

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Sciences Appliquées  
Département de Génie Electrique



Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et technologies

Filière : Génie électrique

Spécialité : Electrotechnique Industrielle

Présenté par :

FRADJ Mohammed

MECHERI Khair eddine

**Thème:**

# Etude et gestion d'un système hybride

Soutenu publiquement

Le : 07/07/2019

Devant le jury :

M<sup>f</sup> BENAOUADJ Mahdi

MCB

Président

UKM Ouargla

M<sup>f</sup> IDER Zahir

MAA

Encadreur/rapporteur

UKM Ouargla

M<sup>f</sup> TAIBI Djamel

MAA

Co-encadreur/rapporteur

UKM Ouargla

M<sup>f</sup> BOUHAFS Ali

MAA

Examineur

UKM Ouargla

Année Universitaire 2018/2019

# *Dédicace*

*Nous dédions ce modeste travail de mes années d'études  
en signe de respect et de reconnaissance*

*À celui qui a recherché et continue de chercher  
Pour nous : « nos pères »*

*À celle Qui m'a appris le sens de la vie, notre premier  
professeur : « nos mères »*

*À notre frères et notre sœurs*

*À ceux que nous aimé et ceux qui nous ont aimé*

*À la promotion d'électrotechnique industriel 2019*

*Nous dédions ce mémoire à toute nos famille et à nos  
chères amis chacun en son nom*

*Ceux qui m'ont aidé à réaliser ce modeste travail et pour  
leurs encouragements.*

*FRADJ Mohammed*

*&*

*MECHERI Khair eddine*

# *Remerciements*

*Louange à Allah celui qui nous donné la force d'achever  
ce travail*

*Nous sommes honorés d'adresser nos sincères  
remerciements et notre gratitude à tous ceux qui ont  
contribué à l'achèvement de ce modeste travail, en  
particulier au Mr IDER Zahir.*

*Il nous a guidé et nous a conseillé de développer ce  
travail.*

*Nous adressons également nos remerciements et notre  
reconnaissance au Mr TAJBI Djamel.*

*Nous remercions également les professeurs et toute la  
famille de la section d'électrotechnique industriel.*

*Nous remercions les membres du jury de leur intérêt à  
regarder ce travail modeste et à le corriger.*

*Enfin, nous voudrions également remercier nos chers  
amis et collègues et tous ceux qui nous ont aidés de près et  
de loin afin de réaliser ce travail.*

# Symboles et notations

## ***Panneaux***

$k_i$ : Coefficient de température de court-circuit de la cellule ( $A/K$ ).

$T_c$ : Température de la cellule en ( $K$ ).

$E$ : Eclairement absorbé par la cellule.

$E_{ref}$ : Eclairement de référence ( $1000 W/m^2$ ).

$I_0$ : Courant de saturation de la diode.

$V_t$ : Tension thermique.

$B$ : Facteur d'idéalité.

$K$ : Constant de Boltzman ( $1,38.10^{-23}J/K$ ).

$q$ : Charge de l'électron ( $1,6.10^{-19}C$ ).

$I_{pv}$ : Courant générer par la cellule photovoltaïque.

$I_{ph}$ : Photo courant créé par la cellule (proportionnel au rayonnement incident).

$I_d$ : Courant circulant dans la diode.

$I_{or}$ : Courant de court- circuit de la cellule à la température et l'éclairement de référence.

$P_{pv}$ : Puissance du générateur PV ( $W$ )

$T$ : Température de la jonction des cellules PV ( $K$ ).

$B$ : Facteur d'idéalité de la jonction.

$E_g$ : Énergie de gap ( $eV$ ).

$R_s$ : Résistance série symbolise la résistance de masse du matériau semi- conducteur, ainsi les résistances ohmiques et de contact au niveau des connexions des cellules.

$V_{pv}$ : Tension de sortie.

$I_p$ : Courant circulant dans la résistance  $R_p$ .

$R_p$ : Résistance shunt représente les fuites autour de la jonction p-n et sur les coins de cellule.

$E_m$ : Eclairement maximal du site ( $W/m^2$ ).

$t$ : Temps solaire en heure.

$t_0$ : Temps de la levée du soleil ( $6h$ ).

$I_m$ : Courant optimale (max).

$V_m$ : Tension optimale (max).

$A$ : la surface du module solaire.

$d$ : diode.

### Batterie

$Q_d$  : Quantité de charge manquante par rapport à  $C_{bat}$ .

$C_b$  : Capacité nominale de la batterie (**Ah**).

$R_s$  : Résistance série de la batterie ( **$\Omega$** )

$E_{bat}$  : Energie de la batterie (**Wh/jour**).

$N_j$  : Nombre de jour d'autonomie de la batterie.

$\eta_{bat}$  : Rendement de la batterie.

$D$  : Profondeur de la batterie.

$V_{bat}$  : Tension de la batterie.

$E_0$  : f.e.m de la batterie (**V**).

$E_0'$  : f.e.m de group des batteries (**V**).

$C_0'$  : Capacité nominale de group des batteries (**Ah**).

$R_s'$  : Résistance série de group des batteries ( **$\Omega$** ).

$V_{dc}$  : Tension de bus (**V**).

$V_{dc, ref}$  : Tension de référence (**V**).

$I_b$  : Courant de batterie (**I**).

$I_{b, ref}$  : Courant de référence (**I**).

$C_{bat}$  : capacité de la batterie (**F**).

### Pile à combustible

$E_N$  : Tension de Nernst (**V**).

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

$V_{ohm}$  : Polarisation Ohmique.

$V_{conc}$  : Polarisation de concentration.

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

$P^*_{H_2}$  : Pressions partielles à l'interface de l'hydrogène (**atm**).

$P^*_{O_2}$  : Pressions partielles à l'interface de l'oxygène (**atm**).

$I_0$  : Courant d'échange définissant à vide les échanges électrode – électrolyte.

$I_n$  : Courant interne permettant de tenir compte d'une éventuelle traversée de gaz et/ ou d'électrons à travers l'électrolyte.

$A$  : Pente de la droite de « Tafel ».

$R_m$  : Résistance totale de la pile à combustible ( **$\Omega$** ).

$B$  : Constante de transport ou de transfert de masse.

$I_{FC}$  : Densité du courant de fonctionnement permanent (**A/cm<sup>2</sup>**).

$I_{Lim}$  : Densité du courant limite.

# Liste des abréviations

<b><i>SEH</i></b>	Système Energie Hybride
<b><i>PV</i></b>	Photovoltaïque
<b><i>CC</i></b>	Courant Continu
<b><i>CA</i></b>	Courant Alternatif
<b><i>DC/DC</i></b>	Convertisseur Courant continu/ Courant continu
<b><i>DC/AC</i></b>	Convertisseur Courant continu/ Courant Alternatif
<b><i>Ah</i></b>	Ampère heure
<b><i>EDC</i></b>	Etat de Charge des batteries (State Of Charge)
<b><i>SOC</i></b>	State Of Charge
<b><i>GPV</i></b>	Générateur Photovoltaïque
<b><i>MPP</i></b>	Maximum Power Point
<b><i>MPPT</i></b>	Maximum Power Point Tracking
<b><i>P&amp;O</i></b>	Perturbation et Observation
<b><i>FC</i></b>	Fuel Cell
<b><i>PAC</i></b>	Pile A Combustible
<b><i>AFC</i></b>	Alcaline Fuel Cells (piles alcalines)
<b><i>PEMFC</i></b>	Proton Exchange Membrane Fuel Cell (Piles à membrane échangeuse de protons)
<b><i>PAFC</i></b>	Phosphoric Acid Fuel Cells (piles à acide phosphorique)
<b><i>SOFC</i></b>	Solid Oxide Fuel Cells (piles à électrolyte solide)
<b><i>DMFC</i></b>	Direct-Methanol Fuel Cell (piles à méthanol direct)
<b><i>PVG</i></b>	PhotoVoltaic Generator
<b><i>PI</i></b>	Proportionnel intégrale
<b><i>PWM</i></b>	Pulse Width Modulation (Modulation de largeur d'impulsion)

# Table des matières

<b>Introduction générale</b> .....	1
<b>Chapitre I: Généralités sur les systèmes hybrides</b>	
I. Introduction.....	4
I.1. Energie Photovoltaïque.....	4
I.1.1. Définition.....	4
I.1.2. Panneau photovoltaïque.....	5
I.1.2.1. Principe de fonctionnement.....	5
I.1.2.2. Différentes type des cellules photovoltaïques.....	6
I.1.3. Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques .....	7
I.2. Batteries de stockage.....	8
I.2.1. Définition .....	8
I.2.2. Différentes types de batteries.....	9
I.2.3. Exigences sur les Batteries Solaires.....	9
I.2.4. Mécanisme de charge / décharge dans la batterie Li-Ion.....	9
I.3. Pile à combustible.....	10
I.3.1. Définition .....	10
I.3.2. Différents types de piles à combustible .....	11
I.3.3. Principe de fonctionnement d'une pile à combustible.....	13
I.3.4. Avantages et inconvénients des piles à combustible de type PEM.....	14
I.4. Systèmes hybrides.....	15
I.4.1. Définition des systèmes hybrides.....	15
I.4.2. Avantages et inconvénients d'un système hybride .....	15
I.5. Système hybride photovoltaïque/pile à combustible/batterie.....	16
I. Conclusion.....	16

## Chapitre II: Modélisation des différentes parties du système hybride

II. Introduction.....	18
II.1. Système de panneaux photovoltaïque.....	18
II.1.1. Modèle de panneau photovoltaïque.....	19
II.1.1.1. Cas d'une cellule idéale.....	19
II.1.1.2. Cas d'une cellule réelle.....	20
II.1.2. Caractéristiques d'un panneau solaire.....	21
II.1.2.1. Caractéristique courant-tension.....	21
II.1.2.2. Caractéristique puissance-tension.....	21
II.1.3. Influence de la température et de l'éclairement sur les caractéristiques du panneau.....	22
II.1.3.1. Influence de la température.....	22
II.1.3.2. Influence de l'éclairement.....	23
II.1.4. Rendement de PV.....	24
II.1.5. Commande du système photovoltaïque au point de puissance maximale.....	24
II.1.5.1. Méthode Perturbation et Observation (P&O).....	25
II.1.2.2. Algorithme P&O.....	26
II.1.6. Modèle et dimensionnement d'un hacheur survolteur (Boost) .....	26
II.2. Système de Batteries.....	28
II.2.1. Modèle de la Batterie.....	28
II.2.2. Modélisation du convertisseur DC/DC (Back –Boost) .....	29
II.2.3.1. Fonctionnement d'un convertisseur DC/DC (Back –Boost).....	29
II.2.3.2. Calcul des paramètres L et C du convertisseur.....	30
II.3. Système de pile à combustible.....	30
II.3.1. Modèle de pile à combustible PEM.....	30
II.3.2. Modelée convertisseur Boost de la pile à combustible.....	32
II.3.3. Calcul des paramètres L et C du convertisseur .....	33
II.4. Module du bus continu.....	33
II.5. Convertisseur DC/AC (Onduleur).....	33



II. Conclusion.....34

**Chapitre III: Gestion et simulation du système hybride**

III. Introduction.....36

III.1. Gestion d'énergie.....36

III.1.1. Différents scénarios pour la gestion d'énergie.....37

III.1.2. Algorithme de gestion.....38

III.1.3. Différentes commutations des interrupteurs pour la gestion d'énergie.....39

III.2. Simulation du système hybride étudié.....39

III.2.1. Allure de l'éclairage (G).....40

III.2.2. Allure de la température (T).....41

III.2.3. Les paramètre des sources.....41

III.2.4. Profil de la charge.....42

III.3. Résultats de simulation.....42

III.3.1. Générateur photovoltaïque(GPV).....43

III.3.2. Batterie.....44

III.3.3. Pile à combustible.....45

III.3.4. Charge.....46

III.3.5. Système hybride .....47

III.4. Discussion des résultats de simulation du système global.....48

III. Conclusion.....49

Conclusion générale.....51

Références Bibliographiques

# Liste figures

## Chapitre I

<b>Figure.I.1</b> : panneaux solaires.....	4
<b>Figure.I.2</b> : Cycle photovoltaïque.....	5
<b>Figure.I.3</b> : Illustration d'une cellule photovoltaïque.....	5
<b>Figure.I.4</b> : Cellules photovoltaïques monocristallines.....	6
<b>Figure.I.5</b> : Cellules photovoltaïques poly-cristallines.....	6
<b>Figure.I.6</b> : Cellules photovoltaïques amorphes.....	7
<b>Figure.I.7</b> : Cellule électrochimique de base.....	8
<b>Figure.I.8</b> : Batteries Solaires.....	10
<b>Figure.I.9</b> : Clarification d'une pile à combustible.....	10
<b>Figure.I.10</b> : Principe de fonctionnement de piles à combustible à électrolyte acide (A) ou alcalin (B).....	14
<b>Figure.I.11</b> : Schéma synoptique du système d'énergie hybride à étudier.....	15

## Chapitre II

<b>Figure.II.1</b> : Architecture de système global.....	18
<b>Figure.II.2</b> : Schéma équivalent d'une cellule idéale.....	19
<b>Figure.II.3</b> : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle.....	20
<b>Figure.II.4</b> : Caractéristique courant-tension du <i>GPV</i> .....	21
<b>Figure.II.5</b> : Caractéristique puissance-tension du <i>GPV</i> .....	22
<b>Figure.II.6</b> : Variation du courant en fonction de la tension.....	22
<b>Figure.II.7</b> : Variation de la puissance en fonction de la tension.....	23
<b>Figure.II.8</b> : Variation du courant en fonction de la tension.....	23
<b>Figure.II.9</b> : Variation de la puissance en fonction de la tension.....	24
<b>Figure.II.10</b> : Caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$ du <i>GPV</i> .....	25
<b>Figure.II.11</b> : Organigramme de la méthode <i>P&amp;O</i> .....	26
<b>Figure.II.12</b> : Convertisseur Boost de <i>GPV</i> .....	27
<b>Figure.II.13</b> : Schéma équivalent R-C de la Batterie.....	28
<b>Figure.II.14</b> : Montage Back/Boost du convertisseur DC-DC.....	29

<b>Figure.II.15:</b> commande du convertisseur bidirectionnel.....	30
<b>Figure.II.16:</b> le Schéma équivalent d'une PEMFC.....	30
<b>Figure.II.17:</b> Caractéristique (V, I) de la pile à combustible.....	31
<b>Figure.II.18:</b> Schéma équivalent du Convertisseur Boost de la pile à combustible .....	32
<b>Figure.II.19:</b> Schéma du bus continu.....	33
<b>Figure.II.20:</b> Schéma de convertisseur DC/AC.....	34

### Chapitre III

<b>Figure.III.1:</b> Schéma du système global étudié.....	36
<b>Figure.III.2:</b> Organigramme de la stratégie de gestion de l'énergie.....	38
<b>Figure.III.3:</b> Schéma de simulation du système global dans Matlab.....	40
<b>Figure.III.4:</b> Allure de l'éclairement .....	40
<b>Figure.III.5:</b> Allure de la température .....	41
<b>Figure.III.6:</b> Profil de la charge.....	42
<b>Figure.III.7:</b> Allure de la tension de <i>GPV</i> .....	43
<b>Figure.III.8:</b> Allure du courant de <i>GPV</i> .....	43
<b>Figure.III.9:</b> Allure de la puissance du <i>GPV</i> .....	43
<b>Figure.III.10:</b> Allure de la tension de batterie.....	44
<b>Figure.III.11:</b> Allure du courant de batterie.....	44
<b>Figure.III.12:</b> Allure de la puissance de la batterie.....	44
<b>Figure.III.13:</b> L'état de charge de la batterie.....	45
<b>Figure.III.14:</b> Allure de la tension de pile à combustible.....	45
<b>Figure.III.15:</b> Allure du courant de pile à combustible.....	45
<b>Figure.III.16:</b> Allure de la puissance de la pile à combustible.....	46
<b>Figure.III.17:</b> Allure de la tension de la charge.....	46
<b>Figure.III.18:</b> Allure du courant de la charge.....	46
<b>Figure.III.19:</b> Puissance réelle consommée par la charge sur une journée .....	47
<b>Figure.III.20:</b> Allure de la tension du bus continu.....	47
<b>Figure.III.21:</b> Allure des courants du système global (hybride + charge) .....	47
<b>Figure.III.22:</b> Allure des puissances du système global (hybride + charge).....	48

# Liste des tableaux

<b>Tableau.I.1</b> : Classification des piles à combustible.....	11
<b>Tableau.III.1</b> : l'état des Switch pour les différentes modes.....	39
<b>Tableau.III.2</b> : paramètres de la source photovoltaïque.....	41
<b>Tableau.III.3</b> : paramètres de la pile à combustible.....	41
<b>Tableau.III.4</b> : paramètres de la Batterie.....	41

# **INTRODUCTION**

## **GENERALE**

# Introduction générale

La consommation de l'énergie au niveau mondiale est liée étroitement à la population. L'accroissement de la population mondiale ainsi que l'activité industrielle des pays en voie de développement ont entraîné une explosion des besoins en énergie. L'exploitation excessive des ressources fossiles pour satisfaire ces besoins est le responsable majeur des rejets des gaz polluants, les études écologiques ont démontré que la consommation énergétique croissante est accompagnée par une augmentation énorme de l'émission des gaz toxiques dans l'atmosphère, ce qui cause la pollution de l'air et de l'eau.

Compte tenu de cette situation, les chercheurs et les opérateurs dans le domaine ont commencé de s'orienter vers les sources et les méthodes de production renouvelable et écologique, en exploitant les énergies propres sur la terre, comme l'énergie solaire, hydraulique, éolienne, géothermie...etc. Ils visent réduire au minimum la demande d'énergie provenant des sources classiques. En conséquence, une ville durable et propre dans son énergie, dans son climat et même dans sa nourriture [1].

Les énergies renouvelables peuvent être classées en trois grandes familles, l'énergie d'origine mécanique (celle du vent), énergie électrique (panneaux photovoltaïques) ou l'énergie sous forme de la chaleur (géothermie, solaire thermique,...etc.) .en sachant qu'à la racine de toutes ces énergies est celle en provenance du soleil, transformée ensuite par l'environnement terrestre. Parmi les différentes sources citées, un retiennent l'attention pour leur important potentiel, l'énergie solaire [1].

Les énergies renouvelables constituent une alternative aux énergies fossiles pour leur faible impact sur l'environnement. Malheureusement, jusqu'à maintenant, les puissances installées par les énergies renouvelables ne sont pas capables de concurrencer les grandes centrales actuelles à cause de leur intermittence et leur caractère fluctuant. Alors, il est indispensable d'utiliser des moyens de stockage pour assurer la continuité d'approvisionnement de l'énergie. Ces sources d'énergies renouvelables et les moyens de stockage associés constituent ainsi un système hybride [2].

Le système de génération hybride, peut être combiné à différents types d'énergies renouvelables associées avec des unités disponibles de stockage pour assurer la continuité de la fourniture électrique à l'utilisateur. Dans ce contexte, on s'intéresse au système hybride photovoltaïque –pile à combustible et batterie. Car c'est un système qui peut convenir pour une installation non connectée au réseau [2].

Le but de notre travail est une stratégie de gestion qui doit gérer le système à fin d'optimiser l'énergie du système et garantir la continuité de l'énergie produite.

Le premier chapitre, on rappelle généralement l'énergie photovoltaïque, le panneau solaire, pile à combustible et la batterie ainsi que le système hybride avec les avantages et inconvénients de tous les composants du système.

Le second chapitre, on procédera à une modélisation mathématique des différentes parties constituant le système à étudier.

Dans le dernier chapitre nous établirons une approche de gestion pour l'ensemble de l'installation et une simulation de leur fonctionnement.

# **CHAPITRE I**

## **Généralités sur les systèmes hybrides**



## I. Introduction

La combinaison de plusieurs sources d'énergies renouvelables permet d'optimiser au maximum les systèmes de production d'électricité, Nous allons donc choisir une partie de la source d'énergie pouvant être combinée pour obtenir un système hybride (panneau solaire à pile à combustible et batterie) fournissant une alimentation électrique permanente.

