

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur  
et de la Recherche Scientifique  
Université Akli Mohand Oulhadj - Bouira -  
Tasdawit Akli Muḥend Ulḥağ - Tubirett -



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
جامعة أكلي محمد أولحاج  
- البويرة -

Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées  
Référence : ...../MM/2022

كلية العلوم والعلوم التطبيقية  
المرجع: .....م / م / 2022

## Mémoire de Master

### Présenté au

**Département** : Génie Électrique  
**Domaine** : Sciences et Technologies  
**Filière** : Electronique  
**Spécialité** : Electronique des systèmes embarqués

### Réalisé par :

**SAIDANI ABDERREZAK**

## Thème

---

**Etude, Gestion et optimisation d'un système hybride  
(photovoltaïque ; pile à combustible avec stockage)**

---

Soutenu le: **15/09/2022**

Devant la commission composée de :

M <sup>r</sup> :	GRICHE ISSAM	M.C.B	Univ. Bouira	Président
M <sup>r</sup> :	MAAFA AMAR	M.C.B	Univ. Bouira	Examineur
M <sup>elle</sup> :	BENSMAIL SAMIA	M.C.B	Univ. Bouira	Rapporteur

Année Universitaire : 2021-2022

# Dédicace

*Je dédie ce modeste travail qui a été fait grâce à Dieu : À mes chers parents :  
Sources de mes joies, secrets de ma force Vous serez toujours le modèle Papa, dans ta  
détermination, ta force et ton honnêteté Maman dans ta bonté, ta patience et ton  
dévouement pour us Merci pour tous vos sacrifices Merci d'être tout simplement mes  
parents Je vous dois ce succès ; À mes frères et sœur ; À tous mes amis ; À tous mes  
collègues de la section "électronique" promotion 2022 ; Je remercie enfin toute  
personne(SAID , AHMED, MARIJA, LINA) ayant contribué à l'élaboration de ce  
travail.*

---

## Remerciements

---

*Avant tous, nous tenons nos remerciements à notre Dieu ALLAH de nous avoir donné le courage et la volonté pour accomplir ce travail.*

*Je tiens, tout particulièrement, à exprimer ma profonde gratitude à Madame BENSMAIL Samia, Prof à l'université de Bouira, pour avoir assuré de manière agréable le suivi de mon travail et pour m'avoir fait profiter de ses expériences. Ses compétences scientifiques, ses conseils et ses qualités humaines ont largement contribué à l'aboutissement de ce travail.*

*Et tous les professeurs du département de Génie électrique. À tout ce qui fut à un moment ou à un autre et à tout instant partie prenante de ce travail.*

*Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos proches et amis, qui nous ont toujours soutenue et encouragée au cours de la réalisation de ce mémoire. Merci à tous et à toutes.*

---

## Résumé

---

Les énergies renouvelables sont des systèmes efficaces et propres par rapport aux sources classiques. C'est une étape très prometteuse et est liée à la demande croissante d'énergie dans le monde. Mais à la nature de ces énergies turbulentes, ne peut garantir une alimentation durable, la solution optimale est de s'appuyer sur des systèmes hybrides pour assurer une production d'énergie continue avec stockage. Dans ce contexte, nous nous sommes intéressés à étudier la maturité de l'énergie hybride, constitué de panneaux photovoltaïque, pile à combustible et batterie. Afin d'économiser de l'énergie en permanence, la charge est fournie par des panneaux solaires et contrôlée par MPPT) Maximum Power Point Tracker), La pile à combustible ou la batterie est utilisée en cas oule PV ne peut pas répondre aux exigences de charge. Les résultats obtenus sont affichés à l'aide du logiciel Matlab/Simulink.

---

# Sommaire

---

Remerciements .....	II
Résumé .....	III
Sommaire.....	IV
Liste des Figures .....	VI
Liste des tableaux.....	VII
Listes des notation et symboles .....	VIII
Introduction Générale.....	1

## **Chapitre I: Généralités sur le système hybride à énergie renouvelable**

1. Introduction.....	3
2. Définition des systèmes hybrides.....	3
2.1. Topologies des systèmes électriques hybrides .....	3
2.1.1. Couplage de bus DC .....	4
2.1.2. Couplage de bus AC .....	4
2.3. Avantages et inconvénients d'un système hybride .....	4
2.4. Différents sous-systèmes du système hybride .....	4
2.5. Les convertisseurs .....	5
3. Généralités sur les systèmes photovoltaïques .....	5
3.1. L'énergie solaire.....	5
3.2. Panneau photovoltaïque.....	5
3.2.1. Principe de fonctionnement.....	6
3.2.2. Caractéristiques électrique d'un modules Photovoltaïque .....	6
3.3. Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques [15] .....	8
4. Les piles à combustible.....	8
4.1. Définition .....	8
4.2. Différents types des piles à combustible.....	9
4.3 Principe de fonctionnement .....	10
4.4 Les avantages et les inconvénients de la pile à combustible.....	10
5. Stockage par les Batteries.....	11
6. Electrolyseur .....	11
6.1. Principe de fonctionnement .....	11
7. Conclusion .....	12

## **Chapitre II: Modélisation du système hybride à énergie renouvelable**

1. Introduction.....	13
2. Panneaux photovoltaïques .....	13
2.1. Modélisation d'un panneau photovoltaïque .....	13
2.2. La commande MPPT :.....	15
3. Modélisation La pile à combustible PEMFC : .....	17
3.1. Modèle électrochimique de la pile à combustible PEMFC.....	17
3.1.1. La tension de Nernst : .....	18
3.1.2. Les Pertes d'activation : .....	19
3.1.3. Les pertes ohmiques : .....	19
3.1.4. Les pertes de concentration : .....	20
3.2. Taux d'hydrogène consommé : .....	20

4. Modélisation de l'électrolyseur.....	21
4.1. Débit de production d'Hydrogène :.....	22
4.2. Modèle thermique :.....	22
5. Stockage d'hydrogène :.....	24
6. Modélisation des éléments de stockage d'énergie.....	24
7. Modélisation du hacheur boost (élevateur) .....	25
8. Modélisation du hacheur Buck-Boost (abaisseur-élevateur) :.....	26
9. Conclusion .....	26

### **Chapitre III: Simulation du système hybride**

1. Introduction.....	27
2. Caractéristiques des panneaux .....	27
2.1. Influence de la température.....	28
2.2. Influence de l'éclairement .....	29
2.3. Influence de la résistance série RS .....	30
2.4. Caractéristique électrique du module photovoltaïque avec l'algorithme MPPT .....	31
3. Caractéristique de la pile combustible PEMFC .....	33
3.1. Caractéristique tension-densité de courant de la pile PEMFC.....	33
3.2. La courbe de puissance :.....	34
3.4. Influence de la température.....	34
4. Caractéristiques d'électrolyseur.....	36
4.1. Influence de la Température .....	36
5. Conclusion .....	37

### **Chapitre IV: Gestion et dimensionnement d'un système hybride**

1. Introduction.....	38
2. Le concept du système hybride proposé.....	38
3. Le principe de gestion d'énergie de ce système hybride.....	39
4. Interprétation des résultats obtenus par la simulation .....	41
4.1 Interprétation de résultats : .....	45
5. Conclusion .....	46
Conclusion Générale .....	47

---

## Liste des Figures

---

### Chapitre I: Généralités du système hybride

Figure I. 1 : Jonction P-N d'une cellule photovoltaïque [7].....	5
Figure I. 2: Fonctionnement d'un panneau photovoltaïque [10].....	6
Figure I. 3: caractéristique I(V) [13].....	7
Figure I. 4: Caractéristiques Ppv (Vpv) d'un panneau solaire[13].....	7
Figure I. 5: Schéma de principe de conversion directe en électricité .....	9
Figure I. 6: Principe de fonctionnement [19] .....	10
Figure I. 7: Schéma de fonctionnement d'un électrolyseur[6]. .....	12

### Chapitre II: Modélisation des composants du système hybride

Figure II. 1: circuit équivalent à une diode d'une cellule PV.....	13
Figure II. 2: Caractéristique de Ppv en fonction de la tension Vpv d'un panneau solaire [24] .....	16
Figure II. 3: Algorithme de la méthode P&O.....	16
Figure II. 4: Caractéristique de polarisation et zones de fonctionnement de la PAC[26].....	17
Figure II. 5: Modèle R-C de la batterie .....	24
Figure II. 6: schéma de hacheur type boost.....	25
Figure II. 7: Schéma d'un hacheur Buck-Boost .....	26

### Chapitre III: Simulation du système hybride

Figure III. 1: Caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ et $P_{pv}(V_{pv})$ dans les conditions standards .....	27
Figure III. 2: Influence de la température sur la caractéristique $I_{pv} = f(V_{pv})$ .....	28
Figure III. 3: Influence de la température sur la caractéristique $P_{pv} = f(V_{pv})$ .....	28
Figure III. 4: Influence de l'éclairement sur la caractéristique $I_{pv} = f(V_{pv})$ .....	29
Figure III. 5: Influence de l'éclairement sur la caractéristique $P_{pv} = f(V_{pv})$ .....	29
Figure III. 6: Influence de résistance série la caractéristique $I_{pv} = f(V_{pv})$ .....	30
Figure III. 7: Influence de résistance série la caractéristique $P_{pv} = f(V_{pv})$ .....	30
Figure III. 8: Influence de l'éclairement sur la caractéristique $P_{pv} = f(V_{pv})$ avec commande MPPT .....	31
Figure III. 9: Effet de la commande MPPT sur la puissance du panneau PV .....	32
Figure III. 10: Effet de la commande MPPT sur la tension du panneau PV .....	32
Figure III. 11: Caractéristique $V_{pac} = f(I_{pac})$ de la pile PEMFC .....	33

Figure III. 12: Caractéristique $P_{pac} = f(I_{pac})$ de la pile PEMFC .....	34
Figure III. 13: Influence de la température $V_{pac} = f(I_{pac})$ .....	35
Figure III. 14: Influence de la température $P_{pac} = f(I_{pac})$ .....	35
Figure III. 15: Caractéristique V-I d'électrolyseur .....	36
Figure III. 16: influence de la température sur la caractéristique I-V de l'électrolyseur.....	37

## **Chapitre IV: Gestion et dimensionnement d'un système hybride**

Figure VI. 1: concept du système hybride.....	38
Figure VI. 2: Organigramme de gestion d'énergie du système hybride .....	40
Figure VI. 3: Profil de puissance demandée par la charge. ....	41
Figure VI. 4: Profile de l'ensoleillement.....	41
Figure VI. 5:Profile de la température .....	42
Figure VI. 6: Allures des puissances (Photovoltaïque, charge, batterie , pile à combustible) .....	42
Figure VI. 7: la puissance des panneaux PV .....	42
Figure VI. 8: La différence entre la puissance $P_{pv}$ et $P_{ch}$ .....	43
Figure VI. 9: l'état de charge de la batterie .....	43
Figure VI. 10: la puissance de la batterie .....	43
Figure VI. 11: Tension du bus continu.....	44
Figure VI. 12: Mode de fonctionnement.....	44
Figure VI. 13:la puissance de la pile à combustible .....	44

---

### **Liste des tableaux**

---

Tableau I.1: Différents types des piles à combustible [17] .....	9
Tableau II.1: Paramètres du panneau photovoltaïque SIEMENS PV SM110. ....	15

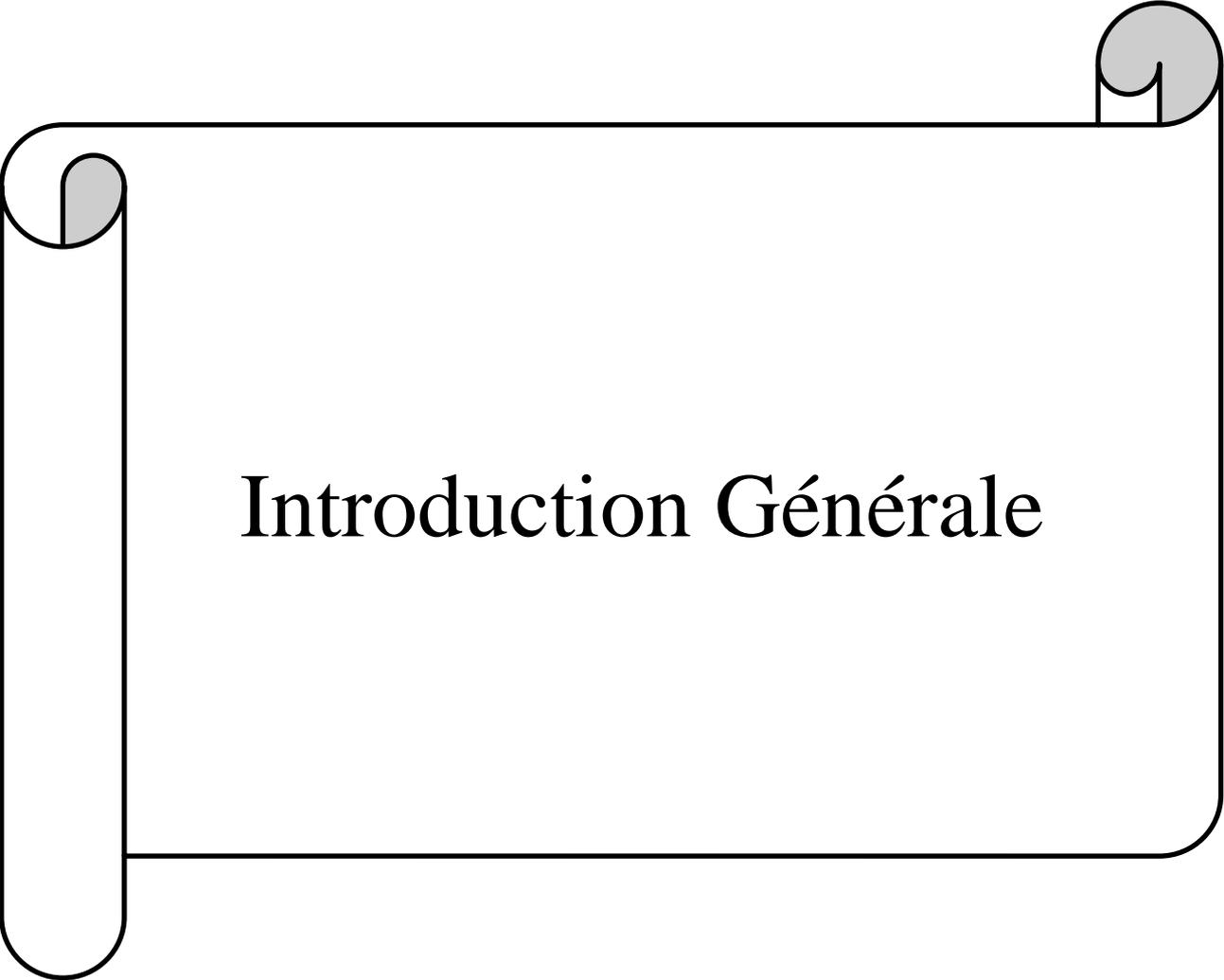
---

## Listes des notation et symboles

---

- **SEH** : Système d'énergie hybride.
- **PV** : Photovoltaïque.
- **AC** : Courant alternatif (alternatif current).
- **DC** : Courant continu (direct current).
- **MPPT** : Recherche point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking).
- **P** : la puissance (W).
- **K** : Constante de Boltzmann ( $K=1.38 \cdot 10^{-23}$  J/k).
- **q** : Charge de l'électron ( $e=1.6 \cdot 10^{-19}$ ).
- **G** : L'irradiation qui représente la puissance lumineuse reçue par unité de surface ( $W/m^2$ ).
- **A** : La surface effective des cellules.
- **I<sub>pv</sub>** : Représente le photo-courant, il dépend de l'irradiation et de la température.
- **I<sub>d</sub>** : Courant de polarisation de la jonction PN.
- **I<sub>mpp</sub>** : Courant au point de puissance maximale appelé aussi courant optimum.
- **V<sub>mpp</sub>** : Tension au point de puissance maximale appelé aussi tension optimale.
- **I<sub>RP</sub>** : courant qui circule dans la résistance parallèle
- **I<sub>sc</sub>** : Courant en court-circuit.
- **V<sub>oc</sub>** : est la tension en circuit ouvert
- **G** : Représente respectivement, le niveau d'insolation dans les conditions standards de fonctionnement
- **P&O** : perturber et observer.
- **K** : est une constante qui dépend de la batterie.
- **R<sub>b</sub>** : est la résistance interne de la batterie.
- **I<sub>b</sub>** : est le courant de décharge.
- **Q<sub>0</sub>** : est la capacité de la batterie en (Ah).
- **T<sub>pv</sub>** : Le signal de commande du relais de générateur PV.
- **PDD** : Profondeur de décharge des batteries.
- **U<sub>bat</sub>** : Tension nominale de la batterie.
- **EDC** : l'état de charge de la batterie.
- **PAC** : pile à combustible.
- **V<sub>pac</sub>** : la tension au bornes de la pile à combustible
- **I<sub>pac</sub>** : le courant de la pile à combustible.
- **V<sub>pac</sub>** : Tension réelle d'une pile unitaire (Volt)

- $E_{\text{Nernst}}$  : Potentiel thermodynamique (idéal) de chaque pile et représente la tension réversible (Volt) ;
- $U_{\text{act}}$ : Pertes d'activation (volt) ;
- $U_{\text{ohm}}$ : Pertes ohmiques (volt) ;
- $U_{\text{conc}}$ : Pertes de concentration (volt) ;
- $P_{\text{cathod}}$  : Pression de l'hydrogène à l'anode
- $P^*_{\text{O}_2}$  : Pression partielle de l'oxygène (atm)
- $P^*_{\text{H}_2}$  : Pression partielle à l'interface de l'hydrogène (atm)
- $\chi_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{sat}}$  : Fraction molaire de saturation d'eau dans le gaz humidifié.
- $Q$  : Débit d'eau pompé ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).
- $H_g$  : hauteur géométrique entre la nappe d'eau pompée et le plan d'utilisation (m).
- $P_{\text{per}}$  : pertes de charge produites par le frottement d'eau sur les parois des conduites.
- $L$  : Longueur des canalisations (m).
- $g$  : accélération de la pesanteur ( $9.81 \text{ m/s}^2$ ).
- $H$  : hauteur manométrique totale atteinte par la pompe (m).
- $q_v$  : débit volumique ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).
- $\rho_{\text{eau}}$  : masse volumique d'eau ( $1000 \text{ Kg/m}^3$ ).
- $P_{\text{mec}}$ : La puissance mécanique requise par la pompe (W).
- $\eta_{\text{pomp}}$  : le rendement de la pompe.
- $q_{\text{H}_2}$  : représente la débit molaire de l'hydrogène ( $\text{kmol/s}$ ) .



# Introduction Générale

# Introduction Générale

Le monde actuel assiste à une demande énergétique grandissante, ce qui oblige l'augmentation de la production de cette dernière. La production actuelle utilise en grande partie des sources d'énergie fossiles (pétrole, le charbon ou l'uranium) qui diminuent au fil des années, entraîne l'émission de Gaz à Effet de Serre (GES) et donc un réchauffement climatique avec tous ses différents problèmes. La solution envisagée est les sources d'énergie durables (énergie solaire, éolienne, hydraulique...) qui sont inépuisables et ne rejettent aucun gaz polluant. On s'intéresse particulièrement à l'Énergie solaire que notre pays exploite en grande partie au niveau du Sahara algérien.

L'énergie solaire occupe une place très importante dans la production d'électricité photovoltaïque et thermique (chauffage), mais présente un aspect intermittent et dépend des conditions météorologiques. Pour mieux utiliser cette source on applique une technique d'extraction de maximum de puissance MPPT, qui comme son nom l'indique, permet d'exploiter l'ensoleillement de manière optimale.

Pour une bonne production d'électricité et pour assurer à tout moment l'égalité entre la demande et la production, il est très commode d'opter pour un système hybride qui associe des systèmes multi sources et/ou multi stockages.

Les sources de stockages les plus utilisés sont les batteries mais ces derniers temps on utilise beaucoup plus le vecteur hydrogène, l'électricité produite par l'énergie photovoltaïque alimente des électrolyseurs qui produisent de l'hydrogène qui sera stocké, puis la production d'électricité est assurée par des systèmes Pile à Combustible.

L'utilisation de ces systèmes nécessite une bonne gestion d'énergie qui prend en compte les différentes contraintes d'utilisation de chaque élément du système, pour limiter la dégradation et le vieillissement prématuré de ces systèmes.

L'objectif de ce projet de fin d'étude est la réalisation d'une stratégie de gestion d'énergie d'un système hybride. Ce dernier est constitué de panneaux photovoltaïques pour la production d'électricité (en exploitant les rayons solaires), associé à un électrolyseur pour la production d'hydrogène et d'une pile et batterie pour la reproduction d'électricité.

Une description générale des systèmes de production d'énergie hybride, ainsi que des notions sur les différentes sources constituant le système à étudier seront présentées dans le premier chapitre.

Pour le fonctionnement d'un tel système il est nécessaire d'utiliser des convertisseurs d'électronique de puissance tels qu'un hacheur commandé par MPPT, et des Convertisseurs boost pour la pile et l'électrolyseur. Ceci sera détaillé en deuxième chapitre.

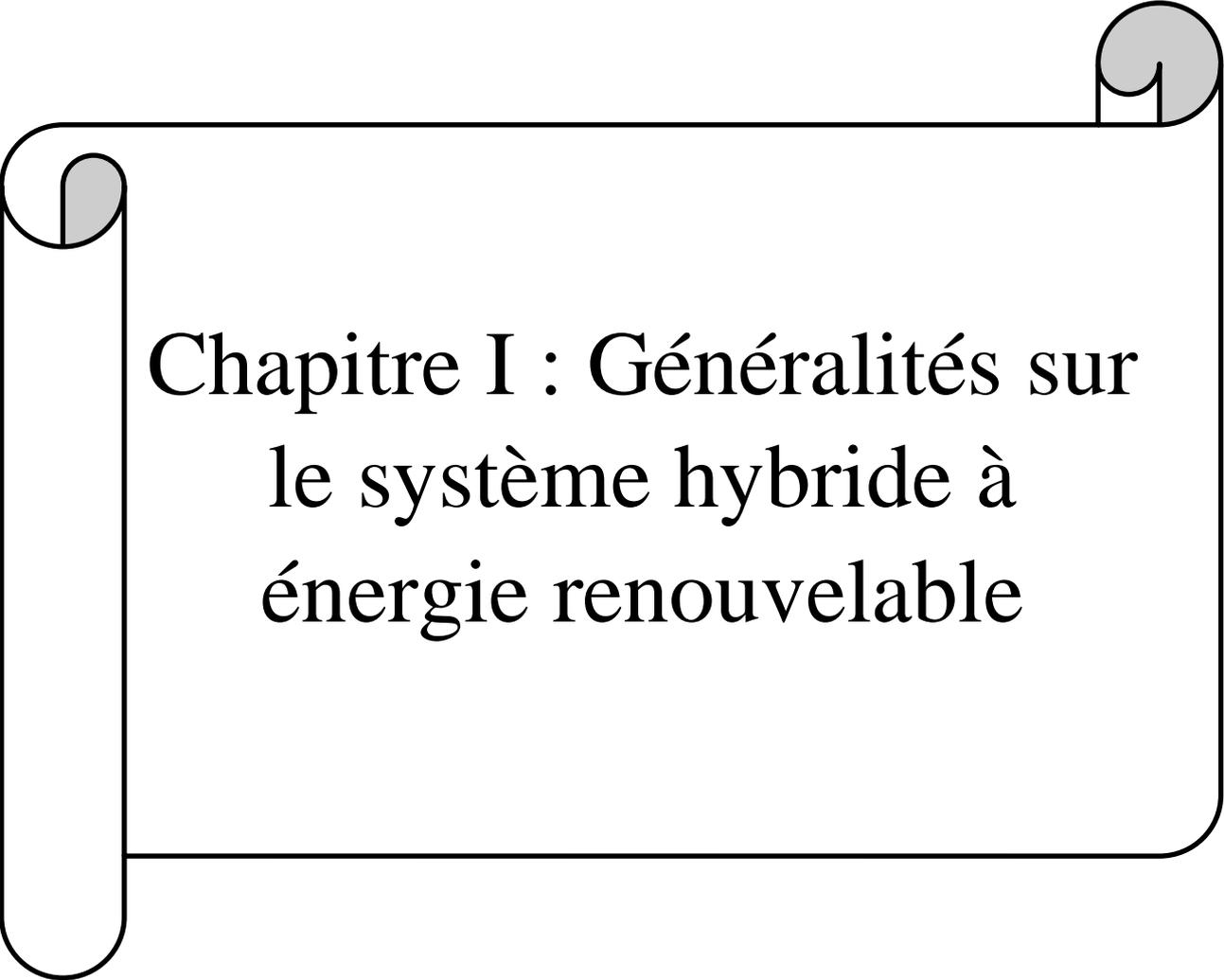
## Introduction Générale

---

Les résultats de simulation de chaque système seul en variant les conditions climatiques (température), seront illustré en troisième chapitre.

