll graphic with a light gray background and a black outline. The scroll is unrolled in the center, with the text 'Conclusion générale' written on it. The left end of the scroll is rolled up into a cylinder, and the right end is also rolled up into a cylinder. The top and bottom edges of the scroll are slightly curved.

# Conclusion générale

### Conclusion générale

Ce mémoire présent un projet de fin d'étude, qui a porté sur la gestion et l'optimisation d'un système hybride autonome, composé de (Générateur photovoltaïque, pile à combustible, batterie, réservoir d'hydrogène) destinier à alimenter une charge isolée.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté un aperçu sur les sources d'énergies exploitées dans notre système. Nous avons détaillé le principe de fonctionnement de chaque source, et leur rôle dans la production, le stockage et la continuité de l'alimentation en énergie.

Le deuxième chapitre présente la modélisation des principaux composants de notre système (PV, PAC, batteries, électrolyseur et les convertisseurs) chaque composant a été simulé pour reproduire son comportement réel et comprendre son rôle dans la production et le stockage de l'énergie au sein du système.

Ensuite, dans le troisième chapitre, nous avons procédé a une simulation de chaque sous-système individuellement pour analyser leurs comportements face à des conditions climatique variable, lors de cette simulation nous avons constaté que certain composants, notamment le générateur photovoltaïque présente des caractéristiques frottements non linéaire qui complique sa gestion. Afin d'améliorer les performances du système photovoltaïque, nous avons donc implémenté une technique MPPT. Cela nous a permis d'extraire la puissance maximale, même en cas de variations des conditions météorologiques.

Dans le quatrième chapitre, nous avons réuni l'ensemble des éléments dans un système global, géré par un algorithme de gestion d'énergie. Cet algorithme a pour rôle de répartir efficacement l'énergie entre les différentes sources du système. Les résultats de simulation ont montré que notre approche permet une gestion fluide, stable et flexible de l'énergie, quel que soit le contexte climatique.

En fin, on propose quelques perspectives pour l'avenir :

- Mettre en place une commande MPPT de PAC.
- Rajouter des supercondensateurs pour le stockage.
- Utilisation d'un gestionnaire d'énergie intelligent.

### **Bibliographie :**

- [1] S. Abderrezak, «Etude, Gestion et optimisation d'un système hybride (photovoltaïque, pile à combustible avec stockage) », Mémoire De Master, Université de Bouira, Algérie, 2022.
- [2] Z. Roumila, « Etude d'un système hybride (Photovoltaïque- Eolien- Diesel)», Thèse Doctorat, Université Bejaia, Algérie, 22018.
- [3] E. Ian Baring-goul, L.Flowers, P.Lundsager, «World wide status of Wind-diesel application» Pre-work shop Wind-diesel, Anchoray, Alaska, 2004.
- [4] H. Khamtache, L. Moali, «Gestion de puissance d'un Système Hybride», Mémoire De Master, Université de Bejaia, Algérie, 2017.
- [5] K. A. Zouhir, R. Lakhdar, «Contribution à la modélisation optimale des piles à combustible de type pem par utilisation des méthodes méta-heuristiques», Mémoire De Master, Ouargla : Université Kasdi Merbah, Faculté des Sciences appliquées, Algérie, 2020.
- [6] H. Zahia, H. Hanane, «Etude d'un système hybride PV/PAC/ Batteries», Mémoire De Master, Université de Bejaia, Algérie 2018.
- [7] C. Hung Tran, «Améliorations d'une chaîne de conversion de l'énergie solaire en électricité autonome en vue d'application dans les pays en voie de développement». Thèse De Doctorat, Automatique. Université de Reims Champagne-Ardenne, France, 2019.
- [8] R. 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.
- [9] Mezzai, S. ; Tadjine, K. «Étude d'un système hybride (éolien – photovoltaïque), Mémoire de Master», Université de Béjaïa, Algérie 2015.
- [10] R. Alkama, «Cours pile à combustible», université de Bejaia, Département génie électrique, Algérie, 2018.
- [11] Daheur, M. ; Taini, S. A. Elmouiz. «Étude et simulation d'un système hybride PV / pile à combustible / batterie». Mémoire de Master, Université de Ouargla, Algérie, 2020.
- [12] S. Elias, M. Mustapha, « Gestion D'énergie Dans Un Système Hybride (Photovoltaïque - Éolien)», Mémoire De Master, université Abderrahmane Mira–Bejaia, Algérie, 2012.
- [13] Merahi.R, «Modélisation d'un dispositif MPPT pour l'étude de l'augmentation de la puissance produite par le générateur photovoltaïque », Mémoire De Master, Badji Mokhtar, Algérie, 2010.
- [14] E.M.Natsheh, « Hybrid Power Systems Energy Management Based on Artificial Intelligence », Thèse Doctorat, Université Manchester Métropolitain, France, July 2013.
- [15] Bernard.C, Sebrao-Oliveira, Laval.B, Vaudouer.C, « Panneau photovoltaïque et algorithme MPPT à base de logique floue », Rapport rédigé dans le cadre l'UV BA04-Energie renouvelable, Université de technologie Compiègne, France, 2009.