Dans ce premier chapitre nous allons présenter l'analyse et le principe de fonctionnement des différents types de sources électriques d'un système hybride. Nous analyserons aussi leurs caractéristiques physiques et électrique, leurs limitations et modèles, ainsi que leurs avantages et inconvénients. Enfin, les différents composants constituant ces sources, feront partie de notre intérêt. Dans ce travail, les éléments fondamentaux qui constituent notre système hybride sont: les panneaux solaires, pile à combustible et les batteries.

### I.1. Energie Photovoltaïque

#### I.1.1. Définition

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. Le terme photovoltaïque peut désigner soit le phénomène physique - l'effet photovoltaïque - ou la technologie associée. Dans ce chapitre on commence par rappeler brièvement le principe de la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique reposant sur l'effet photoélectrique des semi-conducteurs, ainsi les caractéristiques d'un générateur photovoltaïque [3].



*Figure.1 : Panneaux solaires*

### I.1.2. 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). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule [3].

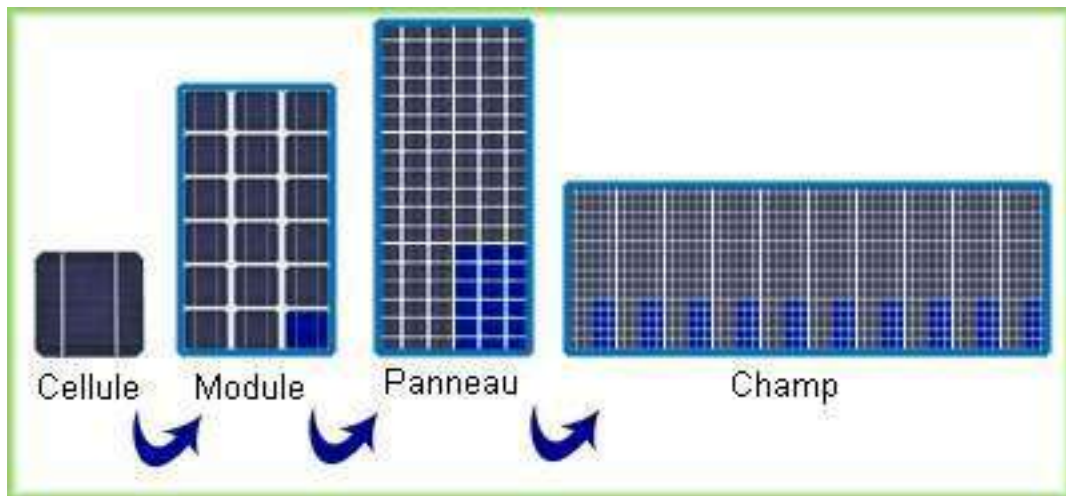


Figure.2 : Cycle photovoltaïque

#### I.1.2.1. Principe de fonctionnement

L'énergie solaire photovoltaïque est l'énergie obtenue par la conversion de la lumière en électricité. Cette énergie est obtenue grâce au phénomène physique appelé l'effet photovoltaïque. Rapporté par Edmond Becquerel en 1839, le principe est assez simple et consiste en l'émergence d'une différence de potentiel aux extrémités d'une structure de matériel semi-conducteur, produit par l'absorption de la lumière [3].

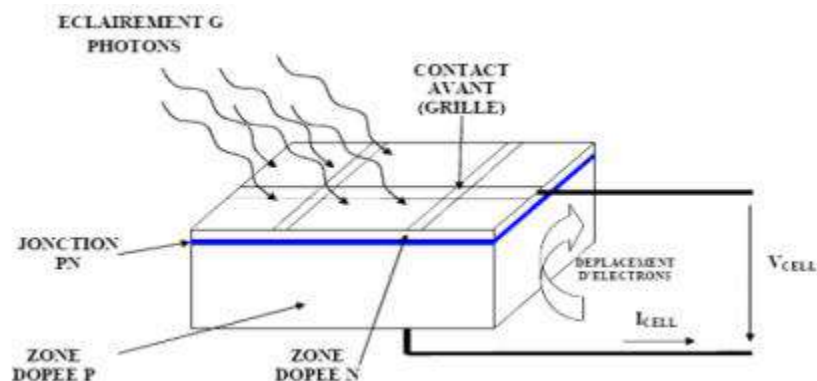


Figure.3 : Illustration d'une cellule photovoltaïque

### **I.1.2.2. Différentes type des cellules photovoltaïques**

Trois technologies principales de cellules photovoltaïques existent :

#### **A. Cellules monocristallines**

Ces cellules sont les plus proches du modèle théorique. Elles sont composées d'un seul cristal divisé en deux couches, et permettent d'obtenir de hauts rendements, de l'ordre de 15 à 22 %.



**Figure.4 :** Cellules photovoltaïques monocristallines

Cette technologie a les caractéristiques suivantes :

- ✓ Première génération de photopiles.
- ✓ Forme de plaquettes rondes, carrées ou pseudo-carrées, de surface bleu-gris uniforme.
- ✓ Rendement excellent de 15 % et jusqu'à 24 % en laboratoire.
- ✓ Méthode de production laborieuse et difficile, et donc, très chère.
- ✓ Nécessite une grande quantité d'énergie pour obtenir un cristal pure.

#### **B. Cellules poly-cristallines**

Elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en plusieurs cristaux dont les orientations sont différentes. On les prépare en sciant en couches minces un bloc de silicium coulé. Elles ont un éclat brillant nacré bleu-gris (multicolore).



**Figure.5 :** Cellules photovoltaïques poly-cristallines

Cette technologie a les caractéristiques suivantes :

- ✓ Coût de production moins élevé.
- ✓ Nécessite moins d'énergie.
- ✓ Rendement de 13 % et jusqu'à 20 % en laboratoire.

### C. Cellules amorphes

Ces cellules sont composées d'un support en verre ou en matière synthétique sur lequel est disposé une fine couche de silicium (l'organisation des atomes n'est plus régulière comme dans un cristal). Elles ont une surface uniformément sombre.



*Figure.6 : Cellules photovoltaïques amorphes*

Cette technologie a les caractéristiques suivantes :

- ✓ Rendement de seulement 6 % par module et de 14 % en laboratoire.
- ✓ Coût de production bien plus bas.
- ✓ Appliquées dans les petits produits de consommation : montres, calculatrices.
- ✓ Elles ont l'avantage de mieux réagir à la lumière diffuse et fluorescente. Donc, elles sont plus performantes à une température élevée.

### **I.1.3. Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques**

#### A. Avantages

- Le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu.
- Une haute fiabilité elle ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement

appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.

- Leurs coûts de fonctionnement sont très faibles vu les entretiens réduits et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé [4].

### B. Inconvénients

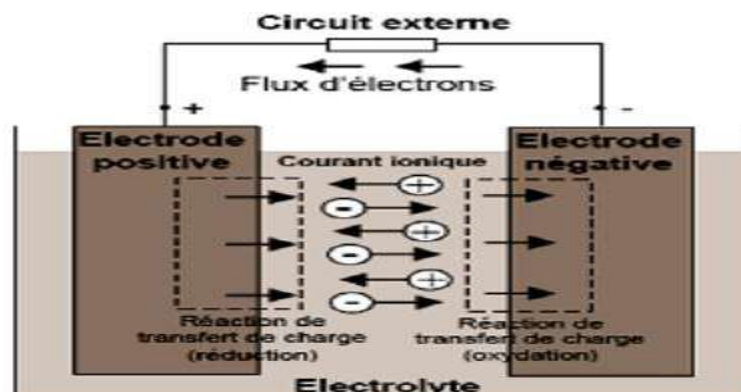
- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 %, les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour les faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- Le non disponibilité de la source d'une façon permanente.
- L'occupation d'espace pour les installations de grandes dimensions [4].

## I.2. Batteries de stockage

### I.2.1. Définition

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.

Avec des électrons (particules avec une charge négative) circulant à travers le circuit externe dans l'autre sens. Ce mouvement d'électricité la charge fait circuler un courant électrique dans la cellule et dans le circuit. Différents types de batteries sont produits pour différentes applications. Ils peuvent être utilisés pour stocker de l'énergie solaire [5].



*Figure.7 : Cellule électrochimique de base*

### I.2.2. Différentes types de batteries

Il existe deux types de batteries :

- **Batteries primaires** (batteries jetables): conçues pour être utilisées une fois et jeté.
- **Batteries secondaires** (batteries rechargeables): conçues pour être utilisées

Rechargé et utilisé plusieurs fois. La plupart des batteries utilisées aujourd'hui avec le système d'alimentation hybride proviennent de la batterie rechargeable. Il existe plusieurs types de piles rechargeables [5].

### I.2.3. Exigences sur les Batteries Solaires

La nécessité de la maintenance des batteries peut être une limitation majeure pour les systèmes PV autonomes. Pour pouvoir être utilisées à long terme, les batteries doivent respecter les exigences suivantes :

- un coût du kWh faible
- une durée de vie longue
- un rendement global élevé
- une autodécharge très faible
- un coût d'entretien faible
- une facilité d'installation et de fonctionnement

La température ambiante perturbe le fonctionnement de la batterie, surtout quand il fait froid car les réactions chimiques vont être ralenties. Une batterie a donc une capacité beaucoup plus faible à froid qu'à chaud. Les installations solaires en montagne doivent donc tenir compte de ce critère en prévoyant une capacité plus importante [5].

### I.2.4. Mécanisme de charge / décharge dans la batterie Li-Ion

Comme avec la plupart des batteries, ils ont un boîtier extérieur en métal. Ce boîtier en métal détient un longue spirale composée de trois feuilles minces pressées l'une contre l'autre:

- une électrode positive (cathode)
- une électrode négative (anode)
- un séparateur

Le séparateur est une très fine feuille de plastique micro-perforé qui sépare le Électrodes positives et négatives tout en laissant passer les ions. L'électrode positive est constituée d'oxyde de lithium et de cobalt ou de  $\text{LiCoO}_2$ . Le négatif l'électrode est en carbone, pendant le déchargement, les ions lithium ( $\text{Li}^+$ ) transportent le courant de l'électrode négative à l'électrode positive, à travers l'électrolyte et le diaphragme séparateur [5].

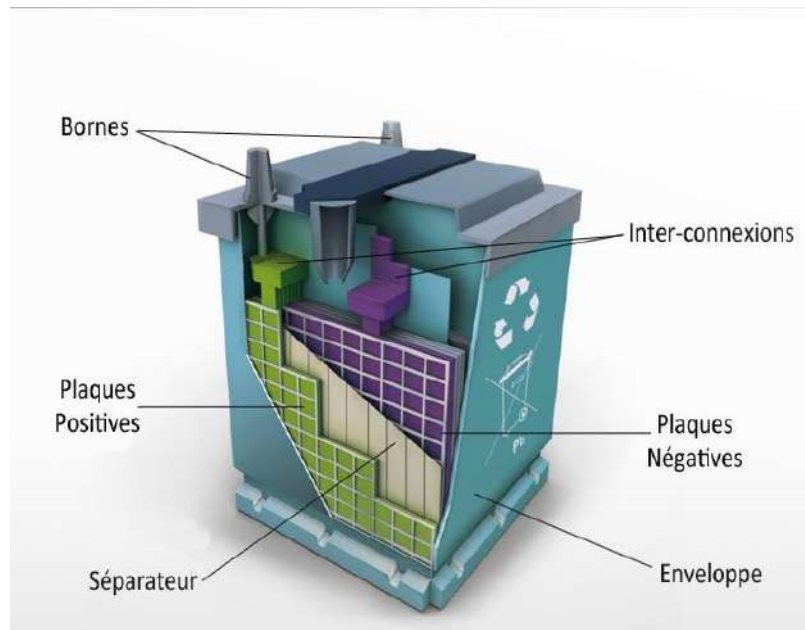


Figure.8 : Batteries Solaires.

### I.3. Pile à combustible

#### I.3.1. Définition

Par définition, la pile à combustible FC (Fuel Cell) produit l'électricité à partir d'une réaction chimique due au passage d'un gaz riche en hydrogène à travers une anode et d'oxygène (ou d'air) à travers une cathode avec un électrolyte entre l'anode et la cathode qui permet l'échange des charges électriques (ions). Le flux d'ions à travers l'électrolyte produit un courant électrique dans un circuit externe vers une charge [6].

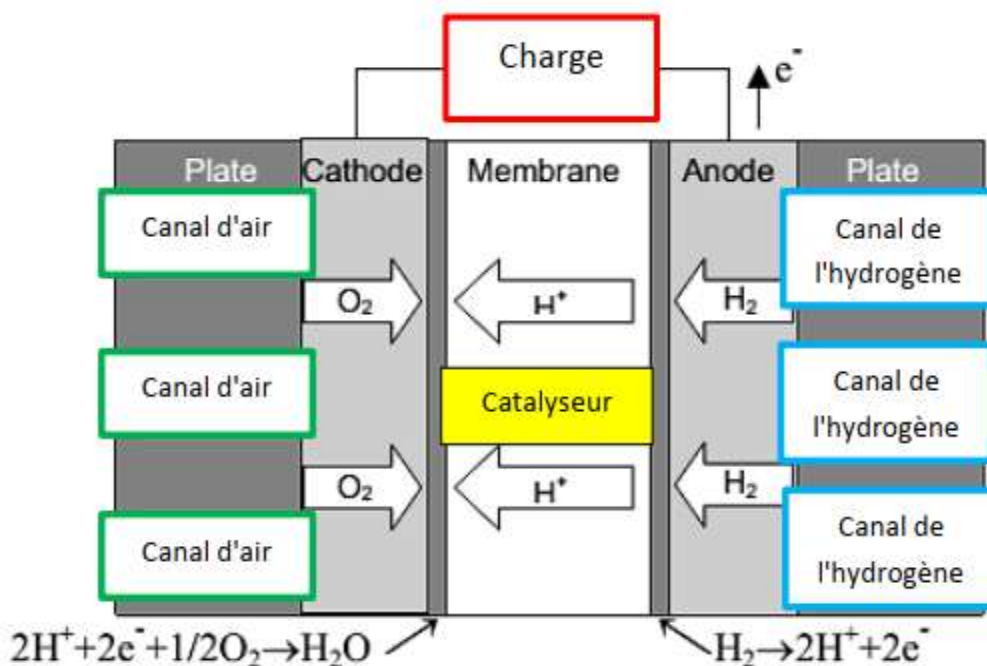


Figure.9 : Clarification d'une pile à combustible

### I.3.2. Différents types de piles à combustible

Dans cette section, nous allons voir le critère de classification de la pile à combustible, suivie d'une description brièvement détaillée de chaque type. Dans le *tableau.1*, nous donnons une classification des types de piles à combustibles d'hydrogène qui sont actuellement en cours d'utilisation et de développement.

Les piles à combustible sont généralement classées en fonction de l'électrolyte utilisée, avec une exception dans la pile à méthanol, dans laquelle, le méthanol est directement injecté à l'anode au cours de la réaction.

Les piles à combustible peuvent également être classées à base de température de fonctionnement, les piles à combustible alcalines, Polymère, Pile à combustible à membrane échangeuse. La pile à combustible à méthanol direct injecté comme carburant et les piles employant l'acide phosphorique ont une faible température de fonctionnement, généralement inférieure à 220 ° C. Par ailleurs, il y a d'autres types comme les piles à combustible à solide oxyde qui fonctionne à haute température d'environ 600-1000 ° C [6].

*Tableau.1 : Classification des piles à combustible [6].*

Type de pile	Polymer Membrane FC	Direct Methanol FC	Phosphoric Acid FC	Alcalin FC	Molten Carbonate FC	Solid Oxyd FC
Température	50-100°C	60-90°C	150-200°C	90-100°C	600-700°C	600-1000°C
Electrolyte	Membrane polymère conductrice de protons	Membrane polymère conductrice de protons	Acide phosphorique	Solution KOH	Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> et KCO <sub>3</sub> fondu dans une matrice LiAlO <sub>2</sub>	ZrO <sub>2</sub> et Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Puissance de sortie	1-250kW	1-100kW	50kW-1MW	10-100kW	1kW-1MW	1kW-3MW
Combustible	H <sub>2</sub> (pur ou reformé)	Méthanol	H <sub>2</sub> (pur ou reformé)	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> (pur ou reformé)	H <sub>2</sub> (pur ou reformé)
Oxydant	Air	Air	Air	O <sub>2</sub> (pur)	Air	Air
Domaines d'application	Automobiles, Portable, Cogénération	Les petits portables	Centrale de production	Militaire Spatial	Centrale de production électrique	Centrale de production. Automobile (APU)
Rendement	53-58%	25-35%	>40%	60%	45-47%	35-43%



### A. Pile à membrane polymère (PEMFC)

La PEMFC est un type de pile à combustible avec une température de fonctionnement dans la gamme de 50° à 100°C. Le fonctionnement à basse température délivre une densité de courant et de puissance élevée. Cela permet à la cellule d'avoir un design compact, poids léger et temps de réponse rapide par rapport aux autres piles à combustible. Comme son nom l'indique, ce type utilise un électrolyte en membrane échangeuse de protons solide.

La membrane conductrice des protons est une composante importante de la pile à combustible. L'utilisation d'un électrolyte solide a ses avantages. L'imperméabilité des gaz d'anode et de cathode devient plus facile, ce qui rend la fabrication de ce genre très économique. Contrairement aux électrolytes liquides, les électrolytes solides sont moins susceptibles à la corrosion qui permet au système d'avoir une durée de vie plus longue [7].

### B. Pile alcaline (AFC)

Les piles alcalines sont des piles à combustible à basse température, les premiers prototypes ont été utilisés dans les missions spatiales Apollo. La AFC utilise l'hydroxyde de potassium en tant qu'électrolyte et platine-cobalt, Platine-Palladium comme alliages des électrodes. L'hydroxyde de potassium a pour rôle d'accélérer la réduction de l'oxygène. La pile alcaline doit fonctionner avec un gaz pur, et de faibles concentrations de dioxyde de carbone, ce qui représente une contrainte d'exploitation majeure [6].

### C. Pile à acide phosphorique (PAFC)

La pile à combustible en acide phosphorique est une pile à basse température dans une gamme de 150 à 200 °C. Principalement utilisée dans les centrales électriques fixes. La PAFC est parmi les premiers PAC commercialisé dans le monde avec une capacité installée de 75 MW.

Il existe déjà des centrales électriques installées dans le monde et qui fournissent des puissances entre 5 et 20 MW. L'électrolyte de ce type est l'acide phosphorique sous forme liquide. La forte concentration en acide augmente la conductivité de l'électrolyte et réduit la corrosion du support des électrodes en carbone [6].

D. Pile à méthanol direct (DMFC)

Ce type est dérivé de la pile à membrane électrolytique en polymère, et sont généralement utilisés pour de petites applications portables ayant une faible température d'exploitation.

Le méthanol est directement introduit dans l'anode dans ces piles à combustible. Ceci élimine le besoin pour un reformeur pour convertir le combustible à hydrogène. Cela rend le DMFC une pile très prometteuse pour les sources d'énergie portables, les véhicules électriques et les applications de transport [6].