Pour une production fiable et stable d'électricité les différents systèmes seront assemblés et gérés par un système de gestion d'énergie SGE qu'on va détailler dans le quatrième chapitre avec ses résultats.

Enfin, on résume tous les points essentiels traités dans ce projet avec les résultats trouvés et des perspectives en conclusion générale.



Chapitre I : Généralités sur  
le système hybride à  
énergie renouvelable

## 1. Introduction

L'énergie renouvelable est une énergie qui provient de sources illimitées et constamment renouvelables (contrairement à l'énergie non renouvelable dont les stocks s'épuisent), son exploitation cause moins de dommages environnementaux. Elle est également appelée énergie alternative, qui est l'énergie dérivée de sources renouvelables telles que le soleil, le vent, les rivières, les sources chaudes, les marées et les biocarburants.

Le monde est sur la voie des énergies renouvelables pour développer des solutions globales et durables aux problèmes environnementaux et préserver les matières fossiles, et ce choix stratégique est stimulé par l'énorme potentiel du monde de l'énergie solaire.

Dans ce premier chapitre nous allons présenter des généralités et le principe de fonctionnement des différents types de sources électriques d'un système hybride (système photovoltaïque et les éléments de base qui les composent, les pile à combustible, les électrolyseurs, et les batteries). Nous analyserons aussi leurs caractéristiques physiques et électrique, leurs modèles, ainsi que leurs avantages et inconvénients.

## 2. Définition des systèmes hybrides

Un système hybride d'énergie est un système qui combine différents systèmes de production. De nos jours, les systèmes hybrides d'énergie associent au moins deux technologies complémentaires : une ou plusieurs sources d'énergie classiques, généralement des générateurs, et au moins une source d'énergie renouvelable.

Les systèmes hybrides d'énergie sont généralement autonomes par rapport aux grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans les régions isolées. Les systèmes hybrides à énergies renouvelables sont fiables, sans pollution et permettent de répondre à la demande d'énergie sur de longues périodes [1].

Les sources d'énergie renouvelable, comme le photovoltaïque, ne délivrent pas une puissance constante. Leur association avec des sources différentes permet d'obtenir une production électrique continue [2].

### 2.1. Topologies des systèmes électriques hybrides

Il existe différentes topologies de systèmes hybrides selon le couplage de générateurs d'énergie renouvelable, qui peut être continu ou alternatif.

## 2.1.1. Couplage de bus DC

Un système hybride couplé au bus continu est un système dans lequel les différentes sources sont raccordées avec la charge de consommation à l'aide des capacités [4].

## 2.1.2. Couplage de bus AC

Un système hybride couplé au bus AC, est un système dans lequel les différents générateurs d'alimentation sont directement reliés à un réseau de courant alternatif ou à des charges de consommation à courant alternatif. [4].

## 2.3. Avantages et inconvénients d'un système hybride

Les systèmes hybrides sont très attractifs vu leurs avantages dont on cite :

- Assurer la continuité énergétique.
- Non dépendant d'une seule source d'énergie.
- Flexible, extensible et capable de satisfaire des charges évolutives [3].

Malgré leurs avantages on ne peut pas nier certains inconvénients par exemple :

- Plus complexe que les systèmes mono source et nécessite du stockage.
- Coût capital élevé comparé aux générateurs diesel [3].

## 2.4. Différents sous-systèmes du système hybride

L'installation photovoltaïque considéré comme la source principale de notre système hybride doit être raccordée avec une autre source d'énergie, pour qu'il soit possible de satisfaire la charge durant la nuit ou par temps nuageux. Ces systèmes alimentent soit des maisons, soit des villages. Différent type de stockage existe comme un banc de batterie et la pile à combustible avec électrolyseur d'hydrogène. Un banc de batteries est un dispositif de stockage qui est largement disponible dans le marché et elle est la plus intéressante car elle peut alimenter une charge pour une durée plus importante mais parfois elle ne peut pas satisfaire la charge en cas d'absence d'énergie photovoltaïque. Tandis que la pile à combustible avec l'électrolyseur et le réservoir d'hydrogène permettent un stockage plus important en termes de quantité stockée mais plus lent et aussi se sont des dispositifs très chers.

## 2.5. Les convertisseurs

Les convertisseurs sont les appareils qui servent à transformer la tension continue fournie par les panneaux ou les batteries pour l'adapter à des récepteurs fonctionnant soit à une tension continue différente, soit à une tension alternative [8].

Il existe plusieurs types de convertisseurs, on trouve principalement [8]:

- Convertisseurs DC/DC (hacheur), ou convertisseur continu - continu.
- Convertisseurs DC/AC (onduleur), ou convertisseur continu - alternative.
- Convertisseur AC/DC (Redresseur), ou convertisseur alternative - continu.

## 3. Généralités sur les systèmes photovoltaïques

### 3.1. L'énergie solaire

L'énergie solaire photovoltaïque désigne l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire avec une cellule photovoltaïque. Plusieurs cellules sont reliées entre elles et forment un panneau solaire (ou module) photovoltaïque. Plusieurs modules qui sont regroupés dans une centrale solaire photovoltaïque sont appelés champ photovoltaïque.

### 3.2. Panneau photovoltaïque

Le panneau solaire est composé de plusieurs cellules. Les cellules sont réalisées à partir de deux couches de silicium, une dopée P (en général dopée au bore) et l'autre dopée N (en général dopée au phosphore). Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P) [9]. Comme nous montre la figure ci-dessous :

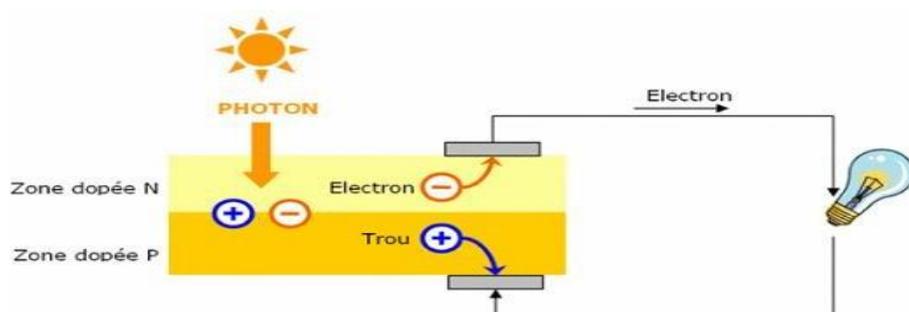


Figure I. 1 : Jonction P-N d'une cellule photovoltaïque [7]

## 3.2.1. Principe de fonctionnement

Un matériau comme le silicium possède la propriété de générer de l'électricité quand il reçoit la lumière du soleil, c'est l'effet photovoltaïque (ce dernier est appliqué dans les cellules photovoltaïques) découvert par Becquerel en 1839 [11].

L'énergie des photons de la lumière solaire est transmise aux électrons du matériau semi-conducteur. Puis, les électrons se mettent en mouvement et génèrent un courant électrique diffusé par une grille métallique très fine. Chaque cellule crée une petite quantité d'électricité. La lumière solaire et la durée d'exposition conditionnent ainsi la production d'un module photovoltaïque [11].

La figure (I.2) représente la fonctionnement d'un panneau photovoltaïque

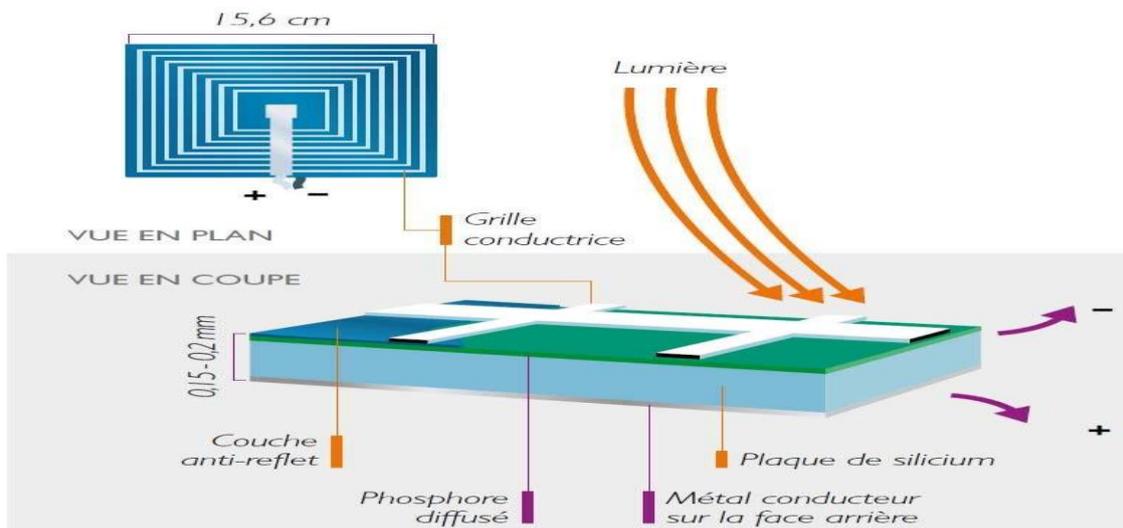


Figure I. 2: Fonctionnement d'un panneau photovoltaïque [10]

## 3.2.2. Caractéristiques électrique d'un modules Photovoltaïque

- **La puissance Crête  $W_c$**  : c'est la puissance maximale que peut fournir le module PV sous les conditions de mesures et de testes normalisées STC :  $1000 \text{ w/m}^2$  et  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  [12].
- **Caractéristique courant-tension  $I(V)$** :

Elle est identique à celle d'une jonction P-N avec un sens bloqué, mais décalé le long de l'axe du courant d'une quantité directement proportionnelle à l'éclairement. Elle se trace sous un éclairement fixe et une température constante [13].

La figure (I.3) représente le fonctionnement d'un panneau photovoltaïque

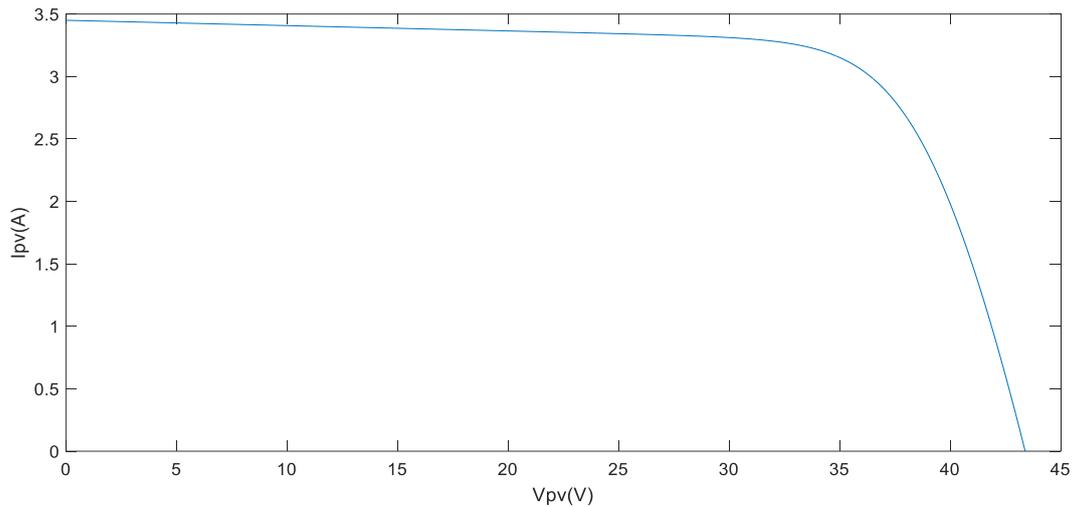


Figure I. 3: caractéristique I(V) [13]

- **Caractéristique puissance-tension (P-V) [13]**

La puissance débitée par le module photovoltaïque dépend du point de fonctionnement de cette dernière, c'est le produit de l'intensité de courant et de la tension entre ses bornes (Figure I.4).

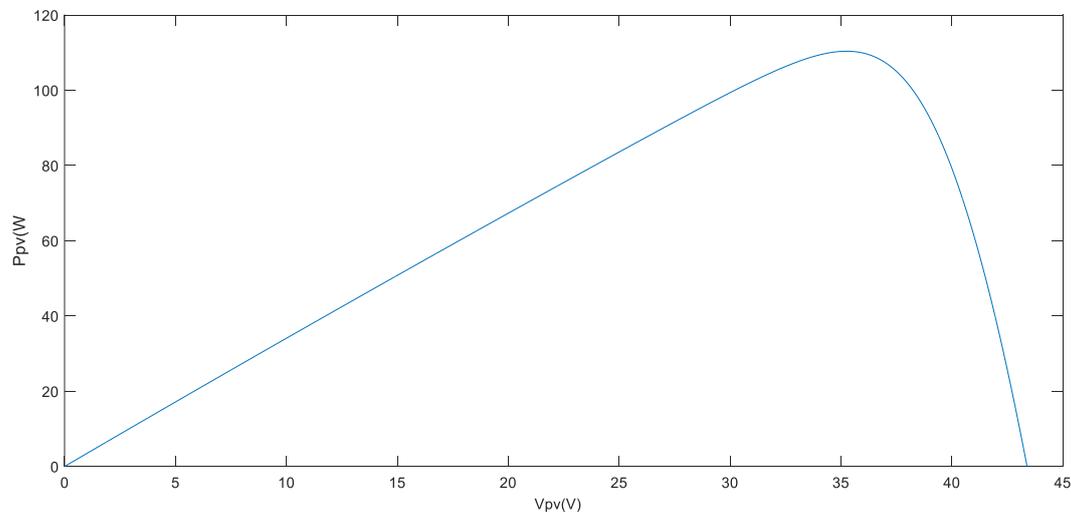


Figure I. 4: Caractéristiques Ppv (Vpv) d'un panneau solaire[13]

- **Le rendement:**

Le rendement  $\eta$  des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente [14].

$$\eta = \frac{I_m \times V_m}{E_s \times A} \quad (\text{I-1})$$

$I_m$  : le courant optimale ;

$V_m$  : la tension optimale ;

$E_s$  : l'ensoleillement ;

$A$  : la surface du module solaire ;

### 3.3. Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques [15]

Les systèmes photovoltaïques sont très intéressants par leurs avantages:

- Carburant gratuit;
- Énergie solaire fournissant de l'électricité aux zones rurales les plus isolées ;
- Panneaux solaires demandant très peu d'entretien ;
- Panneaux solaires silencieux et non dérangeants ;
- Panneaux solaires recyclables.

Malgré les avantages qu'elle présente, les systèmes photovoltaïques présentent certains inconvénients qui peuvent être résumés comme suit :

- Fabrication du module PV qui relève de la haute technologie ;
- Coût : l'installation PV nécessite des investissements d'un coût élevé ;
- Rendement : le rendement de conversion d'un module PV est faible moins 20%

## 4. Les piles à combustible

### 4.1. Définition

Une pile à combustible est un appareil qui convertit l'énergie chimique d'un combustible en électricité à travers une réaction chimique contrôlée avec l'oxygène ou d'un autre oxydant. Les piles à combustibles se distinguent des batteries et des piles par le fait qu'elles ont besoin d'un apport constant de combustible pour fonctionner, mais que leur production d'électricité est constante tant que le combustible est approvisionné.

La pile à combustible est un générateur de courant à haut rendement énergétique. Celui-ci est généralement proche de 50%. [16] [17].

La figure (I.5), représente un modèle de principe de conversion directe en électricité d'une pile à combustible (PAC) :

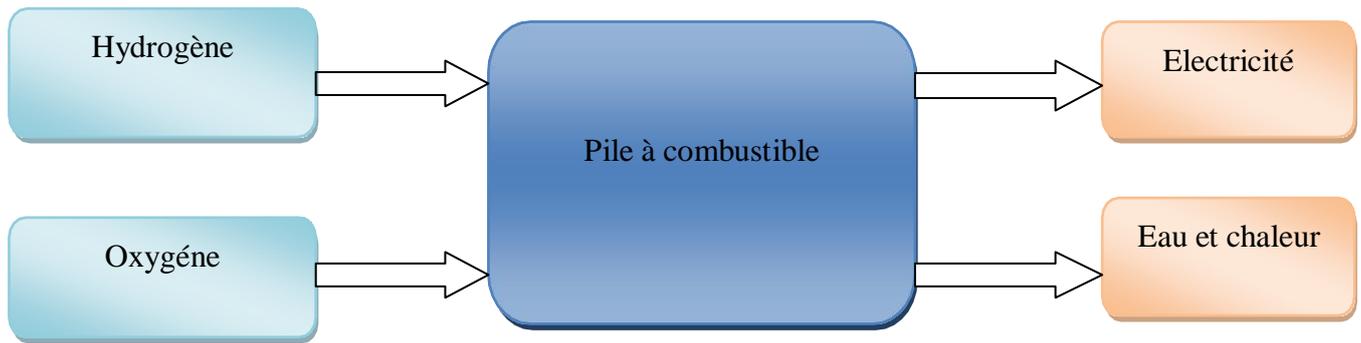


Figure I. 5: Schéma de principe de conversion directe en électricité

#### 4.2. Différents types des piles à combustible

Il existe différents types de piles à combustible qui se différencient essentiellement par la nature de l'électrolyte utilisé et par la température de fonctionnement comme illustrés dans le tableau suivant :

Tableau I.1: Différents types des piles à combustible [17]

Les types	Electrolyte	Température de fonctionnement	Domaine d'application
AFC Electrolyte Alcalin	Hydroxyde de potassium	60°C à 90°C	Transport
DMFC Méthanol Direct	Membrane polymère	60°C à 120°C	Portable
PFMFC Membrane Electrolyte Polymérique	Membrane polymère	60°C à 100°C	Portable Stationnaire Transport
PAFC Acide Phosphorique	Acide phosphorique	150°C à 220°C	Stationnaire
MCFC Carbonates Fondus	Carbonate de métaux alcalins	650°C	Stationnaire
SOFC A Oxyde Solide	Céramique	600°C à 1000°C	Stationnaire Transport

## 4.3 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement de la pile à combustible est décrit comme l'inverse de l'électrolyse de l'eau. En effet, il s'agit d'une combustion électrochimique contrôlée d'hydrogène et d'oxygène, avec production simultanée d'électricité, d'eau et de chaleur, selon une réaction chimique globale :



Dans les piles dites « acide », l'hydrogène est oxydé à l'anode, c.-à-d. décomposé en protons et électrons. Les protons traversent ensuite l'électrolyte et se retrouvent à la cathode. Le déséquilibre en électrons crée un pôle positif et un pôle négatif entre lesquels circulent les électrons produisant ainsi de l'électricité. Simultanément à la cathode, les protons réagissent avec les électrons et l'oxygène et donnent de l'eau, seul sous-produit de cette réaction chimique ( Figure 1.6 ) [18] :

On a donc à l'anode, la formule suivante :



Et à la cathode, l'équation suivante :

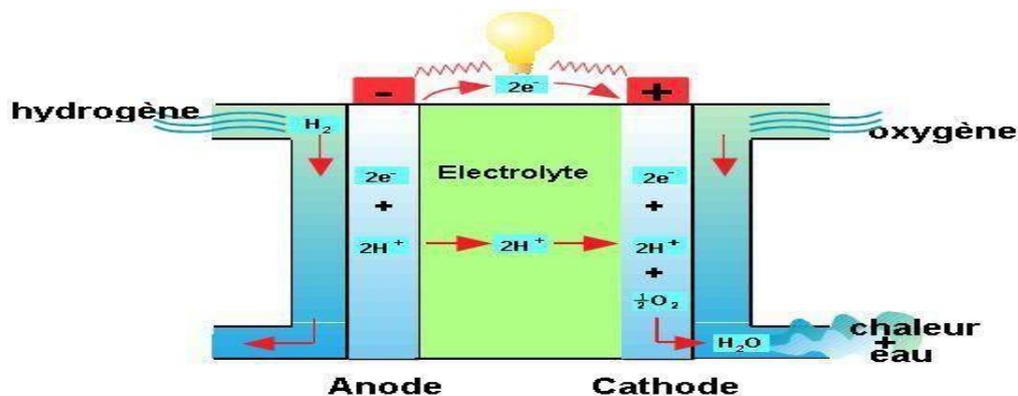


Figure I. 6: Principe de fonctionnement [19]

## 4.4 Les avantages et les inconvénients de la pile à combustible

Parmi les avantages des piles à combustible on peut citer :

- De hauts rendements énergétiques même à charge partielle
- De faibles émissions sonores
- Peu d'émissions (elles dépendent cependant du combustible utilisé)

- Elles sont de construction modulaire [20]

Malgré les avantages que présente les piles à combustible, elles ont certains inconvénients qui peuvent être résumés comme suit:

- Le coût.
- Le poids et le volume.
- La durée de vie.
- La gestion thermique du module [20].

## 5. Stockage par les Batteries

Une batterie est un appareil qui convertit directement l'énergie chimique en énergie électrique. Il contient une ou plusieurs cellules. Chaque cellule est composée de trois parties principales: une électrode positive (borne), une électrode négative et un liquide ou un solide les séparant appelé électrolyte. Quand une batterie est connectée à un circuit électrique, une réaction chimique se produit dans l'électrolyte provoquant des ions (dans ce cas, un atome avec une tension électrique positive charge) pour le traverser dans un sens [21].

