

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE MINISTÈRE  
DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
CENTRE UNIVERSITAIRE SALHI AHMED – NAAMA



INSTITUT DES TECHNOLOGIES  
DÉPARTEMENT DE GÉNIE ÉLECTRIQUE

# MÉMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :

**Énergies Renouvelables**

*Option : Énergies Renouvelables en Électrotechnique*

**Intitulé :**

---

## ETUDE DE LA METHODE DE PERTURBATIONS ET OBSERVATIONS D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAIQUE

---

**Présenté par :**

- Alaouna Souad
- Belfar Nassima
- Bougrine Hadjer

*Soutenu le : 22/06/2023 devant le Jury :*

<i>M.Sofi Naima</i>	<i>MCB</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Président</i>
<i>M. Haouam Imane</i>	<i>MCB</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Encadreur</i>
<i>M. Brahimi Mohamed</i>	<i>MCA</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Examineur</i>

## ***Remerciement***

*Nous remercions d'abord Dieu qui nous a amenés à ce moment merveilleux pour lequel nous avons travaillé pendant de nombreuses années, puis nous remercions nos parents qui se sont sacrifiés afin de nous faire vivre ce moment, nous remercions notre encadrant Dr.Haouam Imane qui nous a aidés par ses conseils, nous remercions tous les professeurs qui travaillent parfaitement pour la réussite des travaux de cette université surtout notre docteur Brahimi Mohamed et tous les jurys, enfin nous remercions tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin même avec une prière ou un mot gentil, Merci à tous du fond du cœur.*

## *Dédicace*

*Nous dédions ce travail à nos parents et à toute notre famille qui ont été notre soutien après Dieu, ainsi qu'à nos proches, amis et collègues qui nous avons passé un bon moments avec eux à chaque étape de notre vie, à tous ceux qui nous ont aidés et ont mis leur touche spéciale dans ce travail, à tous ceux qui ont apporté de la joie dans nos cœurs, à tous ceux qui se soucient de notre bonheur et leur joie de notre joie, Nous vous disons, vous méritez vraiment d'être mentionnés et loués*

# *Sommaire*

# Sommaire

Remerciement	
Dédicace	
Liste des abréviations	
Liste des figures	
Résumé	
Introduction générale	

## Chapitre I : L'énergie solaire et les systèmes photovoltaïques

I.1 Introduction :	4
I.2 L'énergie solaire :	4
I.2.1 Les types d'énergies solaires :	4
I.3 Le rayonnement solaire :	6
I.3.1 Le spectre du rayonnement :	7
I.4 Le principe de la conversion photovoltaïque :	8
I.5 Le système photovoltaïque :	8
I.6 Système PV raccordé au réseau :	12
I.7 Système autonome :	13
I.7.1 Les systèmes au fil du soleil :	15
I.7.2 Les systèmes avec stockage :	16
I.8 Système hybride :	16
I.9 Les avantages et les inconvénients des systèmes PV :	16
I.10 Conclusion :	17

## Chapitre II : Le générateur photovoltaïque et les convertisseurs DC/DC

II.1 Introduction :	19
II.2 L'effet photovoltaïque :	19
II.3 Les éléments d'un système photovoltaïque :	20
II.3.1 Cellule photovoltaïque :	20
II.3.1.1 Constituions de la cellule photovoltaïque :	21
II.3.1.2 Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque :	22
II.3.1.3 Les technologies des cellules solaires :	23
II.3.1.4 Caractéristiques électrique d'une cellule photovoltaïque :	27
II.3.1.5 Modélisation de la cellule photovoltaïque :	31
II.4 Association de module PV :	35
II.4.1 Association des cellules en séries :	36
II.4.2 Association des cellules en parallèles :	36
II.4.3 Association des cellules (série et parallèle) :	37
II.5 Caractéristique électrique :	39

II.6 Générateur photovoltaïque et ses performances :	39
II.6.1 Définition d'un générateur photovoltaïque :	39
II.6.2 Constitution d'un générateur photovoltaïque :	40
II.6.3 Caractéristique Courant-Tension :	41
II.7 Connexion directe source-charge :	49
II.8 Étage d'adaptation entre un Générateur PV et une charge :	50
II.9 Les convertisseurs DC-DC :	51
II.9.1 Les types des convertisseurs DC /DC :	51
II.10 Conclusion :	58

### **CHAPITRE III : La Commande MPPT (P&O)**

III.1 Introduction :	60
III.2 Le principe de la Commande MPPT :	60
III.3 Classification Des Commandes MPPT :	62
III.4 La méthode de perturbation et observation (P&O) :	63
III.4.1 Le principe de la commande P&O :	64
III.4.2 L'algorithme de la méthode P&O:	65
III.4.3 Les avantages et les inconvénients de P&O :	67
III.5 Simulation d'un système PV adapté par la commande MPPT (P&O) :	67
III.6 Interprétation des résultats :	73
III.7 Conclusion :	74

Conclusion générale

*Bibliographie*

Webographie

Annexe

## Liste des abréviations

**GPV** : Générateur photovoltaïque.

**PV** : Photovoltaïque.

**MPP** : Maximum power point.

**MPPT**: Maximum power point tracking.

**P MAX** : Puissance Maximale d'un Générateur Photovoltaïque.

**V<sub>pv</sub>** : La tension aux bornes du GPV.

**I<sub>pv</sub>** : Le courant que peut délivrer un GPV.

**P<sub>pv</sub>** : La puissance d'un GPV.

**V<sub>cel</sub>** : La tension aux bornes de la cellule PV.

**I<sub>cel</sub>** : le courant de la cellule PV.

**I<sub>cc</sub>** : Courant de court-circuit d'une cellule ou d'un module solaire (A).

**V<sub>co</sub>** : Tension du circuit ouvert (V).

**V<sub>opt</sub> et I<sub>opt</sub>** : Tension et Courants optimaux correspondant à P<sub>MAX</sub>.

**DC** : Courant continu.

**AC** : Courant alternative.

**$\alpha$**  : Le rapport cyclique.

**DC-DC** : Direct current-Direct current.

**CC-CC** : Courant continu- Courant continu

**CS** : Convertisseur statique.

**P&O** : Perturb and Observe.

**U<sub>oc</sub>** : Tension de circuit ouvert.

**V<sub>max</sub>** : Tension de puissance maximale.

**I<sub>max</sub>** : Courant de puissance maximale.

**P<sub>max</sub>** : Puissance maximale.

**I<sub>r</sub>** : Irradiation.

# LISTE DES FIGURES

## Chapitre I : L'énergie solaire et les systèmes photovoltaïques

FIGURE I. 1 : TRANSFORMATION DE L'ENERGIE LUMINEUSE EN ENERGIE PV .....	4
FIGURE I. 2: ENERGIES SOLAIRE THERMIQUES .....	5
FIGURE I. 3: ENERGIES SOLAIRE THERMODYNAMIQUE. ....	5
FIGURE I. 4: ENERGIES SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE. ....	6
FIGURE I. 5: TYPE DE RAYONNEMENT SOLAIRE REÇUS AU SOL.....	7
FIGURE I. 6: LE SPECTRE DE RAYONNEMENT SOLAIRE. ....	8
FIGURE I. 7: LE PRINCIPE DE LA CONVERSION DE L'ENERGIE PV.....	8
FIGURE I. 8: SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE .....	9
FIGURE I. 9: SYSTEME DE PHOTOVOLTAÏQUE PLUS DETAILLES .....	9
FIGURE I. 10: SYMBOLE D'UN ONDULEUR. ....	9
FIGURE I. 11: REGULATEUR AUTONOME .....	10
FIGURE I. 12: EXEMPLE DE CABLAGE.....	11
FIGURE I. 13 : SYSTEME PV RACCORDE AU RESEAU CENTRAL. ....	12
FIGURE I. 14 : SYSTEME PV RACCORDE AU RESEAU SANS STOCKAGE D'ENERGIE.....	12
FIGURE I. 15 : SYSTEME PV RACCORDE AU RESEAU AVEC STOCKAGE D'ENERGIE .....	13
FIGURE I. 16 : SYSTEME PV AUTONOME .....	13
FIGURE I. 17 : COUPLAGE DIRECT GPV-CHARGE.....	13
FIGURE I. 18 : SYSTEME PV AUTONOME ALIMENTANT DES CHARGES DC ET AC (ETAGE 1 EST DC/AC).....	14
FIGURE I. 19 : SYSTEME PV AUTONOME ALIMENTANT DES CHARGES DC ET AC (ETAGE 1 EST DC/DC).....	15
FIGURE I. 20 : SYSTEME DE POMPAGE AU FIL DU SOLEIL. ....	15

## Chapitre II : Le générateur photovoltaïque et les convertisseurs DC/DC

FIGURE II. 1 : L'EFFET PHOTOVOLTAÏQUE.....	20
FIGURE II. 2 : STRUCTURE BASIQUE D'UNE CELLULE SOLAIRE. ....	21
FIGURE II. 3 REPRESENTATION SCHEMATIQUE D'UNE CELLULE SOLAIRE.....	22
FIGURE II. 4 LE PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UNE CELLULE SOLAIRE. ....	23
FIGURE II. 5 : LES DIFFERENTES TECHNOLOGIES. ....	24
FIGURE II. 6 : CELLULE EN SILICIUM MONO-CRISTALLIN.....	25
FIGURE II. 7 : CELLULE EN SILICIUM POLY-CRISTALLIN.....	25
FIGURE II. 8 CELLULE EN SILICIUM AMORPHE (COUCHE MINCE). ....	26
FIGURE II. 9 : LE PASSAGE D'UNE CELLULE A UN CHAMP PHOTOVOLTAÏQUE. ....	26
FIGURE II. 10 SCHEMA EQUIVALENT ELECTRIQUE DE LA CELLULE PV. ....	27
FIGURE II. 11 : COURBE I(V) A $T=25^\circ$ ET UN ECLAIREMENT DE $1000W/M^2$ . ....	29
FIGURE II. 12 : COURBE P(V) A $T=25^\circ$ ET UN ECLAIREMENT DE $1000 W/M^2$ .....	31
FIGURE II. 13 : SCHEMA EQUIVALENT D'UNE CELLULE IDEALE.....	31
FIGURE II. 14 : SCHEMA EQUIVALENT D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE REELLE.....	32
FIGURE II. 15 : MODULE PHOTOVOLTAÏQUE .....	34
FIGURE II. 16 COMPOSITION D'UN MODULE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE.....	35
FIGURE II. 17 : CHAMP PHOTOVOLTAÏQUE. ....	35
FIGURE II. 18 CARACTERISTIQUE COURANT TENSION DE NS CELLULE EN SERIE. ....	36
FIGURE II. 19 : CARACTERISTIQUE COURANT TENSION DE (NP) CELLULE EN PARALLELE.....	37
FIGURE II. 20 A) : ARCHITECTURE CLASSIQUE D'UN PANNEAU SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE AVEC DIODES DE PROTECTIONS. (B) DEFAILLANCE D'UNE DES CELLULES DU MODULE PV ET ACTIVATION DE DIODE DE CIRCULATION IPV. ....	38
FIGURE II. 21 : CARACTERISTIQUE D'UN ASSEMBLAGE SERIE/PARALLELE DE NS ET NP CELLULES PV.....	38
FIGURE II. 22 : CARACTERISTIQUE I-V D'UNE CELLULE SOLAIRE ; A L'OBSCURITE ET SOUS ECLAIREMENT. ....	39
FIGURE II. 23 : LES COMPOSANTS D'UN GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE.....	40
FIGURE II. 24 : CARACTERISTIQUES I(V) ET P(V) D'UN GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE.....	40
FIGURE II. 25 : EXEMPLES D'ASSOCIATION SECURISEE DE DEUX MODULES PV COMMERCIAUX EN PARALLELES AVEC LEURS DIODES DE PROTECTIONS. ....	41
FIGURE II. 26 : (A) CARACTERISTIQUE $I=F(V)$ , (B) CARACTERISTIQUE $P=F(V)$ DU GENERATEUR. ....	43