E. Pile à oxyde solide (SOFC)

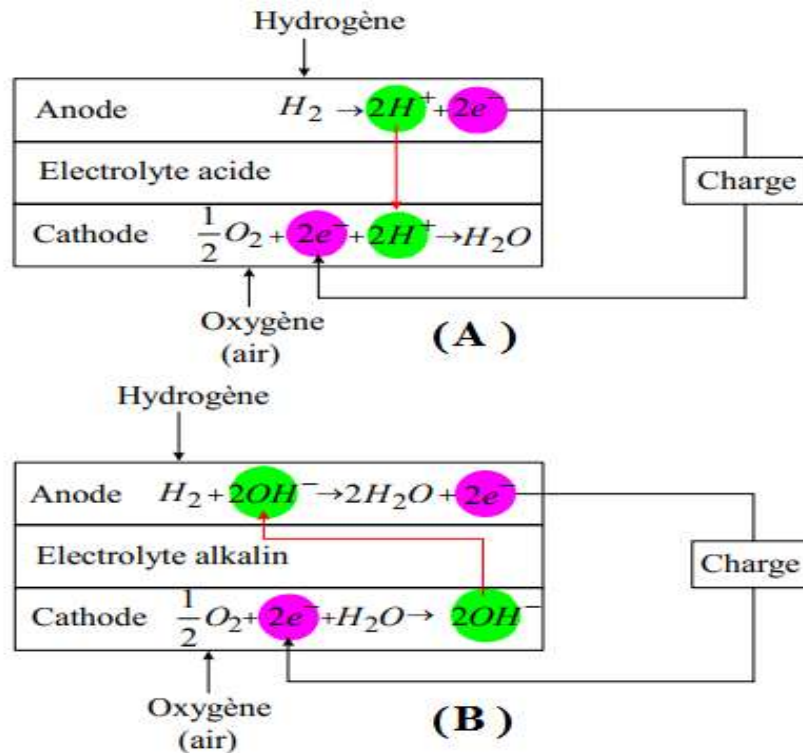
La SOFC possède une caractéristique lui permettant de fonctionner dans les hautes températures, ce qui rend ce type de pile convenable pour l'application centralisée et pour la cogénération pour des gammes de 1kW jusqu'à 3-4 MW. Une SOFC est constituée de quatre couches superposées avec une épaisseur très fine de quelques millimètres et une très haute température (600-1000°C).

Le principe de fonctionnement des SOFC est basé sur le mécanisme de dissociation de l'oxygène à la cathode en O<sub>2</sub>, puis le cation migre à travers l'électrolyte conducteur ionique à haute température (800 °C) et va se combiner à l'anode avec l'hydrogène pour former de l'eau et libérer des électrons. La haute température des piles SOFC présente un double avantage, elle permet l'utilisation directe d'hydrocarbures de gaz naturel et elle assure d'autre part la fourniture d'une chaleur élevée facilement exploitable en cogénération avec ou sans turbine à gaz [6].

**I.3.3. Principe de fonctionnement d'une pile à combustible**

Le principe de fonctionnement de la pile à combustible PEM est de produire électricité, eau; chaleur. Il est basé sur le processus inverse d'électrolyse de l'eau. Les réactions électrochimiques de une pile à combustible PEM dans pendant le fonctionnement de la pile à combustible PEM sont données par les équations suivante [7] :





**Figure.10:** Principe de fonctionnement de piles à combustible à électrolyte acide (A) ou alcalin (B) [7].

### I.3.4. Avantages et inconvénients des piles à combustible de type PEM

#### A. Avantages

- Les piles à combustible **PEMFC** produisent de l'électricité en convertissant directement l'énergie chimique en énergie électrique.
- Un rendement de conversion important 53-58% ; grâce à la conversion directe de l'enthalpie libre de la réaction chimique en énergie électrique.
- Pas de bruit, ce qui les rend appropriés pour les applications domestique comme les écoles, les universités... etc.
- La taille d'une pile à combustible peut facilement être augmentée ou réduite et le rendement électrique est relativement indépendant de cette taille.
- Les piles à combustibles **PEMFC** sont plus fiables par rapport à d'autres méthodes classiques parce qu'ils n'ont pas des vibrations mécaniques et des pièces en mouvement, par conséquent, il n'exige pas beaucoup de maintenances [7].

#### B. Inconvénients

- Le plus grand obstacle des piles à combustible est leurs coûts.

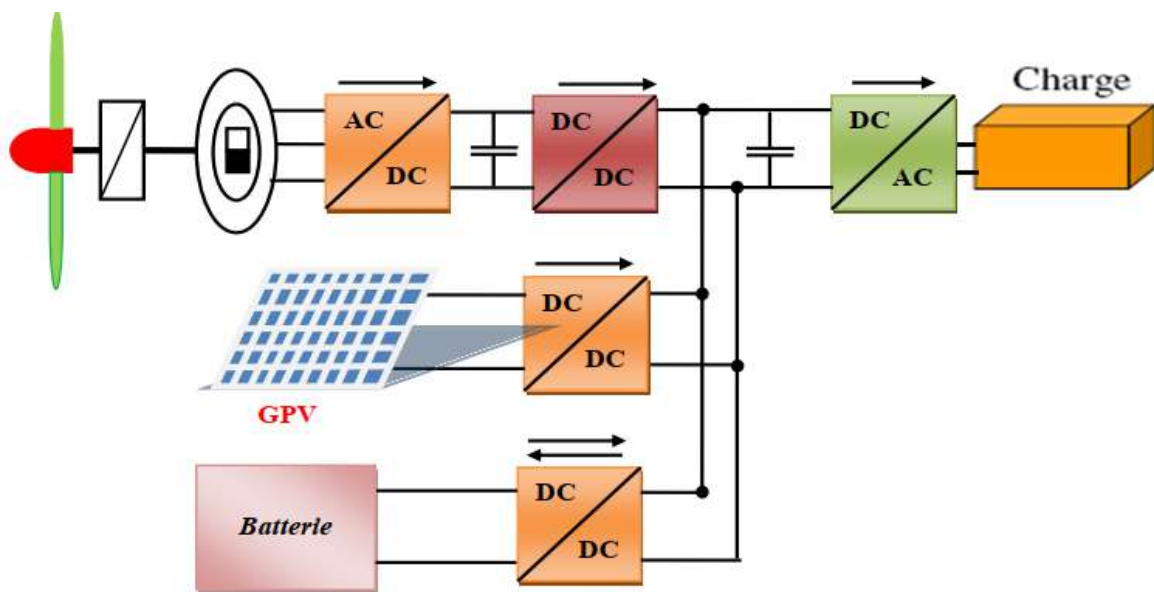
- Une durée de vie faible spécialement si on aura un courant délivré subit des variations importantes et répétées [7].

## I.4. Systèmes hybrides

### I.4.1. Définition des systèmes hybrides

Le problème avec la puissance variable et non garantie produite par les sources d'énergie renouvelables, peut être résolu par un couplage des sources d'approvisionnement et la formation d'un système dit hybride. Un système d'énergie hybride est défini comme une installation qui utilise deux ou plus des technologies de la génération d'énergies.

Les sources d'énergie renouvelable, comme le photovoltaïque, ne délivrent pas une puissance constante. Leur association avec des sources différentes permet d'obtenir une production électrique continue. Les systèmes d'énergie hybrides sont généralement autonomes par rapport aux grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans les régions isolées [8].



*Figure.11 : Schéma synoptique du système d'énergie hybride.*

### I.4.2. Avantages et inconvénients d'un système hybride

#### A. Avantages

- Assurer la continuité énergétique.
- Non dépendant d'une seule source d'énergie.
- Flexible, extensible et capable de satisfaire des charges évolutives.
- Exploitation simple, travaux de maintenance et de révision réduits [2].

**B. Inconvénients**

- Plus complexe que les systèmes mono source et nécessite du stockage.
- Coût capital élevé comparé aux générateurs diesel [2].

**I.5. Système hybride photovoltaïque/pile à combustible/batterie**

L'installation photovoltaïque doit être raccordée avec une autre source d'énergie, pour qu'il soit possible de satisfaire la charge durant la nuit ou par temps nuageux. Ces systèmes alimentent soit des maisons, soit des villages. Différent type de stockage existe comme un banc de batterie et un électrolyseur d'hydrogène. Un banc de batteries est un dispositif de stockage qui est largement disponible dans le marché et elle est la plus intéressante car elle peut alimenter une charge pour une durée plus importante mais parfois elle ne peut pas satisfaire la charge en cas d'absence d'énergie photovoltaïque [9].

Tandis que l'électrolyseur et le réservoir d'hydrogène permettent un stockage plus important en terme de quantité stockée mais plus lent et aussi se sont des dispositifs très chers, pour Alors parfois en fait appel à d'autre source d'énergie conventionnelle [9].

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

**I. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons abordé les concepts de base concernant le système mixte (hybride). Nous avons appris que le système combine des sources d'énergie. Nous avons donc choisi ce système (panneaux solaires, pile à combustible et batterie). Réglementer l'intervention de chacun selon les besoins pour contrôler la manière dont l'énergie circule. Nous ont permis d'inspirer quelques idées utiles pour le contrôle de notre système d'entraînement. La modélisation des composantes du système global qui seront l'objet du chapitre suivant.

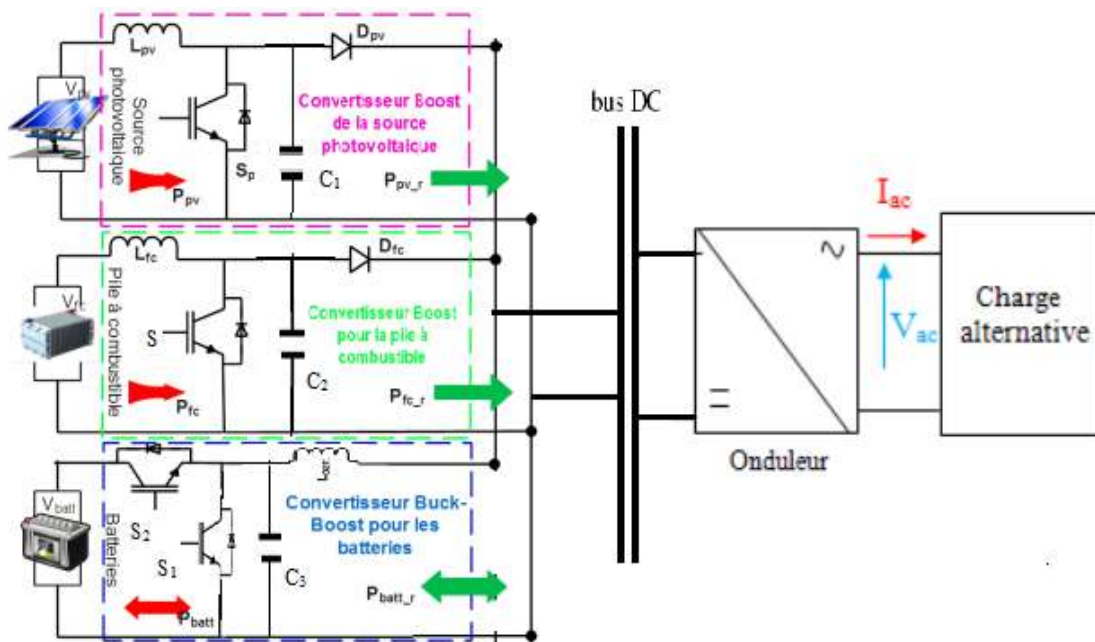
## **CHAPITRE II**

# **Modélisation des différentes parties du système hybride**

## II. Introduction

Ce deuxième chapitre a pour but de présenter un modèle simplifié de panneau solaire, de pile à combustible et de batterie. Et fournir des caractéristiques et des taux mathématiques importants pour comprendre le mécanisme d'action de ces modèles. La modélisation consiste à traduire en équation le comportement d'un système physique donné, afin de pouvoir comprendre son fonctionnement et faciliter son dimensionnement.

L'architecture de système global est montrée sur la *Figure.1*.



*Figure.1 : Architecture de système global*

Cette architecture inclut un générateur *PV*, une pile à combustible, des batteries, des convertisseurs *DC/DC*, un onduleur (*DC/AC*) et une charge.

### II.1. Système de panneaux photovoltaïque

Le soleil libère une énorme quantité d'énergie dans l'univers. La quantité de cette énergie qui atteint la terre est définie comme "constante de l'énergie solaire". La constante d'énergie solaire (*S*) est définie comme la quantité de rayonnement solaire qui atteint la haute atmosphère de la terre, sur une surface perpendiculaire aux rayons du soleil. Une partie de cette énergie solaire incidente est diffusée, cette énergie est absorbée par : les molécules d'air, couverture nuageuse, l'atmosphère,....etc [10].

Le reste du rayonnement qui n'est pas dispersée et absorbée qui atteint la surface de la terre est estimé à environ  $1000W/m^2$  à midi par ciel clair Le rayonnement qui vient directement du soleil sans être réfléchi ou diffusée, est appelé rayonnement direct et le

rayonnement qui est réfléchi et diffusé est appelé rayonnement diffus. Le rayonnement global est le terme utilisé pour définir le rayonnement total (direct et diffus) [10].

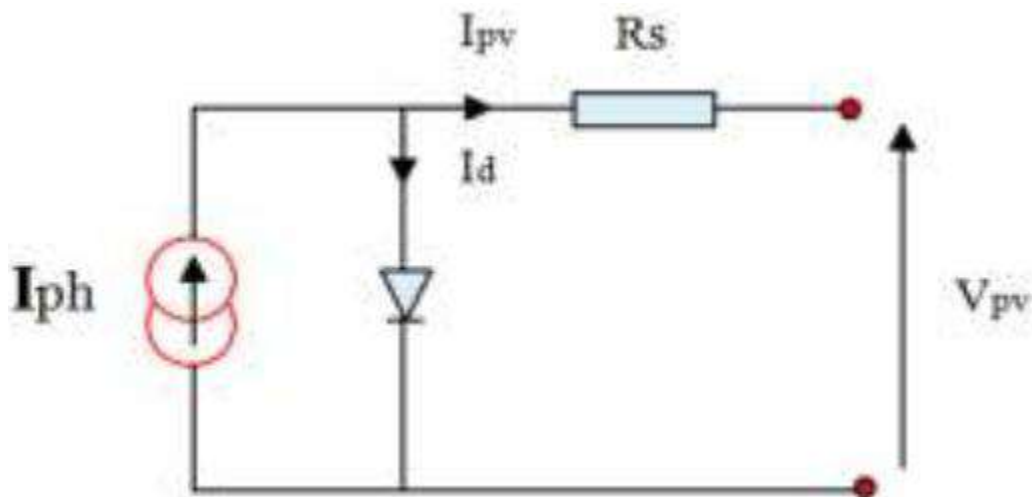
### II.1.1. Modèle de panneau photovoltaïque

Les cellules solaires sont l'élément le plus fondamental du système photovoltaïque, elles convertissent l'énergie solaire en énergie électrique. Elles sont très similaires à la plupart des appareils électroniques à semi-conducteurs couramment utilisés tels que les diodes, et les transistors. La cellule solaire se compose essentiellement d'une jonction *PN* formée par un matériau semi-conducteur [10].

Lorsque la lumière tombe sur les cellules solaires une paire électron trou est générée par l'énergie de la lumière (photons). Le champ électrique créé à la jonction provoque la paire électron-trou pour séparer les électrons dérivant vers la zone *N* et les trous vers la région *P*. D'où une tension électrique est générée à la sortie. Le photo-courant ( $I_{ph}$ ) circulera à travers la charge connectée aux bornes de sortie d'une cellule photovoltaïque [10].

#### II.1.1.1. Cas d'une cellule idéale

Dans le cas idéal, la cellule d'une jonction *PN* soumise à l'éclairement photovoltaïque peut être schématisée par un générateur de courant en parallèle avec une diode délivrant un courant selon la *Figure .2* qui représente le circuit équivalent d'une cellule solaire idéale [11].



*Figure.2 : Schéma équivalent d'une cellule idéale*



- L'équation retenue de ce modèle est :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \tag{1}$$

e courant  $I_{ph}$  est assimilé au courant  $I_{cc}$  avec  $V_{pv} = 0$ , courant de court-circuit.

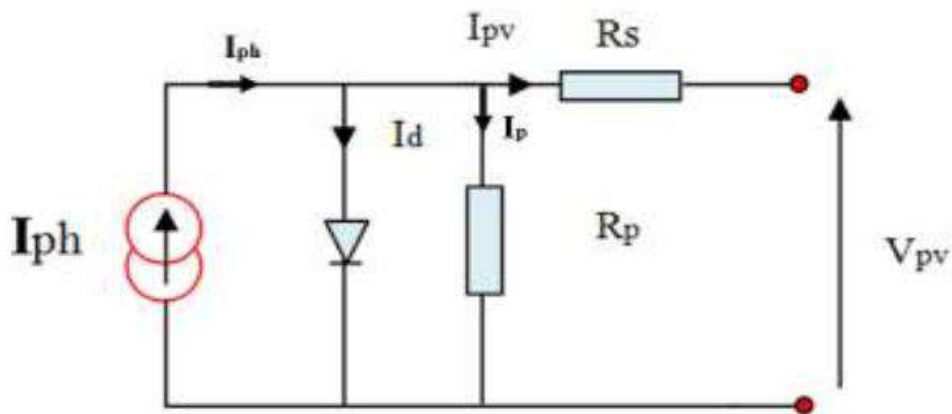
$$I_{ph} = [I_{CC} + k_i * (T_c - T_{ref})] * \frac{E}{E_{ref}} \tag{2}$$

$$I_d = I_0 \left( e^{\frac{v_d}{V_t}} - 1 \right) \tag{3}$$

$$V_t = \frac{B * K * T}{q} \tag{4}$$

**II.1.1.2. Cas d'une cellule réelle**

Le schéma équivalent de la cellule photovoltaïque réelle tient compte l'effet résistifs parasites dues à la fabrication et représenté sur la **Figure .3** .Ce schéma équivalent est constitué d'une diode ( $d$ ) caractérisant la jonction, une source de courant ( $I_{ph}$ ) caractérisant le photo courant, une résistance série ( $R_s$ ) représentant les pertes par effet Joule, et une résistance shunte ( $R_p$ ) caractérisant un courant de fuite entre la grille supérieure et le contact arrière qui est généralement très supérieure à ( $R_s$ ) [11].



**Figure.3** : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle

- Le courant de sortie d'une cellule photovoltaïque se met sous la forme mathématique suivante :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_p \tag{5}$$

$$I_d = I_0 \left( e^{\frac{v_d}{V_t}} - 1 \right) \tag{6}$$

$$I_0 = I_{0r} \left( \frac{T}{T_n} \right)^3 * e^{\left[ \frac{E_g}{B * K} \left( \frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right) \right]} - 1 \tag{7}$$

En substituant les équations (6 ; 7) dans l'équation (5), le courant ( $I_{PV}$ ) devient :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 * [ e^{(\frac{V_{pv} + I_{pv} * R_s}{V_t})} - 1 ] - \frac{V_{pv} + I_{pv} * R_s}{R_p} \quad (8)$$

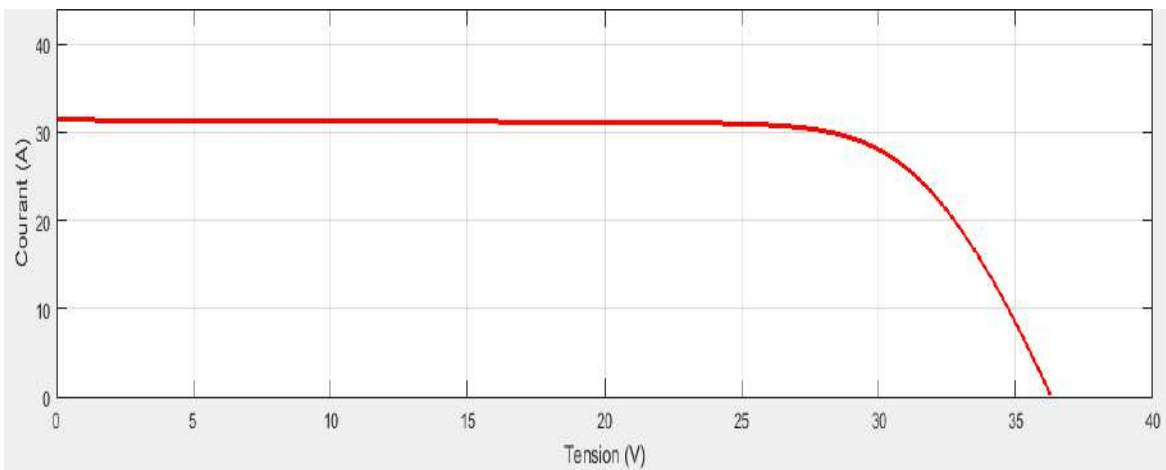
Avec : 
$$I_p = \frac{V_{pv} + I_{pv} * R_s}{R_p} \quad (9)$$

## II.1.2. Caractéristiques d'un panneau solaire

### II.1.2.1. Caractéristique courant-tension

La **Figure.4** représente la caractéristique (courant, tension) tracée pour un éclairement  $E=1000W/m^2$  et une température ambiante  $T = 25^\circ C$ . On constate que la caractéristique ( $I, V$ ) se comporte comme une source de courant constant dans la partie horizontale et comme un générateur de tension dans la partie verticale.