## 6. Electrolyseur

L'électrolyseur est la technologie la plus ancienne de production de l'hydrogène, C'est la machine qui convertit l'électricité en énergie chimique qui produit de l'hydrogène lorsque l'on désire obtenir de l'hydrogène extrêmement pur. L'intérêt de la production d'hydrogène par électrolyse réside dans les grands avantages qu'elle représente pour l'environnement à condition que l'on utilise de l'électricité d'origine renouvelable pour alimenter l'électrolyseur (comme l'électricité d'origine photovoltaïque). Il existe trois types essentiels d'électrolyseur : l'alcalin, le PEM (Proton Exchange Membrane) et l'électrolyse à haute température [5].

### 6.1. Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement d'un électrolyseur consiste à séparer l'hydrogène et l'oxygène de l'eau par apport d'énergie électrique. Dans une cellule d'électrolyse de l'eau, le courant électrique est utilisé pour effectuer la dissociation de l'eau en ses constituants élémentaires que sont l'hydrogène (H<sub>2</sub>) et l'oxygène (O<sub>2</sub>) moléculaires. En milieu acide, cette réaction se décompose en deux demi réactions [6]:

On a donc à l'anode, la formule suivante :



Et à la cathode, l'équation suivante :



Electrolyseur est constituée de deux électrodes, anode positive et cathode négative, dont les noms sont donc inversés, séparées par l'électrolyte solide comme le montre la figure (I.7).

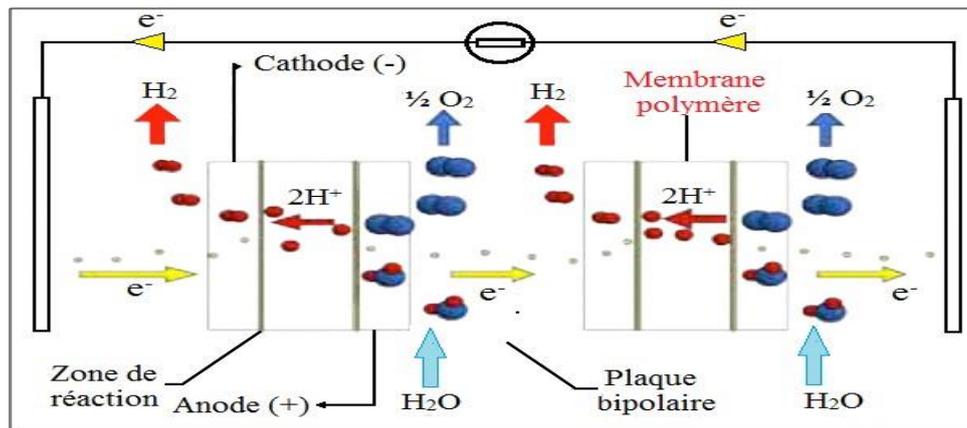
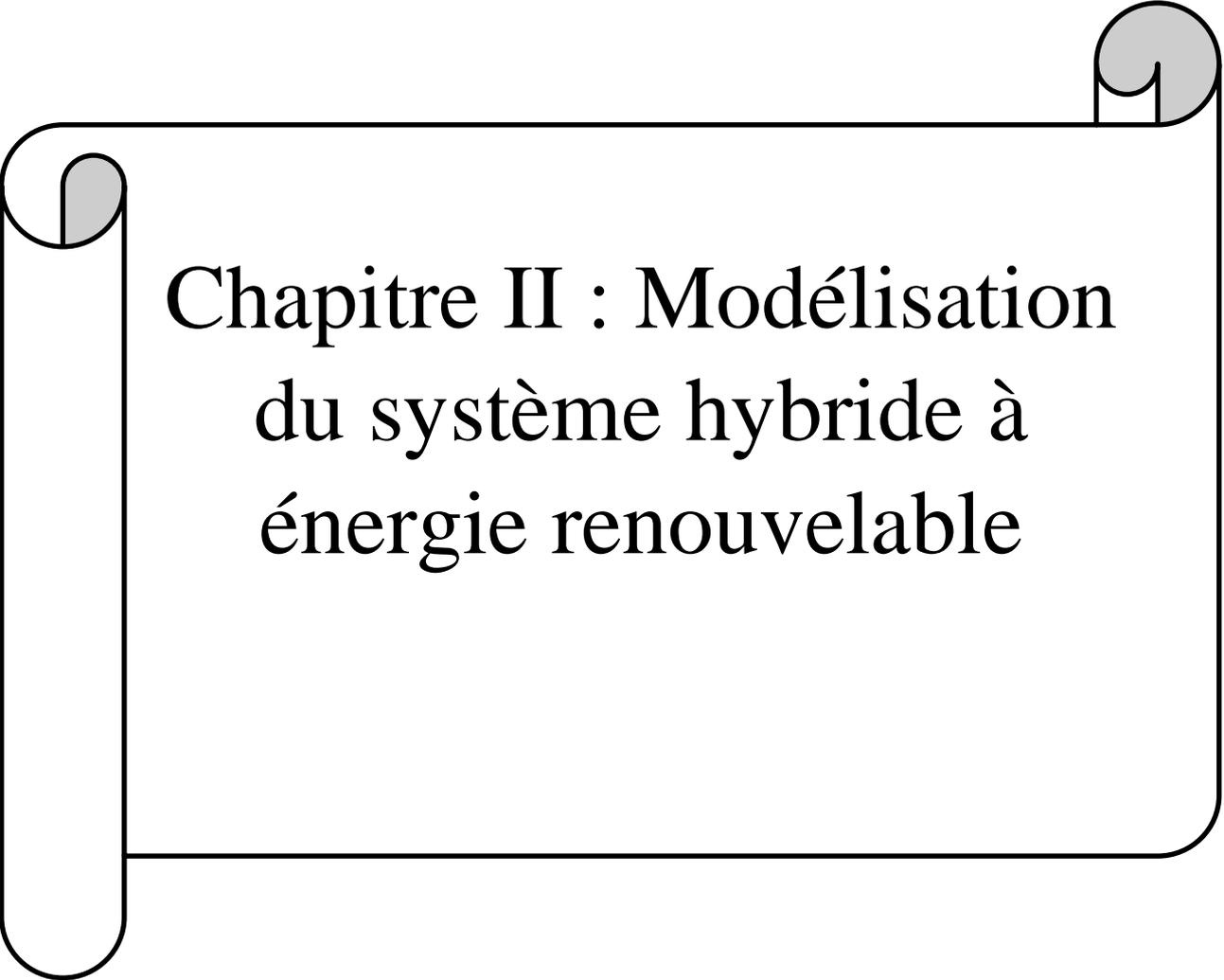


Figure I. 7: Schéma de fonctionnement d'un électrolyseur[6].

## 7. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné une brève description des différents composants de base de notre système hybride, et différentes configurations, puis expliqué le fonctionnement du système, nous avons aussi mis en valeur les avantages, les inconvénients. Ensuite on a expliqué le fonctionnement des Panneau photovoltaïque et ses différents types et ses caractéristiques. La modélisation du système hybride sera présentée dans le chapitre suivant.



## Chapitre II : Modélisation du système hybride à énergie renouvelable

## 1. Introduction

Ce deuxième chapitre vise à introduire le processus par lequel nous utilisons des expressions mathématiques pour décrire un état réel appelé modélisation. La modélisation consiste à écrire en notation mathématique ce qui est d'abord exprimé en mots en incluant des variables au besoin. Nous introduirons la modélisation des composants du système hybride et développerons et validerons des modèles mathématiques pour les différents composants ou sous-systèmes de notre système hybride de production d'énergie

## 2. Panneaux photovoltaïques

Un panneau PV est utilisé pour générer de l'énergie électrique en consommant la lumière du soleil. Cependant, il existe certains facteurs dont dépend la sortie d'un panneau PV comme la température et le rayonnement solaire.

### 2.1. Modélisation d'un panneau photovoltaïque

Un module PV se compose d'un certain nombre de cellules solaires connectées en série et en parallèle pour obtenir les niveaux de tension et de courant désirés. Une cellule de panneau solaire est essentiellement une jonction de semi-conducteur p-n [22].

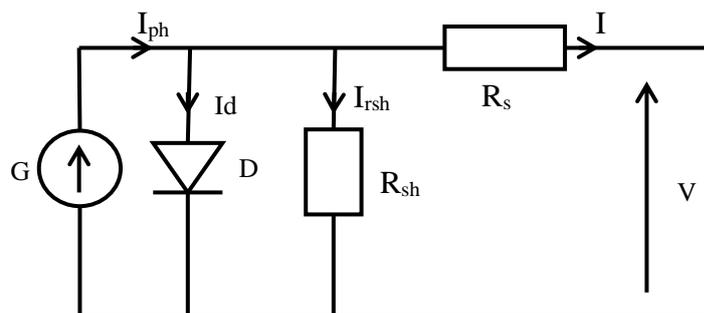


Figure II. 1: circuit équivalent à une diode d'une cellule PV[22]

Le circuit équivalent du modèle général se compose d'un photo-courant( $I_{ph}$ ), d'une diode, d'une résistance parallèle ( $R_{sh}$ ) exprimant un courant de fuite et d'une résistance série ( $R_s$ ) due aux contacts entre les semi-conducteurs et les parties métalliques, comme sur la figure (II.1).

En appliquant la loi de Kirchhoff, le courant sera obtenu par l'équation suivante [23]:

$$I = I_{ph} - I_d - I_{rsh} \quad (\text{II. 1})$$

Avec :

$I_{ph}$  : est un courant généré par la lumière ou la photo courant. est donnée par l'équation suivante :

$$I_{ph} = [I_{sc} + K_i \cdot (T - 298)] \cdot \frac{G}{1000} \quad (\text{II. 2})$$

$I_{rsh}$  : courant qui circule dans la résistance parallèle, est donnée par l'équation suivante :

$$I_{rsh} = \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \quad (\text{II. 3})$$

$I_d$  : est le courant de la diode, il est donné par l'équation suivante :

$$I_d = I_0 \cdot \left[ \exp \left( \frac{q \cdot (V + I \cdot R_s)}{n \cdot K \cdot N_s \cdot T} \right) - 1 \right] \quad (\text{II. 4})$$

$I_0$  : courant de saturation de la diode (A) ;

$q$  : charge élémentaire (1.6.10-19 C) ;

$K$  : constante de Boltzmann (1.38.10-23(SI)) ;

$n$  : coefficient d'idéalité de la cellule ;

$N_s$  : nombre de cellules connectées en série ;

$I_0$  : courant de saturation de la diode donné par :

$$I_0 = I_{rs} \cdot \left( \frac{T}{T_n} \right)^3 \cdot \exp \left[ \frac{q \cdot E_{g0} \cdot \left( \frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right)}{n \cdot K} \right] \quad (\text{II. 5})$$

Avec :

$E_{g0}$  : est l'énergie de gap du semi-conducteur utilisé dans la cellule en électronvolt (eV) ;

$I_{rs}$  : Le courant de saturation  $I_{rs}$  de la diode pour la température  $T_n$ , est donné par :

$$I_{rs} = \frac{I_{sc}}{e \cdot \frac{q \cdot V_{oc}}{n \cdot K \cdot N_s \cdot T} - 1} \quad (\text{II. 6})$$

Avec :

$V_{oc}$  : est la tension en circuit ouvert ;

Nous remplaçons dans l'équation (1), l'équation caractéristique tension-courant d'une cellule solaire est donnée comme suit :

$$I = I_{ph} - I_0 \cdot \left[ \exp \left( \frac{q \cdot (V + I \cdot R_s)}{n \cdot K \cdot N_s \cdot T} \right) - 1 \right] - I_{rsh} \quad (\text{II. 7})$$

La puissance générée par la cellule photovoltaïque s'obtient en multipliant l'expression précédente par la tension de sortie (V) et s'écrit comme :

$$P = V \cdot I_{ph} - V \cdot I_0 \cdot \left[ \exp \left( \frac{q \cdot (V + I \cdot R_s)}{n \cdot K \cdot N_s \cdot T} \right) - 1 \right] - V \cdot I_{rsh} \quad (\text{II. 8})$$

Dans notre travail, nous avons retenu le modèle à une diode qui donne de très bonnes précisions, et nous avons utilisé le panneau SIEMENS SM 110-24 de 110 W. Le tableau (II-1) donne les paramètres électriques de panneaux utilisé dans les conditions standards [13] :

Tableau II.1: Paramètres du panneau photovoltaïque SIEMENS PV SM110.

Paramètres	
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 ICC	3.45 A
Tension en circuit ouvert $V_{oc}$	43.5 V
Coefficient d'incrément de courant $I_{cc}$ ( $\alpha_{cc}$ )	1.4 mA/°C
Coefficient d'incrément de la tension $V_{oc}$ ( $\beta_{oc}$ )	-152 mV/°C

### 2.2. La commande MPPT :

De nombreux algorithmes ont été élaborés pour améliorer le MPPT en fonction d'une utilisation spécifique. Perturber et observer est l'un des plus couramment utilisés. C'est une méthode itérative pour obtenir le point de puissance maximum mpp en mesurant les valeurs des caractéristiques d'un panneau photovoltaïque, Cet algorithme mesure les entrées de tension et de courant et incrémente ou décrémente arbitrairement la tension. Ensuite, les nouvelles données sont comparées aux lectures précédentes. Si la puissance augmente la tension est déplacée dans le même sens que le dernier réglage. Cela continue jusqu'à ce que la nouvelle valeur affiche moins de puissance que la précédente. La direction est ensuite modifiée pour essayer d'atteindre la puissance d'entrée de crêt.

La figure (II.2) représente Le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension  $V_{pv}$  d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance  $P_{pv}$ .

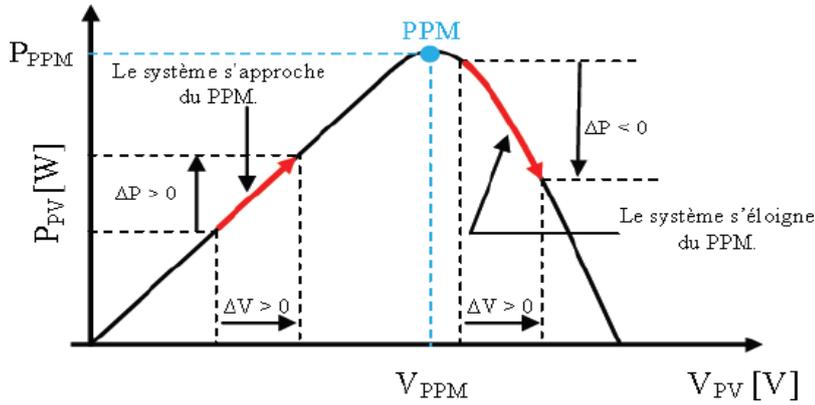


Figure II. 2: Caractéristique de Ppv en fonction de la tension Vpv d'un panneau solaire [24]

La figure (II.3) représente l'algorithme à une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension. Pour ce type de commande, deux capteurs (mesurant le courant et la tension des panneaux PV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du PV à chaque instant.

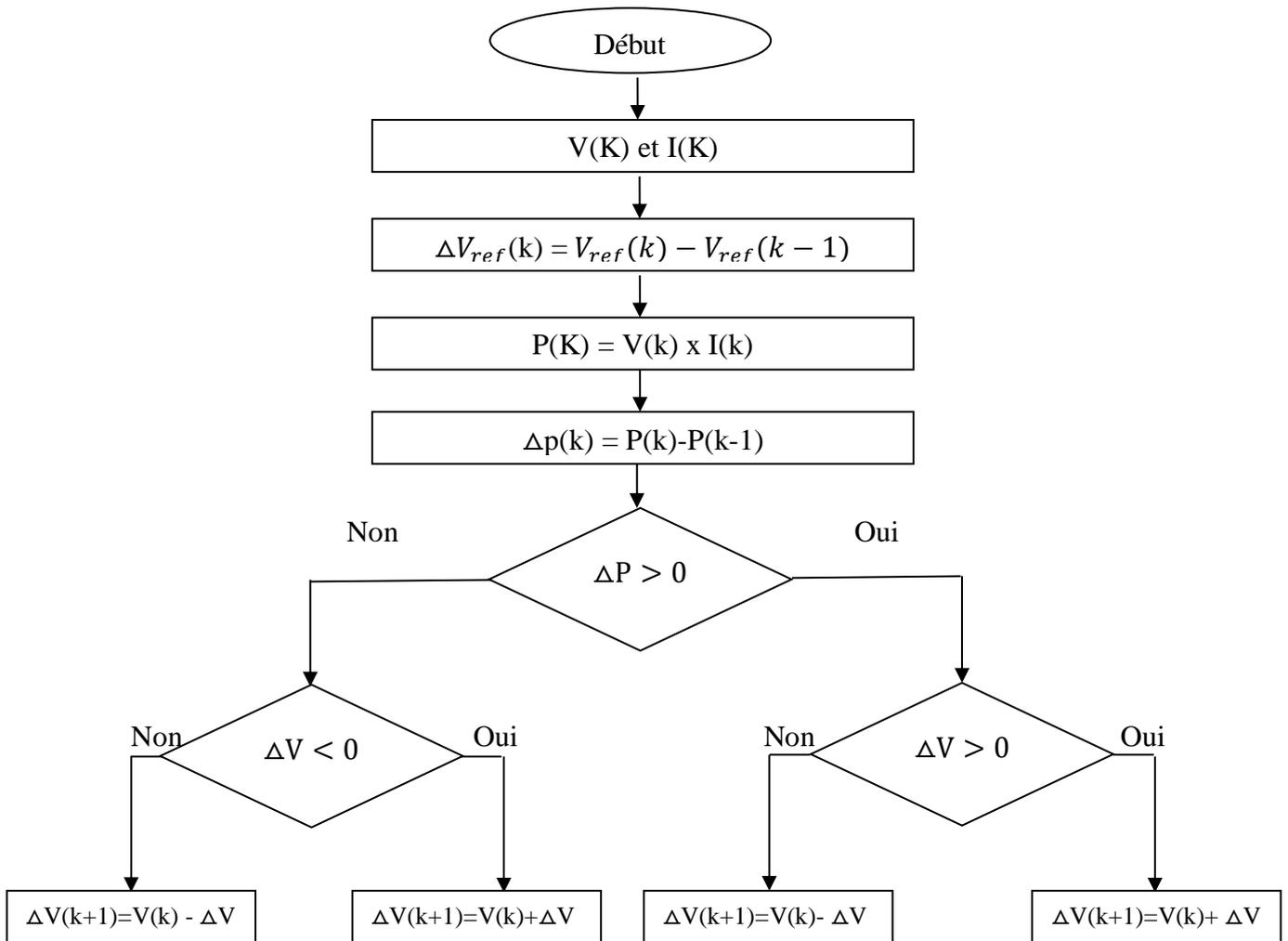


Figure II. 3: Algorithme de la méthode P&O

### 3. Modélisation de la pile à combustible PEMFC :

Les piles à combustible sont des dispositifs électrochimiques qui convertissent l'énergie chimique d'un combustible directement en électricité. L'oxydation du carburant (principalement l'hydrogène) à l'anode produit des électrons qui sont guidés via un conducteur externe vers la cathode où ils réduisent l'oxydant et produisent de l'électricité. [25].

La tension réelle de la pile à combustible est inférieure à la tension théorique à la suite de la réaction, de charge et de transfert de masse. Comme le montre la figure II.4

Les performances d'une pile à combustible peuvent être illustrées par une courbe de polarisation composée de trois segments : 1) les pertes d'activation, 2) les pertes ohmiques, 3) les pertes de concentration. Par conséquent, la tension nominale d'une cellule peut être exprimée comme la différence entre la tension théorique et les pertes ci-dessus. Les caractéristiques V-I de la cellule pleine de base sont présentées à la figure (II.4).

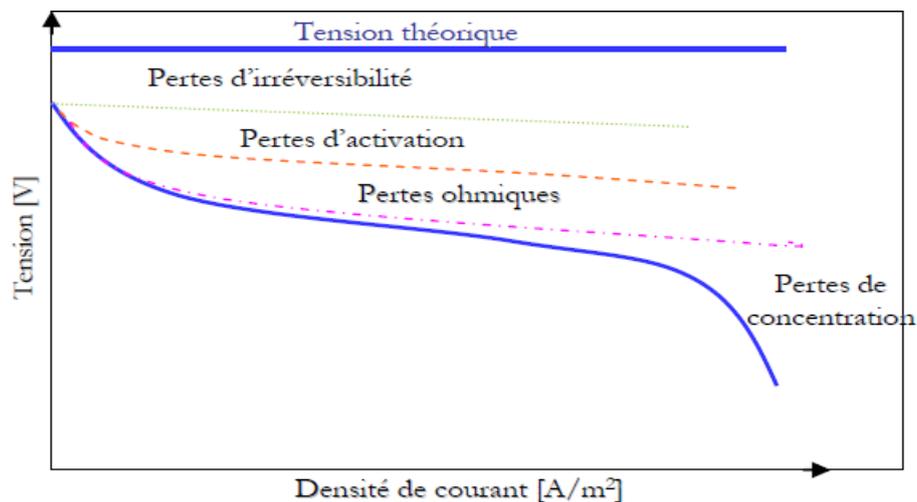


Figure II. 4: Caractéristique de polarisation et zones de fonctionnement de la PAC[26]

#### 3.1. Modèle électrochimique de la pile à combustible PEMFC

La pile à combustible utilise de l'hydrogène et de l'oxygène pour former une réaction chimique, où l'hydrogène se dissocie en protons et en électrons. La réaction chimique est la suivante :



La tension de sortie de la pile à combustible,  $V_{pac}$ , est le produit entre le nombre de cellules (N) composant la pile à combustible et la tension de sortie d'une seule cellule (E), Cette tension s'exprime comme suit :

$$V_{pac} = N * E \quad (II. 10)$$

La tension de sortie d'une seule cellule peut être définie par l'expression suivante :

$$E = E_{nernt} - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc} \quad (II. 11)$$

Avec :

$N$  : Le nombre des cellules de la pile ;

$E_{nernt}$  : La tension de Nernst (volt) ;

$V_{act}$  : Pertes d'activation (volt) ;

$V_{ohm}$  : Pertes ohmiques (volt) ;

$V_{conc}$  : Pertes de concentration (volt) ;

### 3.1.1. La tension de Nernst :

C'est la thermodynamique potentielle de la cellule et il représente sa tension réversible. Cette tension s'exprime comme suit :

$$E_{nernt} = \frac{\Delta G}{2.F} - \frac{\Delta S}{2.F} (T - T_0) + \frac{R.T}{2.F} \left[ \ln(P_{H_2}) + \frac{1}{2} \ln(P_{O_2}) \right] \quad (II. 12)$$

Avec :

$\Delta G$  : Le changement d'énergie libre (J/K.mol) ;

$\Delta S$  : Le changement d'entropie (J/K.mol) ;

$F$  : La constante de Faraday (96.487 C/K.mol) ;

$T$  : La température absolue opérationnelle ;

$T_0$  : La température de référence (K) ;

$R$  : La constante universelle des gaz parfaits (8.314 J/K.mol) ;

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

$$E_{Nernst} = 1.229 - 0.85 \cdot 10^{-3} (T - 298.15) + 4.31 \cdot 10^{-5} \cdot T \left[ \ln(P_{H_2}) + \frac{1}{2} \ln(P_{O_2}) \right] \quad (II. 13)$$

Les pressions partielles d'hydrogène et d'oxygène sont :

$$P_{H_2} = 0.5 P_{H_2O}^{sat} \left[ \exp \left( - \frac{1.635 \cdot I}{T \cdot 1.334} \right) \cdot \frac{P_{anode}}{P_{H_2O}^{sat}} - 1 \right] \quad (II. 14)$$

$$P_{O_2} = P_{H_2O}^{sat} \left[ \exp \left( - \frac{4.192 \cdot I}{T \cdot 1.334} \right) \cdot \frac{P_{cathode}}{P_{H_2O}^{sat}} - 1 \right] \quad (II. 15)$$

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 ;

Elle est calculée avec :

$$\log_{10}(P_{H_2O}^{sat}) = -2.18 + 2.95 * 10^{-2} T_c - 9.19 * 10^{-5} T_c^2 + 1.44 * 10^{-7} T_c^3 \quad (II. 16)$$

$$T_c = T - 273.15 \quad (II. 17)$$

### 3.1.2. Les Pertes d'activation :

Les pertes d'activation sont dues au démarrage des réactions chimiques, ils sont essentiellement dus aux réactions cathodiques.