## Bibliographie

---

- [16] M.Boudehouche, M.Ouennoughi, « Gestion d'un système photovoltaïque avec stockage », Mémoire De Master, Université de Bejaia, Algérie, 2016.
- [17] T. Mourad, « Gestion Optimale D'énergie D'une Chaîne De Production Electrique Renouvelable », Thèse Doctorat, université Mohamed Khider Biskra, Algérie, 2017.
- [18] F. Amrouche, B. Mahmah, M. Belhamel, H. Benmoussa, «Modélisation d'une Pile à Combustible PEMFC Alimentée Directement en Hydrogène-Oxygène et Validation Expérimentale», Rev. Energ. Ren, Vol. 8, page 109 – 121, Algérie, 2005.
- [19] J.C. Amphlett, R.M. Baumert, R.F. Mann, B.A. Peppley, P.R. Roberge, A. Rodrigues, « Parametric modelling of the performance of a 5-kW proton exchange membrane fuel cell stack », Journal of Power Sources, Vol 49, Issues 1-3, page 349-356, Canada, April 1994.
- [20] Yasuhito.H, Koji.K, « Modeling of a Hybrid System of Photovoltaic and Fuel cell for Operational Strategy in Residential Use », 47th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2012.
- [21] Mustapha.H, « Contribution à l'Étude des Systèmes Hybrides Photovoltaïque/Pile à Combustible », Thèse Doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran, Algérie, 2010.
- [22] C. Restrepo, C. Torres, J. Calvente, R. Giral and R. Leyva, « Simulator of a PEM fuel-cell stack based on a dynamic model », 2009 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, Porto, Portugal, 2009, page 2796-2801.
- [23] C. Wang, M. H. Nehrir, S. R. Shaw, «Dynamic models and model validation for PEM fuel cells using electrical circuits», in IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol 20, No°2, page 442-451, 2005.
- [24] A. Zaidy, P. Pokharkar, R. Krishnan and D. Sonawane, « Dynamic modeling and simulation of a PEM fuel cell: MATLAB and Lab View modeling approach », Proceedings of 2014 1st International Conference on Non Conventional Energy (ICONCE 2014), page 272-276, Kalyani, India.
- [25] N. Tlili, B. Neily, F. Ben Salem, « Modeling and Simulation of Hybrid System Coupling a Photovoltaic Generator, a PEM Fuel Cell and an Electrolyzer (Part I) ». IEEE 11th International Multi-Conference on Systems, Signals&Devices (SSD14), Barcelona, Spain, 2014, page 1-7.
- [26] M.Fradj.K, Mecheri.K, «Etude et gestion d'un système hybride », Mémoire De Master, Université de Kasdi Merbah Ouargla, Algérie, 2019.
- [27] S.Bensmail, «Contribution à La Modélisation Et à l'Optimisation Des Systèmes Photovoltaïque», Mémoire De Master, Université de A. Mira-Bejaia, Algérie, 2012.
- [28] ULLEBERG, OYSTEIN. «Modeling of advanced alkaline electrolyzers: a system simulation approach." International journal of hydrogen energy, Vol 28, No°1, January 2003, page 21-33.