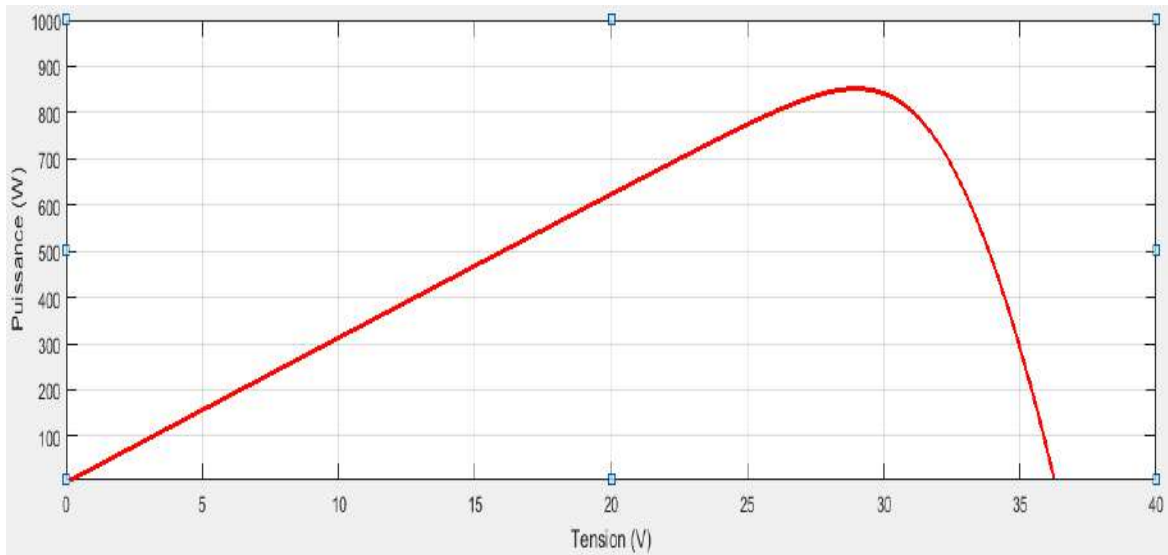
On note aussi qu'il existe toujours un point de puissance maximale, située sur le coude de la caractéristique.



**Figure.4** : Caractéristique courant-tension du GPV

### II.1.2.2. Caractéristique puissance-tension

La **Figure.5** représente la caractéristique (puissance, tension) tracée pour un éclairement  $E=1000W/m^2$  et une température ambiante  $T = 25^\circ C$ . On constate que la caractéristique ( $P, V$ ) On note aussi qu'il existe toujours un point de puissance maximale, située sur le coude de la caractéristique.

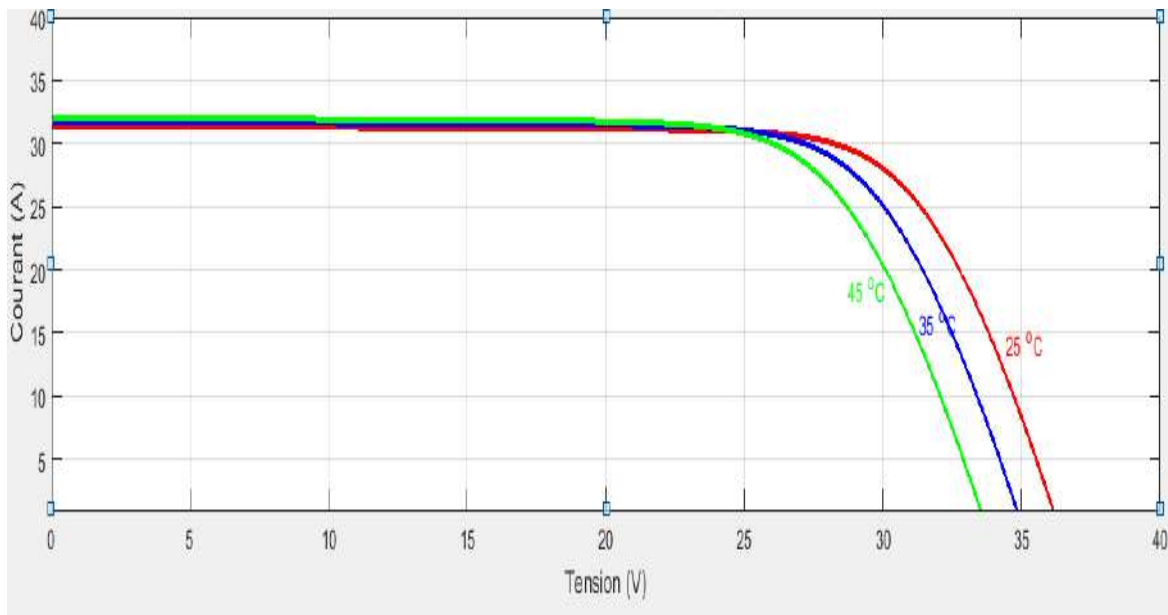


*Figure.5 : Caractéristique puissance-tension du GPV*

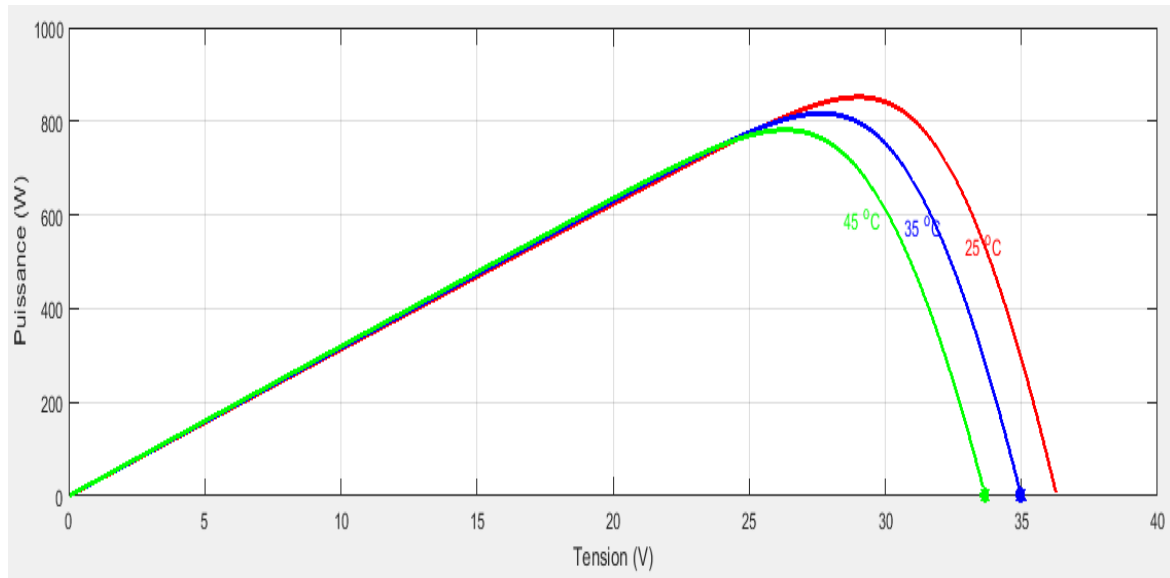
### II.1.3. Influence de la température et de l'éclairement sur les caractéristiques du panneau

#### II.1.3.1. Influence de la température

La température est un paramètre important dans le comportement des cellules (*Figure.6*) montre que l'augmentation de la température entraîne une diminution nette de la tension de circuit ouvert et une faible augmentation du courant de court-circuit, ainsi que une diminution de la puissance maximale (*Figure.7*).



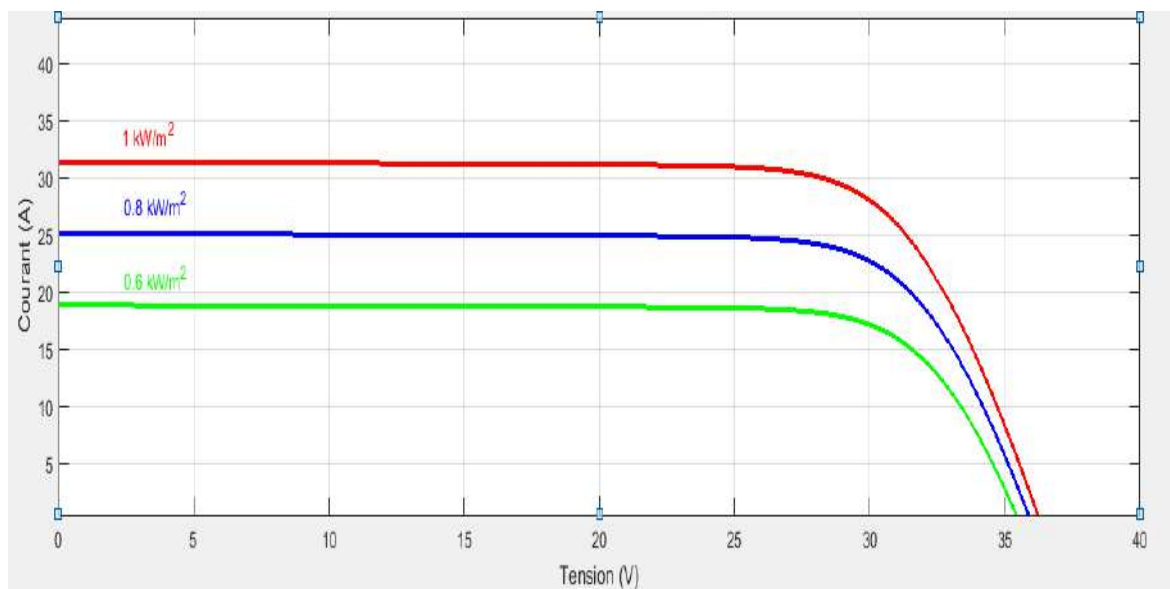
*Figure.6 : Variation du courant en fonction de la tension pour  $T=25^{\circ}\text{C}$ ,  $T=35^{\circ}\text{C}$  et  $T=45^{\circ}\text{C}$ .*



**Figure.7 :** Variation de la puissance en fonction de la tension pour  $T=25^{\circ}\text{C}$ ,  $T=35^{\circ}\text{C}$  et  $T=45^{\circ}\text{C}$ .

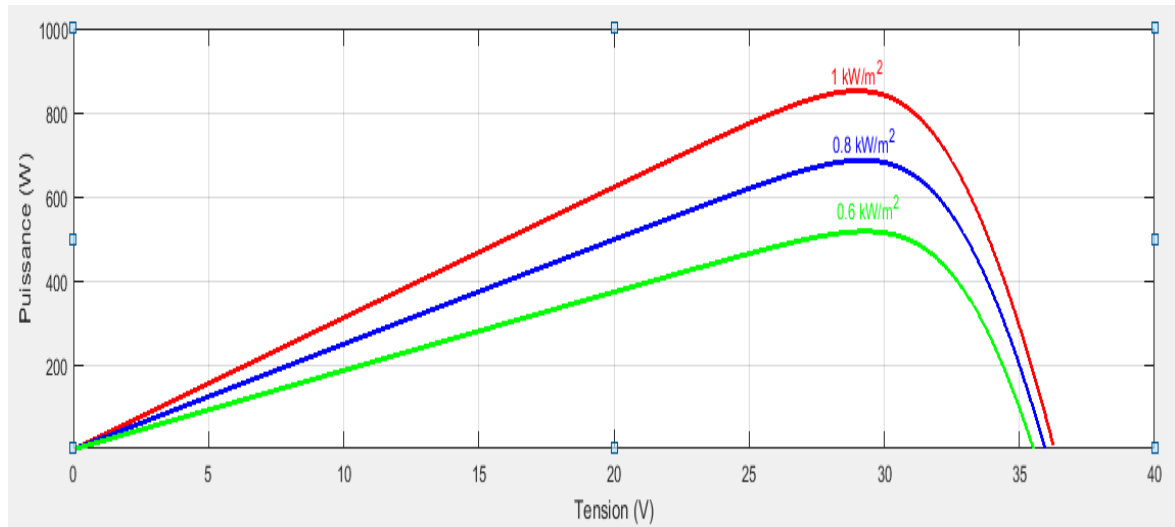
### II.1.3.2. Influence de l'éclairement

L'augmentation de l'éclairement voire **Figure.8** se traduit par un déplacement de la caractéristique  $I=f(V)$  suivant l'axe des courants. L'accroissement du courant de court-circuit est beaucoup plus important que celui de la tension à circuit ouvert étant donné que le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement, alors que celle de la tension à circuit ouvert est logarithmique.



**Figure.8:** Variation du courant en fonction de la tension pour  $G=600\text{ W/m}^2$ ,  $G=800\text{ W/m}^2$ ,  $G=1000\text{ W/m}^2$ .

- La puissance maximale  $P_m$  augmente avec l'augmentation de l'éclairement. Mais, les points de tension qui correspondent à la puissance maximale varient peu voire

**Figure.9**

**Figure.9 :** Variation de la puissance en fonction de la tension pour  $G=600 \text{ W/m}^2$ ,  
 $G=800 \text{ W/m}^2$ ,  $G=1000 \text{ W/m}^2$

#### II.1.4. Rendement de GPV

Ce facteur définit le taux de conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique, il représente le rapport de la puissance fournie rapportée à celle du rayonnement incident :

$$\eta = \frac{I_m * V_m}{E * A} \quad (10)$$

Ce rendement varie généralement entre 8 à 13% pour le silicium monocristallin, entre 7 à 11% pour le poly-cristallin et entre 4 et 9% pour la cellule au silicium amorphe [12].

#### II.1.5. Commande du système photovoltaïque au point de puissance maximale

Dans un système électrique comprenant une source et une charge, la recherche du point de fonctionnement optimal par des techniques d'optimisation représente ce qui est le plus important. Dans le cas du photovoltaïque, la présence de convertisseur (**DC/DC**) permet la mise en place d'algorithmes de poursuite de point de puissance maximal (**MPPT**).

Ces algorithmes vont modifier l'impédance équivalente du convertisseur pour s'assurer que le générateur **PV** fonctionne à sa puissance maximale. De nombreux travaux ont été et sont menés sur l'amélioration de ces algorithmes [13].

### II.1.5.1. Méthode Perturbation et Observation (P&O)

La méthode *P&O* est l'une des méthodes les plus utilisées. C'est une méthode itérative qui permet d'obtenir le point de puissance maximale du panneau photovoltaïque, on mesure les caractéristiques du panneau *PV* (tension, courant et puissance) puis on induit une petite perturbation sur la tension (ou le courant) afin d'analyser la variation de puissance qui en résulte. Le point maximum est atteint lorsque  $dP_{pv}/dV_{pv} = 0$ . Faisant ceci, la tension de fonctionnement du générateur *PV* est perturbée par un petit incrément  $\Delta V_{pv}$  et le changement résultant  $\Delta P_{pv}$  de la puissance est mesuré. Si  $\Delta P_{pv}$  est positif, la perturbation de la tension de fonctionnement devrait être dans la même direction de l'incrément. Cependant, s'il  $\Delta P_{pv}$  est négatif, le point de fonctionnement du système obtenu s'éloigne de *MPPT* et la tension de fonctionnement devrait être dans la direction opposée de l'incrément.

A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique  $P_{pv}(V_{pv})$ , il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au *PPM*, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié [14].

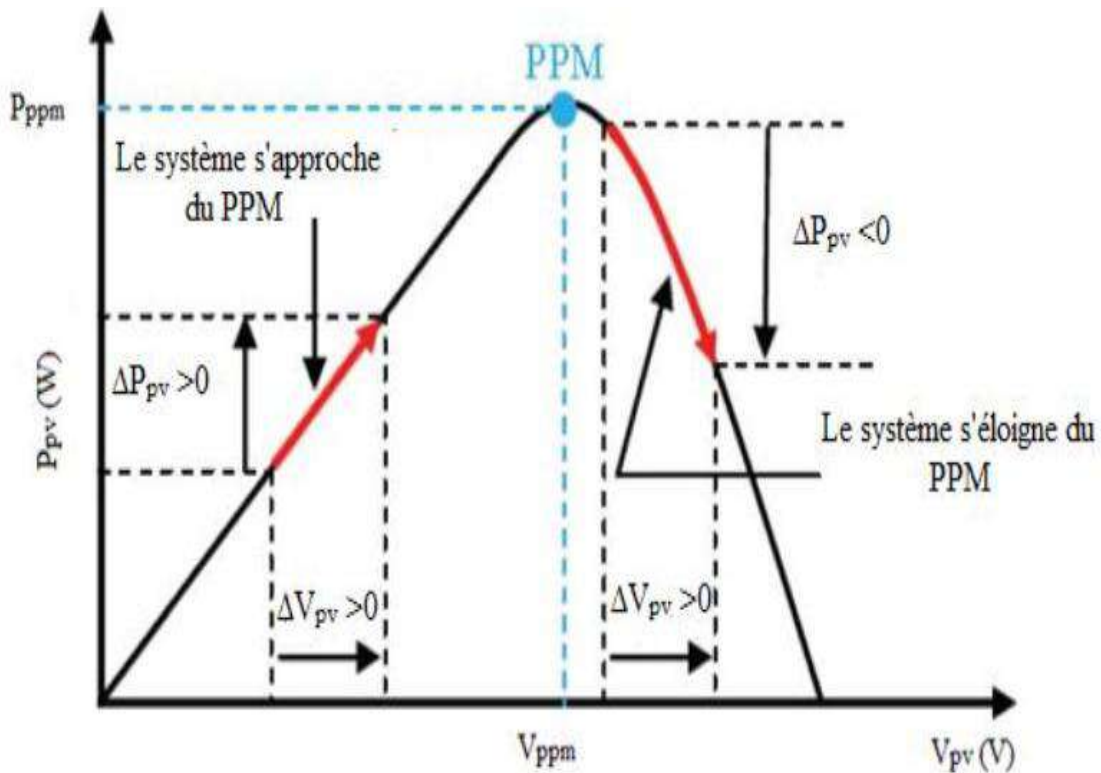
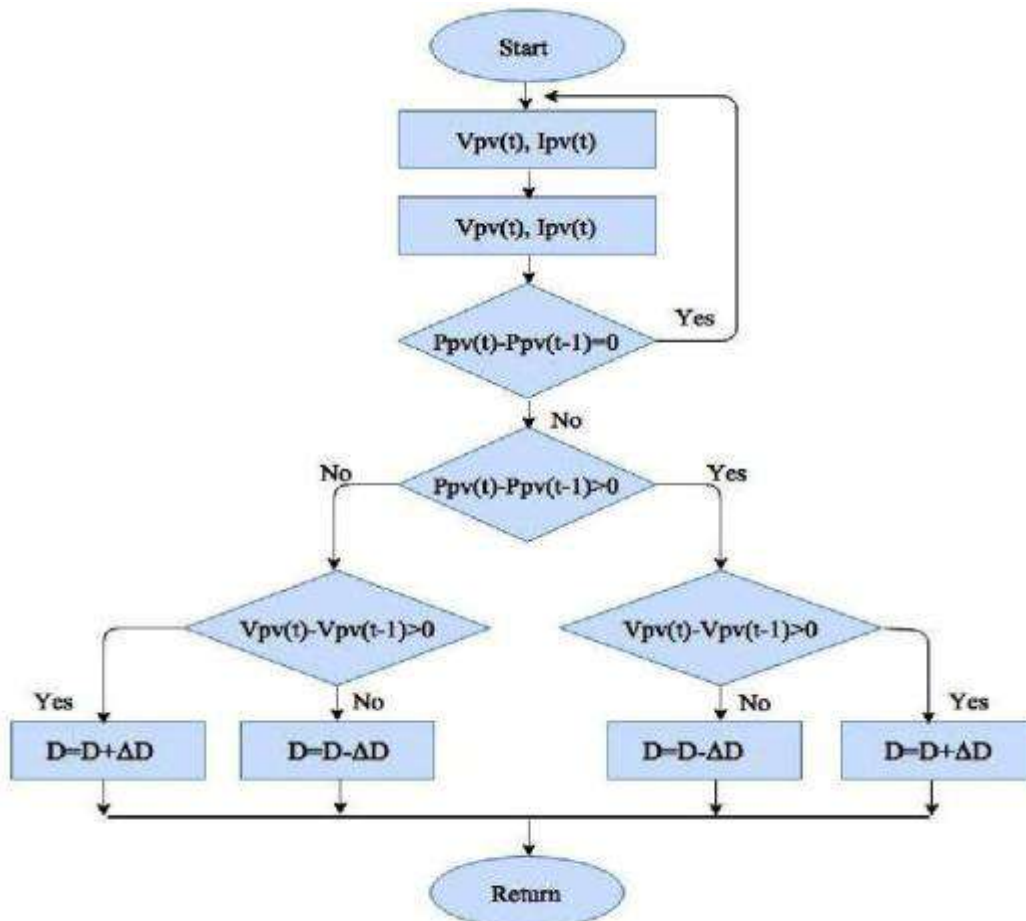


Figure.10 : Caractéristique  $P_{pv}=f(V_{pv})$  du GPV

### II.1.5.2. Algorithme P&O

L'avantage de cette algorithme (La méthode **P&O**) est qu'il est adapté aux conditions climatique instable, de caractéristiques de cette méthode qu'il n'avait pas des risqué dans le plus divergence par rapport au point de puissance maximale [15].