La relation entre les pertes d'activation et la densité de courant est exprimée dans l'équation suivante [27] :

$$V_{act} = \frac{R.T}{a zF} \ln \frac{I}{I_0} = T. [a + b \ln(I)] \quad (II. 18)$$

Par ailleurs, l'équation empirique pour  $V_{act}$  est donnée en [28], où la constante ( $\eta_0$ ) est ajoutée à (II. 15) comme suit :

$$V_{act} = \eta_0 + (T - 298).a + T.b.\ln(I) = V_{act1} + V_{act2} \quad (II. 19)$$

Avec :

$\eta_0, a, b$  : constantes empirique

$V_{act1} = (\eta_0 + (T - 298).a)$  : est la chute de tension affectée seulement par température interne de la de la pile à combustible

$V_{act2} = (T.b.\ln(I))$  : est dépendante à la fois du courant et de la température.

### 3.1.3. Les pertes ohmiques :

Les pertes ohmiques sont dues à la résistance qu'opposent les électrodes et les plaques bipolaires à la circulation des électrons et l'électrolyte au passage des protons. La chute de tension peut être exprimé par l'utilisation de la loi d'Ohm s'écrit :

$$V_{ohm} = IR_{ohm} \quad (II. 20)$$

$R_{ohm}$  : est la résistance équivalente de la membrane à la conduction des protons, elle est calculée en fonction du courant et de la température, relation suivante [29]:

$$R_{ohm} = R_{ohm0} + K_{RI} \cdot I - K_{RT} \cdot T \quad (II. 21)$$

Avec :

$R_{ohm0}$  : la partie constante de  $R_{ohm}$  ;

$K_{RI}$  et  $K_{RT}$  : sont des constantes empiriques ;

**3.1.4. Les pertes de concentration :**

Les chutes de tension par concentration résultent d'un manque de réactifs. Lorsque la densité courant devient élevée la diffusion des gaz dans les électrodes n'est plus assez rapide pour entretenir la réaction. Ces pertes sont données par la relation suivante :

$$V_{\text{conc}} = -\frac{RT}{zF} \ln\left(1 - \frac{I}{I_{\text{lim}}}\right) \quad (\text{II. 22})$$

Avec :

$I_{\text{lim}}$  : courant de limitation ou le courant maximal ;

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

**3.2. Taux d'hydrogène consommé :**

Chaque gaz individuel sera considéré séparément et les équations des gaz parfaits lui seront appliquées. Ici, l'hydrogène sera considéré comme un exemple [28] :

$$P_{\text{H}_2} V_{\text{an}} = n_{\text{H}_2} R T \quad (\text{II. 23})$$

Avec :

$V_{\text{an}}$  : est le volume de l'anode (en litre) ;

$n_{\text{H}_2}$  : est le nombre de mole d'hydrogène dans le canal anode ;

$R$  : la constante universelle des gaz parfait (8,31447 J/mol/K) ;

$T$  : représente la température en Kelvin (K) ;

$$\frac{d}{dt} P_{\text{H}_2} = \frac{RT}{V_{\text{an}}} q_{\text{H}_2} \quad (\text{II. 24})$$

Avec :

$q_{\text{H}_2}$  : représente le débit molaire de l'hydrogène (kmol/s) ;

Pour le débit molaire de l'hydrogène, il existe trois facteurs importants : débit d'entrée d'hydrogène, débit de sortie d'hydrogène et débit d'hydrogène pendant la réaction [30] :

$$\frac{d}{dt} P_{\text{H}_2} = \frac{RT}{V_{\text{an}}} (q_{\text{H}_2}^{\text{in}} - q_{\text{H}_2}^{\text{out}} - q_{\text{H}_2}^{\text{r}}) \quad (\text{II. 25})$$

La relation entre le flux d'hydrogène et la cheminée courant peut s'écrire :

$$P_{\text{H}_2}^{\text{r}} = \frac{N_s I_{\text{pac}}}{2F} = 2 I_{\text{pac}} \times K_r \quad (\text{II. 26})$$

Avec :

$$K_r : \text{est une constante de paramètre de modélisation [kmol/(s}\cdot\text{A)] , } K_r = \frac{N_s}{4} \quad (\text{II. 27})$$

$N_s$  : Le nombre des cellules de la pile ;

$I_{pac}$  : Intensité du courant d'une cellule de la pile à combustible (A)

En dérivant l'équation des gaz parfaits, une relation spécifique est dérivée entre la partie la pression et le débit d'entrée du combustible, la pression partielle d'hydrogène et d'oxygène sont données dans les équations (20), (22). [30, 31] :

En utilisant l'équation (20), l'équation. (22) peut être réécrit comme:

$$P_{H_2} = \frac{1/K_{H_2}}{1+\tau_{H_2}s} (q_{H_2}^{in} - 2K_r I) \quad (II. 28)$$

Avec :

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

$$\tau_{H_2} = (V_{an}) / (K_{H_2} RT) \quad (II. 29)$$

#### 4. Modélisation de l'électrolyseur

Un électrolyseur est un dispositif qui utilise l'énergie électrique pour faire des réactions chimiques. Dans le cadre de notre étude, les électrolyseurs employés réalisent l'électrolyse de l'eau afin de produire de l'hydrogène. il est défini comme une appareil qui sépare l'eau ( $2H_2O$ ) en hydrogène ( $2H_2$ ) et oxygène ( $O_2$ ) selon l'équation (II.30).



L'électricité est nécessaire pour le processus de production d'hydrogène. Les caractéristiques U-I d'un électrolyseur avancé sont définies comme [32] :

$$V_{\text{élec\_Cell}} = V_{\text{rév}} + \frac{r_1+r_2T}{A} I + K_{\text{éle}} \ln \left( \frac{K_{T_1} + \frac{K_{T_2}}{T} + \frac{K_{T_3}}{T^2}}{A} I + 1 \right) \quad (II. 31)$$

Avec :

$V_{\text{élec\_Cell}}$  : la tension aux bornes de la cellule (V) ;

$V_{\text{rév}}$  : la tension réversible de cellule(V) ;

$r_1, r_2$  : les paramètres de résistance ohmique ( $\Omega \cdot m^2, \Omega \cdot m^2 / ^\circ C$ ) ;

$K_{\text{éle}}, K_{T_1}, K_{T_1}, K_{T_1}$  : les paramètres de surtension  $V, m^2/A, m^2 \cdot ^\circ C/A, m^2 \cdot ^\circ C^2/A$  ;

La tension minimale ou réversible  $V_{\text{rév}}$  d'une cellule d'électrolyseur correspond à l'énergie libre ( $\Delta G$ ) nécessaire pour décomposer la molécule d'eau , elle est donnée par la formule suivante :

$$V_{\text{rév}} = -\frac{\Delta G}{2F} \quad (II. 32)$$

$\Delta G$  : est l'énergie libre de la réaction d'électrolyse (J/mol) ;

F : La constante de Faraday (96.487 C/K.mol) ;

$V_{rév}$  : peut être exprimé comme une équation empirique comme :

$$V_{rév} = V_{rév}^0 - K_{rév} (T - 25) \quad (\text{II. 33})$$

Avec :

$V_{rév}^0$  : est la tension de cellule réversible à l'état standard (V) ;

$K_{rév}$  : est coefficient empirique de température de  $V_{rév}$  ( $V/^{\circ}C$ ) ;

Pour un électrolyseur constitué de  $n_c$  cellules en séries , la tension de sortie est définie comme :

$$V_{élec} = n_c \cdot V_{élec,cell} \quad (\text{II. 34})$$

#### 4.1. Débit de production d'Hydrogène :

Selon la loi de Faraday, le taux de production d'hydrogène dans une cellule d'électrolyseur est directement proportionnel au taux de transfert d'électrons aux électrodes, le taux de production totale d'hydrogène dans un électrolyseur, composé de plusieurs cellules connectées en série, peut être exprimé une [32] :

$$\dot{n}_{H_2, prod} = \eta_F \frac{N_c I}{2F} \quad (\text{II. 35})$$

Avec :

$\dot{n}_{H_2}$  : débit de production d'Hydrogène (mole/sec) ;

$\eta_F$  : 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 [33] :

$$\eta_F = \frac{\left(\frac{1}{A}\right)^2}{f_1 + \left(\frac{1}{A}\right)^2} f_2 \quad (\text{II. 36})$$

Avec :

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

#### 4.2. Modèle thermique :

La température de fonctionnement de l'électrolyseur affecte ses performances. Le taux de variation de température de l'électrolyseur est proportionnel à la différence de taux de chaleur généré

$\dot{Q}_{gen}$ , moins la perte de chaleur  $\dot{Q}_{loss}$ , et refroidissement chaleur  $\dot{Q}_{cool}$ , peut être exprimé comme [33] :

$$C_t \frac{dT}{dt} = \dot{Q}_{gen} - \dot{Q}_{loss} - \dot{Q}_{cool} \quad (\text{II. 37})$$

Avec :

$C_t$  : est la capacité thermique globale de l'électrolyseur ;

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

$$\dot{Q}_{gen} = \eta_c (V - V_{th}) \cdot I \quad (\text{II. 38})$$

Avec :

$$V_{th} = -\frac{\Delta H}{2F}, \text{ est la tension thermique} \quad (\text{II. 39})$$

$\dot{Q}_{pert}$  : la perte de puissance calorifique. elle peut être déterminée par :

$$\dot{Q}_{pert} = \frac{1}{R_t} (T - T_a) \quad (\text{II. 40})$$

$R_t$  : est résistance thermique de l'électrolyseur ( $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ) ;

$T_a$  : est la température ambiante ( $^{\circ}\text{C}$ ) ;

$\dot{Q}_{refroidissement}$  la perte de puissance calorifique dû au refroidissement, peut être exprimée par :

$$\dot{Q}_{refroidissement} = C_{cm} (T_{cm,s} - T_{cm,e}) \quad (\text{II. 41})$$

Avec :

$C_{cm}$  : est la capacité thermique de l'eau de refroidissement ( $\text{J}/^{\circ}\text{C}$ ) ;

$T_{cm,e}$  : est la température de l'eau de refroidissement d'entrée ( $^{\circ}\text{C}$ ) ;

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

$$T_{cm,s} = T_{cm,e} + (T - T_{cm,e}) \left( 1 - \exp\left(-\frac{V_{AHX}}{C_{cm}}\right) \right) \quad (\text{II. 42})$$

Avec :

$V_{AHX}$  : coefficient d'échange calorifique effective pour le processus de refroidissement, peut être exprimée par :

$$V_{AHX} = h_{cond} + h_{conv} \cdot I \quad (\text{II. 43})$$

$h_{cond}$  : 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)) ;

**5. Stockage d'hydrogène :**

Le réservoir de stockage d'hydrogène est un dispositif de stockage d'hydrogène Produit par électrolyseur, Ce dernier fournit de l'hydrogène à la pile à combustible en l'absence de production d'énergie photovoltaïque afin de répondre à la demande de charge du consommateur [34] :

$$P = \frac{nRT}{V} \tag{II. 44}$$

La dynamique du système de stockage de H2 peut être exprimée dans l'équation (II. 37), la pression dans le réservoir est donnée par [35] :

$$P = \frac{nRT}{V-nb} - a \frac{n^2}{V^2} \tag{II. 45}$$

Avec :

$P$  : Pression (pascale) ;

$n$  : Nombre de moles (mol) ;

$R$  : Constante de gaz universelle ;

$T$  : Température (K) ;

$V$  : Volume de stockage ( $m^3$ ) ;

$T_{cr}$  : Température critique (K) ;

$P_{cr}$  : Pression critique (Pa) ;

**6. Modélisation des éléments de stockage d'énergie**

Pour la modélisation on représente une batterie par le circuit électrique suivant:

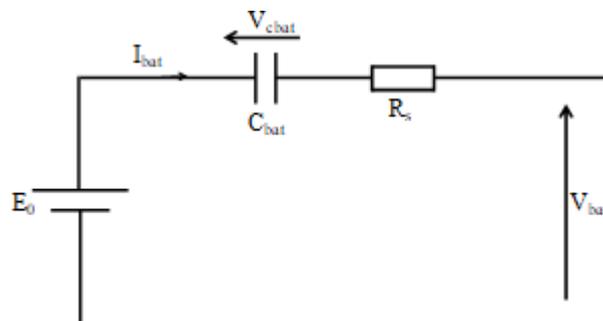


Figure II. 5: Modèle R-C de la batterie

Ce modèle comprend une  $E_0$  modélisant la tension a vide de la batterie, un condensateur modélisant la capacité interne de la batterie ( $C_{bat}$ ) et une résistance interne ( $R_s$ ).

La tension aux bornes de la batterie donnée par [9] :

$$V_{bat} = E_0 - R_s \cdot I_{bat} - V_{cbat} \tag{II. 46}$$

On définit également l'étas de charge (EDC) de la batterie par :

$$EDC = 1 - \frac{Q_d}{C_{bat}} \tag{II. 47}$$

$Q_d$  : la quantité de charge manquante par rapport à  $C_{bat}$  ;

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

### 7. Modélisation du hacheur boost (élevateur)

La tension de sortie du module photovoltaïque et de la pile à combustible sont élevées en utilisant Le convertisseur Boost, la tension de sortie est toujours supérieure à la tension d'entrée. La figure (II.6) représente la structure d'un hacheur de type Boost utilisé lorsqu' on désire augmenter la tension disponible d'une source continue [36] :

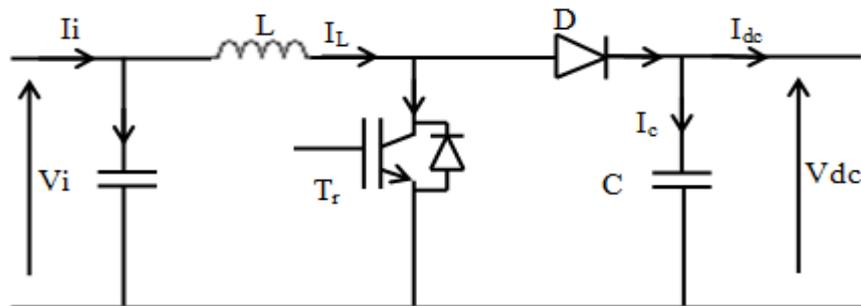


Figure II. 6: schéma de hacheur type boost [36]

En mode de conduction continue le fonctionnement de ce convertisseur peut être divisé en deux phases selon l'état du transistor  $T_r$ .

Dans la première phase  $T_r$  est passant, la tension aux bornes de l'inductance vaut  $V_L = V_i$  le courant traversant l'inductance augmente linéairement ; dans la deuxième phase le transistor est bloqué, la diode devient passante. La tension aux bornes de l'inductance vaut  $V_i = V_L + V_{dc}$  Dans cette phase le condensateur  $C$  se charge en même temps par le courant stocké dans l'inductance et par le générateur. Les équations électriques du hacheur boost sont [36] :

$$V_i = L \cdot \frac{dI_L}{dt} + (1 - a) \cdot V_{dc} \tag{II. 48}$$

$$(1 - a) \cdot I_L = C \cdot \frac{dV_{dc}}{dt} + I_{dc} \tag{II. 49}$$

$a$  : le rapport cyclique ;

### 8. Modélisation du hacheur Buck-Boost (abaisseur-élevateur) :

Le convertisseur Buck-Boost est un inverseur de tension à stockage inductif, la tension en sortie est toujours de signe contraire à la tension en entrée. Tandis que lorsque le transistor est fermée le courant dans l'inductance augmente, l'énergie est stockée, et quand le commutateur est ouvert la tension à travers l'inductance est renversée et l'énergie stockée se transfère vers la charge via la diode [13].

La figure (II.7) représente la structure d'un hacheur de type Buck-Boost

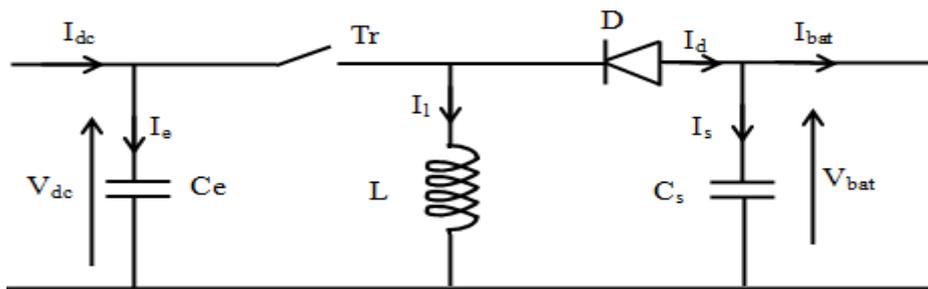


Figure II. 7: Schéma d'un hacheur Buck-Boost

La valeur moyenne de la tension aux bornes de l'inductance est nulle, par conséquent l'équation de la tension aux bornes de la batterie décrivant le fonctionnement en conduction continue est donnée par [13]:

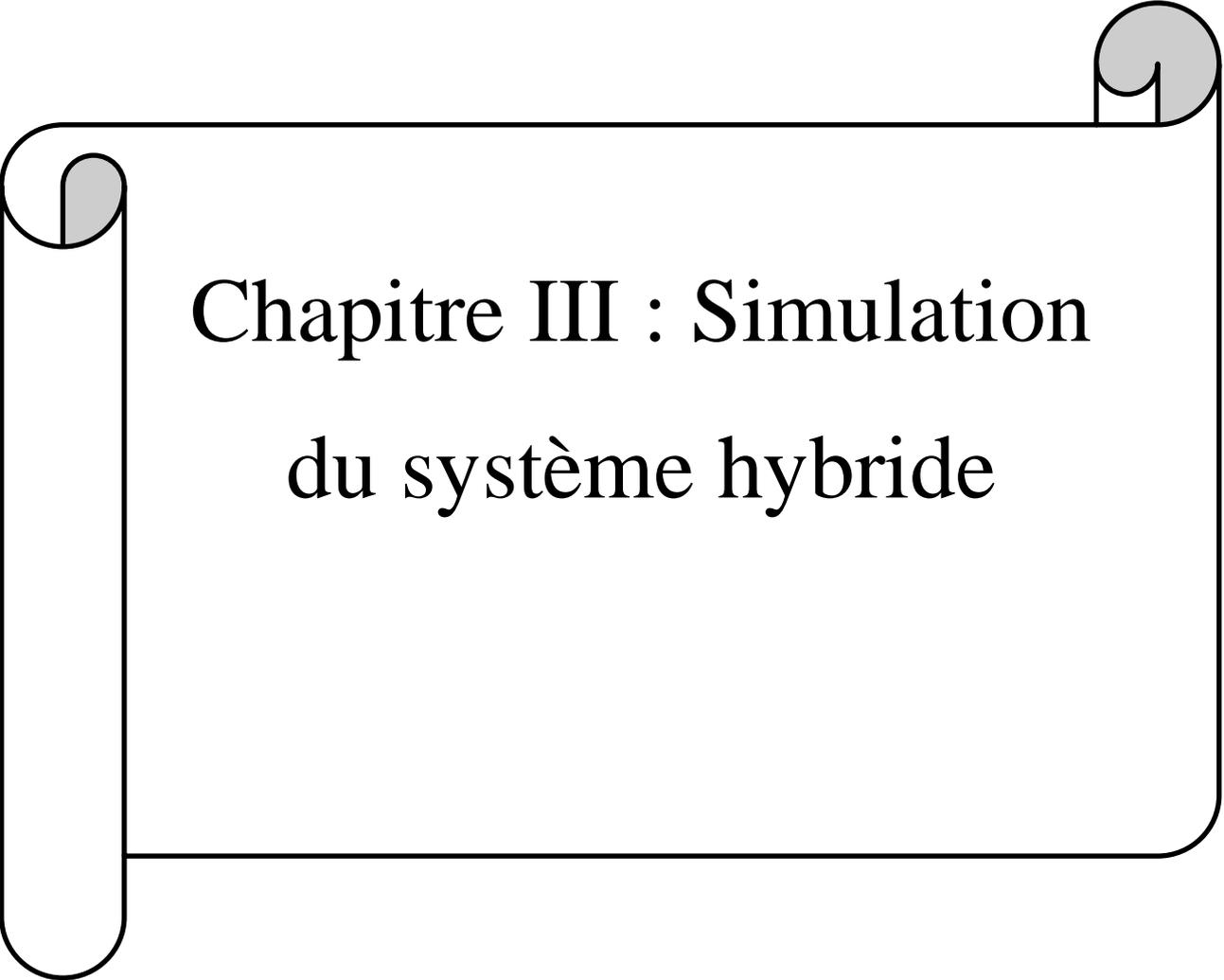
$$V_{bat} = -\frac{\alpha}{(1-\alpha)} V_{dc} \quad (\text{II. 50})$$

Si nous admettons que la puissance échangée entre la batterie et le bus se conserve, alors nous pouvons écrire :

$$I_{bat} = -\frac{(1-\alpha)}{\alpha} I_{dc} \quad (\text{II. 51})$$

### 9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation mathématique d'un système hybride composé d'un panneau photovoltaïque pour consommant la lumière du soleil, et modélisation des éléments de stockage d'énergie la piles à combustible et la batterie, ensuite on a modélisé le l'électrolyseur pour produire l'hydrogène dans le réservoir de stockage. Enfin on a modélisé le modèle mathématique du hacheur. Cette modélisation est une étape essentielle permet d'introduire un certain nombre de modèles puis évaluer la caractéristique de chaque élément d'un système hybride.



Chapitre III : Simulation  
du système hybride

## 1. Introduction

La modélisation des différentes parties d'un notre système hybride doit être validé par une simulation pour montrer l'influence des conditions météorologique (particulièrement la température) sur les caractéristiques électriques de ces système (PV, PEMFC, Batterie, Electrolyseur...)

C'est ce que fera l'objet de ce chapitre, avec la présentation des résultats de simulation sous Matlab-Simulink.

## 2. Caractéristiques des panneaux

La figure (III.1) représente les caractéristiques courant-tension  $I_{pv}$  ( $V_{pv}$ ) du module SIEMENS SM 110-24 pour un éclairement et une tension donnée ( $E = 1000W/ m^2$ ,  $T_c=25^\circ C$ ).