## Bibliographie

---

- [29] A.Khalilnejad, «A hybrid Wind-PV system performance investigation for the purpose of maximum hydrogen production and storage using advanced alkaline electrolyzer», *Energy Conversion and Management*, Vol 80, April 2014, Pages 398-406.
- [30] L.Stoyanovs, «Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables», Thèse Doctorat, de l'Université Technique de Sofia, Bulgarie, 2011.
- [31] S. Singh, P. Chauhan, M. Asim Aftab, I. Ali, S.M. S Hussain, T. Selim Ustun. « Cost Optimization of a Stand-Alone Hybrid Energy System with Fuel Cell and PV ». *Energies* 2020, 13, 1295, Punjab, India.
- [32] Y. Xiao, K. Agbossou, « Interface Design and Software Development for PEM Fuel Cell Modeling Based on Matlab/Simulink Environment », 2009 WRI World Congress on Software Engineering, Xiamen, China, 2009, page 318-322.
- [33] P. Thounthong, « Conception d'une source hybride utilisant une pile à combustible et des super condensateurs », Thèse doctorat, de l'INPL. L'Institut National Polytechnique de Lorraine, France, 2005.
- [34] A. Haddad, «Modèle dynamique non linéaire de la pile à combustible du type PEM : application à la régulation de l'humidité dans la membrane électrolytique », Thèse doctorat, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, France, 2009.
- [35] N. Aouchiche, M.S. Aït Cheikh et A. Malek. « Poursuite du point de puissance maximale d'un système photovoltaïque par les méthodes de l'incrémentation de conductance et la perturbation & observation ». *Revue des Energies Renouvelables* Vol 16, N°3 ,2013.
- [36] J. Padulles, G.W. Ault, J.R. McDonald, « An Integrated SOFC Plant Dynamic Model for Power Systems Simulation », *Journal of Power Sources*, Vol 86, N°1, page. 495 - 500, 2000.
- [37] M. Uzunoğlu, M.S. Alam, «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*, Vol. 21, N°3, page 767 - 775, 2006.
- [38] A. Khalilnejad, A. Sundararajan, A.I. Sarwat, « Performance Evaluation of Optimal Photovoltaic-Electrolyzer System with the Purpose of Maximum Hydrogen Storage », 2016-ESC-0074.
- [39] M. Arrouf, « Optimisation de l'ensemble onduleur, moteur et pompe branché sur un générateur photovoltaïque », Thèse de Doctorat, Université MENTOURI de Constantine, Algérie, 25 Décembre 2007.

**1. Paramètres du panneau photovoltaïque SIEMENS PV SM110 [11]**

Paramètres	Valeurs
Puissance maximale du panneau $P_m$	110 W
Courant au point de puissance maximale $I_m$	3.15 A
Tension au point de puissance maximale $V_m$	35 V
Courant de court-circuit $I_{cc}$	3.45 A
Tension en circuit ouvert $V_{oc}$	43.5 V
Coefficient d'incrémentation du courant $I_{cc} (\alpha_{cc})$	1.4 mA/°C
Coefficient d'incrémentation de la tension $V_{oc} (\beta_{oc})$	-152 mV/°C

**2. Paramètre de la pile à combustible [1]**

Paramètre	Symbole	Valeur
Nombre de cellules	$N_s$	72
Potentiel standard	$E^0$	1.23 V
Courant limite	$I_{lim}$	25 A
Constante des gaz parfaits	$R$	8.314 J/K.mol
Constante de faraday	$F$	96485 C/mol
Constantes empiriques	$a_0$	0.9514 V
	$a$	$-2.2 \cdot 10^{-3} V/K$
	$B$	$1.87 \cdot 10^{-4} V/K.A$
Paramètres de la Résistance	$R_{ohm0}$	$1.58 \cdot 10^{-2} \Omega$
Ohmique	$K_{RI}$	$3 \cdot 10^{-5} \Omega/A$
	$K_{RT}$	$3.8 \cdot 10^{-5} \Omega/K$
Facteur d'utilisation	$U$	80 %
Masse	$M_{PAC}$	6 Kg
Capacité thermique	$C_{PAC}$	$10^4 J/Kg.K$
Coefficient de transfert de chaleur	$H$	20 (W/m <sup>2</sup> .K)
Surface effective	$A$	0.09 m <sup>2</sup>

**3. Paramètres électrique d'un électrolyseur [1]**

Paramètre	Symbole	Valeur
<b>Coefficient de température</b>	$K_{rev}$	$1.93 \cdot 10^{-3} V/^{\circ}C$
<b>Tension réversible de la cellule</b>	$U$	$1.23 V$
<b>Résistance ohmique</b>	$r_1$	$7.3 \cdot 10^{-5} \Omega.m^2$
	$r_2$	$-1.1 \cdot 10^{-7} \Omega.m^2/^{\circ}C$
<b>Paramètres de surtension</b>	$S$	$0.185 V$
	$t_1$	$-1.002 m^2 / A$
	$t_2$	$8.424 m^2/^{\circ}C/A$
	$t_3$	$247,3 m^2/^{\circ}C^2/A$
<b>Surface effective</b>	$A$	$0.25 m^2$
<b>Paramètres de calcul du rendement faradique</b>	$f_1$	$250 mA^2/cm^4$
	$f_2$	$0.96$
<b>Coefficient de transfert de chaleur</b>	$h_{co}$	$0.02 W/^{\circ}C.A$
	$nv$	$7 W/^{\circ}C$
	$h_{co}$	
	$nd$	
<b>Capacité thermique</b>	$C_t$	$625 kJ/^{\circ}C$
<b>Résistance thermique</b>	$R_t$	$0:167^{\circ}C/W$