La **Figure.11** présente le diagramme de l'algorithme de l'incrément de conductance.



**Figure.11** : Organigramme de la méthode **P&O**

### II.1.6. Modèle et dimensionnement d'un hacheur survolteur (Boost)

Les convertisseurs statiques **DC/DC**, appelés aussi hacheurs, sont souvent utilisés dans les systèmes photovoltaïques comme interface d'adaptation entre le générateur photovoltaïque et sa charge. Ils permettent de commander le flux d'énergie générée par les **GPV** et d'assurer la poursuite du point de puissance maximale en suivant des stratégies de contrôle spécifiques [16].

Le convertisseur **Boost** est un élévateur de tension, la tension de sortie est toujours supérieure à la tension d'entrée. La **Figure.12**, représente la structure d'un hacheur de type **Boost** utilisé pour adapter un système photovoltaïque. On utilise un convertisseur Boost lorsqu'on désire augmenter la tension disponible d'une source continue [16].

Les systèmes alimentés par photovoltaïque utilisent souvent plusieurs cellules en série afin de disposer d'un niveau de tension suffisamment élevé. Un convertisseur Boost permet d'augmenter la tension fournie par la cellule photovoltaïque et ainsi diminuer le nombre de cellule nécessaires pour atteindre le niveau de tension désire [16].

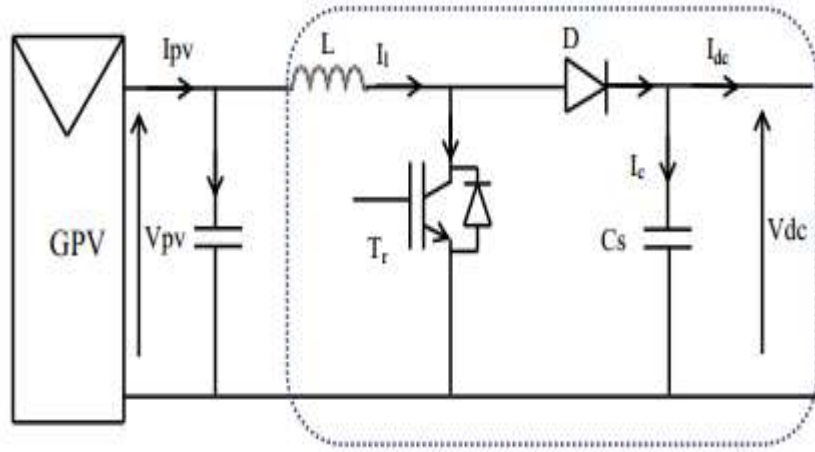


Figure.12 : convertisseur Boost de GPV

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  $V_L = V_{pv}$  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  $V_L = V_{pv} + V_{dc}$  Dans cette phase le condensateur  $C_s$  se charge en même temps par le courant stocké dans l'inductance et par le générateur [17].

Les équations électriques du hacheur **Boost** sont :

$$L \frac{di_l}{dt} = V_{PV} - (1 - T_r) V_{dc} \quad (11)$$

$$C_s \frac{dv_{dc}}{dt} = (1 - T_r) I_L - I_{dc} \quad (12)$$

En valeurs moyennes, la tension de sortie est fonction de la tension d'entrée et du rapport cyclique moyen. Son expression est donnée par l'équation (13).

$$V_{dc} = \frac{1}{(1-T_r)} V_{pv} \quad (13)$$

Et le courant par la relation :

$$I_{dc} = (1 - T_r) I_L \quad (14)$$



Régulation de la tension de sortie se fait alors en contrôlant le rapport cyclique.

Dans le fonctionnement continu du hacheur et de tension donnée, les valeurs des capacités et de la bobine du hacheur peuvent être déterminées comme suit [18]:

$$L = \frac{V_{pv}}{4 * f * \Delta I_{pv}} \quad (15)$$

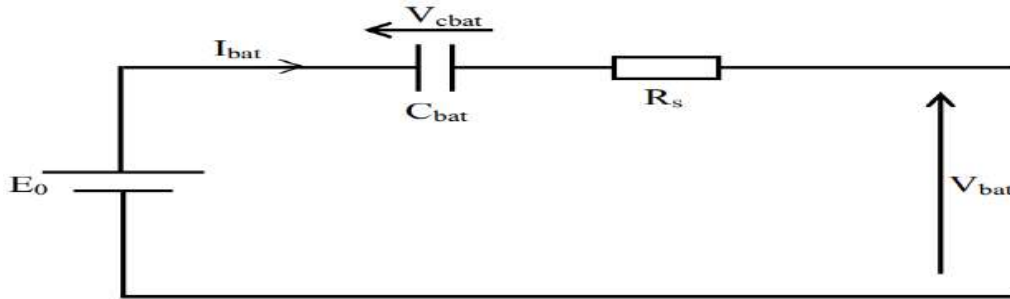
$$C_s = \frac{\Delta I_L}{8 * f * \Delta V_{dc}} \quad (16)$$

$$C_{pv} = \frac{I_{pv}}{f * \Delta V_{pv}} \quad (17)$$

## II.2. Système de Batteries

### II.2.1. Modèle de la Batterie

La **Figure.13** Schéma équivalent **RC** de la batterie.



**Figure.13** : Schéma équivalent R-C de la Batterie

On a donc :

$$V_{bat} = E_0 - R_s \cdot I_{bat} - V_{cbat} \quad (18)$$

On définit également l'état de charge (**SOC**) de la batterie par :

$$SOC = (1 - \frac{Q_d}{C_b}) * 100 \quad (19)$$

SOC : state of charge (état de charge). Indique le pourcentage l'état de charge de la batterie.

Pour un pack de batteries compose de :

$N_s$  : batteries en série et  $N_p$  : batterie en parallèle,

On peut écrire les équations suivantes :

$$E_0' = N_s * E_0 \quad (20)$$

$$C_0' = \frac{N_p}{N_s} * C_{bat} \quad (21)$$

$$R_s' = \frac{N_s}{N_p} * R_s \quad (22)$$

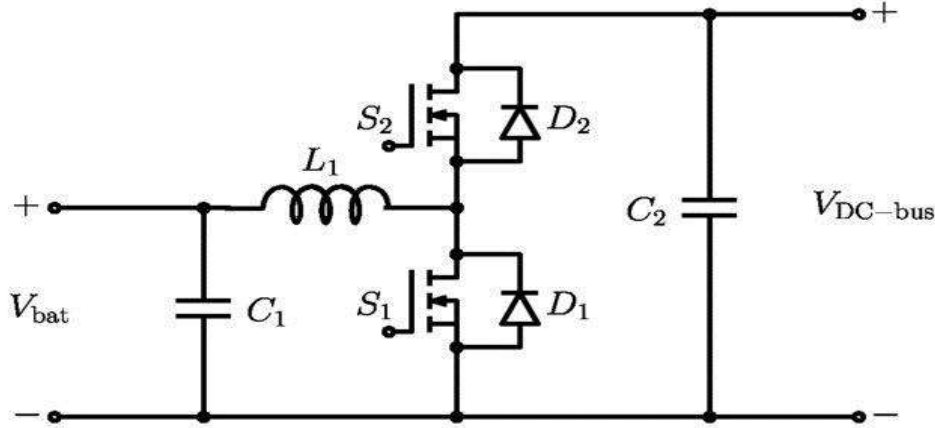
Pour déterminée la capacité ( $C_b$ ) de batterie :

$$C_b = \frac{E_{bat} * N_j}{V_{bat} * \eta_{bat} * D} \quad (23)$$

## II.2.2. Modélisation du convertisseur DC/DC (Back –Boost)

### II.2.3.1. Fonctionnement d'un convertisseur DC/DC (Back –Boost)

La **Figure.14** représente Montage Back/Boost du convertisseur DC-DC



**Figure.14** : Montage Back/Boost du convertisseur DC-DC

Les équations électriques du hacheur **Boost** sont :

$$L_1 \frac{di_l}{dt} = V_{bat} - (1 - S_1) V_{dc} \quad (24)$$

$$C_2 \frac{dv_{dc}}{dt} = (1 - S_1) I_L + I_{dc} \quad (25)$$

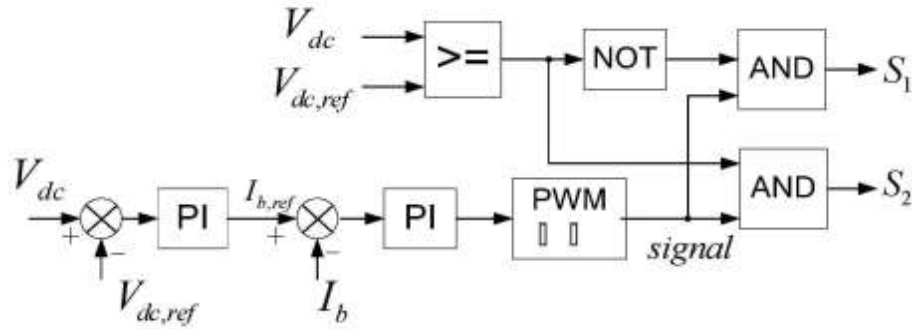
Les équations électriques du hacheur **Buck** sont :

$$L_1 \frac{di_l}{dt} = V_{bat} - S_2 * V_{dc} \quad (26)$$

$$C_2 \frac{dv_{dc}}{dt} = S_2 * I_{L1} - I_{dc} \quad (27)$$

L'objectif principal du convertisseur de batterie est de : maintenir la tension de liaison continue commune constante. De cette façon, non quelle que soit la charge ou la décharge de la batterie, la tension de le **Bus** à courant continu peut être stable et donc l'ondulation dans le condensateur la tension est beaucoup moins. Lors de la charge, le commutateur **S1** est activé et le convertisseur fonctionne comme un circuit de **Boost**. Autrement. Quand la décharge, l'interrupteur **S2** est activé et le convertisseur fonctionne comme un circuit **Buck** [19].

La **Figure.15** présente la méthode de contrôle du convertisseur bidirectionnel. Le schéma de contrôle comprend toujours deux boucles-contrôle de tension externe et contrôle de courant interne. Lorsque la tension sur la liaison **CC** est inférieure à la tension référence, le commutateur **S2** est activé; lorsque la tension sur le lien continu est supérieur à la référence de tension, le commutateur **S1** est activé [19].



**Figure.15 :** Commande du convertisseur bidirectionnel

### II.2.3.2. Calcul des paramètres de L et C du convertisseur

Pour calculer des paramètres L et C se fait grâce aux expressions suivantes :

$$L = \frac{V_{dc}}{4 * f * \Delta I_{L1}} \tag{28}$$

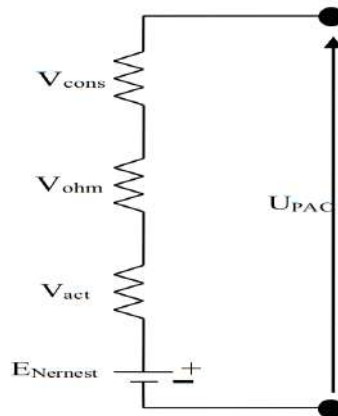
$$C_2 = \frac{\Delta I_{L1}}{8 * f * \Delta V_{dc}} \tag{29}$$

$$C_1 = \frac{I_{bat}}{f * \Delta V_{bat}} \tag{30}$$

## II.3. Système de pile à combustible

### II.3.1. Modèle de pile à combustible PEM

La **Figure.16** présente Schéma équivalent de pile à combustible PEM



**Figure.16 :** Le Schéma équivalent d'une PEMFC

$$U_{pac} = E_{Nernst} - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc} \quad (31)$$

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

On peut exprimer la tension d'activation en relation avec la densité du courant  $I_{fc}$  délivré par la pile par l'équation suivante :

$$V_{act} = A^* \log \left( \frac{I_{fc} - I_n}{I_0} \right) \quad (33)$$

$V_{ohm}$  est la chute de tension ohmique, elle est due aux résistances de la conduction des protons à travers de l'électrolyte.

On peut l'exprimer par la formule suivante:

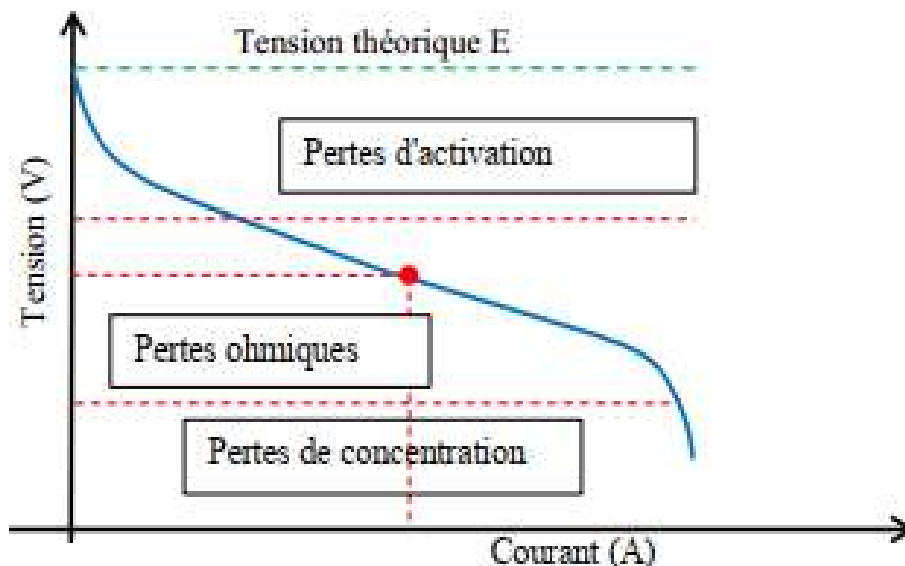
$$V_{ohm} = R_m (I_{fc} - I_n) \quad (34)$$

$V_{conc}$  est la chute de tension provenant de la réduction de la concentration des gaz lors de la réaction chimique.

Elle est régit par l'équation suivante:

$$V_{conc} = B^* \log \left( 1 - \frac{I_{fc} - I_n}{I_{Lim}} \right) \quad (35)$$

La courbe montre la tension et le courant de la pile à combustible :



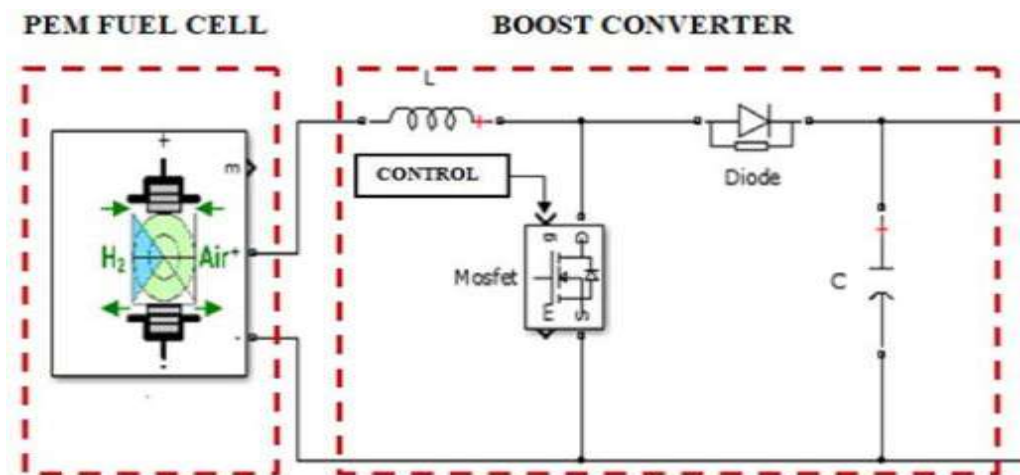
**Figure.17:** Caractéristique (V, I) de la pile à combustible

La première zone représente une tension d'activation faible en raison des réactions chimiques lentes se produisant à la surface de l'électrode.

En fonction de la température, de la pression de fonctionnement, du type d'électrode et du catalyseur utilisés, cette zone est large ou moins large. La deuxième zone représente les pertes de résistance dues à la résistance interne du réservoir de carburant. Enfin, le troisième domaine représente les pertes de transport de masse résultant du changement de concentration des réactifs au cours de l'utilisation du combustible.

### II.3.2. Modèle du convertisseur Boost de la pile à combustible

La tension de la pile à combustible est inférieure à la tension bus continue. Ainsi, nous utilisons un convertisseur *Boost* pour réguler la tension de sortie de la pile à combustible. La *Figure .18* montre l'adaptateur *DC-DC* composé d'une inductance  $L$ , d'une capacité  $C$ , d'une diode  $D$  et d'un commutateur *Mosfet*. La sortie est chargée avec les propriétés de résistance de l'adaptateur de lot *DC-DC*, comme montre la figure présentée ci-dessous.



*Figure.18* : Schéma équivalent du Convertisseur Boost de la pile à combustible.

Les équations électriques du hacheur *Boost* sont :

$$L \frac{di_L}{dt} = V_{pile} - (1 - S) V_{dc} \quad (36)$$

$$C \frac{dv_{dc}}{dt} = (1 - S) I_L + I_{dc} \quad (37)$$

La commande de ce convertisseur est la même que la commande du convertisseur de la batterie.