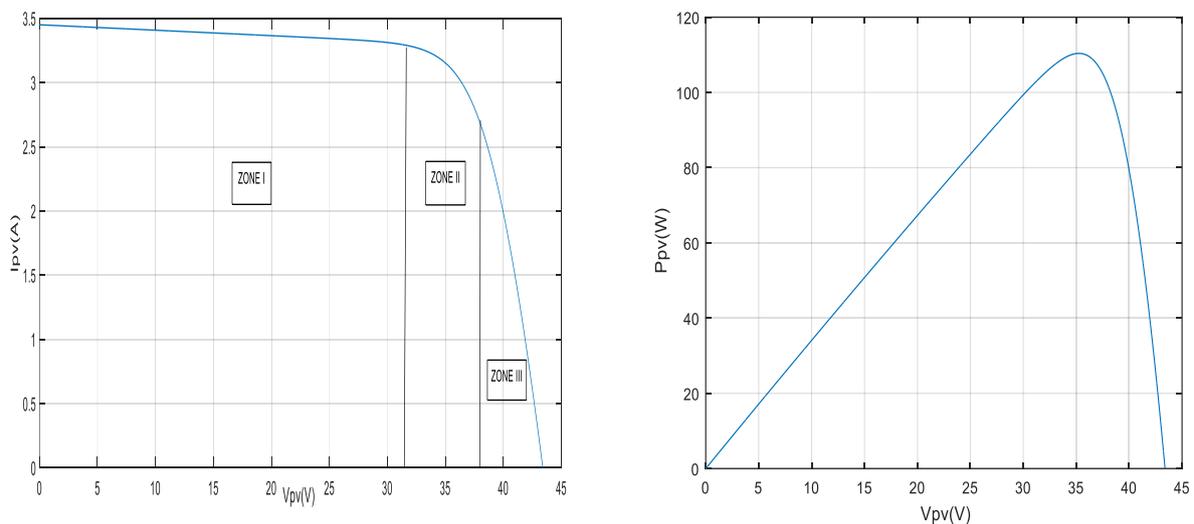


Figure III. 1: Caractéristique  $I_{pv}(V_{pv})$  et  $P_{pv}(V_{pv})$  dans les conditions standards

On remarque dans la caractéristique (courant-tension) que le module photovoltaïque possède trois zones de fonctionnement qui sont :

La zone (1) : le courant reste presque constant quel que soit la tension, pour cet intervalle, le module photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.

La zone (2) : qui se distingue par une variation de courant correspondant à une tension presque constante, dans ce cas le générateur est assimilable à un générateur de tension.

La 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.

### 2.1. Influence de la température

L'influence de la température est importante et a des conséquences pour la conception des panneaux et des systèmes photovoltaïques. La température est un paramètre essentiel puisque les cellules sont exposées aux rayonnements solaires, susceptibles de les échauffer. De plus, une partie du rayonnement émis n'est pas convertie en énergie électrique il se dissipe sous forme de chaleur. Pour voir l'influence de la température, nous avons tracé les caractéristiques  $P_{pv}$ - $V_{pv}$  et  $I_{pv}$ - $V_{pv}$  comme la figure (III.2)(III.3) , pour des différentes températures, et avec un ensoleillement constant  $E = 1000 \text{ W/m}^2$ .

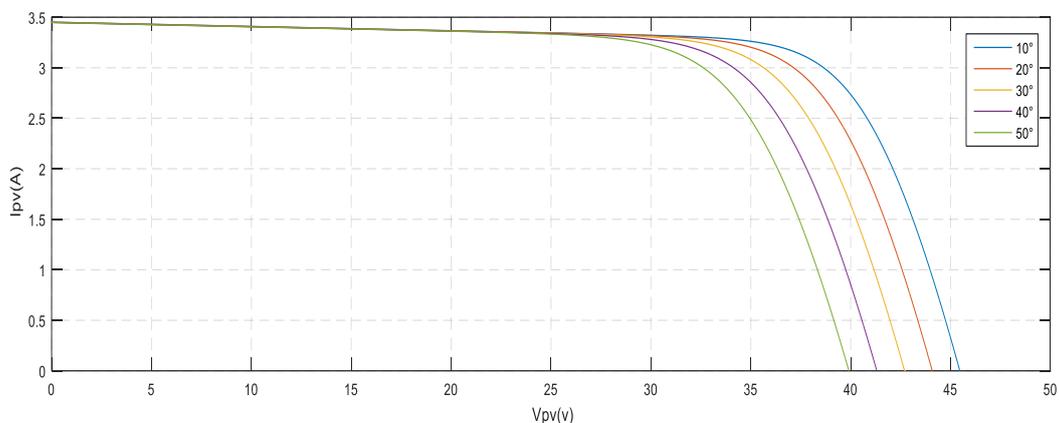


Figure III. 2: Influence de la température sur la caractéristique  $I_{pv} = f(V_{pv})$

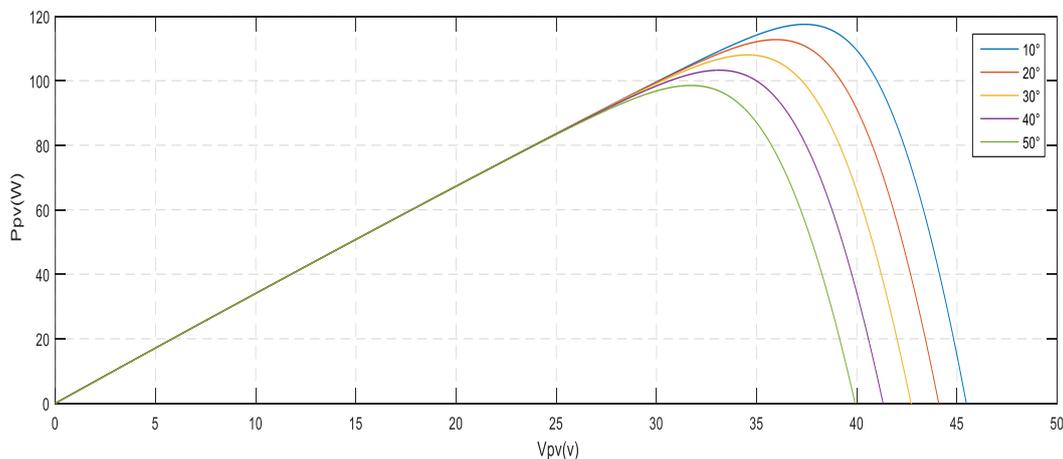


Figure III. 3: Influence de la température sur la caractéristique  $P_{pv} = f(V_{pv})$

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

## 2.2. Influence de l'éclairement

L'énergie électrique produite par un panneau dépend de l'éclairement qu'elle reçoit sur sa surface. Les figures qu'on voit ci-dessous représentent les caractéristiques I-V et P-V de la cellule PV avec variation de l'éclairement, à une température constante  $T=25^{\circ}\text{C}$ .

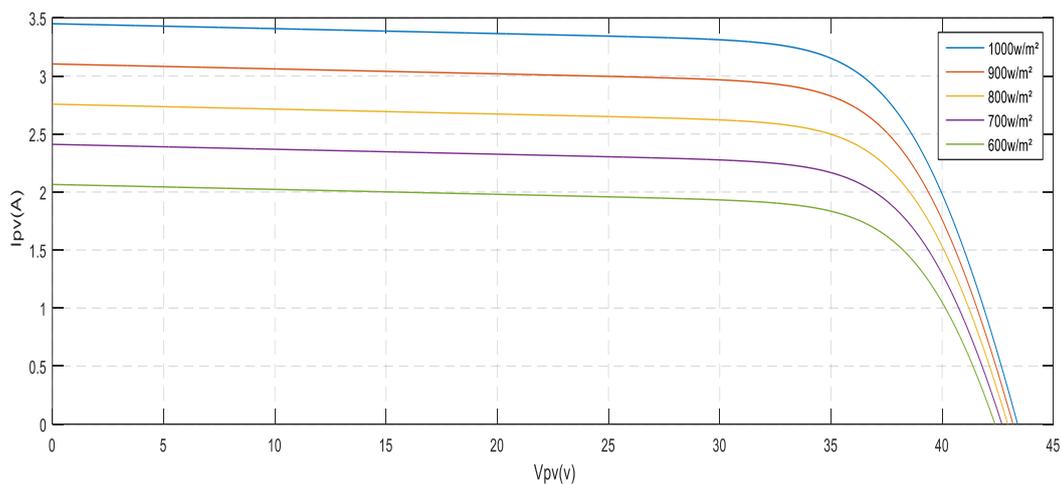


Figure III. 4: Influence de l'éclairement sur la caractéristique  $I_{pv}=f(V_{pv})$

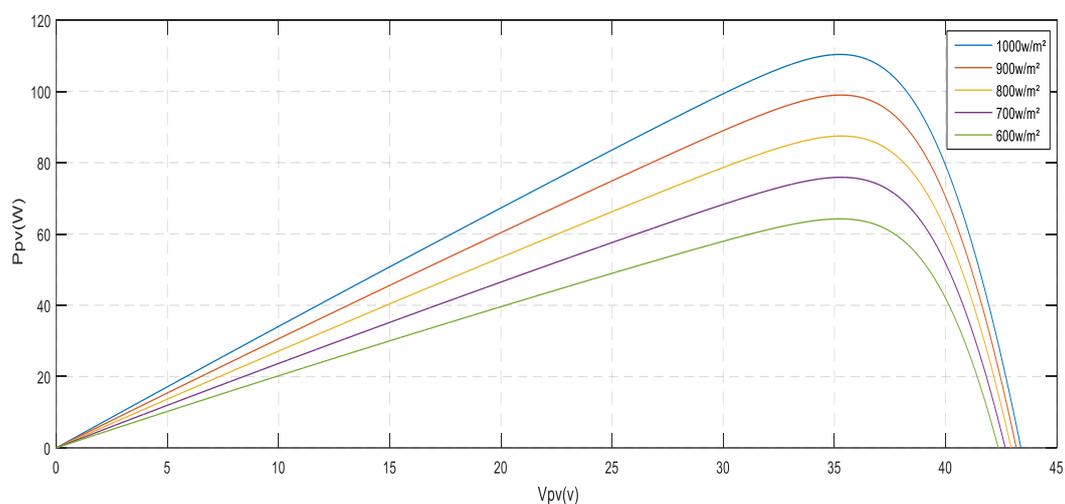


Figure III. 5: Influence de l'éclairement sur la caractéristique  $P_{pv}=f(V_{pv})$

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.

### 2.3. Influence de la résistance série RS

La valeur de la résistance série est très faible dans certains cas, il est possible de faire varier cette résistance et prédire l'influence de la résistance de sa variation sur les sorties du module PV.

Les figures qu'on voit ci-dessous représentent les caractéristiques P-V et I-V, en résultant 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.

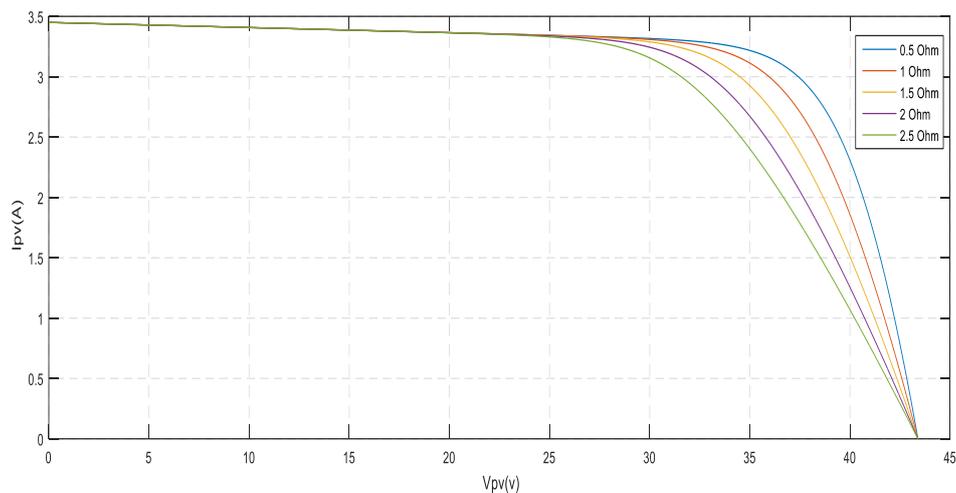


Figure III. 6: Influence de résistance série la caractéristique  $I_{pv} = f(V_{pv})$

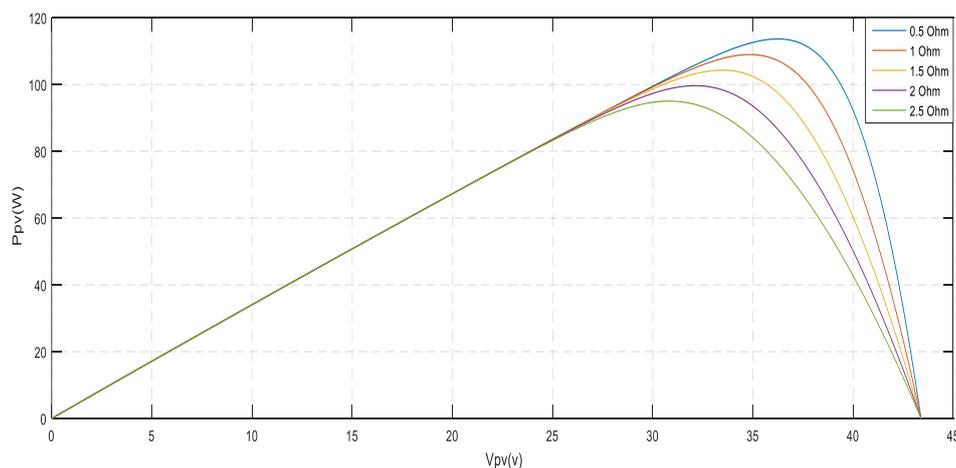


Figure III. 7: Influence de résistance série la caractéristique  $P_{pv} = f(V_{pv})$

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.

## 2.4. Caractéristique électrique du module photovoltaïque avec l'algorithme MPPT

D'après l'étude que nous avons fait, nous avons montré que le panneau PV fonctionnant sous des conditions climatiques constantes, a un unique point de tension et de courant où sa puissance est maximale. La commande MPPT (Maximum Power Point Tracker), en français, le suiveur du point de puissance maximum peut être utilisé pour maintenir le point de fonctionnement du panneau photovoltaïque au point de sa puissance maximale. Le MPPT permet de réaliser ceci par le contrôle du courant et la tension du champ photovoltaïque, indépendamment des courants et tensions de la charge.

Après avoir réalisé le système photovoltaïque avec la commande MPPT basée sur la méthode de perturbation et observation (P&O) on aura les résultats suivant dans la figure (III.8) de l'influence de l'ensoleillement sur la puissance  $P_{pv}$  en fonction de la tension  $V_{pv}$ .

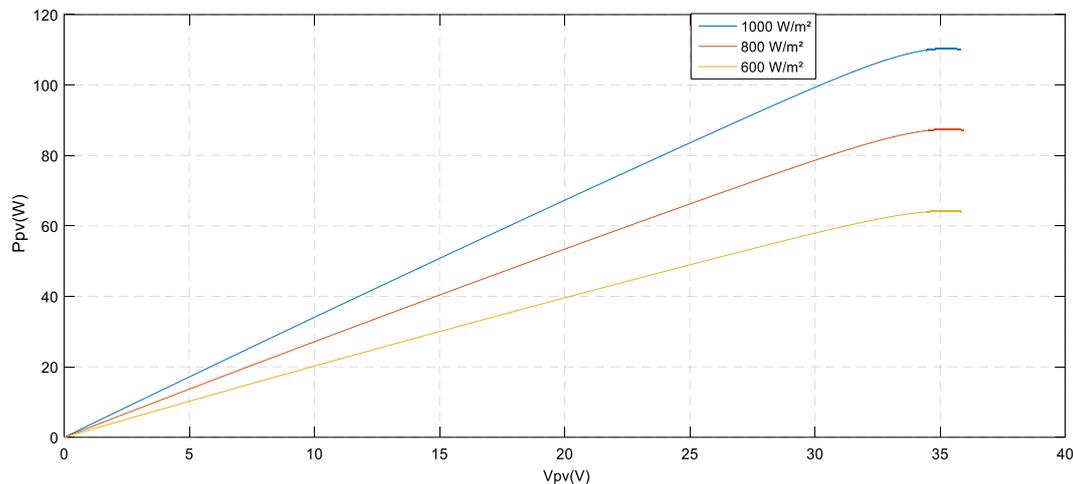


Figure III. 8: Influence de l'éclairement sur la caractéristique  $P_{pv} = f(V_{pv})$  avec commande MPPT

Les figures ci-dessous représentent la tension et la puissance générées par le générateur photovoltaïque par la commande MPPT « perturbation et observation » ( $1000\text{W}/\text{m}^2$ ,  $T=25^\circ\text{C}$ )

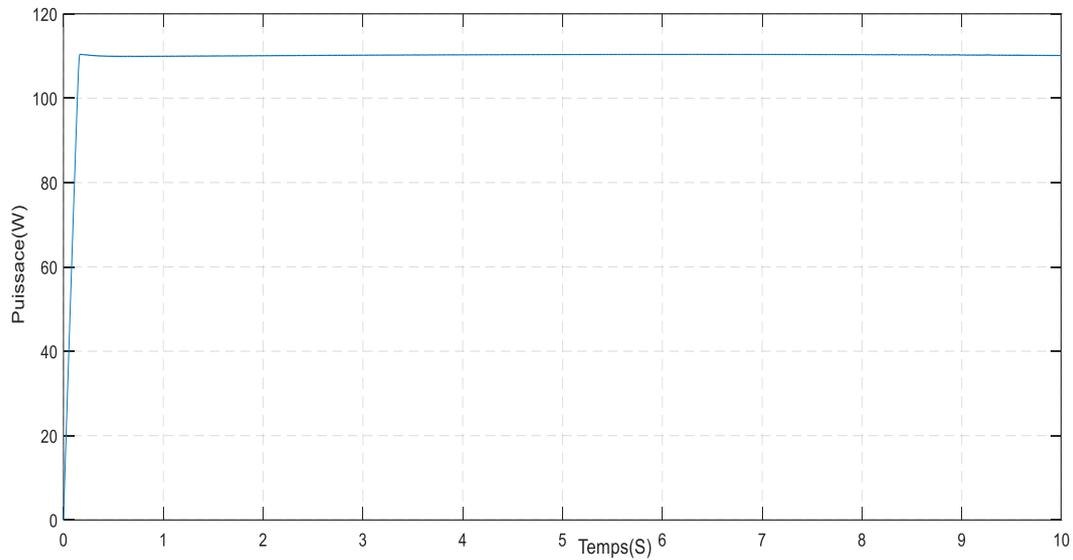


Figure III. 9: Effet de la commande MPPT sur la puissance du panneau PV

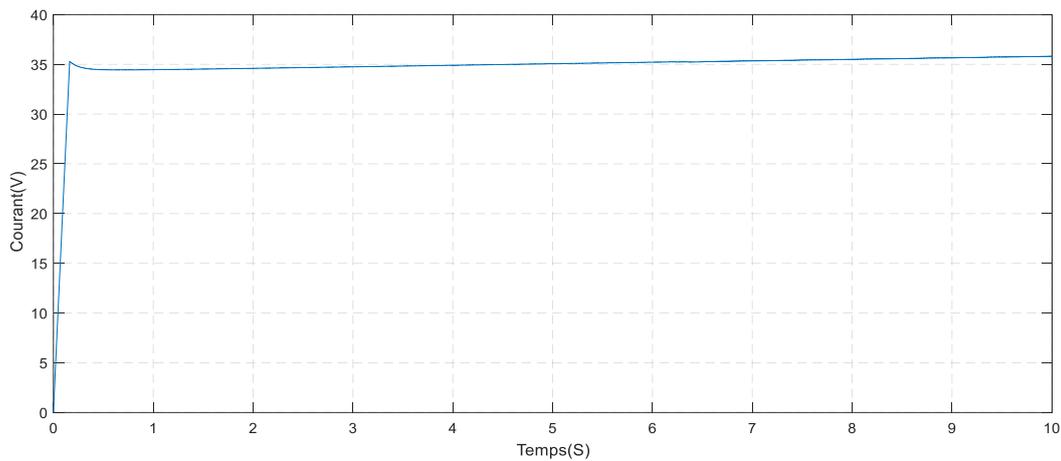


Figure III. 10: Effet de la commande MPPT sur la tension du panneau PV

### 3. Caractéristique de la pile combustible PEMFC

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

La figure (III.11) représente la variation de la tension de sortie en fonction de la densité de courant. On remarque d'après cette courbe que les caractéristiques de la pile sont non linéaires, à chaque fois que le courant augmente la tension diminue. On peut distinguer trois domaines différents, sur la courbe caractéristique V-I de la pile PEMFC, à une température constante = 25 C°.

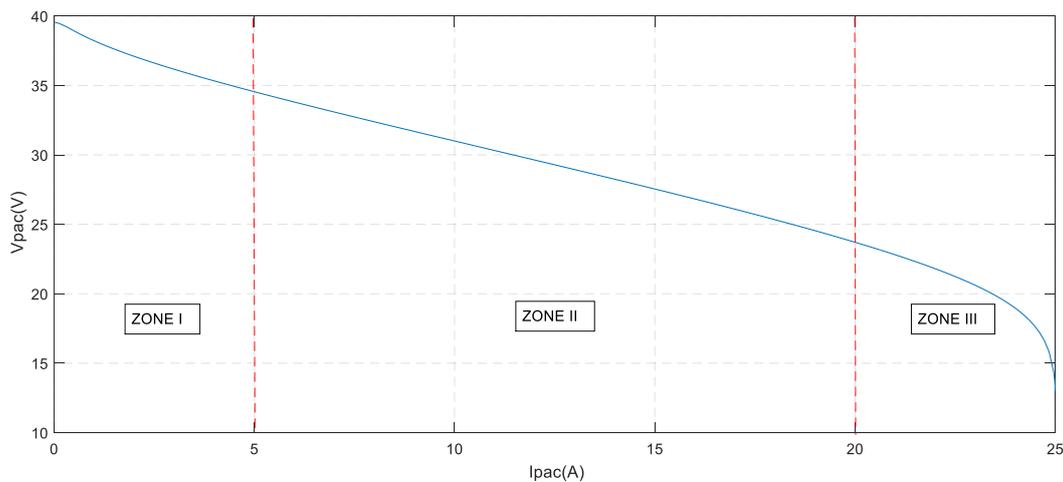


Figure III. 11: Caractéristique  $V_{pac} = f(I_{pac})$  de la pile PEMFC

La première zone à faible densité de courant représente les polarisations d'activation anode et cathode qui est le phénomène le plus important pour les faibles densités de courant.

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

La troisième zone à haute densité de courant liée à la limitation par diffusion et noyage n'est pas exprimée. Ces phénomènes déterminent l'évolution de la pression des différentes espèces dans les canaux de la pile à combustible et ils sont dues au transport du gaz deviennent dominantes. Cette dernière zone ne doit pas être utilisée en fonctionnement car le noyage détériore très fortement les performances de la pile.