FIGURE II. 27 : LES DIFFERENTES ZONES DE LA CARACTERISTIQUE I (V) AUX CONDITIONS STC. ....	43
FIGURE II. 28 : SCHEMATISATION D'UN GPV ELEMENTAIRE AVEC DIODES BY-PASS ET DIODE ANTI- RETOUR. ....	45
FIGURE II. 29 : CARACTERISTIQUE (I-V) POUR DIFFERENTES VALEURS DE RAYONNEMENT A 25°C. ....	45
FIGURE II. 30 : CARACTERISTIQUE P –V POUR DIFFERENTES VALEURS DE RAYONNEMENT A 25°C. ....	46
FIGURE II. 31 : CARACTERISTIQUE I -V POUR DIFFERENTES VALEURS DES TEMPERATURES A 1000W/M2. ....	46
FIGURE II. 32 : CARACTERISTIQUE P –V POUR DIFFERENTES VALEURS DES TEMPERATURES A 1000W/M2. ....	47
FIGURE II. 33 (A) : INFLUENCE DU NOMBRE DE MODULE PARALLELE SUR LA CARACTERISTIQUE I-V. ....	47
FIGURE II. 34 (B) : INFLUENCE DU NOMBRE DE MODULE PARALLELE CARACTERISTIQUE P –V. ....	48
FIGURE II. 35 (A) : INFLUENCE DU NOMBRE DE MODULE SERIE SUR CARACTERISTIQUE I-V. ....	48
FIGURE II. 36 (B) : INFLUENCE DU NOMBRE DE MODULE SERIE SUR CARACTERISTIQUE P-V. ....	48
FIGURE II. 37 : CONNEXION DIRECTE SOURCE-CHARGE. ....	50
FIGURE II. 38 : L'ETAGE D'ADAPTATION DANS UNE CHAINE PHOTOVOLTAÏQUE. ....	50
FIGURE II. 39 : SYMBOLE D'UN HACHEUR. ....	51
FIGURE II. 40 : SCHEMA DE PRINCIPE D'UN HACHEUR BOOST. ....	54
FIGURE II. 41 : SCHEMA DE PRINCIPE D'UN HACHEUR ELEVATEUR. ....	55
FIGURE II. 42 : SIGNAL DE COMMANDE DE L'INTERRUPTEUR K. ....	56
FIGURE II. 43 : SCHEMA DE PHASE ACTIVE. ....	56
FIGURE II. 44 : SCHEMA DE PHASE DE ROUE LIBRE. ....	57

### **CHAPITRE III : La Commande MPPT (P&O)**

FIGURE III. 1: COURBE CARACTERISTIQUE DE PUISSANCE D'UN GPV. ....	60
FIGURE III. 2 : CHAINE DE CONVERSION D'ENERGIE SOLAIRE COMPRENANT UN PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE, UN CONVERTISSEUR BOOST, UNE COMMANDE MPPT ET UNE CHARGE. ....	61
FIGURE III. 3 : PRINCIPE DE LA COMMANDE MPPT. ....	61
FIGURE III. 4 : ORGANIGRAMME DE LA PREMIERE COMMANDE MPPT. ....	62
FIGURE III. 5 : CARACTERISTIQUE DE FONCTIONNEMENT DE LA METHODE P&O. ....	64
FIGURE III. 6 : ORGANIGRAMME DE L'ALGORITHME P&O. ....	65
FIGURE III. 7 : PRINCIPE DE LA METHODE HC. ....	66
FIGURE III. 8 : ORGANIGRAMME DE L'ALGORITHME DE HILL CLIMBING. ....	66
FIGURE III. 9 : SCHEMA MATLAB/SIMULINK DE LA COMMANDE MPPT. ....	67
FIGURE III. 10 : VARIATION DE TENSION DU PANNEAU. ....	68
FIGURE III. 11 : VARIATION DE TENSION DE LA CHARGE. ....	68
FIGURE III. 12 : VARIATION DU COURANT DU PANNEAU. ....	68
FIGURE III. 13: VARIATION DE COURANT DE LA CHARGE. ....	69
FIGURE III. 14 VARIATION DE PUISSANCE DU PANNEAU. ....	69
FIGURE III. 15 : VARIATION DE PUISSANCE DE LA CHARGE. ....	69
FIGURE III. 16 : VARIATION DE TENSION DU PANNEAU. ....	70
FIGURE III. 17 : VARIATION DE TENSION DE LA CHARGE. ....	70
FIGURE III. 18 : VARIATION DU COURANT DU PANNEAU. ....	70
FIGURE III. 19 : VARIATION DU COURANT DE LA CHARGE. ....	71
FIGURE III. 20 : VARIATION DE PUISSANCE DU PANNEAU. ....	71
FIGURE III. 21 : VARIATION DE PUISSANCE DE LA CHARGE. ....	71
FIGURE III. 22 : VARIATION DE TENSION DU PANNEAU. ....	72
FIGURE III. 23 : VARIATION DE TENSION DE LA CHARGE. ....	72
FIGURE III. 24 : VARIATION DU COURANT DU PANNEAU. ....	72
FIGURE III. 25 : VARIATION DU COURANT DE LA CHARGE. ....	73
FIGURE III. 26 : VARIATION DE PUISSANCE DU PANNEAU. ....	73
FIGURE III. 27 : VARIATION DE PUISSANCE DE LA CHARGE. ....	73

## LISTE DES TABLEAUX

TABLEAUX I. 1 LES DIFFERENTS TYPES DES BATTERIES.....	11
TABLEAUX II. 1 : PRESENTE LE RENDEMENT DES DIFFERENTS TYPES DES CELLULES.....	26
TABLEAUX III. 1 : FONCTIONNEMENT DE P&O.....	64

## **Résumé :**

Le générateur photovoltaïque GPV est une source caractérisée par un point de fonctionnement où la puissance générée est optimale. Ce point se déplace en fonction des conditions atmosphériques. L'adaptation entre le GPV et la charge permet d'améliorer la puissance et le rendement de système PV. L'utilisation optimale de l'énergie fournie par le générateur solaire nécessite l'usage des moyens techniques permettant d'assurer cette tâche.

L'objectif de ce mémoire est d'optimiser le fonctionnement d'une chaîne de conversion PV, c'est pour cette raison nous avons étudié un système de production de l'énergie photovoltaïque qui travaille sur la maximisation de puissance appelé MPPT (Maximum power point tracker) par la technique "Perturbation et Observation" (P&O) pour assurer la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur photovoltaïque à l'aide d'un convertisseur élévateur.

## **Abstract:**

The photovoltaic generator GPV is a source characterized by an operating point where the generated power is optimal. This point moves according to atmospheric conditions. The adaptation between the GPV and the load allow to increase the power and the efficiency of the PV system. The optimal use of the energy provided by the solar generator requires the use of technical means to ensure this task.

The objective of this thesis is to optimize the operation of a PV conversion chain, it is for this reason that we have studied a photovoltaic energy production system which works on power maximization called MPPT (Maximum power point tracker) by the technique "Disturbance and Observation" (P&O) to ensure the continuation of the maximum power supplied by the photovoltaic generator using a boost converter.

**Mots clés :** Système photovoltaïque, générateur photovoltaïque, Convertisseur DC /DC Boost, Algorithme MPPT (P&O), méthode de contrôle directe.

# *Introduction générale*

## *Introduction générale*

---

L'énergie solaire est une source d'énergie inépuisable, propre, disponible partout et encore renouvelable. Mais la forme sous laquelle nous recevons l'énergie n'est pas nécessairement celle sous laquelle cette énergie est utilisable, c'est pourquoi nous devons utiliser des processus de conversion de l'énergie : les cellules photovoltaïques.

La conversion directe du rayonnement solaire en énergie électrique génère une énergie photovoltaïque. Cette transformation d'énergie s'effectue à travers d'une cellule photovoltaïque dite PV basée sur un phénomène physique connu sous le nom d'effet photovoltaïque, qui consiste à donner une force électromotrice lorsque la surface de la cellule est exposée à la lumière. La combinaison de plusieurs cellules série/parallèle crée un générateur photovoltaïque GPV, qui a une caractéristique courant-tension (I-V) non linéaire présentant un point de puissance maximale.

Les caractéristiques (I-V) d'un PV dépendent du niveau de l'éclairement et de la température de la cellule, ainsi que le point de fonctionnement de ces derniers dépendent directement de la charge qu'il fournit.

Les régulateurs solaires MPPT recherchent le point de puissance maximale MPP qui correspond à une tension et un courant de panneau PV optimaux pour lesquels la puissance maximale dépend d'un certain nombre des paramètres météorologiques, tel que le niveau d'irradiation solaire et la température.

Au début de notre mémoire, nous présenterons des généralités sur l'énergie solaire et ses différents types ainsi sur les systèmes photovoltaïques. Nous passerons ensuite à la modélisation d'un générateur photovoltaïque ainsi le convertisseur continu-continu qui a le rôle d'adaptation d'impédance entre la source et la charge. Dans le troisième chapitre nous présenterons la méthode perturbation et observation (P&O) qui est une approche largement répandue dans la recherche de MPPT.

Finalement, nous présenterons, des résultats de simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT numérique « perturbation et observation ».

*Chapitre I :*  
*L'énergie solaire et les*  
*systemes*  
*photovoltaïques*

**I.1 Introduction :**

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie de la lumière en électricité. Cette conversion s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basé sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule.

**I.2 L'énergie solaire :**

L'énergie solaire est la ressource énergétique la plus abondante sur terre. Elle est à l'origine de la majorité des énergies renouvelables, mais elle est très atténuée. Le rayonnement solaire peut être utilisé pour produire soit directement de l'électricité à l'aide de semi-conducteur photovoltaïque, soit de la chaleur solaire thermique pour le chauffage ou la production électrique. L'énergie solaire se présente bien comme une alternative aux autres sources d'énergie, elle représente un potentiel considérable. En effet, la terre reçoit plus de 3000 h de lumière solaire par année avec un haut niveau d'éclairement. Avec une optimisation des angles de réception, la moyenne annuelle journalière est de 5 à 7 kWh /m<sup>2</sup>/jour [1] L'énergie solaire est utilisée essentiellement pour deux usages : la production de chaleur et la production d'électricité. [2]



**Figure I.1 :** Transformation de l'énergie lumineuse en énergie PV.

**I.2.1 Les types d'énergies solaires :**

L'avantage de la technologie solaire est qu'elle permet de pratiquer des prix d'électricité peu élevés. Les installations des centrales sont déployées sur plusieurs hectares pour générer en retour une quantité d'électricité suffisante pour alimenter un territoire donné. Il existe différents types d'énergies solaires à savoir :

**a. L'énergie thermique :**

Le solaire thermique actif permet de transmettre la chaleur du rayonnement solaire au sein d'un fluide, parfois de l'air, le plus souvent de l'eau, par la mise en œuvre des capteurs solaires. Ces techniques peuvent assurer la production d'eau chaude sanitaire ou d'eau distillée, le chauffage des piscines et des habitations ainsi que le séchage [3].

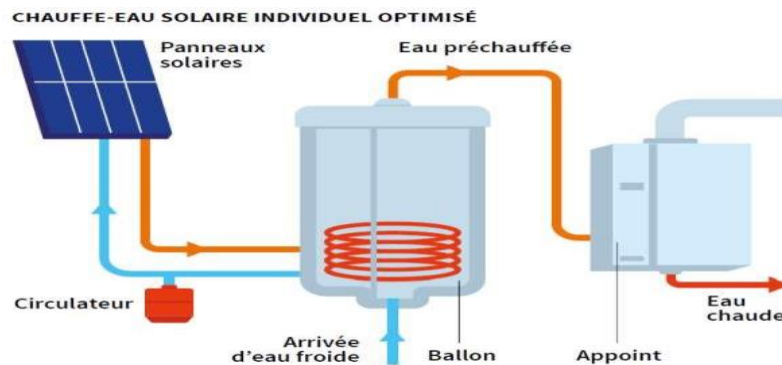


Figure I.2: énergies solaire thermiques.

**b. L'énergie solaire thermodynamique :**

L'énergie solaire thermodynamique est produite via des centrales solaires à concentration. Il s'agit d'un assemblage de miroirs contenant des fluides caloporteurs, couplés à un générateur d'électricité solaire. À l'image des panneaux solaires thermiques, ce sont les miroirs qui transforment l'énergie collectée par les rayons du soleil, en chaleur à une température très élevée. Bien supérieure à une température à laquelle elle a collectée. Elle peut aller de 250 à 800 degrés selon la technique employée.

Cette chaleur sera convertie en électricité au moyen d'une turbine et d'un alternateur comme dans une centrale thermique. [4]



Figure I.3: énergies solaire thermodynamique.

### c. L'énergie solaire photovoltaïque :

L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie électrique produite à partir du rayonnement solaire. Elle fait partie des énergies renouvelables. Pour exploiter cette énergie, on doit concevoir des cellules photovoltaïques qui convertissent l'énergie lumineuse en électricité. Plusieurs cellules sont reliées entre elles sur un module solaire photovoltaïque. Plusieurs modules sont regroupés pour former une installation solaire. [3]



Figure I.4: énergies solaire photovoltaïque.