### II.3.3. Calcul de L et C du convertisseur [18]

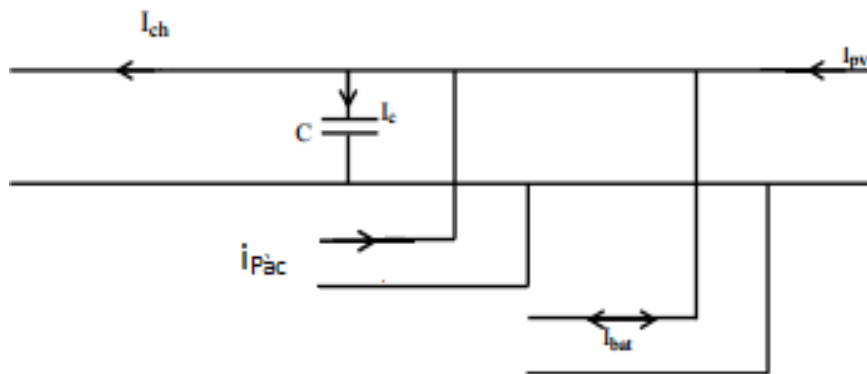
Pour calculer des paramètres L et C se fait grâce aux expressions suivantes :

$$L = \frac{V_{dc}}{4 * f * \Delta I_L} \quad (38)$$

$$C = \frac{\Delta I_L}{8 * f * \Delta V_{dc}} \quad (39)$$

### II.4. Modèle du bus continu

Le bus continu assure le couplage entre les sources d'énergie, les batteries et la charge, Le bus continu est composé d'une capacité, qui a pour but de filtrer la tension et chaque convertisseur statique qui est reliés avec lui exerce une influence par le courant (*Figure.19*)



*Figure.19 : Schéma du bus continu*

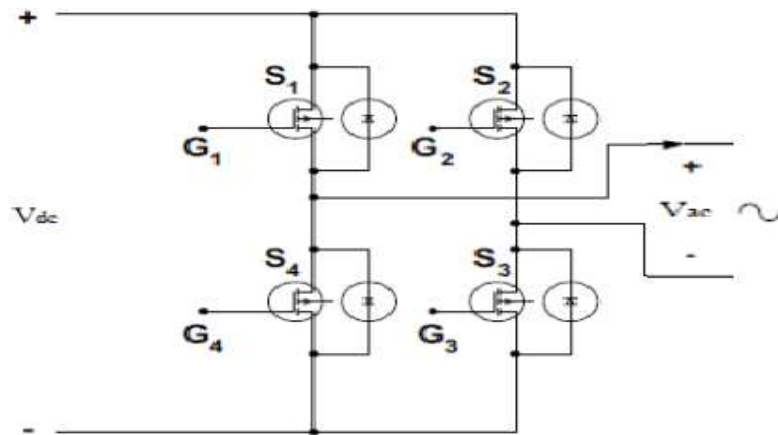
D'après la *Figure 19*, on a :

$$I_{ch} = I_{pv} + I_{FC} + I_{bat} - I_C \quad (40)$$

$$I_C = c \frac{dV_c}{dt} \quad (41)$$

### II.5. Convertisseur DC/AC (Onduleur)

Utilise *DC / AC* pour générer un signal alternatif à partir de le signal continu. La fonction de base de la commutation *DC / AC* consiste à générer une forme d'onde *CA* Du signal *CC*, en actionnant chaque paire de commutateurs S1-S3 et S2-S4 (IGBT ou Mosfat) en alternance, Avec leur cycle de travail pour chaque période de commutation (*Figure.20*).



*Figure.20: Schéma du convertisseur DC/AC*

## II. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé le modèle de chaque partie du système hybride (panneau solaire, batterie et pile à combustible) et le modèle de convertisseur du panneau solaire avec suivi du nombre maximal de points et fonction de l'algorithme principal. Ainsi qu'un modèle de convertisseur bidirectionnel pour charger et décharger la batterie, le modèle du convertisseur Boost de la pile à combustible, le modèle de bus continu et de l'onduleur monophasé.

Le dernier chapitre sera consacré à la simulation du système global (système hybride et une charge variable) et la discussion des résultats obtenus.

## **CHAPITRE III**

# **Gestion et simulation du système hybride**

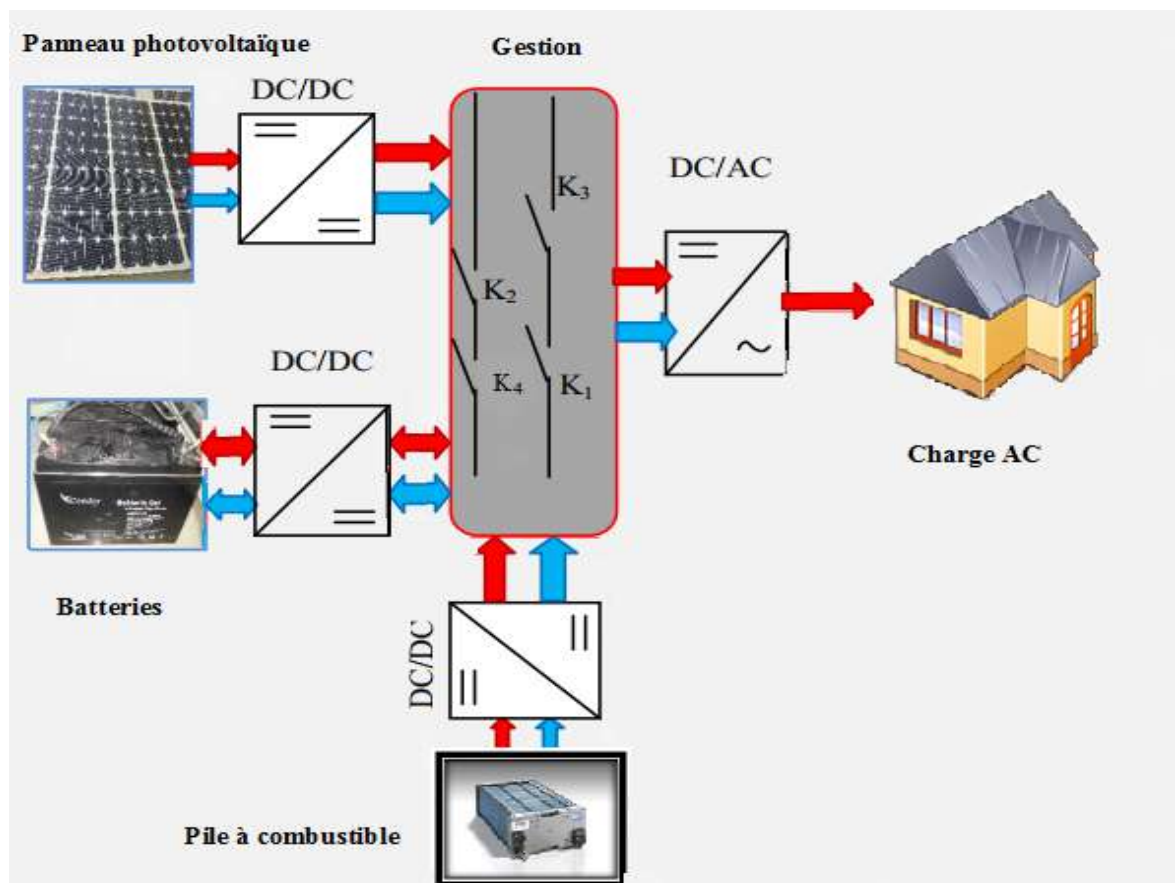


### III. Introduction

À l'aide des modèles et des lois de commande élaborés dans le chapitre précédent pour les différents éléments, nous allons construire notre système globale composé de **GPV**, pile à combustible, batterie et une charge variable. Nous terminons par simulation avec Matlab du système étudié et la présentation des résultats.

#### III.1. Gestion d'énergie

Nous avons choisi la gestion de l'énergie d'un système hybride constitué d'une chaîne de conversion photovoltaïque et une pile à combustible alimentent une charge variable et le surplus d'énergie produite par le **GPV** sert à charger la batterie qui constitue notre système de stockage. L'énergie emmagasinée dans la batterie va servir à compenser le manque au niveau de la charge dans le cas où le **GPV** et la pile ne satisfait pas cette dernière.



*Figure.1 : Schéma du système global étudié.*

### III.1.1. Différents scénarios pour la gestion d'énergie

- **Mode 1:** L'énergie générée par le **GPV** est supérieure à la demande de Charge ( $P_{pv} > P_{ch}$ ), et la batterie est complètement chargée ( $Soc > soc\ max$ ). "**M1**".
- **Mode 2:** L'énergie générée par le **GPV** est supérieure à la demande de charge ( $P_{pv} > P_{ch}$ ), et la batterie n'est pas chargée ( $Soc < soc\ min$ ). "**M2**".
- **Mode 3:** L'énergie générée par le **GPV** est inférieur à la demande de charge ( $P_{pv} < P_{ch}$ ) avec ( $P_{pv} > 0$ ), et la batterie est complètement chargé ( $Soc > soc\ max$ ). "**M3**".
- **Mode 4:** L'énergie générée par le **GPV** est inférieur à la demande de charge ( $P_{pv} < P_{ch}$ ), avec ( $P_{pv} > 0$ ), et la batterie n'est pas chargée ( $Soc < soc\ min$ ), et la pile à combustible est disponible "**M4**".
- **Mode 5:** L'énergie générée par le **GPV** est inférieur à la demande de charge ( $P_{pv} < P_{ch}$ ), avec ( $P_{pv} < 0$ ), et la batterie est complètement chargé ( $Soc > soc\ max$ ) et la pile à combustible est disponible "**M5**".
- **Mode 6:** L'énergie générée par le **GPV** est inférieur à la demande de charge ( $P_{pv} < P_{ch}$ ), avec ( $P_{pv} < 0$ ), et la batterie n'est pas chargée ( $Soc < soc\ min$ ), et la pile à combustible est disponible "**M6**".

Avec :

$$\blacksquare \quad Soc_{max} = 80 \% \ ; \ Soc_{min} = 20 \% \quad [20].$$

III.1.2. Algorithme de gestion : La Figure.2 montre Organigramme de la stratégie de gestion de l'énergie.

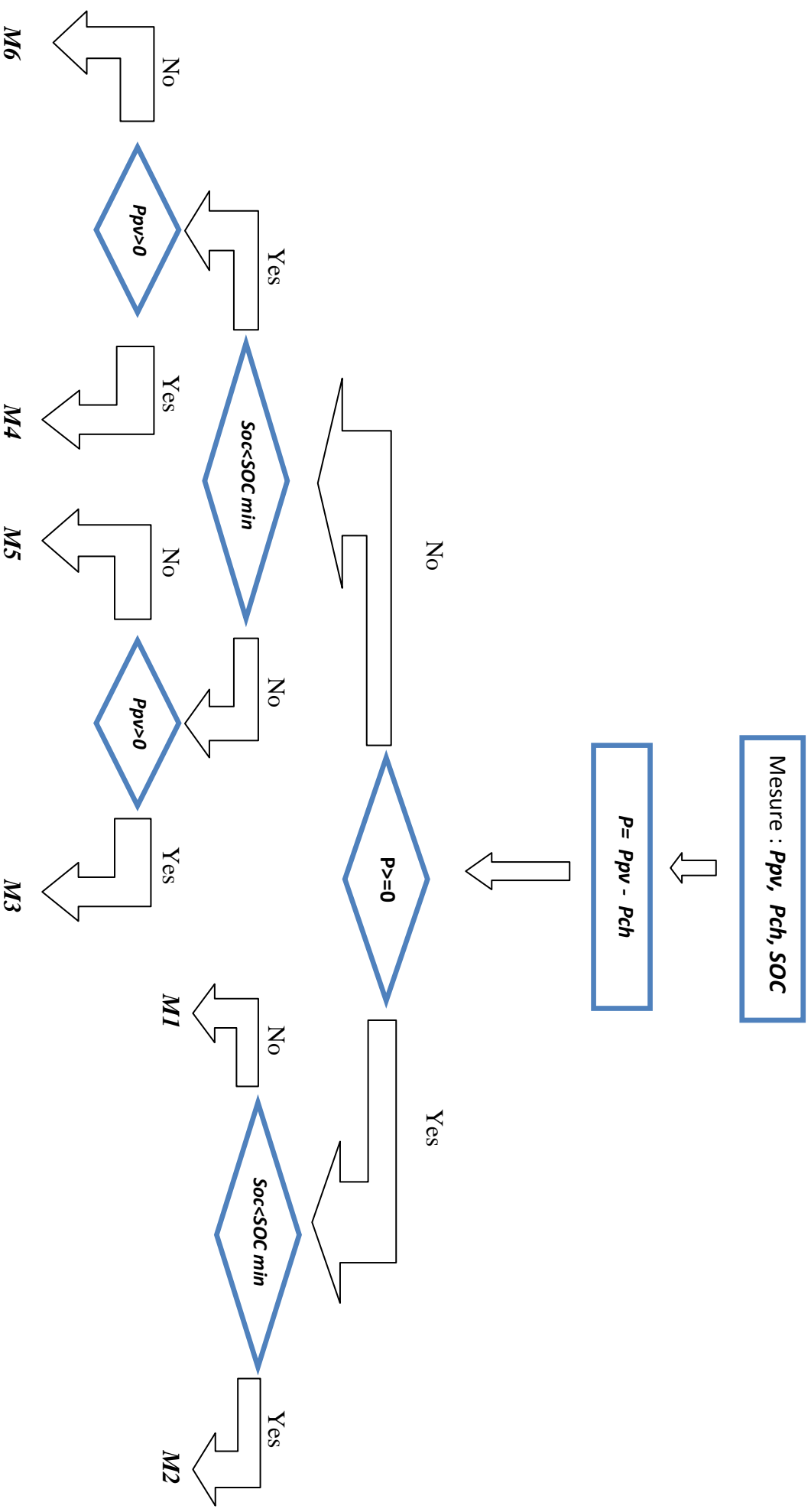


Figure.2 : Organigramme de la stratégie de gestion de l'énergie

Avec les scénarios suivants :

**M1** = fonction le panneau solaire  $P_{pv}$  → charge  $P_{ch}$ .

**M2** = fonction le Panneau solaire  $P_{pv}$  → batterie  $P_{batt}$  + charge  $P_{ch}$ .

**M3** = fonction le Panneau solaire  $P_{pv}$  + fonction La batterie  $P_{batt}$  → charge  $P_{ch}$ .

**M4** = fonction PEM + fonction le Panneau solaire  $P_{pv}$  → charge  $P_{ch}$  + charge la batterie  
Soc < Soc min.

**M5** = fonction PEM + fonction La batterie  $P_{batt}$  → charge de batterie Soc < Soc min.

**M6** = fonction PEM → charge  $P_{ch}$  :  $P_{pv} = 0$   $P_{batt} = 0$ .

### III.1.3. Différentes commutations des interrupteurs pour la gestion d'énergie

Nous utilisons la gestion de l'énergie entre ces sources par les interrupteurs (Switch)

**Tableau.2** Etat des Switch pour les différentes modes

Mode	K1	K2	K3	K4
M1	1	0	0	1
M2	1	1	0	1
M3	1	1	0	1
M4	1	1	1	1
M5	0	1	1	1
M6	0	0	1	1

K1 : interrupteur d'un panneau solaire

K2 : interrupteur d'une batterie

K3 : interrupteur d'une pile à combustible

K4 : interrupteur d'un la charge.

### III.2. Simulation du système hybride étudié

À l'aide des modèles et des lois de commande élaborés dans les chapitres précédents pour les différents éléments composants le système étudié, nous allons discuter les résultats de simulation de la gestion d'énergie dans tout le système obtenus au cours de cette étude. Pour ce faire, nous avons conçu un algorithme implémenté sous *Matlab-Simulink* qui Traite des différentes situations possibles que nous appelons à faire face. Le but de ce chapitre est de valider la stratégie par simulation. Le schéma de la **Figure.3** représente la simulation par le logiciel Matlab de notre système hybride choisi.

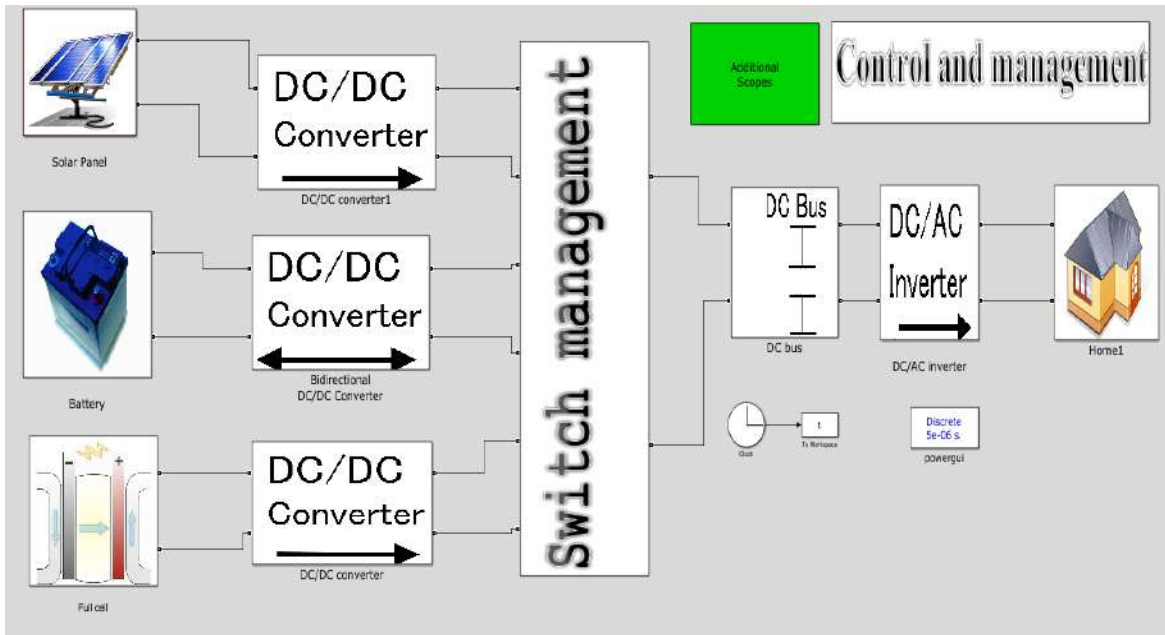


Figure.3 : Schéma de simulation du système global dans Matlab.

Pour simuler le système hybride proposé, nous choisissons deux Bloc Matlab Simulink pour l'éclairement et la température du générateur solaire, ainsi qu'une batterie chargée et une pile à combustible avec un stock contenant **100%** d'oxygène et **100%** d'hydrogène. Pour déterminer rapidement les courbes et les observations, nous choisissons un certain temps. **2,4s** signifie **24 heures** (une journée complète). Nous avons aussi utilisé une charge variable qui représente un site isolé (Maison).

### III.2.1. Allure de l'éclairement (G)

Nous avons supposé que la lumière solaire variés en fonction des heures du jour, elle est mesurée le jour où le ciel est dégagé de manière à atteindre un maximum de  $1000 \frac{w}{m^2}$  à **[1h :15h]** (**[1s : 1.5s]** pour simulation de matlab), La **Figure.4** montre la courbe des changements de lumière durant une journée.

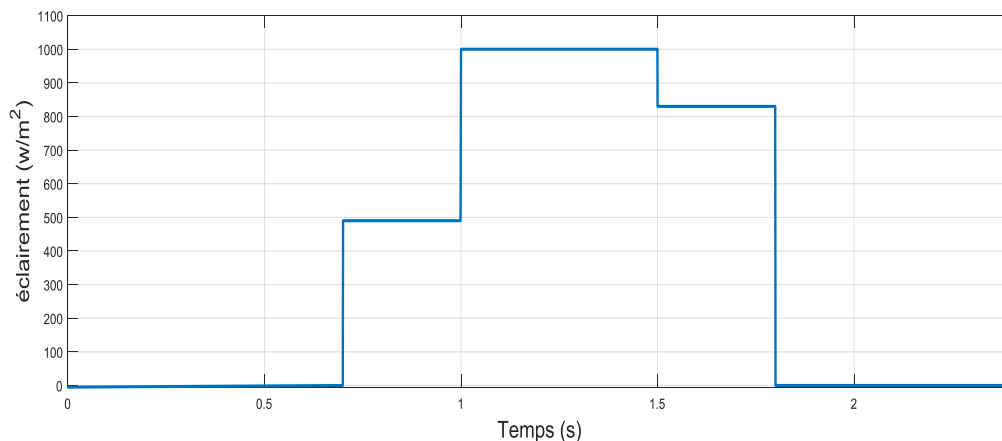
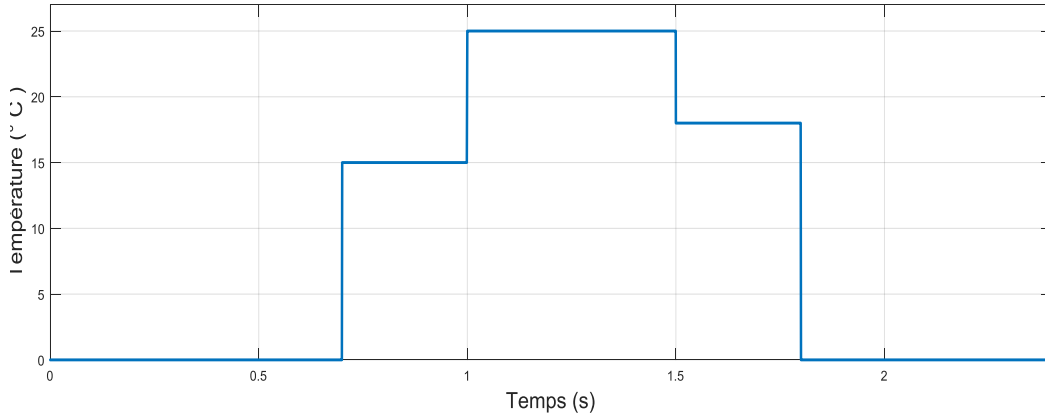


Figure.4 : Allure de l'éclairement

### III.2.2. Allure de la température (T)

La température varie en fonction de l'heure et est mesurée le jour où la température normale est de  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  à  $[1h : 15h]$  ( $[1s : 1.5s]$  pour la simulation *Matlab*). La *Figure.5* montre la courbe des changements de température durant la journée.