### 3.2. La courbe de puissance :

La puissance est définie comme le produit entre le courant et la tension, La figure (III.12) représente la variation de la caractéristique densité de Puissance-Densité de courant, de la pile à combustible PEMFC de 5kW de puissance en réponse à un courant variant sous forme de rampe.

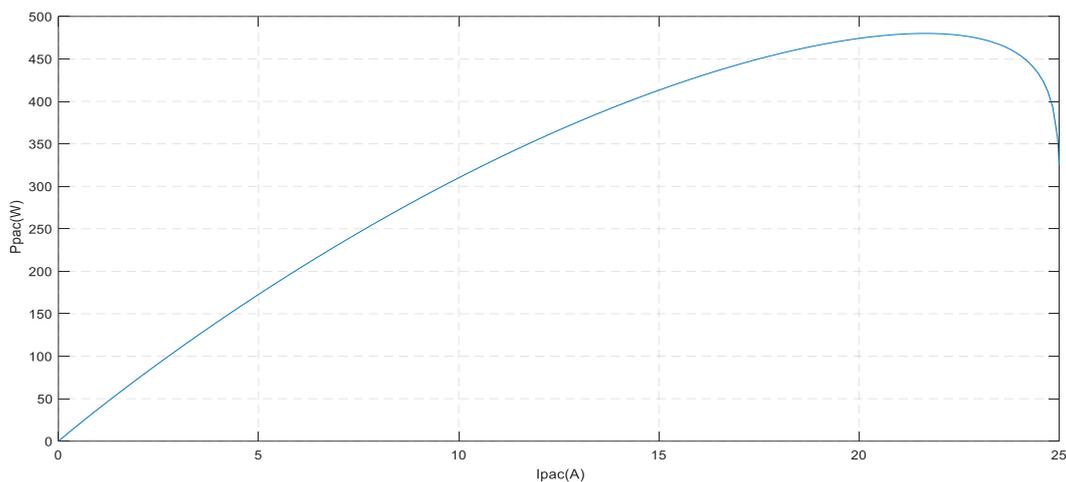
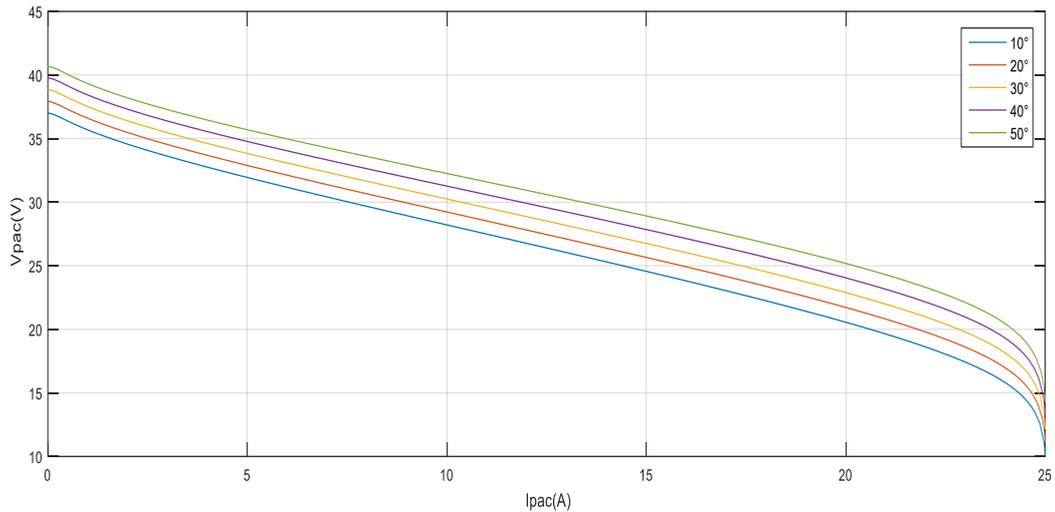
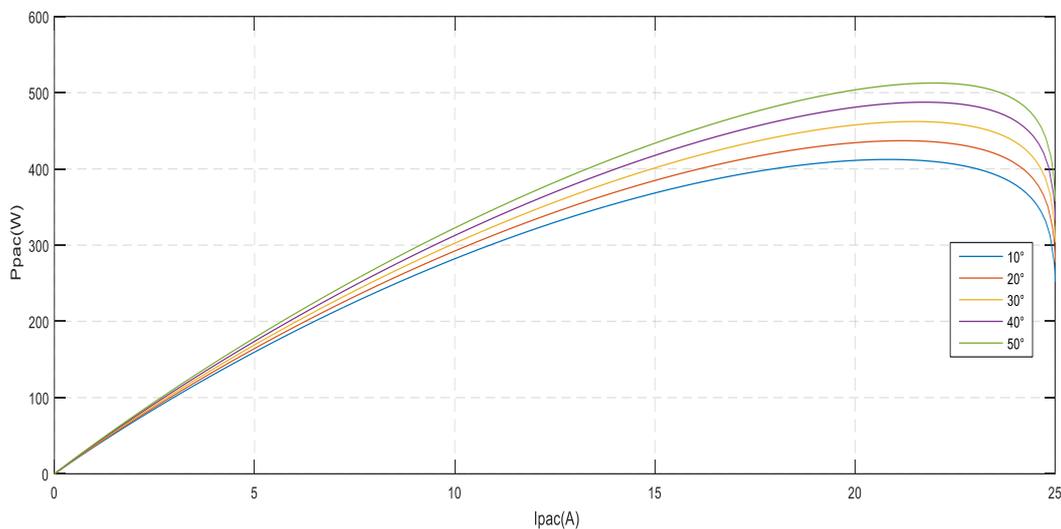


Figure III. 12: Caractéristique  $P_{pac} = f(I_{pac})$  de la pile PEMFC

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.

### 3.4. Influence de la température

L'influence de la variation des paramètres d'entrées de la pile sur son bon fonctionnement. les figures qu'on voit ci-dessous représentent les caractéristiques (V-I) et (P-I) pour différentes températures  $T$  (°C) = 10, 20, 30, 50. Elles représentent l'influence de la variation de la température ambiante sur la tension et puissance de la pile à combustible.

Figure III. 13: Influence de la température  $V_{pac} = f(I_{pac})$ Figure III. 14: Influence de la température  $P_{pac} = f(I_{pac})$ 

Nous remarquons sur la figure (III.13), qu'il y a une relation proportionnelle entre la température et la tension, l'augmentation de la température augmente la tension, parce que l'augmentation de la température de fonctionnement provoque la diminution de la résistance ohmique de l'électrolyte. La densité de puissance varie selon la variation de la température comme montre la figure (III.14).

L'augmentation de la température permet, d'une part, d'améliorer les cinétiques électrochimiques (vitesse) des réactions au niveau des électrodes et donc de diminuer les pertes d'activation. D'autre part elle améliore la diffusion des gaz dans les électrodes et permet d'augmenter le courant limite de la pile. Enfin, elle contribue à diminuer les pertes ohmiques dans la membrane grâce à l'augmentation de la conductivité ionique de cette dernière.

Cependant, une température élevée va voir tendance à assécher la membrane et donc à augmenter des pertes ohmiques (par l'augmentation de sa résistance).

#### 4. Caractéristiques d'électrolyseur

La figure (III.15) représente la variation de la tension en fonction de courant avec une température constante  $T= 25\text{ C}^\circ$ . D'après cette courbe que les caractéristiques d'électrolyseur sont non linéaires, On peut distinguer trois parties différentes sur la courbe caractéristique V-I, la première partie la tension augmente en une fonction exponentielle et immédiatement, la deuxième partie elle se manifeste sous forme linéaire, et dans la dernière partie la forme du signal de la tension se présente sous forme non linéaire.

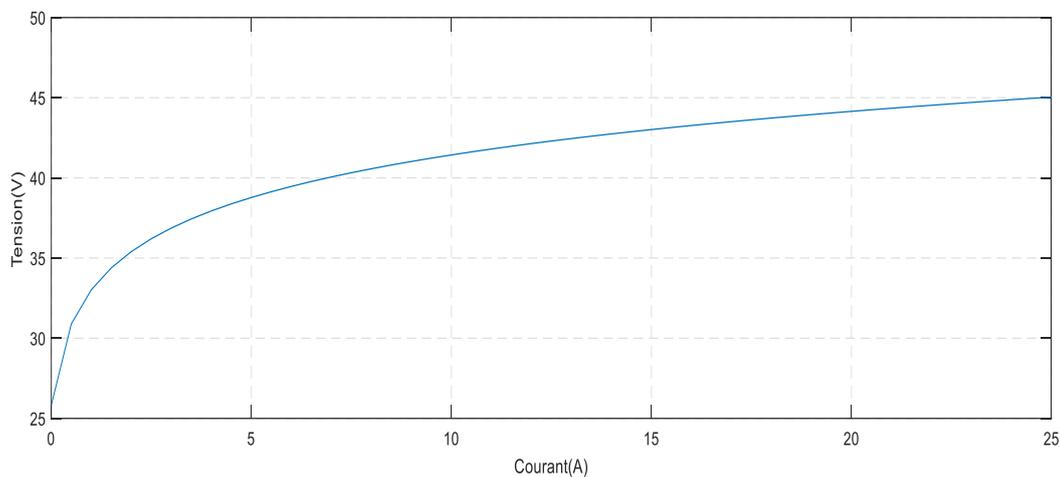


Figure III. 15: Caractéristique V-I d'électrolyseur

#### 4.1. Influence de la Température

L'électrolyseur est sensible à la température. Pour voir l'influence de cette dernière, nous avons tracé les caractéristiques  $I_{pv}$ - $V_{pv}$  comme la figure (III.16), pour des différentes températures.

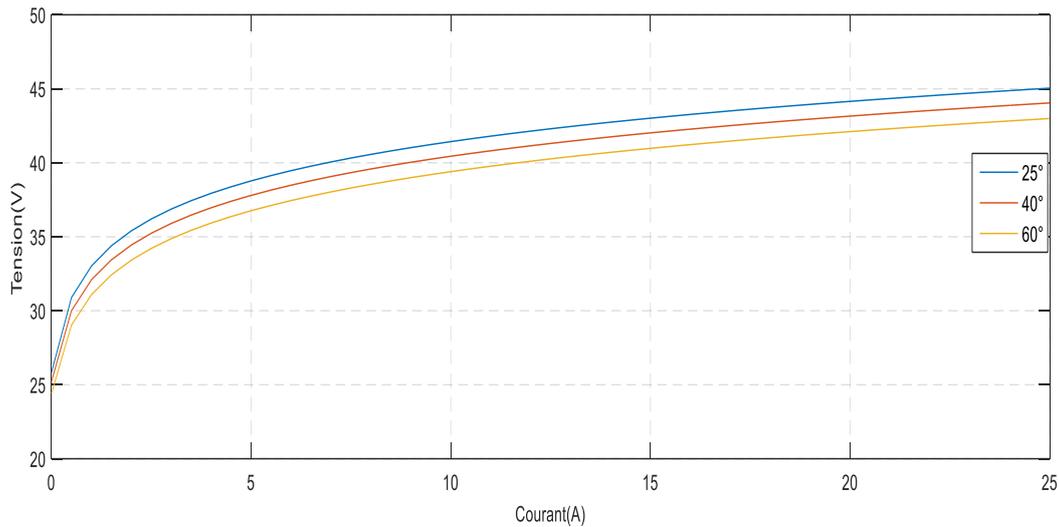


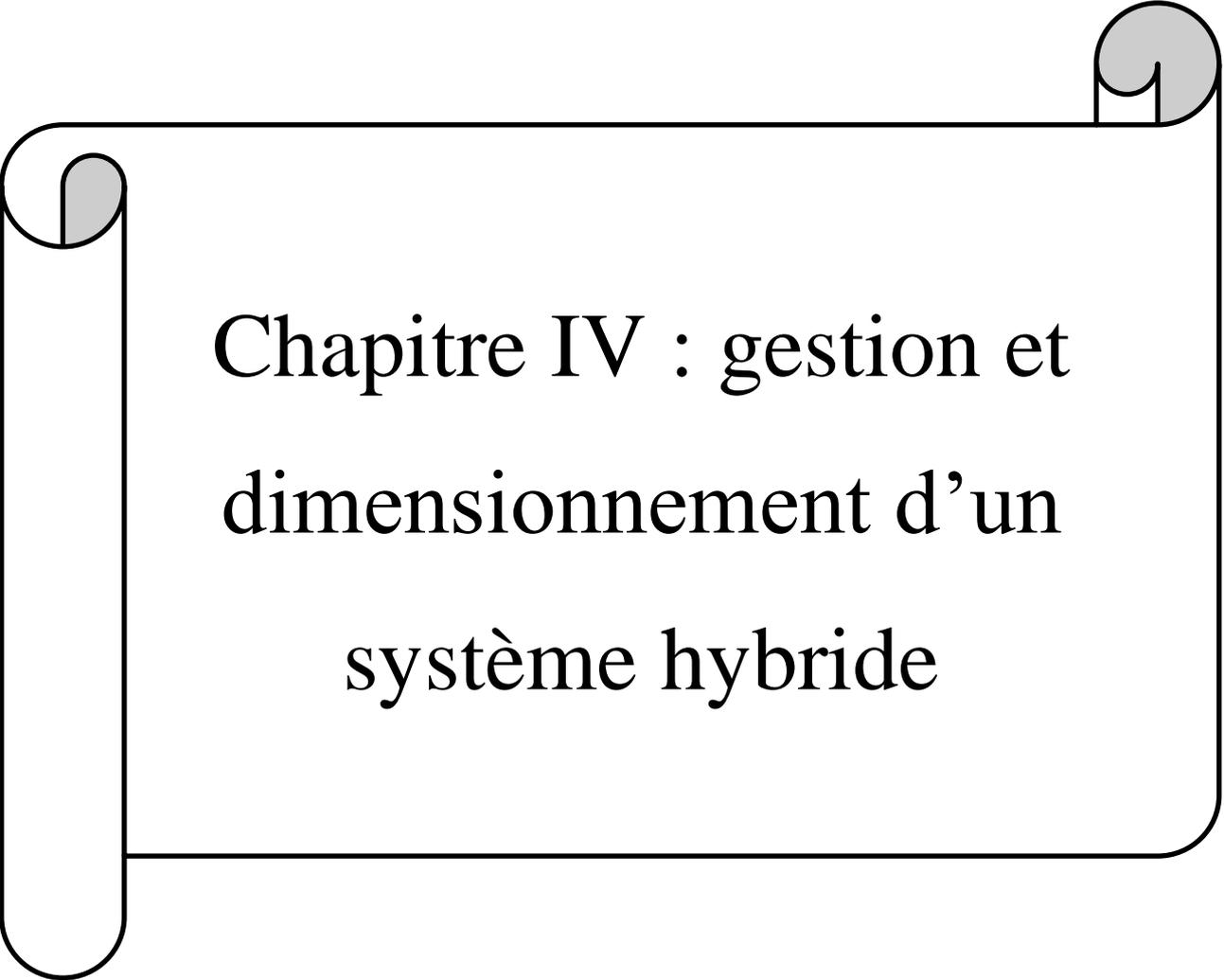
Figure III. 16: influence de la température sur la caractéristique I-V de l'électrolyseur

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

## 5. Conclusion

La simulation des systèmes (PV, PEMFC, Batterie, Electrolyseur...) a montré le bon fonctionnement de chacun. Après les résultats on voit que la température affecte le fonctionnement du PV, PAC, Batterie, électrolyseur. Et que la MPPT optimise la puissance du PV.

Dans le chapitre suivant on procédera à la simulation du système global et à voir comment faire une bonne gestion de la puissance produite par les différentes sources de notre système hybride.



Chapitre IV : gestion et  
dimensionnement d'un  
système hybride

## 1. Introduction

Etant donné que notre système a hybride des sources d'énergie, donc il présente l'avantage de gestion de production et de stockage, la nécessité de cette dernière se manifeste par la nature aléatoire des conditions climatiques.

Pour cette raison on propose dans ce chapitre une stratégie de gestion de l'énergie entre les éléments du SEH (PV/PAC/batteries), tout en extrayant le maximum de puissance.

## 2. Le concept du système hybride proposé

Le système d'énergie hybride basé sur de nouvelles technologies s'est avéré être une solution réalisable pour la production d'électricité autonome dans des endroits éloignés.

Dans le système étudié (Figure VI. 1), le champ photovoltaïque (PV) alimente directement l'utilisateur. L'excédent d'électricité est d'une part stockée dans des batteries et d'autre part utilisé pour alimenter un électrolyseur (EL) qui dissocie l'eau en hydrogène et oxygène. Le gaz est stocké sans perte quel que soit le temps de stockage. Lorsque le champ photovoltaïque ne peut pas fournir la totalité de la demande d'électricité, la pile à combustible est connectée. Elle régénère l'électricité stockée en recombinaison l'hydrogène et l'oxygène. La pile à combustible (ou FC pour Fuel Cell) produit de l'eau pure qui est stockée pour approvisionner l'électrolyseur.

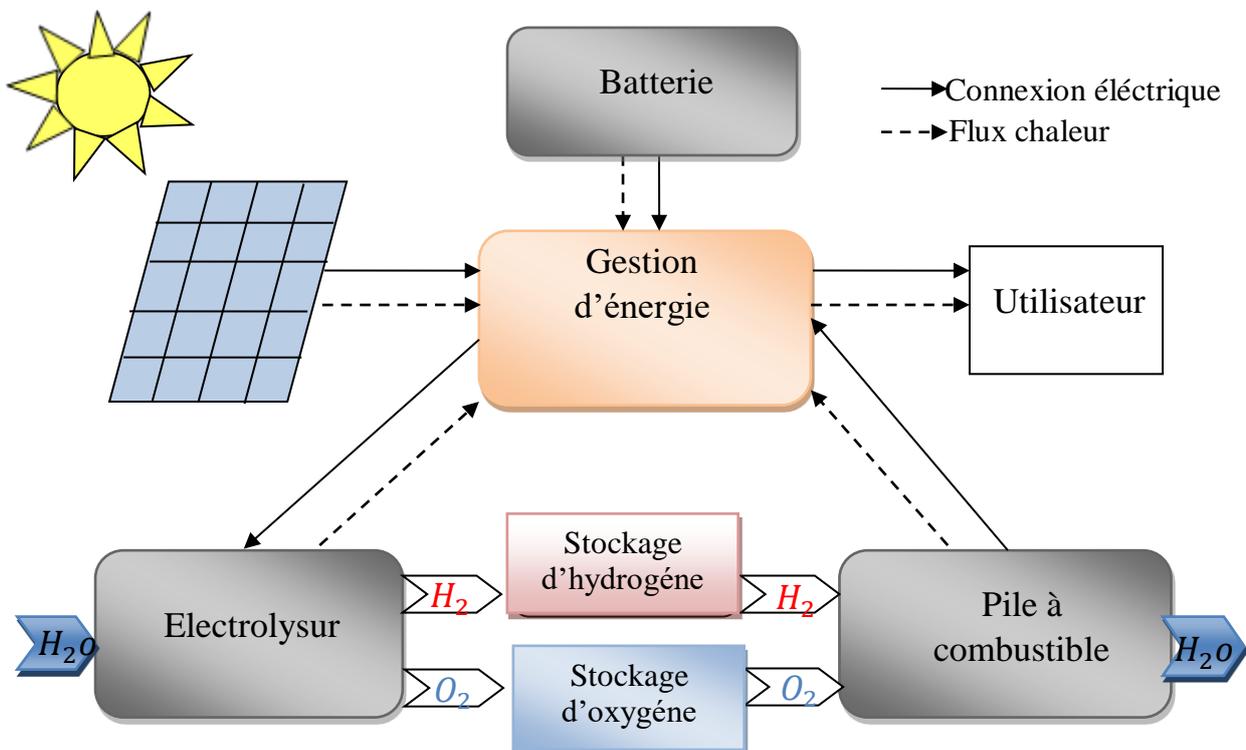


Figure VI. 1: concept du système hybride

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

La commande de gestion de l'alimentation fonctionne pour charger les batteries ou pour charger l'électrolyseur lorsqu'il y a un surplus de puissance produite par le PV et utilise la PEMFC lorsque la puissance n'est pas disponible au PV.

On propose dans ce travail 06 modes de fonctionnement pour déterminer la capacité du système hybride à satisfaire la puissance totale demandée (la puissance de charge plus la puissance nécessaire pour charger les batteries) et cela en fonction des conditions atmosphériques (ensoleillement, température).

#### Mode 1 :

$P_{pv} = P_{ch}$  : la charge sera alimentée directement par le GV.

#### Mode 2 :

$DP > 0$  ,  $SOC \geq SOC_{max}$  et  $NH_2 \geq NH_2Q_{max}$  : la charge sera alimentée par le Gv et le surplus d'énergie alimente la charge supplémentaire .

#### Mode 3 :

$DP > 0$  ,  $SOC \geq SOC_{max}$  et  $NH_2 < NH_2Q_{max}$  : la charge sera alimentée par le Gv et le surplus sera utilisé pour produire l'hydrogène .

#### Mode 4 :

$DP > 0$  ,  $SOC < SOC_{max}$  : la charge sera alimentée par le Gv et le surplus est utilisé pour charger les batteries .

#### Mode 5 :

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

#### Mode 6 :

$DP < 0$  ,  $SOC < SOC_{min}$  et  $QH_2 \geq QH_2Q_{min}$  : le générateur ne pourra pas alimenter la charge les batteries sont déchargées on appelle la Pac pour compléter le déficit d'énergie .

#### Mode 7 :

$DP < 0$  ,  $SOC < SOC_{min}$  et  $QH_2 < QH_2Q_{min}$  : la charge sera détachée .