### I.3 Le rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire est la matière première de l'énergie solaire. C'est une propagation d'une onde de longueur qui varie entre 0.2 et  $4.10^{-6}$  m. sans la nécessité d'un support physique pour se déplacer, il arrive au sol après la perte d'une grande partie de son intensité, à cause d'une partie de l'ultraviolet, qui s'absorbent. [5]

- **Le rayonnement direct :** Reçu directement du soleil sans diffusion atmosphérique. Ces Les rayons sont parallèles entre eux. Ainsi, il projette une ombre et peut être focalisé par un miroir. Il peut être mesuré avec un pyranomètre. [6]
- **Le rayonnement diffus :** par l'atmosphère (air, nuage, aérosol). La diffusion est le phénomène de division d'un faisceau parallèle de lumière en plusieurs faisceaux les faisceaux tirent dans toutes les directions. Dans le ciel, il y a des molécules d'air, Les gouttelettes d'eau (nuages) et la poussière qui produisent cette (rafale) de rayons solaires. Cela dépend donc d'abord des conditions météorologiques. [6]
- **Le rayonnement solaire réfléchi :** ou l'albédo du sol est le rayonnement réfléchi par le sol Objets au sol ou à sa surface. Quand le sol est Réfléchissant spécial (eau, neige). [6]

- **Le rayonnement global** : est la somme de tous les rayonnements reçus, y compris le Rayonnement réfléchi par le sol et les objets qui se trouvent à sa surface. Il est mesuré par un pyranomètre ou un solarimètre sans écran. [6]

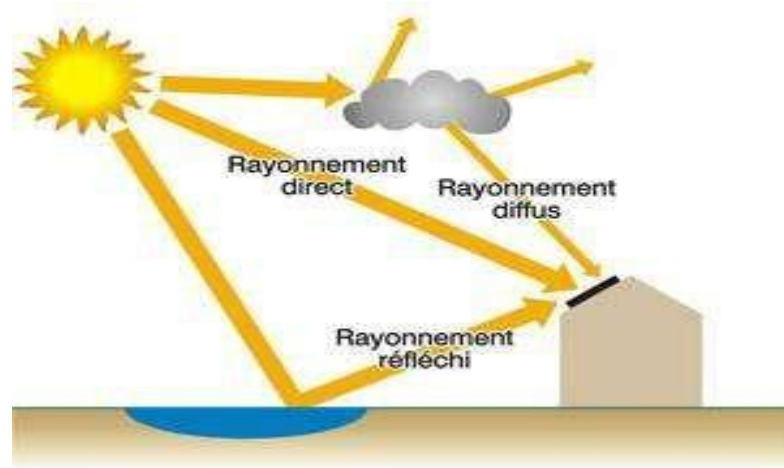


Figure I.5: Type de rayonnement solaire reçu au sol.

### I.3.1 Le spectre du rayonnement :

Le rayonnement électromagnétique est constitué de "particules" lumineuses appelées photons. L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde. L'énergie de chaque photon est donnée par :

$$E = h\nu = hc/\lambda \quad (\text{I.1})$$

$$h = 6,62 \cdot 10^{-34} \quad \text{JS}^{-1} \text{ est la constante de Planck}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ mS}^{-1} \text{ étant la vitesse de propagation}$$

Le spectre du rayonnement extraterrestre correspond environ à l'émission d'un corps noir porté à 5800° K. Une courbe standard, compilée selon les données recueillies par les satellites, est désignée sous le nom de AM0. Sa distribution en énergie est répartie en [7] :

- Ultraviolet **UV**  $0.20 < \lambda < 0.38 \text{ mm}$  **6.4%**
- Visible  $0.38 < \lambda < 0.78 \text{ mm}$  **48.0%**
- Infrarouge **IR**  $0.78 < \lambda < 10 \text{ mm}$  **45.6%**

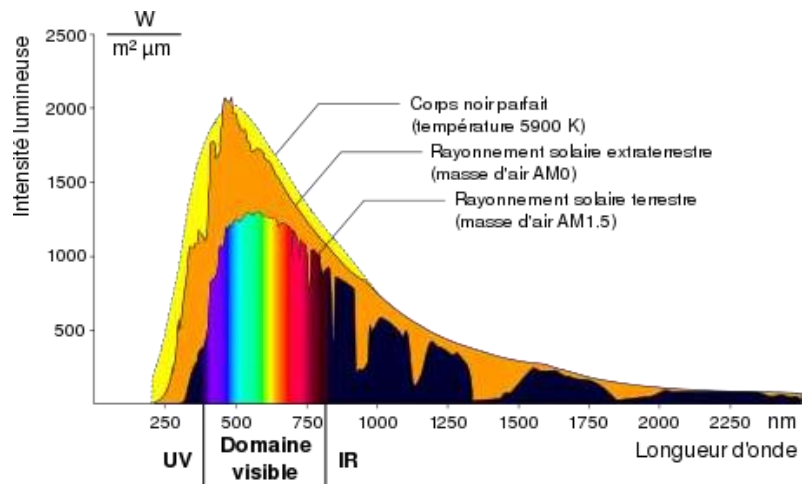


Figure I.6: Le spectre de rayonnement solaire. [7]

#### I.4 Le principe de la conversion photovoltaïque :

L'énergie photovoltaïque est générée par la conversion directe de la lumière du soleil en électricité à l'aide des cellules généralement à base de silicium cristallin, et c'est encore le secteur le plus développé sur le plan technique et industriel, le fait que le silicium soit l'un des éléments les plus abondants sur Terre est oxyde de silicium II non toxique ; la figure I.7 présente cette conversion [8] :

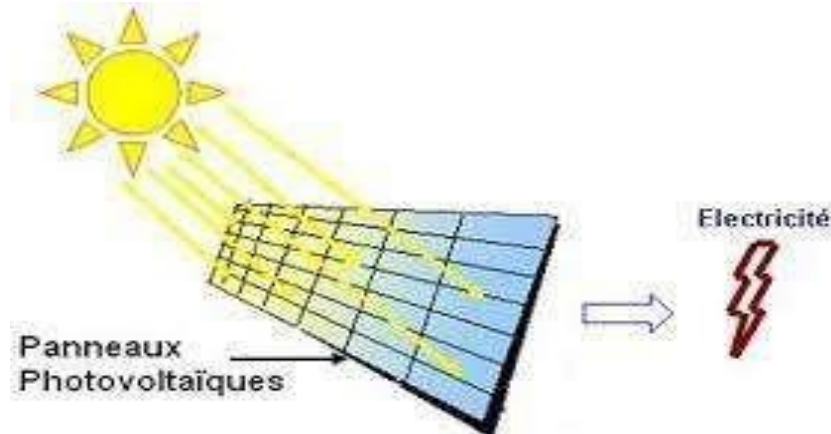


Figure I.7: le principe de la conversion de l'énergie PV.

#### I.5 Le système photovoltaïque :

Un système photovoltaïque est un groupe d'éléments (composants) qui génèrent de l'électricité à partir du soleil. Ces composants sont essentiellement les champs photovoltaïques, le conditionnement de puissance, les systèmes de stockage (dans des cas particuliers) et les charges (voir Figure I .8). Le conditionnement de puissance peut comprendre : un régulateur séparé, un régulateur avec un convertisseur (DC/DC ou/et

DC/AC) ou un convertisseur séparé. Un exemple de système plus détaillé est illustré à la figure I.8 [9].

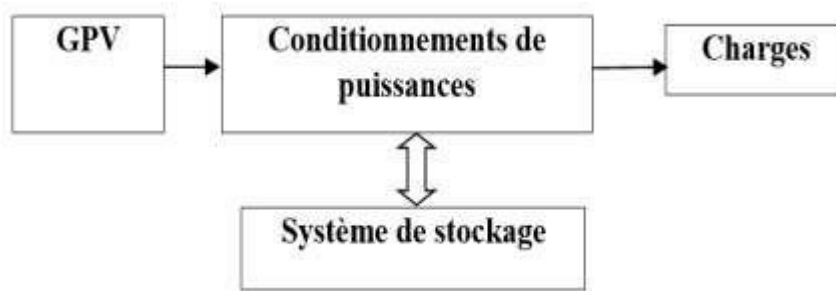


Figure I.8: Système photovoltaïque.

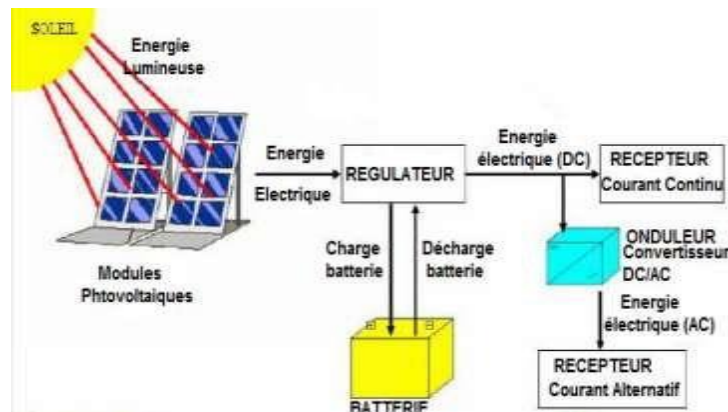


Figure I.9: système de photovoltaïque plus détaillé.

Un système photovoltaïque est généralement constitué d'un champ de panneaux PV (générateur), d'un régulateur, d'un ou plusieurs batteries de stockage, d'un convertisseur (onduleur), de câbles et de récepteurs électriques.

✓ **Générateur PV (champs des panneaux) :**

Le générateur est l'élément de base de toutes les installations photovoltaïques (il est bien détaillé dans le deuxième chapitre).

✓ **Convertisseur (onduleurs) :**

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion d'énergie électrique de la forme continue (DC) à la forme alternative (AC).

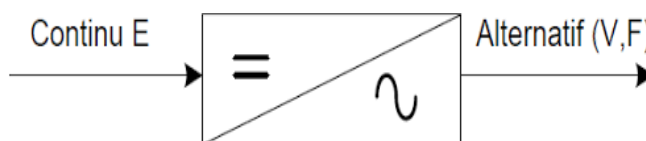


Figure I.10: symbole d'un onduleur.

**✓ Régulateur**

Le régulateur est l'élément central d'un système PV autonome. Il se place entre les panneaux et les batteries. Son objectif est de protéger la batterie contre les surcharges et les décharges profondes pour lui assurer une meilleure durée de vie.



**Figure I.11:** régulateur autonome

**✓ Les batteries :**

Elle est chargée de stocker le courant produit par le panneau pour assurer l'autonomie du système (sert à stocker chimiquement de l'énergie électrique), sa durée de vie est définie par nombre de cycle (charge-décharge), elle se caractérise par :

- Ampérage en Ampère heure (Ah)
- Voltage en Volt.

La batterie remplit trois fonctions importantes [10] :

- **Autonomie** : nombre de jours pendant lesquels la batterie doit fournir la puissance requise sans n'être recharger ni subir de dommage.
- **Courant de surcharge** : une batterie permet de fournir un courant de surcharge pendant quelque instant, c'est à dire un courant plus élevé que celui que peut fournir le champ PV.
- **Stabilisation de la tension** : une batterie permet de fournir une tension constante, en éliminant les écarts de tension du champ PV et en permettant aux appareils un fonctionnement à une tension optimisée.

Leur durée de vie des batteries est fortement augmentée si la profondeur de décharge Moins de 30 % de la capacité totale de la batterie au plomb par jour, jusqu'à 70% est utilisé pour les batteries au lithium.

Tableaux I.1 : les différents types des batteries

Type de batterie (Décharge de 30% / temps. 25°C)	Nombre de cycles cycle = 1 x (décharge + charge)	Durée de vie
Batteries AGM	1500 cycles (600 cycles à 50%)	≈ 4 ans
Batteries AGM Plomb- Carbone	1500 cycles (1000 cycles à 50%)	≈ 4 ans
Batteries GEL	1800 cycles (750 cycles à 50%)	≈ 5 ans
Batteries GEL Plomb- Carbone	2500 cycles (1750 cycles à 50%)	≈ 7 ans
Batteries OPzV / OPzS	5000 cycles (3000 cycles à 50%)	≈ 13 ans
Batteries Lithium	6000 cycles (5000 cycles à 50%)	≈ 15 ans

### ✓ Câblage :

Toute installation solaire photovoltaïque comprend des câbles qui permettent le passage de l'électricité du panneau à la batterie puis à la charge. Généralement un câble Il est recommandé d'utiliser du cuivre doux côté DC, le cuivre avec le meilleur prix/ Les propriétés de conductivité et de câblage contribuent à garantir des connexions de haute qualité Par conséquent, la meilleure pratique consiste à minimiser la perte d'énergie due à la chute de tension.

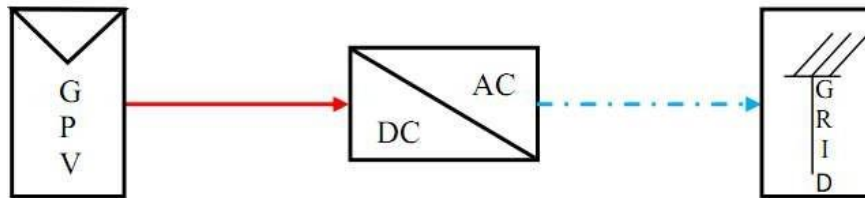


**Figure I.12:** Exemple de câblage.

Les systèmes PV peuvent être autonomes ou connectés aux réseaux publics, comme on peut rajouter aux GPV d'autres sources, par exemple éoliennes et/ou groupes électrogènes pour éviter le sur dimensionnement des panneaux et des batteries. Dans ce cas, le système PV est devenu système hybride [11].