**4. Paramètres de la batterie [11]**

Capacité de batterie :  $C_{bat} = 260Ah$

Tension au borne de la batterie :  $V_{bat} = 12V$ ;

La résistance interne de la batterie :  $R_s = 4 m\Omega$



## ملخص

تمثل الطاقات المتجددة اليوم حلاً نظيفاً وفعالاً لمصادر الطاقة التقليدية. فهي تلبي الطلب المتزايد على الكهرباء عالمياً، إلا أن طبيعتها المتغيرة لا تسمح دائماً بإمداد مستمر للتغلب على هذا العائق. يُعد استخدام نظام هجين حلاً مثالياً، يجمع بين مصادر متعددة لضمان إنتاج مستقر ومستمر. في هذا العمل، درسنا نظاماً هجيناً يتكون من ألواح كهروضوئية وخلية وقود وبطاريات. يهدف هذا العمل إلى دراسة نظام طاقة شمسية متجددة (SEH). ولتحقيق ذلك، قدمنا لمحة عامة عن هذا النوع من الأنظمة، ثم أجرينا نمذجة رياضية لكل مكون، مما سمح لنا بمحاكاة الخصائص غير الخطية لـ (GPV و PAC). ولتعزيز الطاقة، استخدمنا طريقة (P&O). وأخيراً، لإدارة تدفق الطاقة، طورنا خوارزمية إدارة تسمح لنا بتحديد المصدر المناسب للعمل، مع تجنب تآكل البطارية. تُظهر نتائج المحاكاة باستخدام Matlab/Simulink كفاءة نظامنا في إمداد الحمل بالطاقة دون انقطاع.

**الكلمات المفتاحية:** النظام الهجين، الطاقة الشمسية، البطارية، MPPT، خلية الوقود.

## Résumé

Aujourd'hui, les énergies renouvelables représentent une solution propre et efficace aux sources d'énergies traditionnelles. Elles répondent à la demande croissante d'électricité dans le monde, mais leur nature variable ne permet pas toujours d'assurer une alimentation continue pour surmonter cette contrainte. L'utilisation de système hybride est une réponse optimale, combinant plusieurs sources pour assurer une production stable et continue. Dans ce travail nous avons étudié un système hybride constitué de panneaux photovoltaïques, d'une pile à combustible et de batteries. L'objectif de ce travail est d'étudier un SEH, pour se faire nous avons donné un aperçu général sur ce type de système puis une modélisation mathématique de chaque composant a été faite ce qui nous a permis de simuler les caractéristiques non linéaires de (GPV et PAC), pour maximiser la puissance nous avons utilisé la méthode (P&O). Enfin, est dans le but de gérer le flux d'énergie nous avons élaborés un algorithme de gestion qui permet de prendre la décision de quelle source doit travailler, tout en évitant l'usure des batteries. Les résultats de simulations en utilisant Matlab/Simulink, montrant l'efficacité de notre système en alimentant la charge sans interruptions.

**Mots clés :** système hybride, photovoltaïque, batterie, MPPT, pile à combustible.

## Abstract

Today, renewable energies represent a clean and efficient solution to traditional energy sources. They meet the growing demand for electricity worldwide, but their variable nature does not always allow for a continuous supply to overcome this constraint. The use of a hybrid system is an optimal solution, combining multiple sources to ensure stable and continuous production. In this work, we studied a hybrid system consisting of photovoltaic panels, a fuel cell, and batteries. The objective of this work is to study a SEH. To do this, we provided a general overview of this type of system, then mathematical modeling of each component was performed, allowing us to simulate the nonlinear characteristics of (GPV and PAC). To maximize power, we used the (P&O) method. Finally, to manage the energy flow, we developed a management algorithm that allows us to decide which source should operate, while avoiding battery wear. Simulation results using Matlab/Simulink demonstrate the efficiency of our system in supplying power to the load without interruptions.

**Keywords:** hybrid system, photovoltaic, battery, MPPT, fuel cell.