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

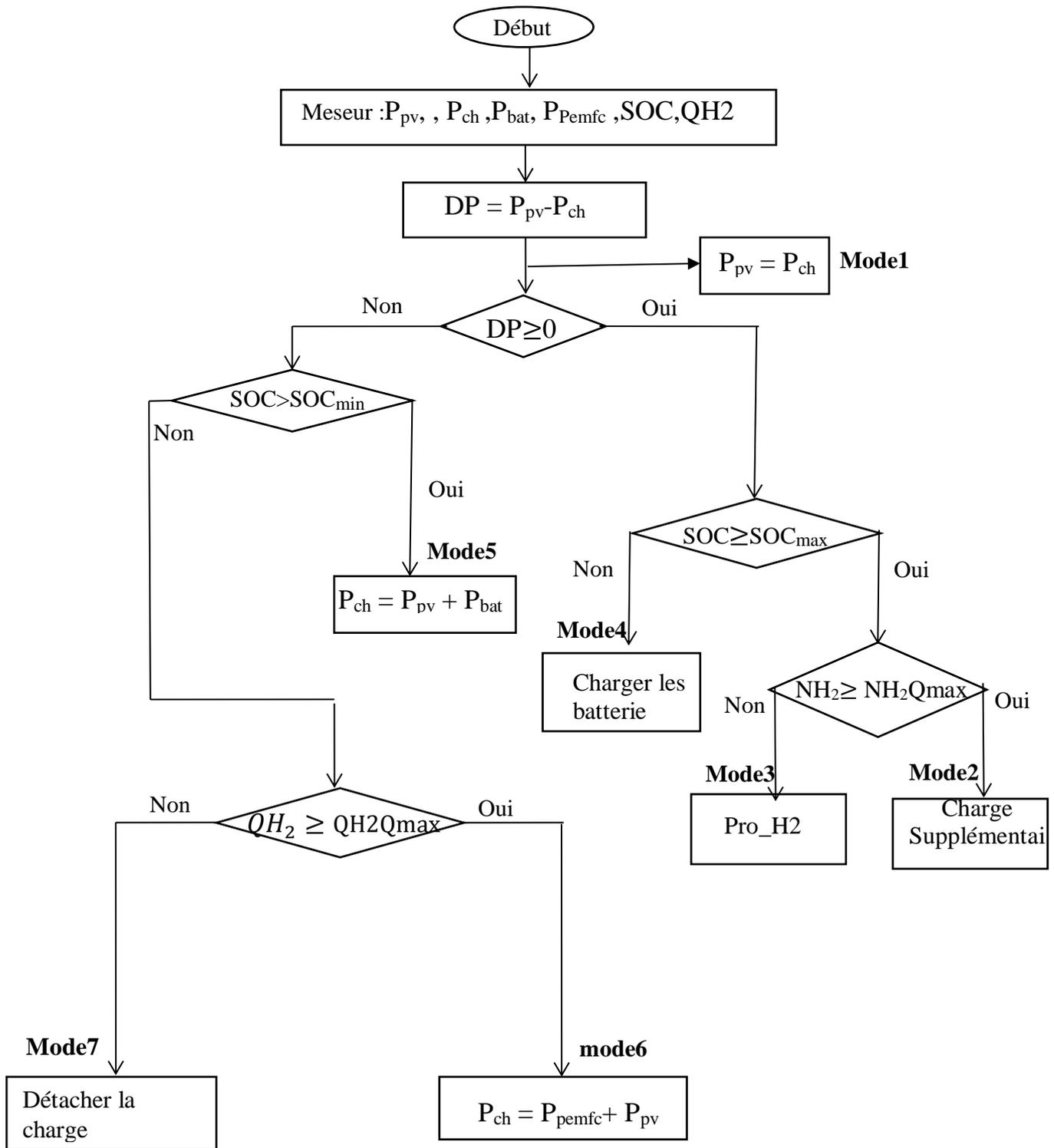


Figure VI. 2: Organigramme de gestion d'énergie du système hybride

#### 4. Interprétation des résultats obtenus par la simulation

Après avoir d'un source d'énergie, rajouté les composants nécessaires au fonctionnement du système, à savoir le hacheur Buck-Boost et le hacheur Boost, avec la charge dérivative, inséré les profils de charge (figure IV.3), et d'ensoleillement (figure IV.4), est profile de la température (figure IV.5), Pendant deux jours assez différents, on est ensuite passé à la simulation en fixant le pas de cette dernière à 48s qui est réellement équivalent à 48h.

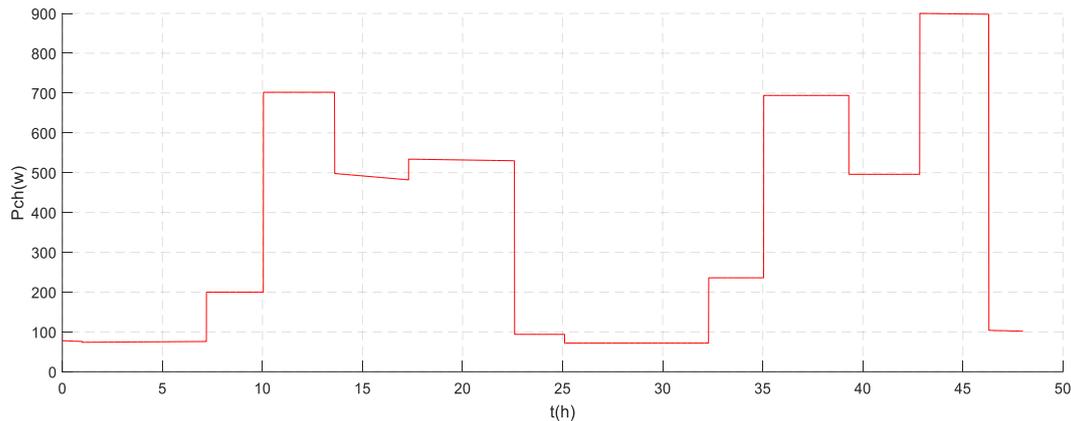


Figure VI. 3: Profil de puissance demandée par la charge.

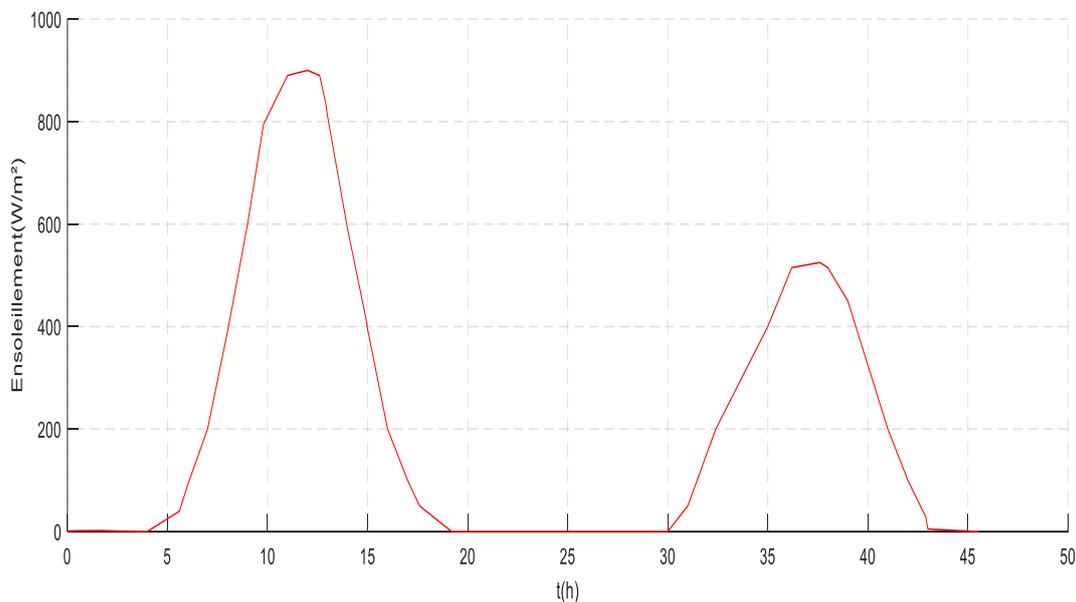


Figure VI. 4: Profile de l'ensoleillement.

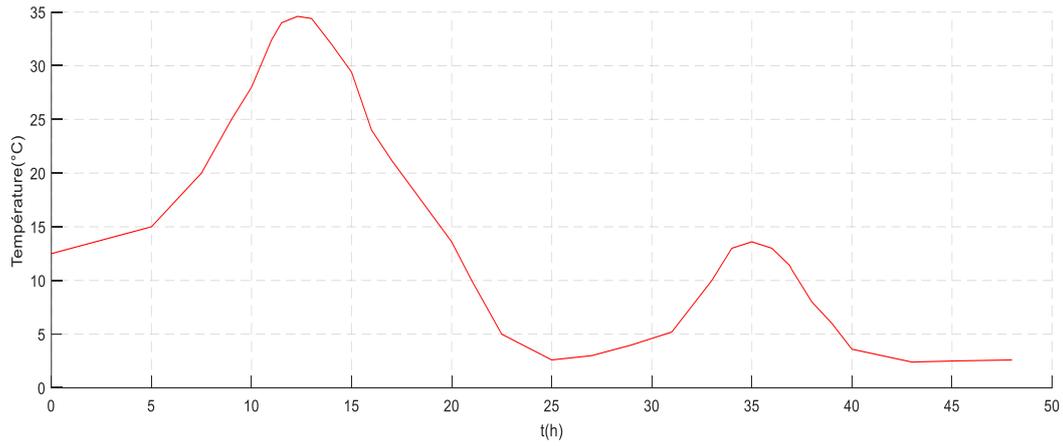


Figure VI. 5:Profile de la température

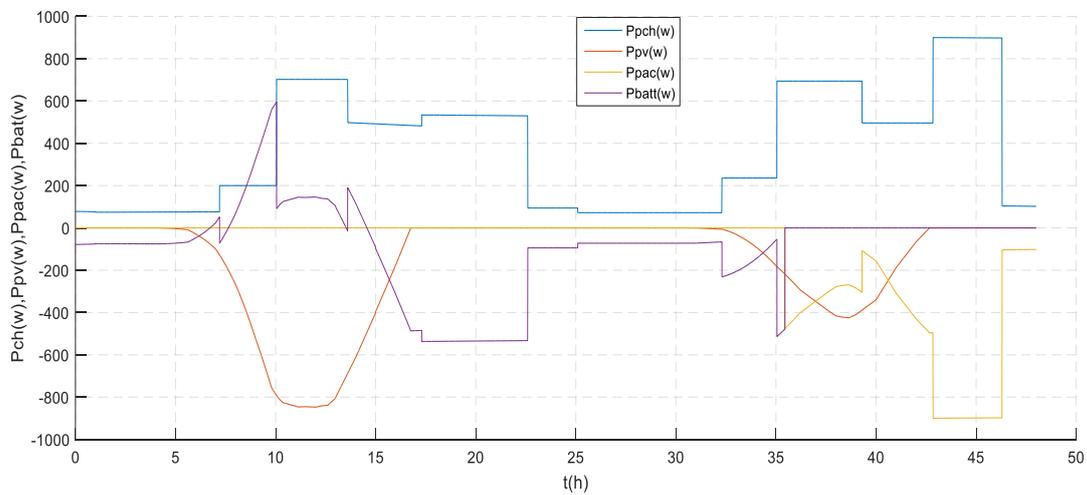


Figure VI. 6: Allures des puissances (Photovoltaïque, charge, batterie, pile à combustible)

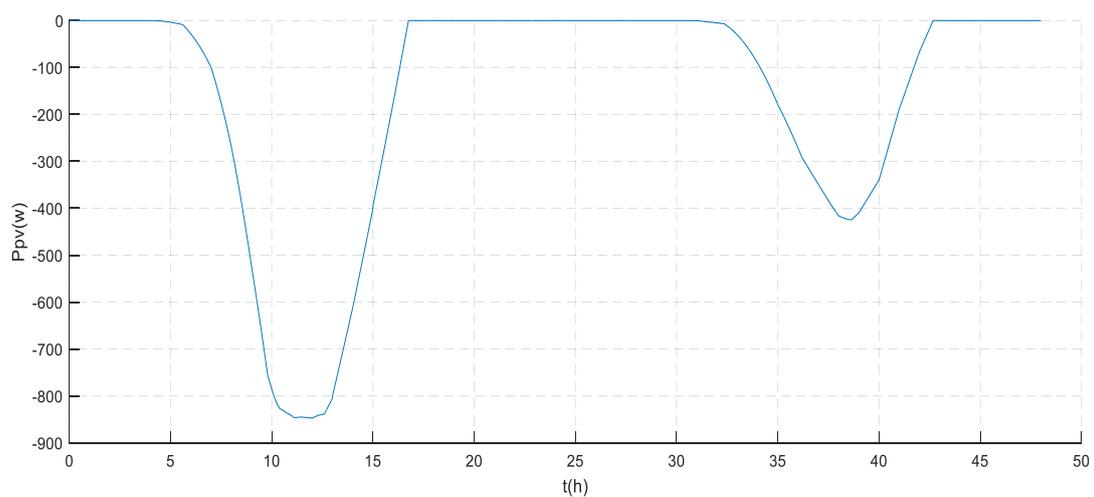


Figure VI. 7: la puissance des panneaux PV

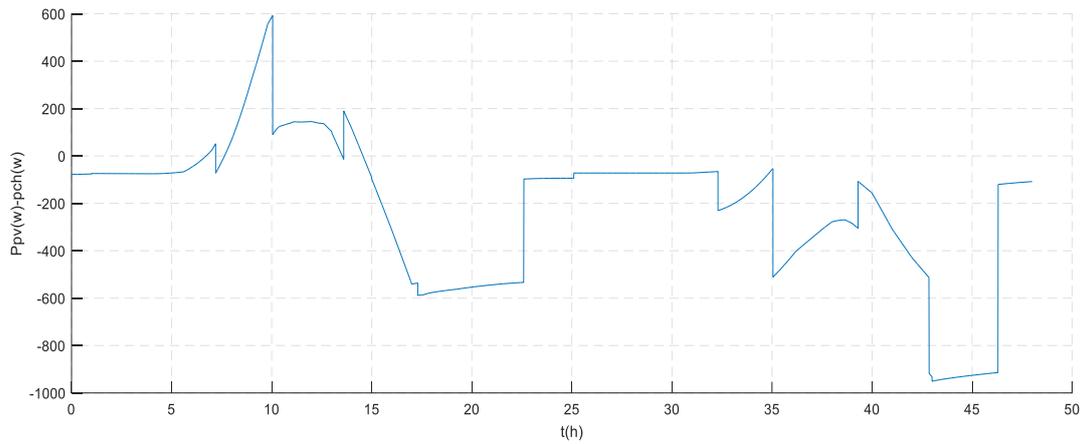


Figure VI. 8: La différence entre la puissance  $P_{pv}$  et  $P_{ch}$

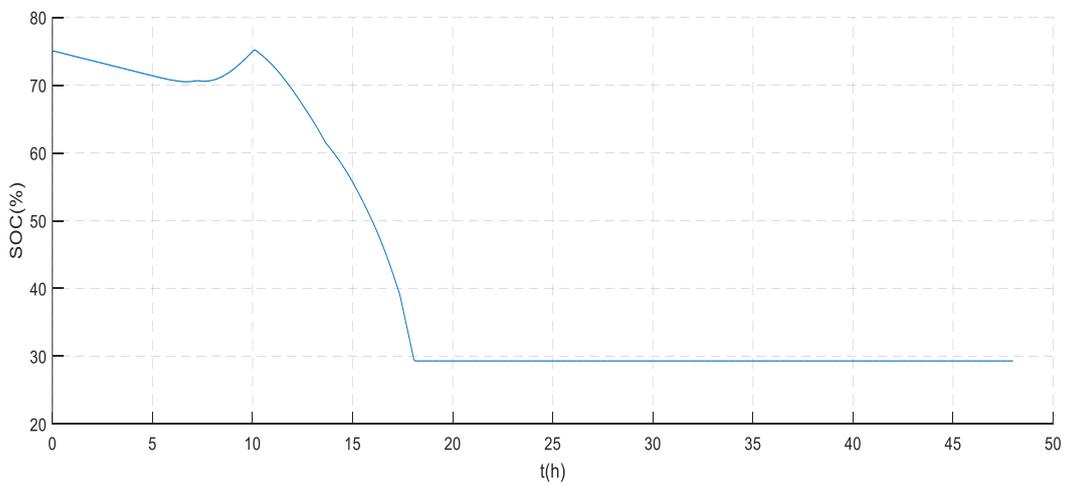


Figure VI. 9: l'état de charge de la batterie

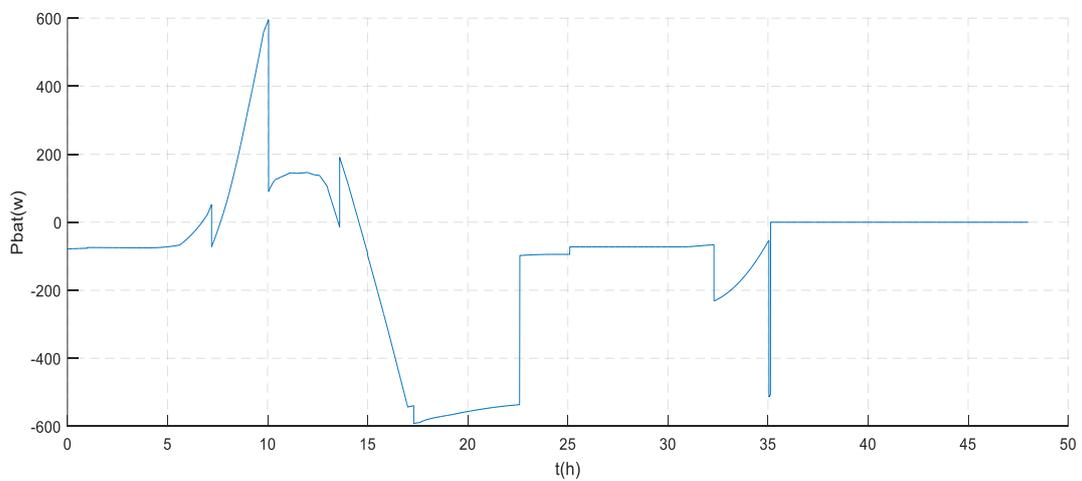


Figure VI. 10: la puissance de la batterie

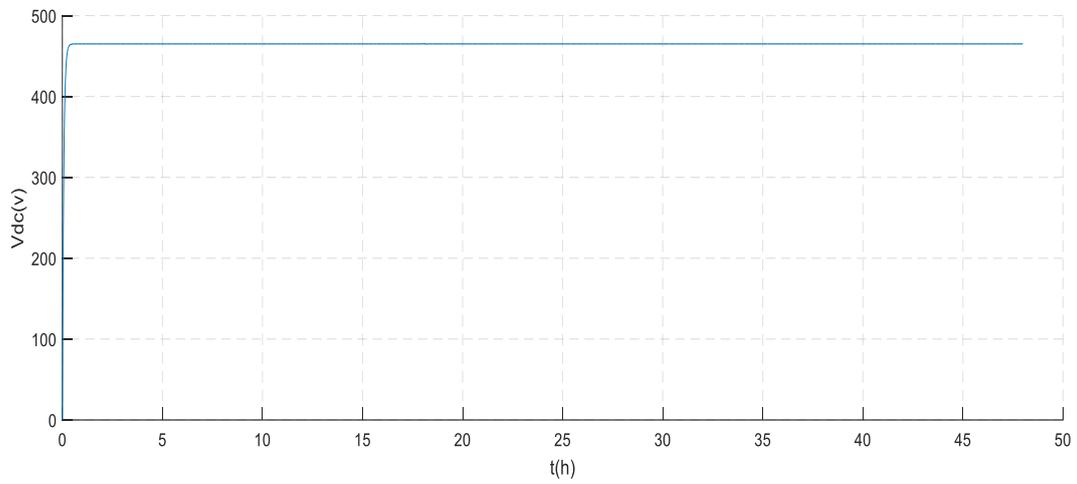


Figure VI. 11: Tension du bus continu

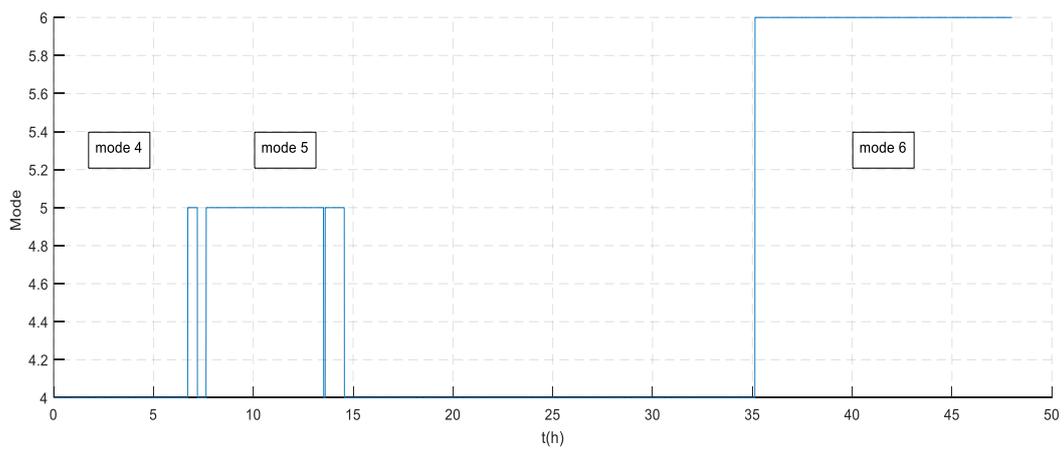


Figure VI. 12: Mode de fonctionnement.

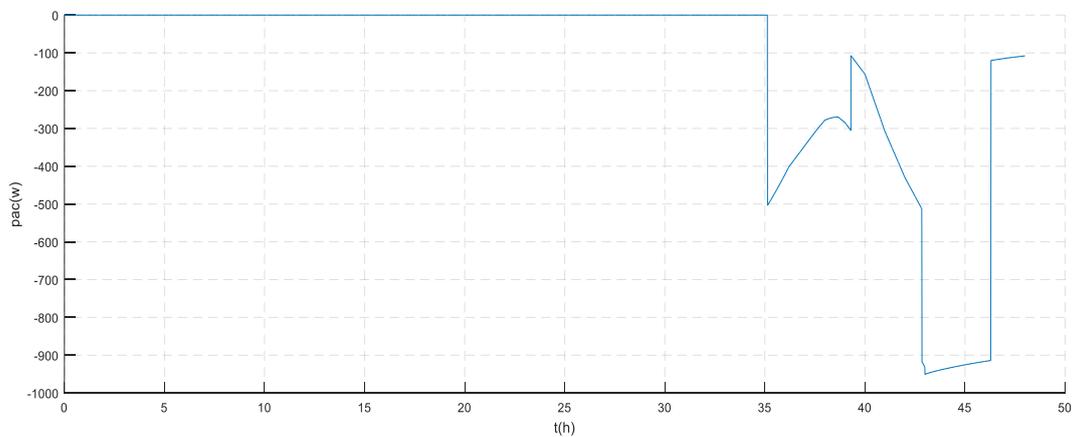


Figure VI. 13: la puissance de la pile à combustible

#### 4.1 Interprétation de résultats :

Les résultats de simulation sont obtenus sous conditions climatique variable durant deux jours successifs figures tel que la première présente un fort ensoleillement, la deuxième journée est caractérisée par un faible ensoleillement. Aussi le test a pris en considération la variation de la charge pendant ces deux jours comme est présenté dans la figure (IV.3).

La figure (IV.5) présente la puissance optimale extraite des générateurs (photovoltaïque) grâce aux contrôleurs MPPT.

La figure (IV.6) représente Les puissances ( $P_{pv}$ ,  $P_{ch}$ ,  $P_{bat}$ ,  $P_{pac}$ ) totales fournissent par le système hybride ( $P_{hyb}$ ), la puissance demandée par la charge ( $P_{ch}$ ) et le courant de la batterie ( $P_{bat}$ ), la puissance de pile à combustible ( $P_{pac}$ ).

D'après la figure (IV.6) des puissances représentées, nous déduisons les différentes phases :  
Phase1  $t \in ([0h, 7h])$  la puissance délivrée par le générateur PV et la puissance demandée par la charge ( $P_{ch}$ ) est pratiquement égale à zéro pendant cette période. Par conséquent le GPV est incapable de répondre à la demande de puissance de charge qui varie entre 100W et 200W.

Phase2  $t \in ([6h, 8h])$  Pour une journée d'hiver l'ensoleillement commence vers 8h donc des panneaux ne produisent pas ( $P_{pv}=0$ ), l'alimentation de la charge se fait à partir des batteries.