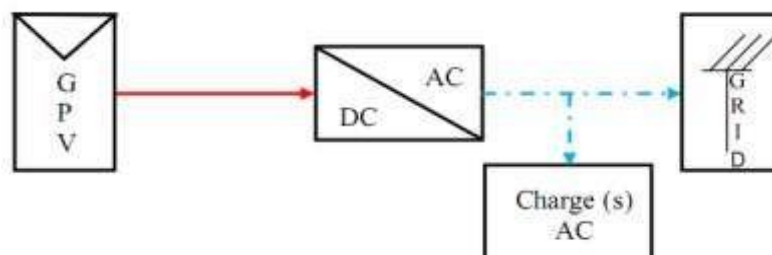
### I.6 Système PV raccordé au réseau :

Dans cette catégorie, trois types de systèmes sont généralement rencontrés dans les applications PV. Figure (I.13) montre un exemple typique de grande centrales PV qui ont pour objectif la fourniture d'électricité en haute (50 à 400 kV) ou en moyenne tension (3 à 50 kV) aux réseaux électriques (Grid dans la littérature Anglo-Saxonne). La totalité de l'énergie produite sera vendue et les charges sur place seront alimentées par le réseau public.



**Figure I.13 :** Système PV raccordé au réseau central.

Figure (I.14) présente un exemple d'installations raccordées au réseau en produisant de l'électricité tout en évitant les pertes de transport et de distribution. Dans ces systèmes, on peut être dispensé du coûteux et problématique stockage d'énergie. D'autre part, si la consommation locale est supérieure à la production de la centrale, l'appoint est fourni par le réseau. Dans le cas contraire, l'énergie est fournie au réseau public et sert à alimenter les consommateurs voisins.



**Figure I.14 :** Système PV raccordé au réseau sans stockage d'énergie.

Troisième type de structure est illustré dans la figure (I.15). Cette topologie est connectée au réseau et en même temps admet un système de stockage qui peut être utile en cas de panne du réseau. L'énergie produite alimente les usagers sur place, le surplus sera stocké dans des batteries jusqu'à la limite de charge et puis le reste sera injecté dans le réseau. Dans le cas où la production et le stockage ne suffit pas pour approvisionner toutes les charges, on fait appel au réseau public. Les réseaux triphasés sont préférés par rapport aux réseaux monophasés à cause de leurs avantages techniques et économiques [11] .

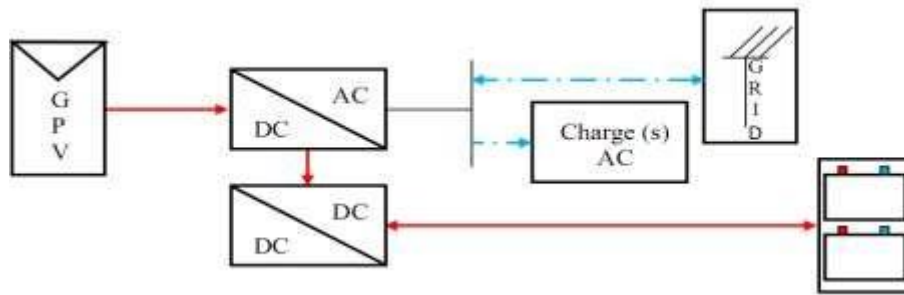


Figure I.15 : Système PV raccordé au réseau avec stockage d'énergie.

**I.7 Système autonome :**



Figure I.16 : système PV autonome.

Autonomes ou « stand-alone » ; Dans le cas d'une installation autonome, le système PV est indépendant de l'opération de réseau électrique, Utilisez immédiatement l'énergie générée par le panneau solaire PV (pompage de l'eau Eau, ventilation, etc.) ou stocké dans la batterie pour retard. Couler Les produits continus fournissent directement des équipements fournis par cet objectif, ou convertissez en 230 V Remplacement à travers un onduleur. La configuration la plus simple du système autonome est le couplage Connectez directement le GPV à la charge continue (figure I.17). À cet égard, La charge ne peut fonctionner que pendant la lumière du soleil suffisante [12].



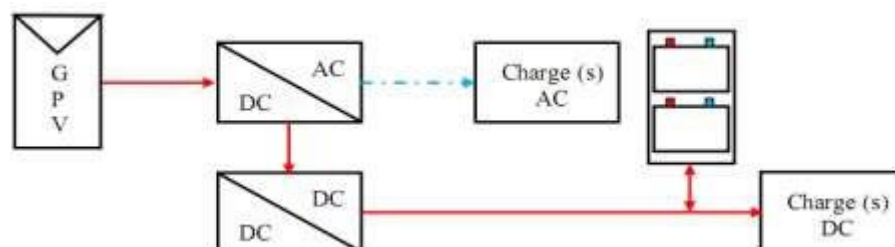
Figure I.17 : Couplage direct GPV-charge.

Pour des applications qui ont besoin de l'énergie électrique même la nuit et lors des moments d'obscurité, un système de stockage peut être ajouté au système.

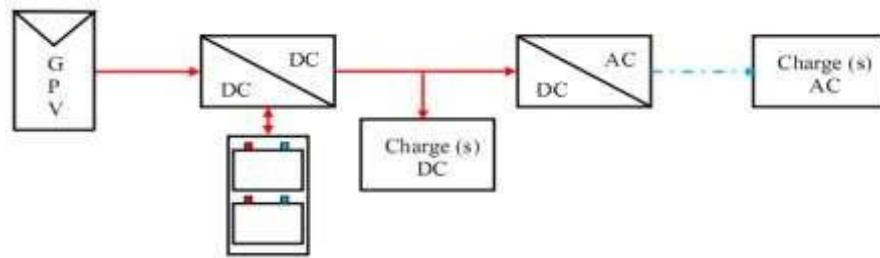
L'énergie produite par le dispositif solaire est emmagasinée dans l'accumulateur d'énergie en vue d'être utilisée au moment du manque de l'éclairage. En effet, c'est presque toujours la batterie qui dure le moins longtemps dans une application solaire. Alors, en vue d'améliorer la durée de vie d'une batterie, on doit empêcher la surcharge (éviter que la tension dépasse un certain seuil) et la décharge profonde (éviter que la batterie soit vidée de plus de 60% de sa charge). Cela est possible par le biais d'un contrôleur de charge. Ainsi, quand l'énergie produite est supérieure à l'énergie consommée, l'excédent d'électricité est stocké dans les batteries Jusqu'à ce que la limite de charge des batteries soit atteinte. Inversement, quand l'énergie produite est inférieure à l'énergie consommée, les batteries fournissent la quantité d'énergie manquante jusqu'à ce que la limite de décharge des batteries soit atteinte. Un régulateur charge-décharge est alors indispensable. A titre d'exemple, quand la tension aux bornes de la batterie atteint 14,5 V (seuil haut typique pour une batterie au Plomb de 12 V nominale), le régulateur coupe la liaison panneau - batterie. Cette charge est rétablie vers 13,5 V. De même, quand la tension atteint 11,5 V (seuil bas typique pour 12V), le régulateur coupe la liaison batterie - utilisation, mettant ainsi la charge électrique hors service jusqu'à ce que la tension batterie soit revenue à un niveau de 12,5 V [11].

Généralement, les systèmes PV autonomes sont installés là où ils constituent la source d'énergie électrique la plus économique. À l'heure actuelle, l'énergie PV est la plus compétitive dans les zones éloignées du réseau et avec une demande d'énergie relativement faible. [4]

Les deux architectures les plus courantes pour les systèmes PV autonomes avec stockage d'énergie. L'alimentation des charges CC et CA est illustrée dans les Figures (I.18) et (I.19). Seul La différence entre les deux est que la sortie du GPV est reliée à un convertisseur Le premier est un DC/AC et le second est un convertisseur DC/DC.



**Figure I.18 :** Système PV autonome alimentant des charges DC et AC (étage 1 est DC/AC).



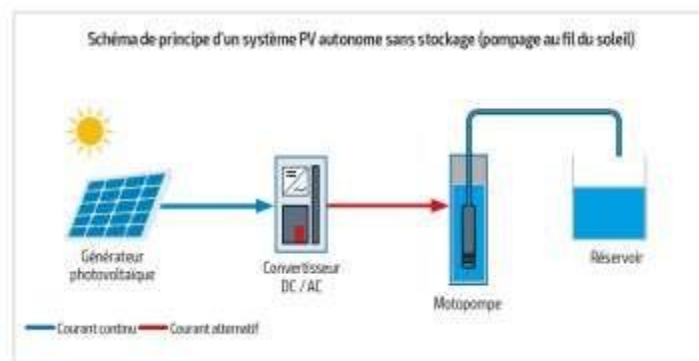
**Figure I.19 :** Système PV autonome alimentant des charges DC et AC (étage 1 est DC/DC).

Différents types de systèmes PV autonomes avec possibilités de couplage. Connectez directement à une charge appropriée ou coupez avec un adaptateur d'impédance MPPT (maximum Power Point Tracking). Le couplage direct consiste à fonctionner au soleil, donc à la puissance. Charge CC typique C'est la batterie qui peut répondre au critère (tension constante puissance variable) électrochimique. La charge en attente est la pompe ou le stockage est encore Sous forme d'eau stockée (dans des réservoirs). [13]

On distingue des types du système PV autonome :

### I.7.1 Les systèmes au fil du soleil :

Les systèmes au fil du soleil sont des systèmes sans stockage. Ils exploitent directement l'énergie solaire sans aucune source d'appoint [9]. Ces systèmes font intervenir des convertisseurs DC/DC qui permet de faire une adaptation entre le générateur et la charge continu. Si la charge est de type alternatif, le convertisseur DC/AC est introduit. [14] L'application la plus connue est le pompage photovoltaïque avec ses deux types : systèmes de pompage PV à courant continu et systèmes à courant alternatif. Pour le deuxième cas on doit ajouter un onduleur. La Fig.I.20 montre un exemple d'un système de pompage PV où le conditionneur d'énergie peut être, selon la fonction exigée, un convertisseur DC/DC, un convertisseur DC/AC ou les deux en même temps. Ces systèmes sont simples mais leur inconvénient est la coupure de l'alimentation en absence du soleil.



**Figure I.20 :** système de pompage au fil du soleil.

### **I.7.2 Les systèmes avec stockage :**

Les systèmes avec stockage sont des systèmes qui contiennent des moyens de stockage. Un système de stockage sert à alimenter les charges durant les périodes ayant un ensoleillement faible (passage des nuages) ou une absence totale de l'ensoleillement (les nuits). Le système de stockage sert à emmagasiner l'énergie durant la présence de l'excès d'énergie photovoltaïque et de la restituer durant les autres périodes d'insuffisance d'énergie. Comme exemple, on peut citer l'alimentation des maisons en électricité dans des sites isolés. [9]

### **I.8 Système hybride :**

Les systèmes d'énergie hybride associent au moins deux sources d'énergie renouvelable ou bien une ou plusieurs sources d'énergie classiques. Les systèmes d'énergie hybrides sont généralement autonomes par rapport aux grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans les régions isolées. Les différentes sources dans un système hybride peuvent être connectées en deux configurations, architecture à bus continu et architecture à bus alternatif. Dans la première configuration, la puissance fournie par chaque source est centralisée sur un bus continu. Ainsi, les systèmes de conversion d'énergie à courant alternatif (CA) fournissent d'abord leur puissance à un redresseur pour être convertie ensuite en courant continu (CC). Les générateurs sont connectés en série avec l'onduleur pour alimenter les charges alternatives. L'onduleur doit alimenter les charges alternatives à partir du bus continu et doit suivre la consigne fixée pour l'amplitude et la fréquence. La fonction spécifique du système de supervision est la commande de mise en marche et arrêt des générateurs et du système de stockage. L'avantage de cette topologie est la simplicité de commande. Dans la seconde configuration, tous les composants du système hybride sont reliés à la charge alternative. [12]

### **I.9 Les avantages et les inconvénients des systèmes PV :**

#### **a. Les avantages :**

- Conversion directe de l'énergie solaire gratuite et inépuisable en électricité.
- Absence de bruit, de pollution et d'émissions.
- Maintenance réduite (pas de pièces en mouvement ; durée de vie des modules = 20 ans).
- Rentabilité assurée pour les applications de faible puissance (moins de 3–5 kWh/jour).
- Possibilité d'adaptation de la taille de l'installation aux besoins existants, avec possibilité d'extension à la demande, au fur et à mesure que le besoin énergétique augmente.

- Le risque de choc électrique est réduit en 12 ou 24 Vcc et le risque d'incendie est moindre qu'avec les groupes électrogènes alimentés au kérosène ou au fuel.

**b. Les inconvénients :**

- Le cout d'investissement des panneaux photovoltaïques est élevé.
- Production d'énergie qui dépend de l'ensoleillement, toujours variable.
- Le faible rendement de conversion de module.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique par des batteries est nécessaire, le cout du système photovoltaïque augmente.
- Pollution à la fabrication. [2]

**I.10 Conclusion :**

Le contenu de ce chapitre a été consacré aux notions de base de l'énergie solaire photovoltaïque. On a mis en évidence ses types et ses composants, et nous avons aussi cité les avantages et inconvénients de ce système.