*Figure.5 : Allure de la température*

### III.2.3. Les paramètre des sources

Les différentes sources d'énergie de notre système hybride sont illustrées sur les tableaux suivants:

*Tableau.3 : Paramètres du panneau photovoltaïque :*

Panneau photovoltaïque	$V_{OC}$ (V)	$I_{OC}$ (A)	$V_{pm}$ (V)	$I_{pm}$ (A)	P (W)
	36.3	7.84	30	7.35	213

*Tableau.4 : Paramètres de la pile à combustible*

Pile à Combustible	Type de la pile	La tension nominal (V)	Courant nominal (A)	Puissance nominal(KW)
	PEMFC	24	52	1.26

*Tableau.5: Paramètres de la Batterie*

Batterie	Type de batterie	La tension nominale (V)	Capacité (Ah)	Résistance interne ( $\Omega$ )
	Lithium-ion	12.8	40	0.015

- la tension du bus continu est prise égale à  $80\text{ V}$
- Pour calculer les paramètres L et C pour les tout convertisseurs, les expressions suivantes sont utilisées:

$$f = 20\text{ KHZ}, \Delta I_L = 2\% * I_L, \Delta V_{dc} = 10\% * V_{dc}, \Delta V_{pv} = 10\% * V_{pv}, \Delta V_{batt} = 10\% * V_{bat}$$

- **Convertisseur Boost (PV)** :  $L_{PV} = \frac{V_{dc}}{4 * f * \Delta I_L}$  ;  $C_{1pv} = \frac{I_{pv}}{f * \Delta V_{pv}}$  ;  $C_{2pv} = \frac{\Delta I_L}{8 * f * \Delta V_{dc}}$

$$L_{PV} = 1.7\text{ mH} ; C_{1pv} = 0.49\text{ mF} ; C_{2pv} = 0.45\text{ }\mu\text{F}$$

- **Convertisseur Back-Boost** :  $L_{batt} = \frac{V_{dc}}{4 * f * \Delta I_L}$  ;  $C_1 = \frac{I_{bat}}{f * \Delta V_{bat}}$  ;  $C_{2batt} = \frac{\Delta I_L}{8 * f * \Delta V_{dc}}$

**(Batterie)**

$$L_{batt} = 1.4\text{ mH} ; C_{1batt} = 68\text{ }\mu\text{F} ; C_{2batt} = 0.5\text{ }\mu\text{F}$$

- **Convertisseur Boost (pile)** :  $L_{pile} = \frac{V_{dc}}{4 * f * \Delta I_L}$  ;  $C_{pile} = \frac{\Delta I_L}{8 * f * \Delta V_{dc}}$

$$L_{pile} = 1.4\text{ mH} ; C_{pile} = 0.5\text{ }\mu\text{F}$$

**Capacité du bus continu**  $C_{bus} = 6000\text{ }\mu\text{F}$

### III.2.4. Profil de la charge

Le système étudié alimente un site isolé de charges variables.

En utilisant le logiciel « PV syst6.7 », nous obtenons le profil de charge.

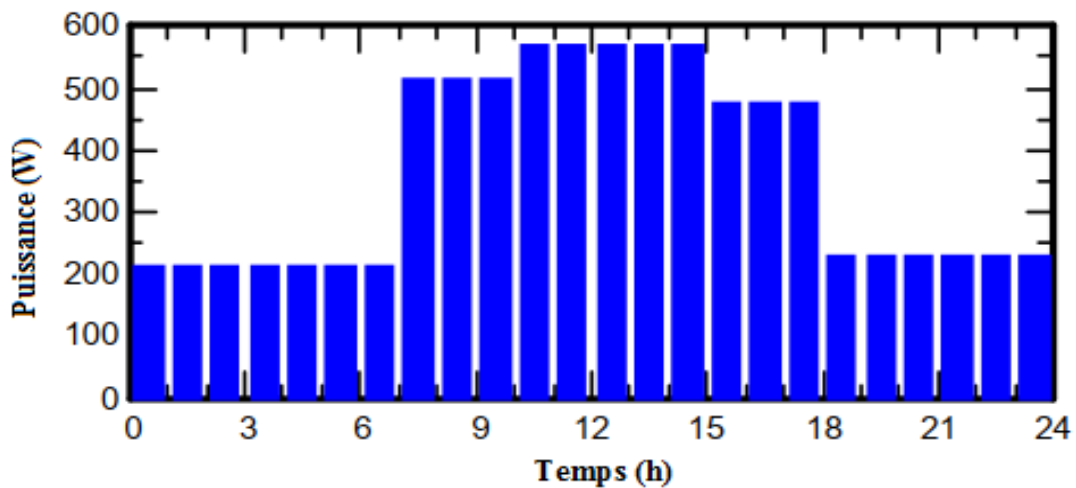


Figure.6 : Profil de la charge

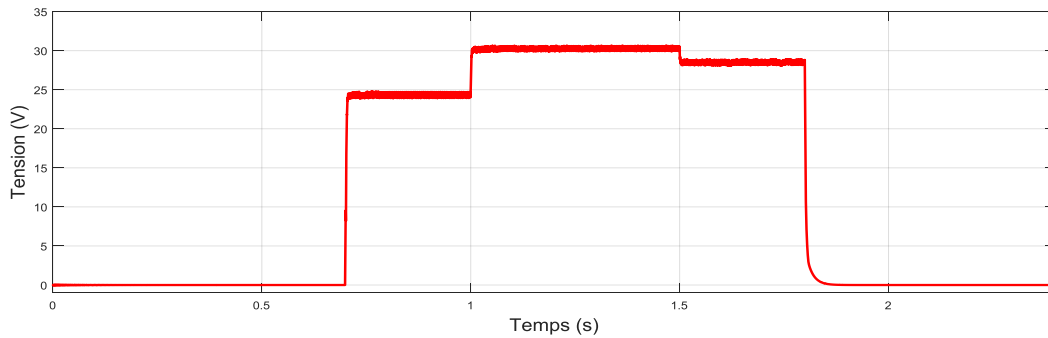
### 3. Résultats de simulation

Les résultats des différents composants du système et de la charge obtenus sont présentés dans les formes suivantes :

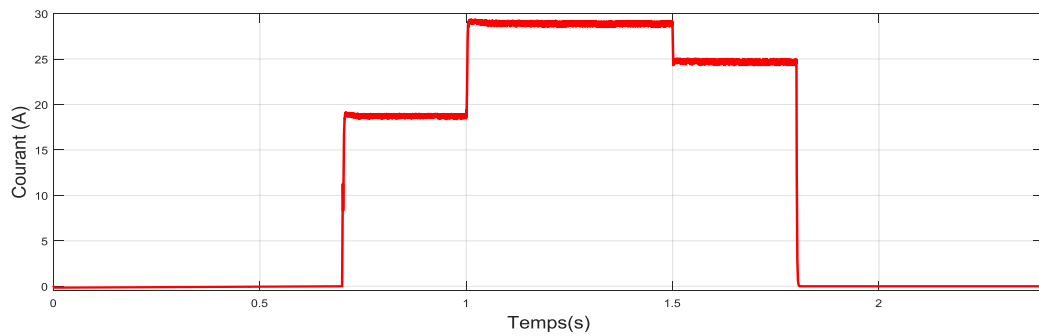
### III.3.1. Générateur photovoltaïque (GPV)

Avant tout il est nécessaire de préciser que notre source photovoltaïque est composée de quatre (4) panneaux formant quatre (4) branches montées en parallèle où chaque branche est une association en série de un panneau(I).

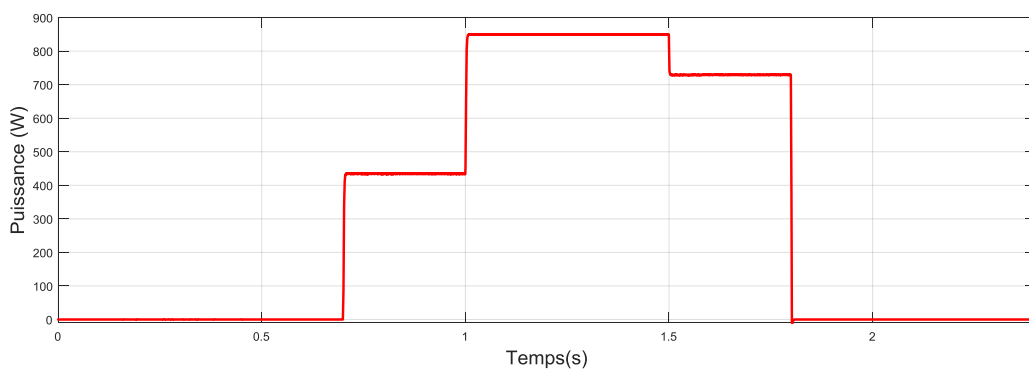
Les figures suivantes (7,8,9) montrent les différentes réponses (tension, courant et puissance) du **GPV** pour un jour.



*Figure.7 : Allure de la tension de GPV*



*Figure.8 : Allure du courant de GPV*



*Figure.9 : Allure de la puissance du GPV*

#### *Commentaires :*

- [0s :0.7s] et [1.8s :2.4s] : le **GPV** ne fonctionne pas à cause de l'absence d'éclairement.



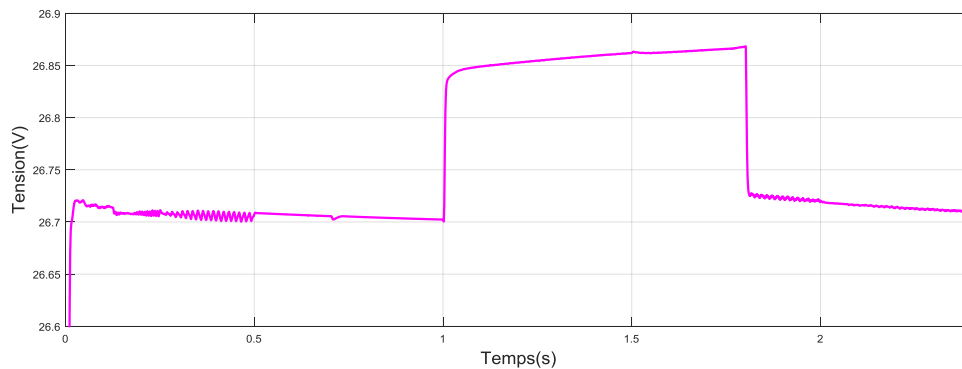
- [0.7s : 1.8s] fonctionnement du *GPV* à cause de la présence d'éclairement et son travail est proportionnel à l'éclairement.

### III.3.2. Batterie

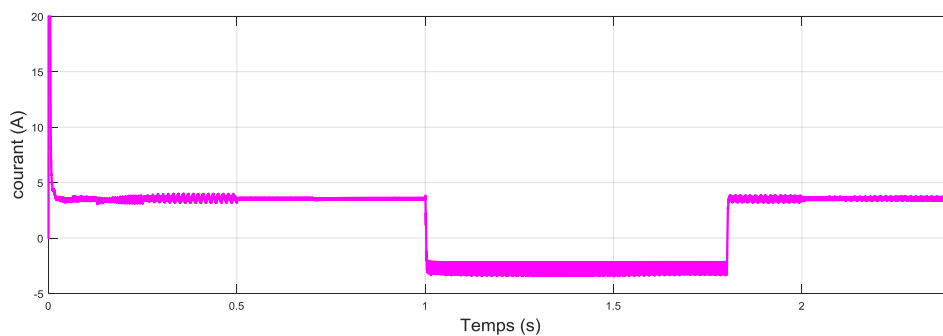
On utilisé deux batterie sont montées en série. Nous avons imposé un courant de décharge de **40 Ah** et de tension **12.8\*2 (V)**.

En pratique afin de préserver les propriétés physico-chimiques de la batterie et de prolonger sa durée de vie on limite la charge et la décharge de la batterie, c'est-à-dire dans notre cas on l'a limité entre **20%** et **80%**, grâce à cette limitation on exploite la zone de fonctionnement linéaire.

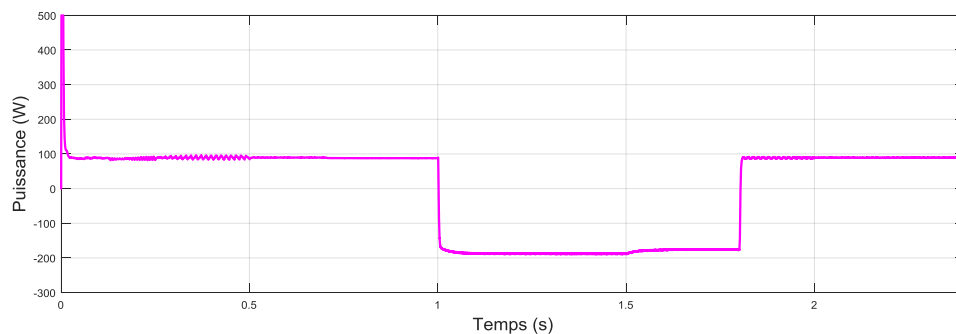
Les figures suivantes (**10, 11,12**) montrent les différentes réponses (tension, courant et puissance) de la batterie pour un jour.



**Figure.10:** Allure de la tension de batterie



**Figure.11 :** Allure du courant de batterie

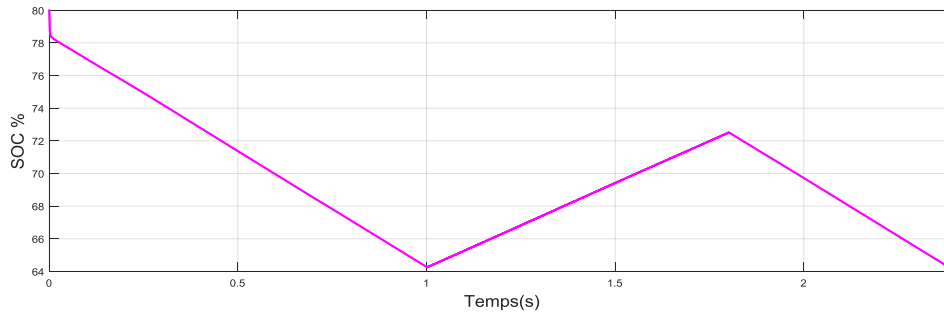


**Figure.12 :** Allure de la puissance du batterie

**Commentaires :** La batterie fonctionne dans deux cas :

- **Cas décharge :** pour couvrir le manque d'énergie (la puissance positive).
- **Cas de charge :** le **GPV** charge la batterie (la puissance négative).

La **Figure.13** représente l'état de charge de la batterie (SOC%) pour une journée d'étude



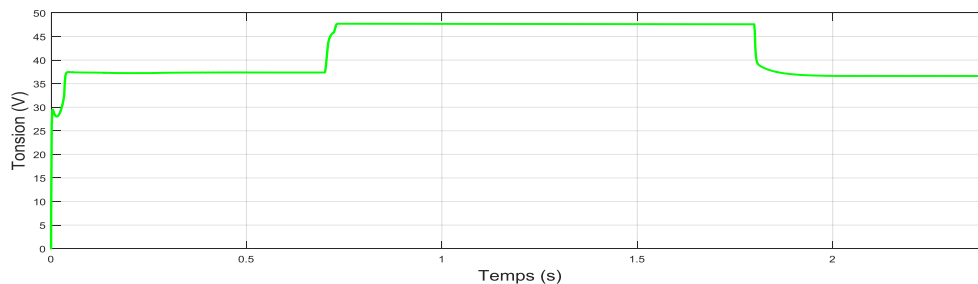
**Figure.13 :** Etat de charge de la batterie.

**Commentaires :**

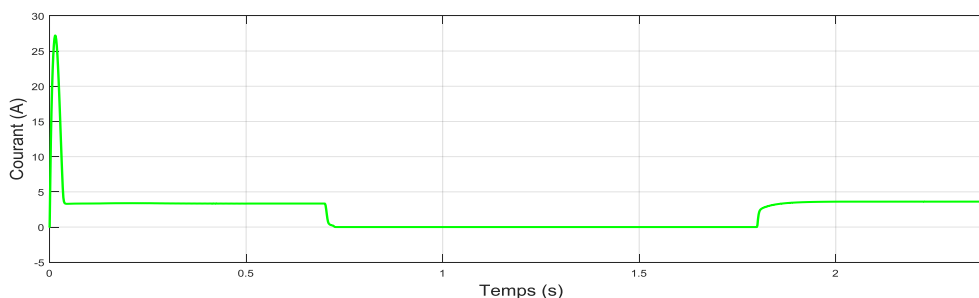
- Le niveau de stockage de la batterie(SOC) diminue lorsque l'état de la batterie se décharge.
- Le niveau de stockage de la batterie(SOC) augmente lorsque l'état de la batterie se charge.

### III.3.3. Pile à combustible

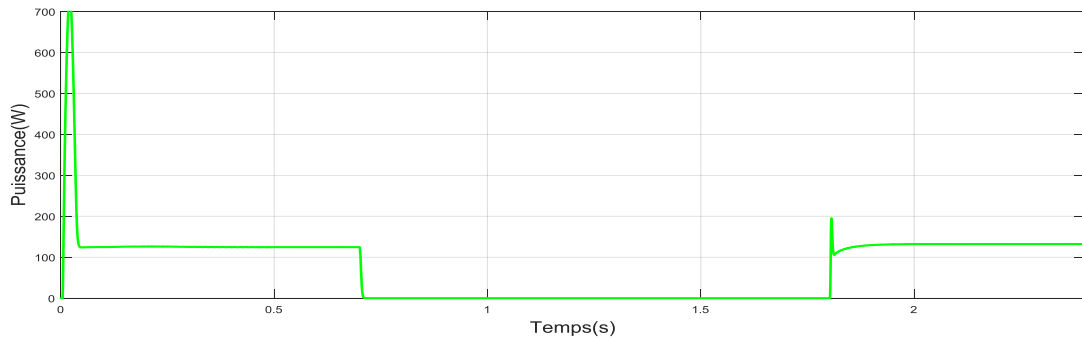
Les figures suivantes (**14, 15,16**) montrent les différentes réponses (tension, courant et puissance) de la Pile à combustible pour un jour.