Phase3  $t \in ([8h, 10h])$  : L'ensoleillement commence à apparaitre le système de gestion détecte cette phase mais la puissance photovoltaïque est insuffisante pour satisfaire la charge, l'état des batteries est supérieur au  $SOC_{min}$ . Les deux puissances s'ajoutent alors et c'est le mode de compensation qui apparait (Mode 5).

Phase4  $t \in ([10h, 18h])$  : l'éclairement diminue donc la puissance photovoltaïque diminue est L'énergie fournit par le système hybride n'est pas suffisante pour répondre aux besoins de la charge

Phase5  $t \in (18h, 35h])$  : dans cette phase la puissance photovoltaïque est encore diminuée et la batterie l'état de charge (30%). on fait appel à la pile à combustible qui va contribuer pour satisfaire la puissance demandée de la charge c'est le mode 6 qui apparait.

Phase6  $t \in ([35h, 48h])$  : l'éclairement diminue donc la puissance photovoltaïque diminue, L'énergie fournit par le système hybride n'est pas suffisante pour répondre aux besoins de la charge est la batterie l'état de charge (30%), alors c'est le mode de détacher la charge c'est le mode 7 qui apparait.

la figure (IV.7) la première étape : l'éclairement augmente donc la puissance  $P_{pv}$  augmente  
deuxième étape : l'éclairement diminue donc la puissance  $P_{pv}$  diminue

la figure (IV.8) la différence entre la puissance  $P_{pv}$  et  $P_{ch}$  On remarque que la variation demande la charge par rapport la puissance de produit par  $P_{pv}$ .

On peut constater l'efficacité du superviseur tel qu'on remarque sur la figure (IV.9) l'état de charge des batteries selon la disponibilité de la puissance produite par les générateurs tout en restant entre(30%-90%)de la charge totale de la batterie.

la figure (IV.10) montre l'évolution de la puissance du la batterie On remarque que la puissance augmente l'étas de charge (90%) de la batterie après diminue la puissance donc la batterie l'étas décharge (30%).

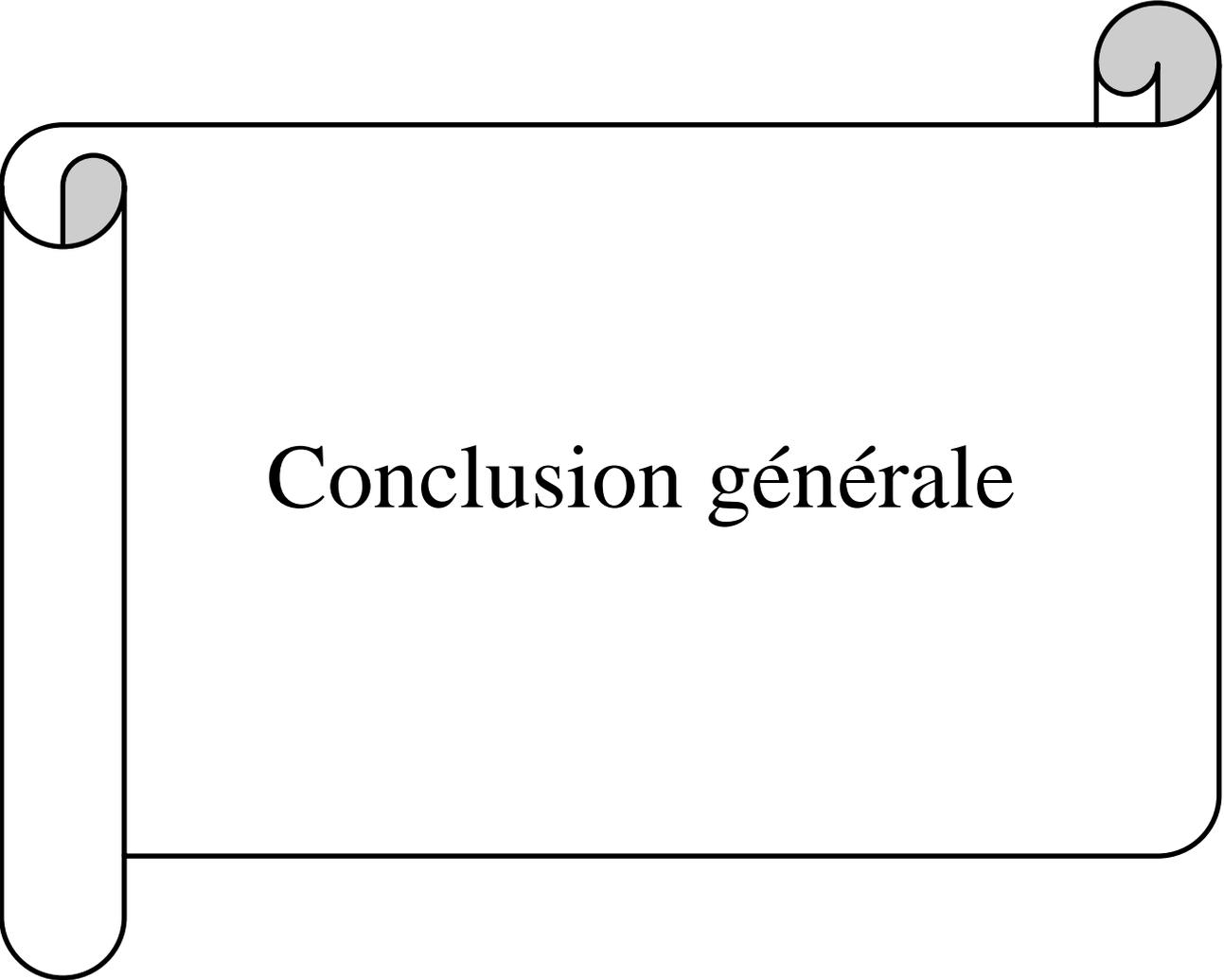
La figure (IV.11) montre l'allure de bus continu qui reste constant et varie peu avec la variation de la charge.

On remarque sur la figure (IV.12) la variation des modes de fonctionnement en fonction des variations des conditions climatiques et le profile de charge ce qui a permis 3 mode fonctionnement.

La figure (IV.13) présente la variation de la puissance pile à combustible, lorsque la puissance photovoltaïque diminue et L'énergie fournit par le système hybride n'est pas suffisante pour répondre aux besoins de la charge ,on fait appel à la pile à combustible qui va contribuer pour satisfaire la puissance demandée de la charge.

## 5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats de simulation du système étudié. Nous avons utilisé une méthode MPPT pour extraire le maximum de puissance et d'énergie. Globalement la simulation nous a permis d'évaluer le comportement général de l'ensemble des composants pour deux journée, été et hiver. L'utilisation d'un système de gestion permet de faire fonctionner le système dans les meilleurs délais, avec la stratégie de contrôle qui a été établie, il détermine la puissance disponible par le générateur photovoltaïque et la puissance de charge demandée. Quand le générateur photovoltaïque n'a pas la puissance suffisante pour alimenter la charge, les batteries ajoutent leurs puissances pour compléter le manque de puissance du générateur photovoltaïque.



Conclusion générale

### Conclusion Générale

Le travail présenté dans ce mémoire est un projet de fin d'étude qui traite l'optimisation et la gestion d'énergie dans un système hybride à énergie propre non connecté au réseau composé d'un générateur photovoltaïque et pile à combustible avec stockage alimentant un site isolé (charge).

Le premier chapitre, a été consacré à l'étude générale des différents composants de notre système hybride et le deuxième à la modélisation des différents éléments de la chaîne de conversion hybride (PV, Pile, Batterie, Electrolyseur ainsi que les Convertisseurs). Le troisième chapitre a traité la simulation de chaque sous système en utilisant le logiciel Matlab ce qui a permis de voir l'influence des conditions climatiques sur les sources d'énergie. Afin d'exploiter le PV au maximum, et d'extraire la puissance maximale dans ce dernier, on a présenté et simulé une technique MPPT qui est Perturbation et observation (P&O), qui a réussi d'après nos résultats à obtenir le maximum de puissance des PV quel que soit les changements climatiques.

Le système hybride avec sa complexité (présence de différentes sources d'énergies) nécessite un algorithme de gestion qui permet de gérer convenablement le système pour assurer son bon fonctionnement. Cependant, dans le dernier chapitre, on a procédé à la simulation du système global avec un algorithme de gestion qui a pour rôle de gérer le flux d'énergie entre les différentes sources constituant le système global. Les résultats de simulation montrent la diversification des modes de fonctionnement l'efficacité de notre Algorithme. Nous pouvons conclure que les résultats de simulation sont en concordance avec la gestion proposée. Ce dernier montre la flexibilité et le bon fonctionnement du système de gestion proposé, sous différentes conditions météorologiques.

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

- Utiliser d'autres techniques *MPPT* pour le suivi de la puissance maximale du générateur photovoltaïque.
- Gérer ce système hybride en utilisant les techniques de l'intelligence artificielle.

### **Bibliographie :**

- [1] A. TRAORE « Gestion D'un Système Autonome Hybride Photovoltaïque Eolien Pour Applications Agricoles » Thèse de doctorat , l'Université du Québec à Trois-Rivières, 2016.
- [2] I. Vechiu, « modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome ». Thèse de doctorat, Université du Havre, le 15 /12/2005.
- [3] M. Sadaoui, M. Meddouri «Gestion d'énergie dans un système hybride (Photovoltaïque -Eolien) » .Mémoire de master en électrotechnique, Université – Bejaia, 2012.
- [4] A. BORNİ, « Étude Et Optimisation D'un Multi Système Hybride De Conversion D'énergie Electrique ». Thèse doctorat, université Constantine ,2015.
- [5] C. DARRAS, « Modélisation de systèmes hybrides photovoltaïque/hydrogène: applications site isolé, micro-réseau et connexion au réseau électrique dans le cadre du projet PEPITE (ANR PAN-H)». Thèse de doctorat. Université Pascal Paoli, 2010.
- [6] N. Achab « Contribution à l'étude technico-économique et évaluation comportementale de système photovoltaïque-électrolyseur-PACet reformeur-PAC». Mémoire de magister Université de MOHAMED BOUDIAF- Oran,2013.
- [7] L. Stoyanov « Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables ». Thèse de doctorat à l'Université Technique de Sofia, 2011.
- [8] R. DJENNADIR, N. BOUKHENTACHE «Modélisation et simulation d'une commande MPPT d'un système photovoltaïque». Mémoire de Master . Université de A.MIRA-BEJAIA , 2021.
- [9] M FRADJ K MECHERI K «Etude et gestion d'un système hybride ». Mémoire de master. Université de kasdi merbah ouargla,2019.
- [10] M DAHEUR et S TAINI A. Elmouiz«Etude et simulation du système hybride PV/ Pile à combustible/Batteri». Mémoire de master. Université de kasdi merbah ouargla,2020.
- [11] THOUVEREZ Pierre, « Des avancées majeures pour le photovoltaïque organique », sur techniques-ingenieur.fr, 6 février 2017.
- [12] R. MAOUADJ «Application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et de Bouzareah ». Mémoire de magister Université de Tlemcen,2005.
- [13] S.BENSMAIL «Contribution à La Modélisation Et à l'Optimisation Des Systèmes Photovoltaïque» . Mémoire de magister Université de A.MIRA-BEJAIA , 2012.
- [14] A. TOULAIT, R. Aili «Modélisation et simulation sous MATALAB/SIMULINK d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT». Mémoire de master .Université de Tizi Ouzou-Mouloud Mammeri,2014.
- [15] L. Debou , D. Maghribi. «Commande d'un système hybride (photovoltaïque éolienne) de production d'énergie » . Mémoire d'ingénieure d'état. Université de bejaia,2008.

## Bibliographie

---

- [16] CANDUSSO, Denis. «Contribution à l'expérimentation de générateurs à piles à combustible de type PEM pour les systèmes de transport». Thèse de doctorat ,École normale supérieure de Cachan-ENS Cachan , 2013.
- [17] Boudellal, Méziane ,«La pile à combustible: structure, fonctionnement, applications»,Dunod ,2007.
- [18] K. KORDESCH , G. SIMADER, «Fuel Cells and Their Applications, ed VCH,Fuel Cell Handbook (5<sup>ième</sup> edition) EG&G services», Parson, Inc. Science Applications, International Corporation (CD ROM), 1996.
- [19] M. Hammoum, H. Thafsouth, «Modélisation et simulation d'une pile à combustible (SOFC) », Diss. Université Mouloud Mammeri, 2012.
- [20] EL H. AGLZIM, « Caractérisation par spectroscopie d'impédance de l'impédance complexe d'une pile à combustible en charge ». Thèse de doctorat de l'Université Henri Poincare-Nancy1, 2009.
- [21] E.M. Natsheh « Hybrid Power Systems Energy Management Based on Artificial Intelligence » Thèse Doctorat, Université Manchester Métropolitain, July 2013.
- [22] S. AIT MAHREZ,B. ADJEROUD «Gestion optimale d'énergie d'un système PV/PAC avec stockage d'hydrogène ». Mémoire de master .Université Saâd Dahleb, Blida,2020.
- [23] H. Essakhi, «modélisation et simulation d'un module photovoltaïque», LASIME, ESTA Université Ibn Zohr, BP 33 (2019).
- [24] Y. Belkhier, M. Ait «Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque » .Mémoire de master .Université Abderrahmane Mira de Bejaia,2021.
- [25] N. Tlili, B. Neily, and F. Ben Salem. «Modeling and simulation of hybrid system coupling a photovoltaic generator, a PEM fuel cell and an electrolyzer (Part I). » 2014 IEEE 11th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD14). IEEE, 2014.
- [26] T. AZIB « Contribution à l'Etude d'Electro-générateurs à Pile à Combustible ».Conceptions d'Architectures et de Leurs Commandes thèse de doctorat université paris-sud XI 2010.
- [27] 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 protonexchange membrane fuel cell stack, Journal of Power Sources, Vol.49, 1-3, 1994, 349-356.
- [28] M. HATTI « Contribution à l'Étude des Systèmes Hybrides Photovoltaïque/Pile à Combustible ». Thèse Doctorat Es Science, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran "Mohamed Boudiaf", 2010.
- [29] H. Yasuhito, K.Koji, « Modeling of a Hybrid System of Photovoltaic and Fuel cell for Operational Strategy in Residential Use ».47th International Universities Power Engineering

## Bibliographie

---

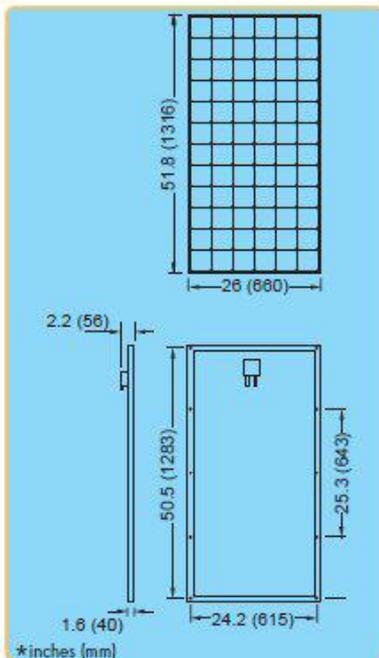
Conference (UPEC).2012.

- [30] J. Padulles, G.W. Ault and J.R. McDonald, «An Integrated SOFC Plant Dynamic Model for Power Systems Simulation», Journal of Power Sources, Vol. 86, N°1, pp. 495 - 500, 2000
- [31] M. Uzunoğlu , M.S. Alam, «Dynamic, Modeling, Design, and Simulation of a Combined PEM Fuel Cell and Ultracapacitor System for Stand-Alone Residential Applications», IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 21, N°3, pp. 767 - 775, 2006.
- [32] Ulleberg, Øystein. "Modeling of advanced alkaline electrolyzers: a system simulation approach." International journal of hydrogen energy 28.1 (2003): 21-33.
- [33] 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
- [34] H. Yasuhito,Koji «Modeling of a Hybrid System of Photovoltaic and Fuel cell for Operational Strategy in Residential Use » 47th International Universities Power Engineering Conference (UPEC),2012
- [35] Rupendra Kumar Pachauri; Yogesh K. Chauhan «Hydrogen generation/pressure enhancement using FC and ANN based MPPT assisted PV system »28-29 November 2014 IEEE Electrical Engineering Department, School of Engineering, Gautam Buddha University, Greater Noida, India
- [36] H. Ismail « Etude et gestion d'un système d'énergie hybride ». Mémoire de Magister, Université de BEJAIA, 15/12/2015.

## Shell SM110-24P Photovoltaic Solar Module

### Mechanical Specifications Module

A torsion and corrosion-resistant anodized aluminium frame ensures dependable performance, even under harsh weather conditions. Pre-drilled mounting holes are provided for ease of installation.



Outside dimensions (in)	51.8 x 26
Thickness (inc. junction box) (in)	2.2
Thickness (exc. junction box) (in)	1.6
Weight (lbs)	25.1

For installation instructions, please refer to the **Installation Manual** which is available from Shell Solar.

### Electrical Characteristics

#### Data at Standard Test Conditions (STC)

STC: irradiance level 1000W/m<sup>2</sup>, spectrum AM 1.5 and cell temperature 25°C

Rated power	$P_r$	110W
Peak power*	$P_{mpp}$ *	110W
Peak power voltage	$V_{mpp}$	35V
Peak power current	$I_{mpp}$	3.15A
Open circuit voltage	$V_{oc}$	43.5V
Short circuit current	$I_{sc}$	3.45A
Series fuse rating		10A
Minimum peak power	$P_{mpp\ min}$	104.5W
*Tolerance on Peak Power		±5%

The abbreviation 'mpp' stands for Maximum Power Point.

#### Typical data at Nominal Operating Cell Temperature (NOCT) conditions

NOCT: 800W/m<sup>2</sup> irradiance level, AM 1.5 spectrum, wind velocity 1m/s,  $T_{amb}$  20°C

Temperature	$T_{NOCT}$	45°C
Mpp power	$P_{mpp}$	80W
Mpp voltage	$V_{mpp}$	32V
Open circuit voltage	$V_{oc}$	40V
Short circuit current	$I_{sc}$	2.8A

#### Typical data at low irradiance

The relative reduction of module efficiency at an irradiance of 200W/m<sup>2</sup> in relation to 1000W/m<sup>2</sup> both at 25°C cell temperature and AM 1.5 spectrum is 7%.

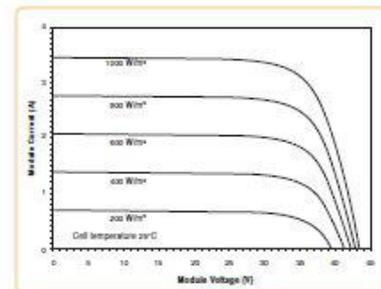
#### Temperature coefficients

$\alpha P_{mpp}$	-0.45 %/°C
$\alpha V_{mpp}$	-152 mV/°C
$\alpha I_{sc}$	+1.4 mA/°C
$\alpha V_{oc}$	-152 mV/°C

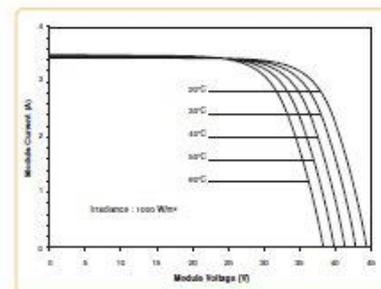
Maximum system voltage: 600 Vdc

### Typical I/V Characteristics

The I/V graph below shows the typical performance of the solar module at various levels of irradiance.



The I/V graph below shows the typical performance of the solar module at various cell temperatures.



References in this Product Information Sheet to 'Shell Solar' are to companies and other organizational entities within the Royal Dutch/Shell Group of Companies that are engaged in the photovoltaic solar energy business. Shell Solar was set up in 1999 and has its principal office in Amsterdam, the Netherlands.

For further information on all Shell Solar products contact:

**Shell Solar**  
4650 Adohr Lane, Camarillo CA 93012  
805-482-6800 Fax 805-388-6511  
Web [www.shell.com/renewables](http://www.shell.com/renewables)

V2/SM11024P/05/02/US



## Annexe

### Paramètre de la pile à combustible

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
	$a$	$-2.2 \cdot 10^{-3} \text{ V/K}$
	$B$	$1.87 \cdot 10^{-4} \text{ V/K.A}$
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	$C_{PAC}$	$10^4 \text{ J/Kg.K}$
Coefficient de transfert de chaleur	$H$	$20 \text{ (W/m}^2 \cdot \text{K)}$
Surface effective	$A$	$0.09 \text{ m}^2$

### Paramètres électrique d'un électrolyseur

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

### **3. Paramètres de la batterie plomb-acide**

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

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

La résistance interne de la batterie :  $R_s = 4\text{ m}\Omega$ .

## ملخص

تعد مصادر الطاقة المتجددة انظمة فعالة و نظيفة مقارنة بالمصادر الكلاسيكية' تعد خطوة واعدة جدا وهي مرتبطة بالطلب المتزايد على الطاقة بالعالم. ولكن نظر لطبيعة هذه الطاقات المضطربة لا يمكنها تأمين تغذية دائمة. الحل الأمثل هو الاعتماد على الانظمة الهجينة لضمان استمرار انتاج طاقة مع التخزين. في هذه المذكرة نحن مهتمون بدراسة نظام الطاقة الهجين 'والذي يتكون من الخلايا الكهروضوئية' و خلية الوقود و بطارية من اجل توفير الطاقة بشكل مستمر' يتم توفير الحمل بواسطة الألواح الشمسية و التحكم فيها بواسطة MPPT (متتبع نقطة الطاقة القصوى). يتم استخدام خلية الوقود او بطارية في حالة نظام الشمسي لا يستطيع تلبية متطلبات الحمل. وتظهر النتائج التي تم الحصول عليها باستخدام برنامج Matlab/Simulink .

**كلمات مفتاحية :** نظام هجين ' الطاقة الشمسية' بطارية' خلية و قود.

## Résumé

Les énergies renouvelables sont des systèmes efficaces et propres par rapport aux sources classiques. C'est une étape très prometteuse et est liée à la demande croissante d'énergie dans le monde. Mais à la nature de ces énergies turbulentes, ne peut garantir une alimentation durable, la solution optimale est de s'appuyer sur des systèmes hybrides pour assurer une production d'énergie continue avec stockage. Dans ce contexte, nous nous sommes intéressés à étudier la maturité de l'énergie hybride, constitué de panneaux photovoltaïque, pile à combustible et batterie. Afin d'économiser de l'énergie en permanence, la charge est fournie par des panneaux solaires et contrôlée par MPPT) Maximum Power Point Tracker), La pile à combustible ou la batterie est utilisée en cas ou le PV ne peut pas répondre aux exigences de charge. Les résultats obtenus sont affichés à l'aide du logiciel Matlab/Simulink.

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

## Abstract

Renewables are efficient and clean systems compared to classical sources. It is a very promising step and is linked to the growing demand for energy in the world. But looking at the nature of this turbulent energy, cannot secure lasting nutrition. The optimal solution is to rely on hybrid systems to ensure continuous energy production with storage. In this context, we are interested in studying the hybrid energy maturity, consisting of photovoltaics, fuel cell and battery. In order to save energy continuously ,the load is provided by solar panels and controlled by MPPT) Maximum Power Point Tracker) ,Fuel cell or battery is used in case of PV ripening that cannot meet load requirements. Results obtained are shown using Matlab/Simulink software.

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