***Chapitre II :***  
***Le générateur***  
***photovoltaïque et les***  
***convertisseurs DC/DC***

## **II.1 Introduction :**

Après avoir présenté dans le chapitre précédent les différents types d'énergie solaire et le système photovoltaïque ainsi ses composants on passe à l'étude d'un générateur photovoltaïque qui a le plus grand rôle dans les systèmes PV et son fonctionnement, ses associations, sa protection, et sa connexion indirecte avec la charge qui fait à travers les convertisseurs DC-DC pour l'adaptation de tension d'entrée de la charge.

## **II.2 L'effet photovoltaïque :**

Le mot "photovoltaïque" vient du mot grec signifiant lumière et il se compose de deux parties Section : "Photo" (Lumière) et nom de famille du physicien italien (Alessandro Volta) qui a inventé la batterie en 1800 et a donné son nom à l'unité de mesure de tension électrique le volt.

Lorsqu'un matériau semi-conducteur est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés, le rayonnement est « bombardé » par les photons qui composent la lumière ; sous cette action, les électrons de la couche électronique supérieure (appelée électrons des couches de valence) a tendance à être « arrachés » : si l'électron revient à son état initial, L'agitation des électrons entraîne un échauffement du matériau. Par contre, dans une cellule photovoltaïque, certains électrons ne retournent pas à son Etat initial. Les électrons "arrachés" génèrent une faible tension continue. Une partie de L'énergie cinétique des photons est ainsi directement convertie en énergie électrique : l'effet photovoltaïque.

L'effet photovoltaïque, c'est-à-dire la production d'électricité directement à partir de la lumière par des cellules, généralement à base de silicium. Les cellules sont connectées les unes aux autres et forment un module solaire, Ce phénomène a été observé pour la première fois par le physicien français Edmond Becquerel en 1839. Malgré cela, Ce n'est que dans les années 1950 que les chercheurs des laboratoires Bell aux États-Unis Fabrication réussie de la première cellule photovoltaïque, élément principal du système Photovoltaïque. [15]

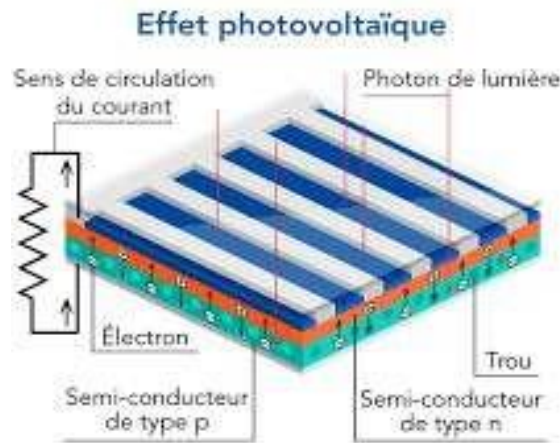


Figure II.1 : L'effet photovoltaïque.

### II.3 Les éléments d'un système photovoltaïque :

#### II.3.1 Cellule photovoltaïque :

Les cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui permettent de transformer l'énergie solaire en énergie électrique [7] ; cette transformation est basée sur trois mécanismes suivants :

- Absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif ;
- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création des paires électrons/trous dans le matériau semi-conducteur ;
- Collecte des particules générées dans le dispositif.

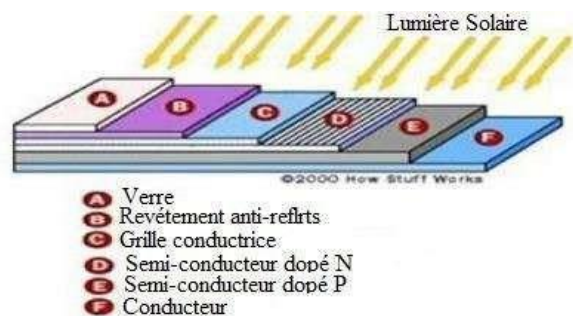
Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant : d'où l'intérêt des semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque. Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électrons / trous créés est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction p-n. [16]

Une cellule solaire ou photopile solaire est l'élément de base d'un générateur photovoltaïque. [17] Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0,3 V et 0,7 V en

Fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que la température et du vieillissement de la cellule.

La cellule PV est composée de matériaux semi-conducteurs et sont constituées :

- D'une fine couche semi-conductrice (matériau possédant une bande interdite, qui joue le rôle de barrière d'énergie que les électrons ne peuvent franchir sans une excitation Extérieure, et dont il est possible de faire varier les propriétés électroniques) tel que le Silicium, qui est un matériau présentant une conductivité électrique relativement Bonne.
- D'une couche anti-reflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires.
- D'une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d'un métal conducteur sur le Dessous ou anode.
- ✚ Les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multicouches Réfléchissants justes en dessous du semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement. [18]



**Figure II.2 :** Structure basique d'une cellule solaire.

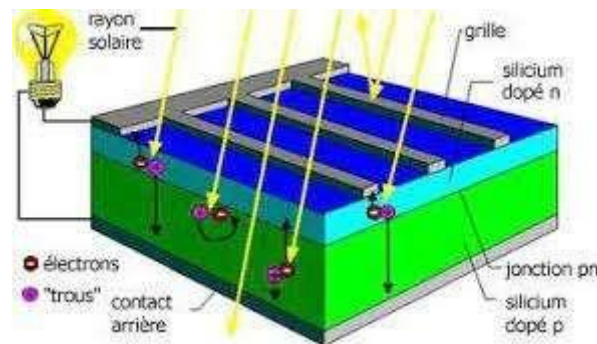
### II.3.1.1 Constituions de la cellule photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque est assimilable à une diode photosensible. Elle est constituée de deux couches minces d'un semi-conducteur qui sont dopées différemment. Pour la couche N, c'est un apport d'électrons périphériques et pour la couche P c'est un déficit d'électrons.

L'énergie des photons lumineux captés par les électrons périphériques (couche N) leur permet de franchir la barrière de potentiel et d'engendrer un courant électrique continu. Pour effectuer la collecte de ce courant, des électrodes sont déposées par sérigraphie sur les deux couches du semi-conducteur. L'électrode supérieure est une grille permettant le passage des rayons

Lumineux. Une couche anti reflet est ensuite déposée sur cette électrode afin d'accroître la quantité de lumière absorbée.

La fabrication des cellules s'effectue à partir de lingots de silicium. Ces lingots sont découpés en fines couches de type P ou N en y diffusant du brome ou du phosphore. Une cellule solaire est alors obtenue en constituant une jonction de deux zones de type opposé (jonction PN). Au voisinage de la jonction apparaît un champ électrique qui maintient la séparation des charges positives et négatives. Des contacts métalliques en formes de grille, contacts avant et arrière, sont déposés (Figure (II.3)). [5]



**Figure II.3 :** Représentation schématique d'une cellule solaire. [5]

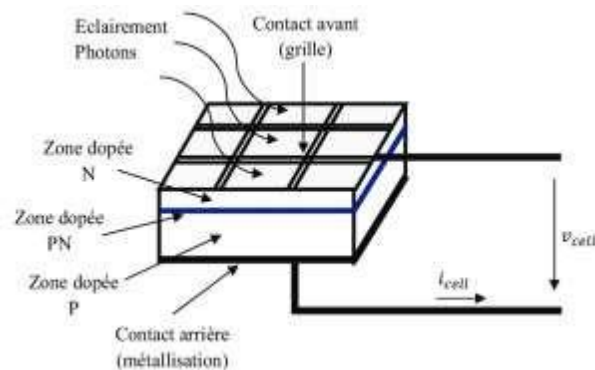
### **II.3.1.2 Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque :**

La conversion photovoltaïque effectuée à l'aide de matériaux semi-conducteurs tel que le silicium (Si), le germanium (Ge), le sélénium (Se) ou les composés semi-conducteurs tel que l'arséniure de gallium (GaAs), le tellure de cadmium (CdTe). Les cellules solaires de type GaAs sont très coûteuses dans leur fabrication, leur utilisation est aujourd'hui essentiellement limitée aux applications spatiales. La majorité des cellules photovoltaïques sont fabriquées à partir du silicium cristallin (différence de potentiel de 0.6 V), [18] car il possède la caractéristique d'être non toxique contrairement au cadmium ou au sélénium, en plus, il permet d'atteindre des efficacités de conversion remarquables, il constitue environ 28% de l'écorce terrestre sous forme de composés (silicates, silice), ce qui en fait une source quasi inépuisable. La cellule solaire à semi-conducteur est un dispositif permettant de débiter un courant électrique dans une charge externe lorsque celui-ci est exposé à la lumière. Son principe de fonctionnement se résume comme suit :

Lorsque la cellule est exposée au rayonnement solaire, les photons d'énergie ( $E_{ph} = h\nu$ ) pénétrant dans la cellule solaire transmettent leur énergie aux atomes de la jonction. Si cette

Énergie est suffisamment élevée, elle peut faire passer les électrons de la bande de valence à la bande de conduction du matériau semi-conducteur et créer ainsi des paires « électron- trou ». Les électrons (charges N) et les trous (charges P), sont alors maintenus séparés par un champ électrique qui constitue une barrière de potentiel.

Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone N rejoignent les trous de la zone P via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel et un courant électrique circule. [18]



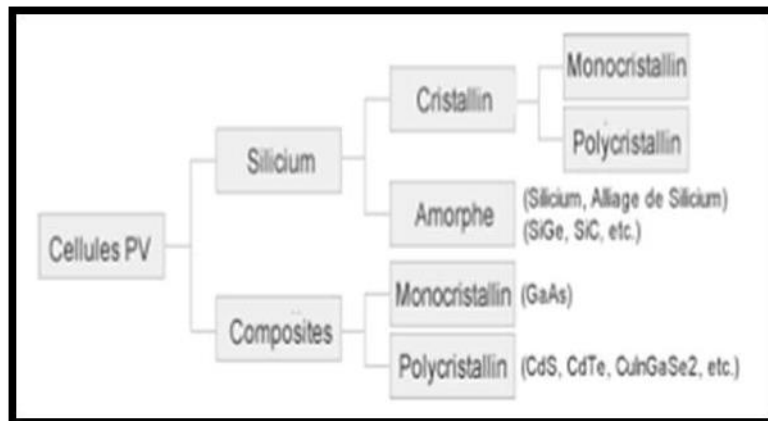
**Figure II.4 :** Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire.

### II.3.1.3 Les technologies des cellules solaires :

L'énergie photovoltaïque est obtenue à l'aide de capteurs appelés cellules solaires ou photopiles. Il existe plusieurs technologies de cellules solaires, mais toutes sont composées de matériaux semi-conducteurs. [7] Les matériaux les plus connus sont :

- Le silicium (Si)
- Le sulfure de cadmium (Cds)
- L'arséniure de gallium (As Ga)
- Le tellure de cadmium (Cd Te)
- Le germanium (Ge)
- Le phosphore d'indium (InP)

-La figure suivant représente les différentes technologies des cellules PV :



**Figure II.5 :** les différentes technologies.

#### a. Les différents types de la cellule photovoltaïque :

Les cellules photovoltaïques sont généralement constituées de diverses formes de silicium. ; La plupart des cellules solaires disponibles sur le marché mondial sont à base de silicium, soit de type silicium monocristallin, polycristallin ou amorphe. [19]

#### ✚ Silicium Mono-cristallin :

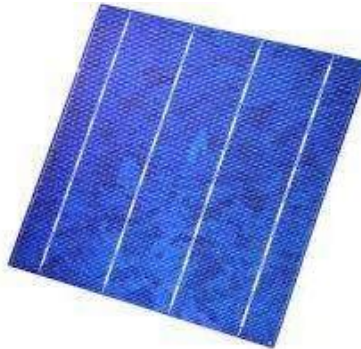
La cellule de silicium monocristallin est historiquement la plus largement utilisée et commercialisée. La fabrication de cellules de silicium commence avec l'extraction du cristal de dioxyde de silicium. Ce matériel est désoxydé dans de grands fours, purifié et solidifié. Ce processus a atteint une pureté de 98 et 99% ce qui permet un rendement énergétique fort (en effet, plus le revêtement de la cellule est pur, plus l'effet photovoltaïque est facilité). Le silicium est alors fusionné avec une petite quantité de dopant, normalement le bore qui est de type P puis coupe en fine tranches d'environ 300  $\mu\text{m}$ . Après la coupe et le nettoyage des impuretés des tranches, des impuretés de type N sont introduites via un processus de diffusion contrôlée. Parmi les cellules photovoltaïques utilisant le silicium comme matériau de base, les monocristallins sont, en général, celles qui ont les meilleures performances. [19]