**Figure.14:** Allure de la tension de pile à combustible.



**Figure.15 :** Allure du courant de pile à combustible



**Figure.16:** Allure de la puissance de pile à combustible

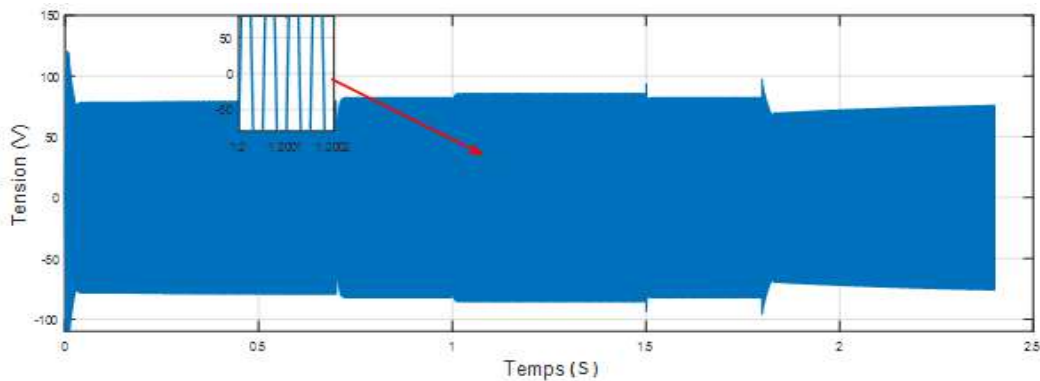
**Commentaires :**

- la pile à combustible fonctionne ( $P_{pile} > 0$ ) à cause de l'absence de **GPV**, et la tension  $V_{pile}$  est à son état normal.
- en cas où la présence de **GPV** la pile à combustible ne fonctionne pas ( $P_{pile} = 0$ ), et la tension  $V_{pile}$  est à son état de repos.

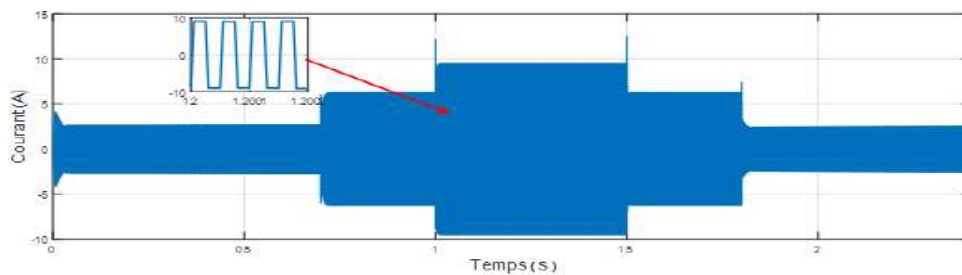
### III.3.4. Charge

On utilise la charge variable et résultats de simulation (les courbes) après le convertisseur DC/AC

Les figures suivantes (17, 18, 19) montrent les différentes réponses (tension, courant et puissance) de la charge pour un jour.

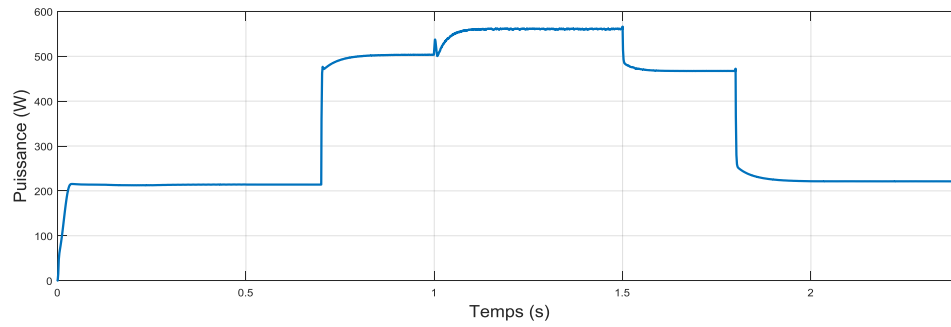


**Figure.17 :** Allure de la tension de la charge



**Figure.18:** Allure du courant de la charge

**Commentaire :** la tension et le courant après le convertisseur (onduleur) est alternatif.



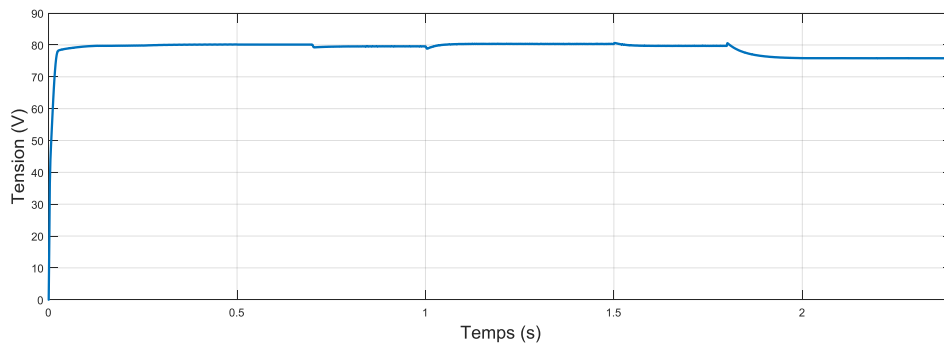
**Figure.19:** Puissance réelle consommée par la charge sur une journée

**Commentaire:**

On remarque que la puissance consommée par la charge est variable selon le profil de la charge choisi.

### III.3.5. Système hybride

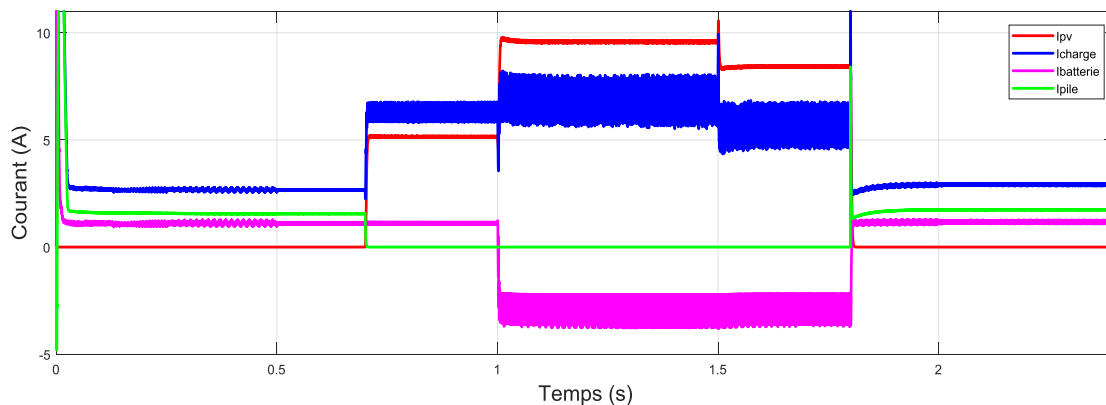
Les figures suivantes (20, 21,22) montrent les différentes réponses (tension, courants et puissances) du système hybride étudié pour un jour.



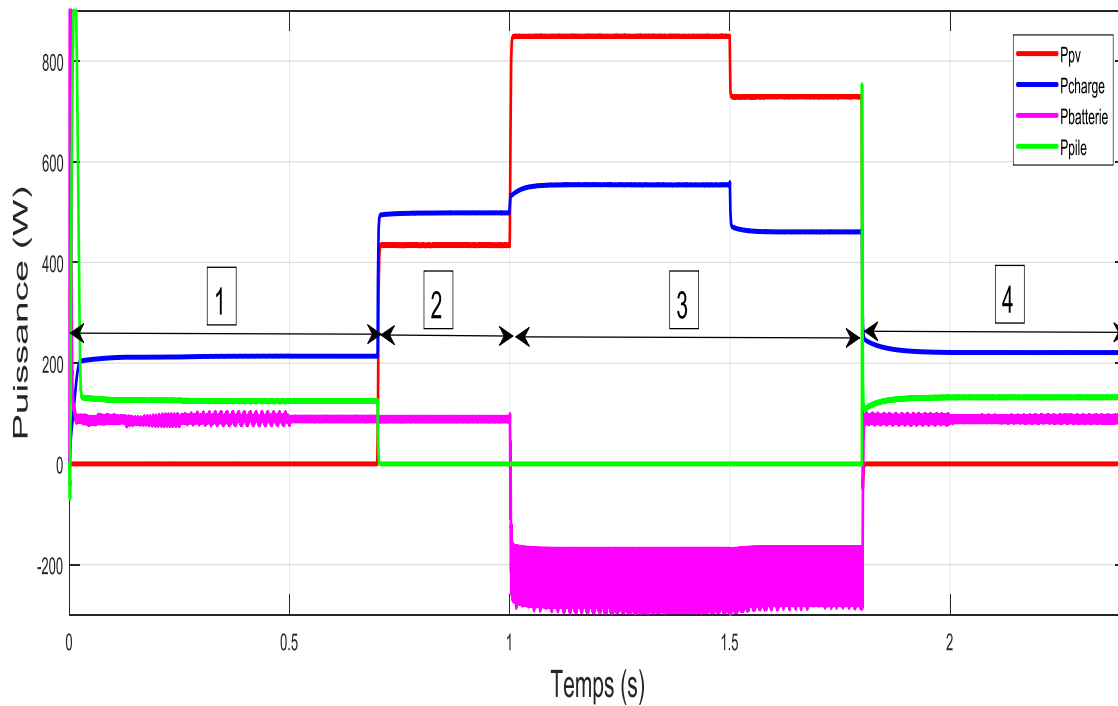
**Figure.20 :** Allure de la tension du bus continu

**Commentaire :**

On constate la tension du bus continu presque constant  $V_{bus} = 80$  (V) car elle est adaptée par les convertisseurs pour avoir une même tension qu'est la tension nominale de la charge.



**Figure.21:** Allure des courants du système global (hybride + charge)



*Figure.22 : Allure des puissances du système global (hybride + charge)*

#### III.4. Discussion des résultats de simulation du système global

Les demandes de charge (site isolé) varient avec le temps selon le profil choisi.

La *Figure.21* représente la puissance de système hybride

**1) Première période : De  $t = 0$  s à  $t = 0.7$  s (00h jusqu'à 7h):**

Le *GPV* ne fonctionne pas car l'éclairage et la température n'existent pas. La batterie (décharge) et la pile à combustible fonctionnent ensemble pour couvrir la demande de la charge. Sachant que le temps de réponse de la batterie est plus rapide que la pile à combustible.

**2) Deuxième période De  $t = 0.7$  s à  $t = 1$  s (7h jusqu'à 10) :**

Le fonctionnement *GPV* est faible en raison de l'affaiblissement de l'éclairage et ne suffit pas pour répondre aux demandes de la charge. La batterie (décharge) intervient pour couvrir le manque d'énergie. A cette période, nous n'avons pas besoin d'énergie de pile à combustible.

**3) Troisième période De  $t = 1$  s à  $t = 1.8$  s (10h jusqu'à 18h):**

Le *GPV* fonctionne très bien parce que l'éclairage atteint le point maximum, ce qui est suffisant pour répondre aux demandes de charge et en chargeant la batterie (charge).

**4) Dernière période De  $t = 1.8$  s à  $t = 2.4$  s (18h jusqu'à 24h):**

Mêmes que la première période.

### III. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les modèles Simulink de chaque élément des chaînes de conversion photovoltaïque avec batteries et la pile à combustible en utilisant les modèles qu'on a obtenus dans la modélisation. Après, nous avons présenté les résultats de simulation du système hybride.

Après avoir examiné ces résultats de la simulation, nous avons conclu qu'il était très important de gérer ce système hybride: Pour assurer une meilleure gestion possible, nous avons utilisé un algorithme approprié. Nous avons montré comment utiliser la batterie dans les deux cas de charge et de décharge et l'utiliser avec la pile à combustible en l'absence du GPV ou en cas d'incapacité du GPV tout seul pour répondre aux besoins de la charge.

# **CONCLUSION GENERALE**

# Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire est consacré à l'étude de la problématique de la gestion de l'énergie dans les systèmes hybrides. Le système hybride étudié est constitué d'un générateur photovoltaïque, une pile à combustible des batteries de stockages et ce système débite sur une charge variable (site isolé).

Le problème de gestion de l'énergie dans les systèmes hybride est important. Cependant, il faut à chaque instant connaître les puissances fournies par les sources (photovoltaïque et la pile à combustible dans notre cas), celle demandé par la charge et l'état de charges des éléments de stockages (batteries). Ensuite il faut que l'algorithme de gestion prenne une décision adéquate pour le bon fonctionnement du système.

Le premier chapitre, consacré sur une étude générale sur les différentes composantes du système hybride ainsi sur les différentes caractéristiques et paramètre des différentes composantes et étude le système hybride (photovoltaïque et la pile à combustible et la batterie).

Nous avons présenté dans le deuxième chapitre la modélisation des différents éléments du système. Un générateur photovoltaïque, la pile à combustible, les régulations de la tension, La modélisation de la batterie de stockage, l'état de charge et décharge des batteries. Pour la recherche de point de puissance maximale (*MPPT*) on a utilisé la méthode *P et O* (perturbation et observation). On a utilisé les batteries (stockage) comme dispositifs de stockage.

Dans le dernier chapitre on la gestion et procédé à la simulation du système hybride (photovoltaïque, la pile à combustible et la batterie) avec une charge variable. Les résultats de simulation présentés montrent le bon fonctionnement des batteries avec des cycles de charge et de décharge et montrent l'efficacité de notre Algorithme de gestion d'énergie.

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

- Utilisé le régulateur *MPPT* floue pour un suivi de la puissance maximale du générateur photovoltaïque.
- Utilisé l'électrolyseur pour production l'hydrogène pour améliore fonctionnement de la pile à combustible.
- Gérer ce système hybride en utilisant les techniques de l'intelligence artificielle.
- Ajouté un autre système production d'énergie.



## Références Bibliographiques

- [1] M. Tiar « *Gestion Optimale D'énergie d'une Chaîne de Production Electrique Renouvelable* » Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, 2017.
- [2] M. Sadaoui, M. Meddouri « *Gestion d'énergie dans un système hybride (Photovoltaïque -Eolien)* » Mémoire de Master en électrotechnique, Université – Bejaia, 2012.
- [3] A. Ferhat, A. Amirouche, « *Etude et implémentation d'une stratégie de contrôle d'un système hybride (Photovoltaïque Diesel)* », Université Abderrahmane Mira, Bejaia, 2012.
- [4] R. Maouedj « *Application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et de Bouzareah* » mémoire de magister, Université abou bekr Belkaid, Tlemcen, Algérie, 2005.
- [5] E. M. Natsheh « *Hybrid Power Systems Energy Management Based on Artificial Intelligence* » Thèse Doctorat, Université Manchester Métropolitain, July 2013.
- [6] I. Tegani « *Optimisation et contrôle d'un micro smart grid utilisant une pile à combustible, des super condensateurs, des batteries, une éolienne et une source photovoltaïque* » Thèse Doctorat LMD, Université Mohamed Khider – Biskra, 04/06/2016.
- [7] P. Thounthong « *Conception d'une source hybride utilisant une pile à combustible et des super-condensateurs* » Thèse Doctorat, L'Institut National Polytechnique de Lorraine, 2005.
- [8] 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.
- [9] L. Stoyanov « *Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables* », Thèse de doctorat à l'Université Technique de Sofia, 2011.
- [10] A. Borni « *Etude et optimisation d'un multi système hybride de conversion d'énergie électrique* » Thèse Doctorat en sciences en électrotechnique, 2015.
- [11] F. Tati, O. Ben Lamoudi « *Etude et Réalisation d'un Système Photovoltaïque Optimisé par Logique Floue* » Mémoire de Master en électrotechnique, Université Ouargla, 2018.
- [12] B. Abdelhalim, « *étude et régulation d'un circuit d'extraction de la puissance maximale d'un panneau solaire* », Mémoire magister. Biskra, 2009.

## Références bibliographiques

---

- [13] K. Himour, « *Optimisation des systèmes photovoltaïques par l'insertion des onduleurs multi niveaux* » Thèse de doctorat, Université de Bejaia, 2015.
- [14] M. Benaouadj, « *Contrôle d'une source hybride batteries/super condensateurs, rechargée par l'énergie photovoltaïque, pour traction électrique (véhicule hybride)*» Mémoire de Magister, Université d'El-Oued, 15 Octobre 2012.
- [15] M. Arrouf, « *Optimisation de l'ensemble onduleur, moteur et pompe branché sur un générateur photovoltaïque* », Thèse de Doctorat, Université MENTOURI de Constantine, 25 Décembre 2007.
- [16] H. Ismail « *Etude et gestion d'un système d'énergie hybride* ». Mémoire de Magister, Université de BEJAIA, 15/12/2015.
- [17] Y. Ammar « *Conception de systèmes de gestion d'énergie pour microsystemes autonomes* », Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier, 2006.
- [18] M.Boukli-Hacene Omar, « *Conception et Réalisation d'un Générateur e Muni d'un Convertisseur MPPT pour une Meilleure Gestion Energétique* », Mémoire de Magister, Université Abou Bakr Belkaid-Tlemcen, 2010.
- [19] Fei Ding\ Peng Li\ Bibin Huang « *Modeling and Simulation of Grid-connected Hybrid Photovoltaic/Battery Distributed Generation System* » Article, Université Tianjin, China 2010.
- [20] N. A. Zambri, A. Mohamed, H. Shareef, and M. Z. C. Wanik« *Design of a Hybrid Fuel Cell with Battery Energy Storage for Stand-Alone Distributed Generation Applications* » Article, International Journal of Electrical and Computer Engineering, 2013.

## Résumé

Les sources d'énergie renouvelables sont des systèmes efficaces et propres comparés aux sources classiques et sont utilisées dans de nombreuses applications, notamment la production d'électricité dans des endroits isolés, le fonctionnement du pompage de l'eau et de nombreux domaines. Cependant, rien ne garantit que la source est toujours disponible (le soleil, le vent et l'hydrogène, etc.) et la solution consiste à faire appel à des systèmes hybrides pour assurer la continuité de l'énergie.

Dans ce mémoire, nous avons étudié la gestion d'un système hybride constitué d'un générateur photovoltaïque, d'une pile à combustible et d'une batterie alimentant un site isolé. Nous avons utilisé l'algorithme *P&O* pour améliorer la sortie du panneau solaire (*MPPT*) et des convertisseurs afin d'assurer l'égalisation de la tension du *Bus*. L'étude a été réalisée sous *Matlab / Simulink*. La gestion du système en fonction des conditions météorologiques, demande de la charge et de la disponibilité des éléments du système.

**Mots clés :** Gestion d'un système hybride, *GPV*, Pile à combustible, Batterie, *P&O*, *MPPT*.

## ملخص

تعد مصادر الطاقة المتجددة أنظمة فعالة و نظيفة مقارنة بالمصادر الكلاسيكية حيث تستخدم في العديد من التطبيقات منها: إنتاج الطاقة في الاماكن المعزولة و تشغيل الضخ المائي و الكثير من المجالات ، لكن لا يوجد ضمان لتوفر المصدر دائما (الشمس، الرياح و الهيدروجين.....).و الحل هو الاعتماد على الأنظمة الهجينة لضمان استمرارية الطاقة.

درسنا في هذه المذكرة ادارة نظام هجين متكون من مولد شمسي، خلية الوقود الهيدروجيني و بطارية يغذي منطقة معزولة استعملنا خوارزمية *P&O* لتحسين انتاج اللوح الشمسي (*MPPT*) و المحولات من اجل ضمان مساواة توتر عند ال *Bus* ، تم تنفيذ الدراسة ب *Matlab / Simulink* و تكون ادارة النظام بحسب ظروف الطقس و احتياج الحمولة و توفر عناصر النظام.

**الكلمات المفتاحية :** إدارة نظام هجين ، مولد شمسي ، خلية الوقود الهيدروجيني ، بطارية ، *MPPT*، *P&O* .

## Abstract

Renewable energy sources are efficient and clean systems compared to conventional sources and are used in many applications, including power generation in isolated locations, water pumping operation and many areas. However, there is no guarantee that the source is always available (sun, wind and hydrogen, etc.) and the solution is to use hybrid systems to ensure continuity of energy.

In this memory, we studied the management of a hybrid system consisting of a photovoltaic generator, a fuel cell and a battery supplying an isolated site. We used the *P&O* algorithm to improve solar panel output (*MPPT*) and converters to provide equalization of *Bus* voltage. The study was conducted under *Matlab / Simulink*. The management of the system according to the meteorological conditions, demand of the load and the availability of the elements of the system.

**Keywords:** hybrid system management, *PVG*, hydrogen fuel cell, battery, *P&O* ,*MPPT*.