**Figure II.6 :** Cellule en silicium Mono-cristallin.

#### ✚ Silicium poly-cristallin :

Les cellules en silicium poly-cristallin sont moins chères que les cellules en silicium Monocristal, car le processus de préparation de la cellule est moins strict. Leur effet est cependant plus faible. Le processus de production est semblable à celui présenté précédemment. Dans le cas de la fabrication de cellules en silicium, cependant, les contrôles sont moins rigoureux. Il en résulte que les cellules obtenues étaient moins chères, mais aussi moins efficaces, il s'est avéré. Leur intérêt en raison de la variété des formes que peut prendre le revêtement : lingot, déposition en dés, ruban ou fil... chaque technique peut produire des cristaux aux propriétés suivantes. Caractéristiques spécifiques, y compris la taille, la morphologie et la concentration d'impuretés. [19]

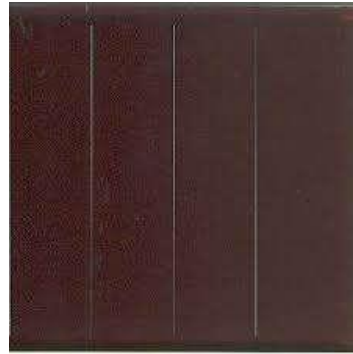


**Figure II.7 :** Cellule en silicium Poly-cristallin.

#### ✚ Silicium amorphe :

Les cellules de silicium amorphe diffèrent des cellules présentées précédemment puisque leur structure présente un haut degré de désordre dans la structure des atomes ; ce silicium en couche très mince répond par contre à tous les éclaircissements, extérieur et intérieur. Sa technologie de fabrication est théoriquement moins onéreuse (mais la

Production n'a pas atteint des niveaux comparables) et permet de réaliser des petits Y formats, grâce à la mise en série intégrée et la simplicité de découpe. [19]



**Figure II.8:**Cellule en silicium amorphe (couche mince).



**Figure II.9:** Le passage d'une cellule à un champ photovoltaïque.

**b. Rendement d'une cellule photovoltaïque :**

**Tableaux II.1 :** présente le rendement des différents types des cellules. [20]

Technologie de cellules	Rendement en laboratoire	Rendement production
Silicium amorphe (a-Si )	13%	5-9%
Silicium poly cristallin (p-Si)	19.5%	11 à 15%
Silicium monocristallin (m-Si)	24.7%	13 à 17%

$$\eta_{STC} = \frac{P_m}{E_{STC} \times S_{cellule}} \tag{II.1}$$

$\eta_{STC}$  = Le rendement de la cellule photovoltaïque ;

$p_m$  : La puissance produite par le générateur PV ;

$E_{STC}$  : L'éclairement absorbé par la cellule ;

$S_{cellule}$  : La surface de la cellule [m<sup>2</sup>].

Ce rendement dépend plusieurs facteurs [20] :

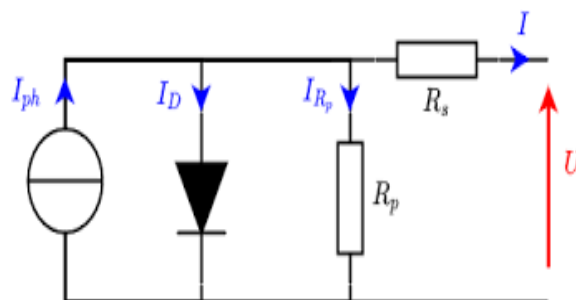
- Réflexion à la surface.
- Température de jonction des cellules.
- Type de matériau utilisé et technique de fabrication.
- La résistance série et parallèle responsables des pertes par effet joule.
- Absorption incomplète et excès d'énergie des photons absorbés.

### II.3.1.4 Caractéristiques électrique d'une cellule photovoltaïque :

La figure (II.10) présente le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque sous éclairement. Il correspond à un générateur de courant  $I_{ph}$  monte en parallèle avec une diode, deux résistance parasites sont introduits dans ce schéma. Ces résistances ont une certaine influence sur la caractéristique  $I=f(v)$  de la cellule :

- La résistance série ( $R_s$ ) est la résistance interne de la cellule ; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles.
- La résistance shunt ( $R_p$ ) est due à un courant de fuite au niveaux de la jonction, elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée.

De nombreux modèles mathématiques de générateurs photovoltaïques, ont été développés pour représenter leur comportement très fortement non linéaire qui résulte de celui des jonctions semi-conductrices qui sont à la base de leurs réalisations. [21]



**Figure II.10** : Schéma équivalent électrique de la cellule PV.

A partir du circuit équivalent de la figure **II.10** on peut écrire :

$$I_{ph} = I_D + I + I_{RP} \quad (\text{II.2})$$

Le courant qui passe dans la résistance **R<sub>P</sub>** est donné par :

$$I_{RP} = \frac{v + I * R_S}{R_p} \quad (\text{II.3})$$

Le courant dans la diode **I<sub>D</sub>** est donné par :

$$I_D = I_{sat} \left[ e^{\frac{(V+I*R_S)}{nV_t}} - 1 \right]$$

Avec  $I_{sat}$  : courant de saturation de la diode

ET  $V_t = \frac{KT}{e}$  : Tension thermique a la température T.

Donc l'expression de la caractéristique I(V) est :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{sat} \left[ e^{\frac{e(v+I*R_S)}{nKT}} - 1 \right] - \frac{V + I * R_S}{R_p} \quad (\text{II.5})$$

Où :

- $e$  : charge de l'électron ( $1.609 \times 10^{-19}$ );
- $K$  : Constant de Boltzmann ( $1.381 \times 10^{-23}$  J/K) ;
- $n$  : facteur de non idéalité de la jonction ;
- $T$  : température effective de la cellule en degré Kelvin ;
- $I_{pv}$  : le courant fourni par la cellule lorsqu'elle fonctionne en générateur ;
- $V_{pv}$  : est la tension aux bornes de cette même cellule ;
- $I_{ph}$  : est le photo-courant de la cellule dépendant de l'éclairement et de température ou Bien courant de (court-circuit) ;
- $R_p$  : est la résistance shunt caractérisant les courant de fuite de la jonction ;
- $R_S$  : est la résistance série représentant les diverses résistances de contacts et de Connexion ;

**a. Courant de court-circuit (I<sub>cc</sub>) :**

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle. Dans le cas idéal ( $R_S$  nulle et  $R_p$  infinie), ce courant se confond avec le photo-courant  $I_{ph}$  dans le cas contraire en annulant V dans l'équation (II.6), on obtient :

$$I_{cc} = I_{ph} - I_{sat} \left[ e^{\frac{e(I_{cc} * R_s)}{nKT}} - 1 \right] - \frac{I_{cc} * R_s}{R_p} \quad (II.6)$$

Pour la plupart des cellules (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme

$I_{sat} \left[ e^{\frac{e(I * R_s)}{nKT}} - 1 \right]$  devant  $I_{ph}$ . L'expression approchée du courant de court-circuit est alors

$$I_{cc} \cong \frac{I_{ph}}{\left(1 + \frac{R_s}{R_p}\right)} \quad (II.7)$$

Quantitativement, il a la plus grande valeur du courant généré par la cellule pratiquement ( $I_{cc} = I_{ph}$ ).

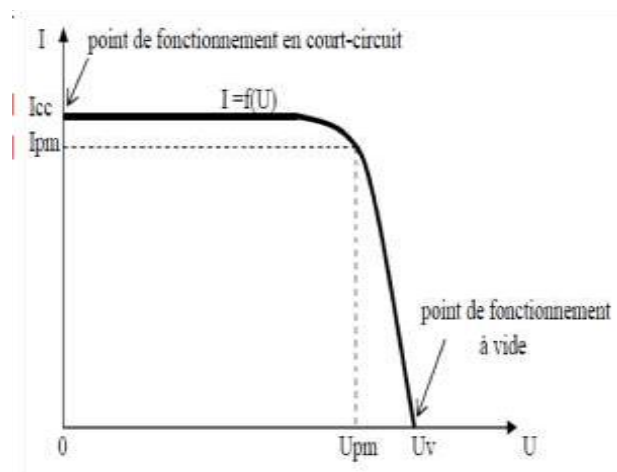
**b. Tension de circuit –ouvert ( $V_{co}$ ) :**

Si l'on place une photopile sous une source lumineuse constante, sans aucune charge à son borne, celle-ci va produire une tension continue d'environ 0,6 V, appelée tension en circuit ouvert  $U_{co}$  ou à vide (elle varie légèrement avec la température et l'éclairement). C'est la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque.

$$0 = I_{ph} - I_{sat} \left[ e^{\frac{e(I_{cc} * R_s)}{nKT}} - 1 \right] - \frac{I_{cc} * R_s}{R_p} \quad (II.8)$$

Dans le cas idéal, sa valeur est légèrement inférieure à :

$$V_{CO} = V_t \ln \left[ \frac{I_{ph}}{I_{sat}} + 1 \right] \quad (II.9)$$



**Figure II.11 :** Courbe  $I(v)$  à  $T=25^\circ$  et un éclairement de  $1000W/m^2$ .

**c. Rendement énergétique :**

Le rendement énergétique est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale fournie par la cellule et la puissance du rayonnement solaire parvenant au module, ce rendement a pour formule :(II.10)

$$n = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{I_{opt} \cdot V_{opt}}{P_{inc}} \quad \text{(II.10)}$$

Avec  $P_{inc}$  est égale au produit de l'éclairement et de la surface totale des photopiles. Ce paramètre reflète la qualité de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. [5]

**d. Facteur de forme :**

On appelle facteur de forme FF, dit aussi facteur de courbe ou facteur de remplissage (full factor), le rapport entre la puissance maximum fournie par la cellule  $P_{max}$  ( $I_{opt}$ ,  $V_{opt}$ ) et le produit du courant de court-circuit  $I_{cc}$  par la tension de circuit-ouvert  $V_{opt}$  (c'est-à-dire la puissance maximale d'une cellule idéale). Le facteur de forme indique la qualité de la cellule ; plus il s'approche de l'unité plus la cellule est performante, Il est de l'ordre de 0.7 pour les cellules performantes ; et diminue avec la température. Il traduit l'influence des pertes par les deux résistances parasites  $R_s$  et  $R_{Shu}$  il est défini par [21] :

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} \cdot V_{co}} = \frac{I_{opt} \cdot V_{opt}}{I_{cc} \cdot V_{co}} \quad \text{(II.11)}$$

**e. La puissance maximale  $P_{max}$  :**

La puissance maximale d'une cellule photovoltaïque éclairée est la grandeur essentielle pour évaluer sa performance ; elle est donnée par la relation :

$$p_{max} = V_{max} * I_{max} \quad \text{(II.12)}$$

Elle traduit sur la caractéristique I-V le point du fonctionnement  $P_{max}$  qui est situé au coude de la caractéristique I-V et dit point de puissance maximale où les valeurs de tension  $V_{max}$  et du courant  $I_{max}$  appelé également tension et courant maximums respectivement. [22]

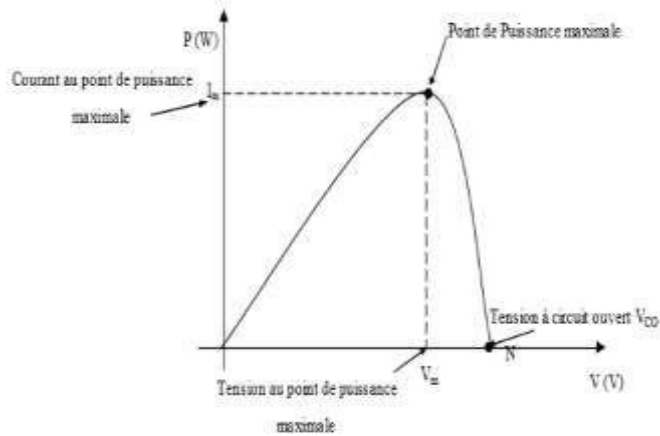


Figure II.12 : Courbe P(V) à T=25° et un éclairement de 1000 W/m<sup>2</sup>.

### II.3.1.5 Modélisation de la cellule photovoltaïque :

#### a. 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  $I_{ph}$  en parallèle avec une diode délivrant un courant selon la figure (II.13), qui représente le circuit équivalent d'une cellule solaire idéale. [23]

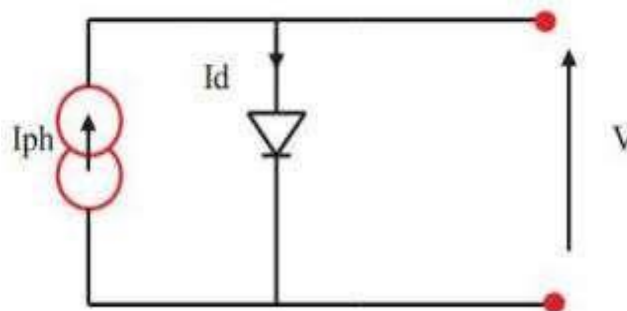


Figure II.13 : Schéma équivalent d'une cellule idéale.

- Les équations retenues de ce modèle sont :

$$I_{PV} = I_{ph} - I_d \tag{II.13}$$

- Le courant  $I_{ph}$  est assimilé au courant  $I_{CC}$  avec  $V_{pv} = 0$ , courant de court-circuit obtenu en court-circuit.

$$I_{ph} = \left[ I_{cc} + Ki * (Tc - Tref) \right] * \frac{E}{E_{ref}} \tag{II.14}$$

- $Ki$  : coefficient de température du courant-circuit de la cellule (Ampères / K) ;
- $Tc$  : Température de la cellule en Kelvin ;

- $E$  : L'éclairement absorbé par la cellule ;
- $E_{ref}$ : L'éclairement de référence (1000 w/m<sup>2</sup>) ;

$$I_d = I_0 \left( e^{\frac{V_d}{V_t}} - 1 \right) \quad \text{(II.15)}$$

- $I_0$  : Courant de saturation inverse de la diode ;

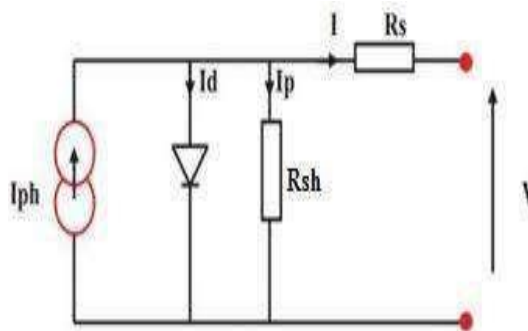
$$V_t = \frac{BKT}{q} \quad \text{(II.16)}$$

- $V_t$  : Tension thermique ;
- $B$  : Facteur d'idéalité de la photopile ;
- $K$  : Constant de Boltzmann (1,38.10<sup>-23</sup>/K);
- $q$  : Charge de l'électron (1,6.10<sup>-19</sup> C).

**b. Cas d'une cellule réelle :**

Le schéma équivalent de la cellule photovoltaïque réelle tient compte d'effets résistifs parasites dues à la fabrication et représenté sur la figure (II.14).

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 ( $R_s$ ). [23]



**Figure II.14 :** Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle.

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

$$I_{PV} = I_{ph} - I_d - I_p \quad \text{(II.17)}$$

- $I_{PV}$  : Courant générer par la cellule photovoltaïque ;

- $I_{ph}$  : Photo courant créé par la cellule (proportionnel au rayonnement incident) ;
- $I_d$  : Le courant circulant dans la diode.

$$I_d = I_0 \left( e^{\frac{V_d}{V_i}} - 1 \right) \quad (\text{II.18})$$

$$I_0 = I_{0r} \left( \left( \frac{T}{T_n} \right)^3 e^{\left[ \frac{E_g}{BK} \left( \frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right) \right]} - 1 \right) \quad (\text{II.19})$$

- $I_{0r}$  : est le courant de court-circuit de la cellule à la température de référence  $T_n$  et l'éclairement de référence ;
- $T$  : Température de la jonction des cellules PV [°K] ;
- $T_n$  : Température de référence des cellules PV [°K] ;
- $B$  : facteur d'idéalité de la jonction ;
- $E_g$  : Énergie de gap [ev] ;
- $V_d = V_{pv} + R_S I_{pV}$
- $R_S$  : résistance série symbolise la résistance de masse du matériau semi-conducteur, ainsi les résistances ohmiques et de contact au niveau des connexions des cellules ;
- $V_{pv}$  : La tension de sortie ;
- $I_p$  : Le courant circulant dans la résistance  $R_p$  ;
- $R_p$  : Résistance shunt représente les fuites autour de la jonction p-n dues aux Impuretés et sur les coins de cellule.

En substituant les équations (II.18 ; II.19) dans l'équation (II.17) le courant  $I_{pV}$

$$I_{pV} = I_{ph} - I_0 \left[ e^{\left( \frac{V_{pV} + I_{pV} \cdot R_S}{V_i} \right)} - 1 \right] - \frac{V_{pV} + I_{pV} \cdot R_S}{R_p} \quad (\text{II.20})$$

Donc :

$$I_{ph} - I_0 \left[ e^{\left( \frac{V_{pV} + I_{pV} \cdot R_S}{V_i} \right)} - 1 \right] - \frac{V_{pV} + I_{pV} \cdot R_S}{R_p} - I_{pV} = 0 \quad (\text{II.21})$$

$$I_p = \frac{V_{pV} + I_{pV} \cdot R_S}{R_p} \quad (\text{II.22})$$

### **II.3.2 Module photovoltaïque :**

Le composant le plus important de toute installation PV est le module photovoltaïque, qui se compose de cellules solaires interconnectées. La figure représente un module photovoltaïque. Les modules PV sont eux-mêmes associés en série et parallèle pour former un champ photovoltaïque d'une puissance crête définie selon les besoins énergétiques. [19]



**Figure II.15 :** Module photovoltaïque .

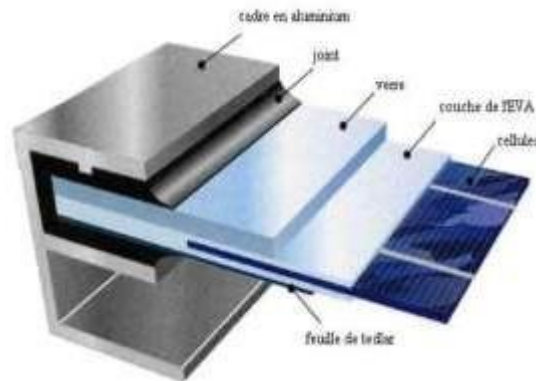
Les modules photovoltaïques assurent les fonctions suivantes :

- ❖ Connexion électrique entre cellules et avec l'extérieur ;
- ❖ Protection des cellules contre les agents atmosphériques ;
- ❖ Protection mécanique et support.

#### **✓ Constitution d'un module de photovoltaïque :**

Un module solaire photovoltaïque est composé généralement de six éléments (figure II.16) [24] :

- Cadre en aluminium.
- Joint pour fixer le module.
- Verre : pour la protection du module.
- Couche de l'EVA (EVA : éthylène-acétate de vinyle) : pour résister aux intempéries et à l'humidité.
- Cellules photovoltaïque.
- Feuille de Tedlar blanc : pour plus de résistance mécanique des grands modules.



**Figure II.16:** Composition d'un module solaire photovoltaïque.

✓ **Champ photovoltaïque :**

Le champ photovoltaïque se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le module PV avec un angle d'inclinaison spécifique. La figure représente un champ photovoltaïque. [7]



**Figure II.17 :** Champ photovoltaïque.

**II.4 Association de module PV :**

Dans des conditions d'ensoleillement standard ( $1000\text{W/m}^2$  ;  $25^\circ\text{C}$  ; AM1.5), la puissance maximale délivrée par une cellule silicium de  $150\text{ cm}^2$  est d'environ  $2.3\text{ Wc}$  sous une tension de  $0.5\text{V}$ . Une cellule photovoltaïque élémentaire constitue donc un générateur électrique de faible puissance insuffisante en tant que telle pour la plupart des applications domestiques ou industrielles. Les générateurs photovoltaïques sont, de ce fait réalisés par association, en série et/ou en parallèle, d'un grand nombre de cellules élémentaires. [25]

- Le groupement en série augmente la tension de fonctionnement.
- Le groupement en parallèle augmente le courant.

### II.4.1 Association des cellules en séries :

Une association de ( $N_S$ ) cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque (GPV). Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultante de groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule, un tel regroupement est représenté par la figure (II.18).

Ce système d'association est généralement le plus communément utilisé pour les modules photovoltaïques du commerce.

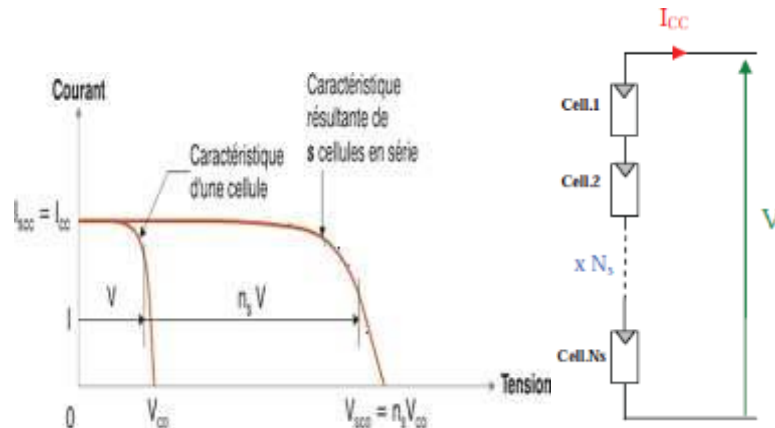


Figure II.18 : Caractéristique courant tension de  $N_S$  cellule en série. [26]

Comme la surface de cellules devient de plus en plus importante, le courant produit par une seule cellule augmente régulièrement au fur et à mesure de l'évolution technologique alors que sa tension reste toujours très faible. [26]

$$V_{coNS} = N_S \times V_{co} \quad \text{Avec} \quad I_{cc} = I_{ccNS} \quad \text{(II.23)}$$

- $V_{co}$  : La tension en circuit ouvert d'une cellule.
- $I_{cc}$  : Le courant de court-circuit d'une cellule.
- $V_{coNS}$  : la somme des tensions en circuit ouvert de  $N_S$  cellules en série.
- $I_{ccNS}$  : courant de court-circuit de  $N_S$  cellules en série.

### II.4.2 Association des cellules en parallèles :

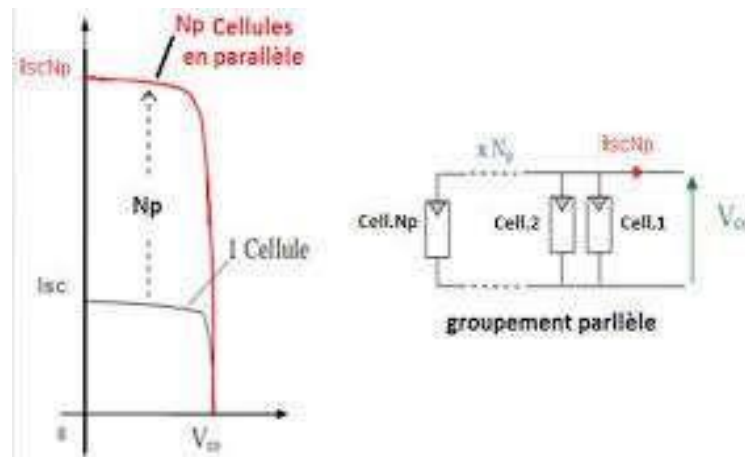
Une association parallèle de ( $N_P$ ) cellules est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créée. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants (Figure II.19).

L'équation (II.24) résume à son tour les caractéristiques électriques d'une association parallèle de  $n_p$  cellules [27]:

$$I_{sc_{N_p}} = n_p * I_{sc} \quad \text{Avec} \quad V_{co_{N_p}} = V_{co} \quad \text{(II.24)}$$

$I_{sc_{N_p}}$  : La somme des courants de court-circuit de  $N_p$  cellules en parallèle.

$V_{co_{N_p}}$  : La tension du circuit ouvert de  $N_p$  cellules en parallèle.



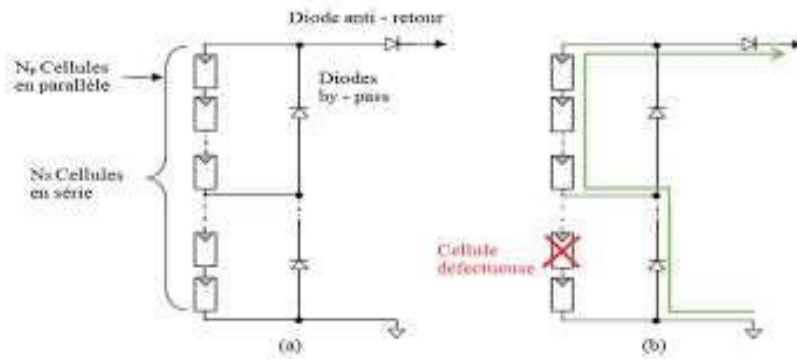
**Figure II.19 :** Caractéristique courant tension de (NP) cellule en parallèle. [27]

### II.4.3 Association des cellules (série et parallèle) :

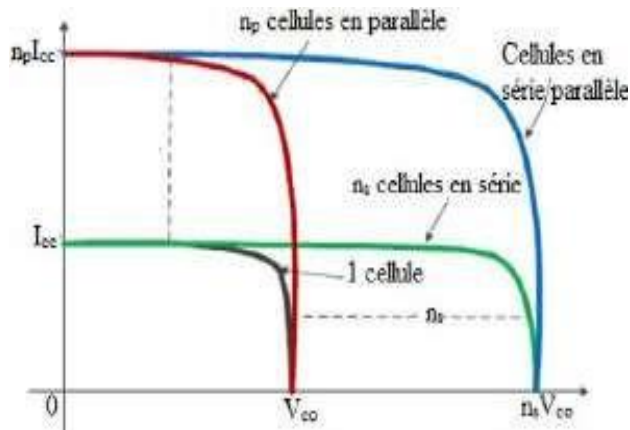
Les caractéristiques d'un générateur solaire ( $I_{PV} - V_P$ ) peuvent être considérées comme ( $N_s * N_p$ ) Résultat de la connexion série/parallèle du réseau cellulaire. L'ensemble peut également varier en raison de l'éclairage, de la température, du vieillissement Effets des cellules et des inhomogénéités d'ombrage ou d'éclairage. De plus, il suffit d'un masquage ou d'une dégradation placés dans Le montage en série fait chuter fortement le courant généré par les modules photovoltaïques. Lorsque le courant délivré est supérieur au courant produit par la cellule faiblement éclairée, Sa tension devient négative et devient un élément récepteur. Celui-ci est situé à dissiper une puissance excessive, ce qui peut provoquer son détruire si la panne persiste trop longtemps. C'est le phénomène des points chauds. Pour corriger ce phénomène, on équipe donc les panneaux photovoltaïques de diodes by-pass A pour effet de protéger les cellules qui deviennent des images passives (II.20.a). La mesure Sur nos modules PV commerciaux cachés (85Wc) Une des (36) cellules construites volontairement (à différents niveaux d'ombrage) qui composent se le générateur est documenté à la Figure (II.20).

On observe clairement une distorsion de courbe ( $I_{PV}-V_P$ ) associée à des effets d'ombrage partiel de modules photovoltaïques. Les diodes by-pass de dérivation entrent en

Fonctionnement, court-circuitant une partie du panneau comme illustré à la Figure (II.20-b), évitant ainsi le passage du courant inversée dans les cellules défectueuses. D'autre part, cette solution efficace réduit la puissance fournie et la tension aux bornes du panneau. Détérioration du monomère La cellule condamne ainsi le groupe de cellules associé à la cellule défectueuse, qui est Protégé par des diodes (by-pass) de la production d'énergie. Ce phénomène manquant La puissance parallèle est comparée à la perte totale sur le panneau au moment du problème Sur compartiments avec pupitres opérateur non protégés.tel regroupement Les cellules (série et parallèle) avec diodes de protection sont représentées dans la figure ci-dessous (II.20). [28]



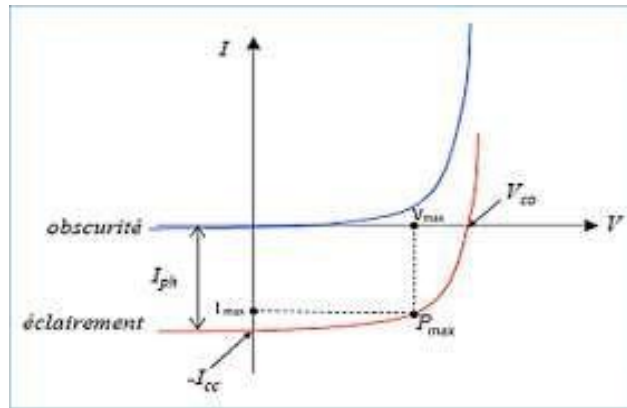
**Figure II. 20 a) :** architecture classique d'un panneau solaire photovoltaïque avec diodes de protections. (b) défaillance d'une des cellules du module PV et activation de diode de circulation  $I_{pv}$ . [28]



**Figure II.21 :** Caractéristique d'un assemblage série/parallèle de  $n_s$  et  $n_p$  cellules PV.

**II.5 Caractéristique électrique :**

La variation du courant A (ou densité du courant (A/cm<sup>2</sup>) en fonction de la tension (V) à l'obscurité et en particulier sous éclairage, permet d'évaluer la performance de la cellule solaire ; la figure (II.22) montre deux exemples de caractéristiques I-V de cellule solaire sans et avec éclairage. [29]



**Figure II.22 :** Caractéristique I-V d'une cellule solaire ; à l'obscurité et sous éclairage.

**II.6 Générateur photovoltaïque et ses performances :**

**II.6.1 Définition d'un générateur photovoltaïque :**

Le générateur photovoltaïque est un ensemble d'équipements mis en place pour exploiter l'énergie photovoltaïque afin de satisfaire les besoins en charge. En fonction de la puissance désirée, les modules peuvent être assemblés en panneaux pour constituer un "champ photovoltaïque". Relié au récepteur sans autre élément, le panneau solaire fonctionne "au fil du soleil", c'est-à-dire que la puissance électrique fournie au récepteur est fonction de la puissance d'ensoleillement. Elle est donc à son maximum lorsque le soleil est au zénith et nulle la nuit. Mais, très souvent, les besoins en électricité ne correspondent pas aux heures d'ensoleillement et nécessitent une intensité régulière (éclairage ou alimentation de réfrigérateurs, par exemple). On équipe alors le système de batteries d'accumulateurs qui permettent de stocker l'électricité et de la restituer en temps voulu.

Pour un certain nombre d'applications, le courant continu produit, par le générateur photovoltaïque, est converti à l'aide d'un onduleur en courant alternatif.

Un générateur photovoltaïque est constitué d'un ou plusieurs modules PV en série et / ou en parallèle pour obtenir une puissance, un I<sub>cc</sub> et un V<sub>co</sub> désirés. [30]

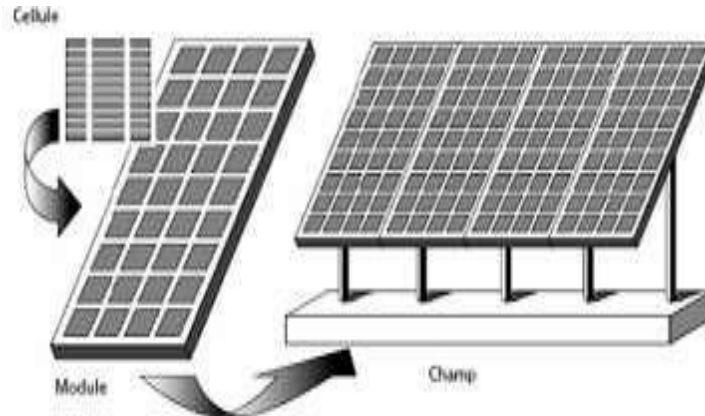


Figure II.23 : Les composants d'un générateur photovoltaïque.

### II.6.2 Constitution d'un générateur photovoltaïque :

Pour augmenter la tension de fonctionnement, les cellules photovoltaïques sont connectées en série. Fragilité la rupture et la corrosion des cellules nécessitent une protection contre son environnement, et celles-ci sont généralement encapsulées sous verre. Le tout s'appelle un module photovoltaïque. Cependant, il est important de prendre quelques précautions car il existe des batteries moins performantes et L'occlusion d'une ou plusieurs cellules (due aux ombres, à la poussière, etc.), peut endommager définitivement les cellules. [31]

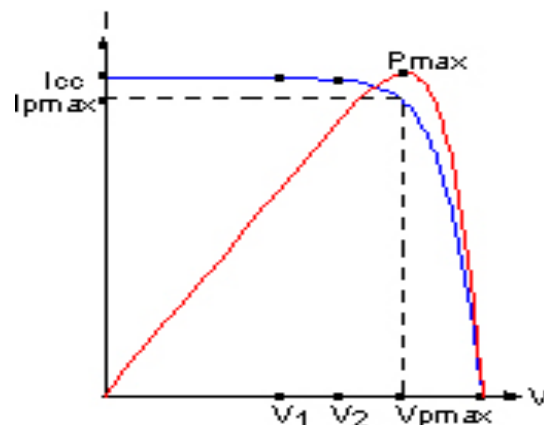
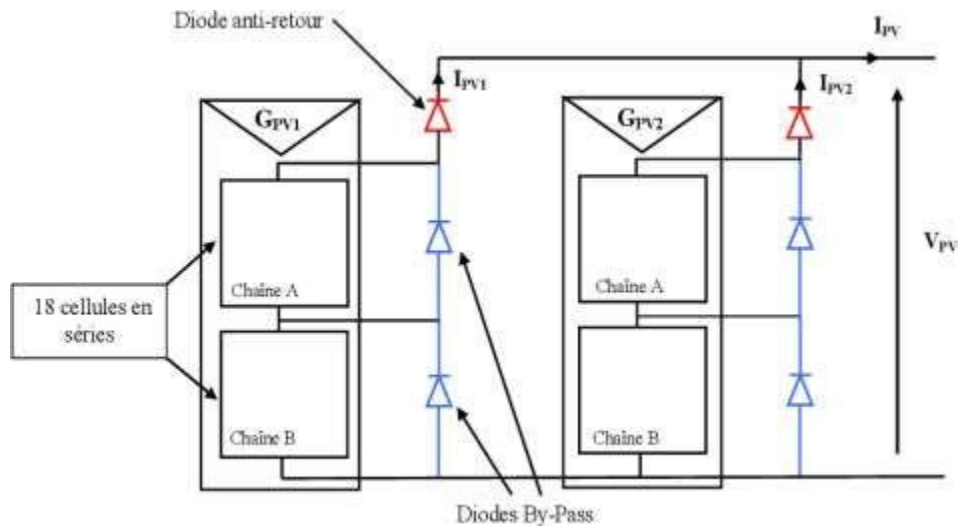


Figure II.24 : Caractéristiques I(V) et P(V) d'un générateur photovoltaïque.

Une cellule élémentaire de quelques dizaines de centimètres carrés délivre, au maximum, quelques watts sous une tension inférieure au volt (tension de jonction PN). Pour produire plus de puissance, plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer un module ou un panneau photovoltaïque. Le câblage série/parallèle est donc utilisé pour obtenir globalement un générateur PV aux caractéristiques souhaitées.

La plupart des modules commercialisés sont constitués de deux à quatre réseaux de cellules en silicium cristallins connectées en série, comme l'illustre la (figure II.25) Chacun de ces sous-réseaux est lui-même constitué d'un groupe de cellules connectées en série (18 cellules pour le module PV référencé BP585). Le nombre de cellules de chaque sous-réseau correspond à un compromis économique entre protection et perte d'une partie importante du GPV en cas de défaut partiel d'ombrage. [32]



**Figure II. 25 :** Exemples d'association sécurisée de deux modules PV commerciaux en parallèles avec leurs diodes de protections. [32].

### II.6.3 Caractéristique Courant-Tension :

Le panneau solaire photovoltaïque étant une association de cellules solaires individuelles, sa caractéristique lev) est directement liée à la caractéristique de la cellule solaire de base. De même que pour la cellule, la tension qui est présente lorsqu'il ne circule aucun courant et appelée tension en circuit ouvert ( $V_{co}$ ). À l'opposé, le courant présent lorsqu'il n'y a aucune tension est appelé courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ). Dans ces deux situations, aucune puissance n'est extraite du panneau photovoltaïque.

La meilleure combinaison s'appelle le point de puissance maximale du panneau solaire photovoltaïque. La tension et le courant correspondants sont appelés tension à puissance maximale ( $V_{PMAX}$ ) et courant à puissance maximale ( $I_{PMAX}$ ). Le point de puissance maximale sert à déterminer le rendement nominal du panneau solaire et la puissance en ce point est exprimée en Wc (watt crête).

Le courant solaire généré alors est donc forcément différent de  $I_{PMAX}$  et la puissance solaire extraite du panneau photovoltaïque n'est pas égale à la puissance maximale. Ceci reste toujours vrai, même si l'ensoleillement est de  $1000W/m^2$  et la température des cellules de  $25^{\circ}c$  (conditions STC). [33]

Pour tracer la caractéristique courant-tension  $I=f(V)$ , d'un générateur photovoltaïque, on doit résoudre l'équation (II.5).

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{sat} \cdot \exp \left[ \left( \frac{e(v_{pv} + (I_{pv} * R_s))}{nKT} \right) - 1 \right] - \frac{V_{pv} + (I_{pv} * R_s)}{R_{sh}} \quad (\text{II.25})$$

$R_{sh}$  étant très grande (théoriquement infini), le modèle GPV devient un modèle idéal qui est donné par l'équation suivante :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{sat} \cdot \exp \left[ \left( \frac{e(v_{pv} + (I_{pv} * R_s))}{nKT} \right) - 1 \right] \quad (\text{II.26})$$

La résolution de cette équation, non linéaire, nécessite une méthode numérique itérative telle que la méthode newton Raphson :

$$X_{n+1} = X_n - \frac{f(X_n)}{f'(X_n)} \quad (\text{II.27})$$

On réécrit l'équation (II.26) sous la forme  $f(x)=0$

$$f(I) = I - I_{ph} - I_{sat} \times \left[ e^{\frac{q \times (V + R_s I)}{AKT}} - 1 \right] = 0 \quad (\text{II.28})$$

La formule de récurrence utilisée dans la résolution est la suivante :

$$I_{n+1} = I_n - \frac{I_{ph} - I_n - I_{sat} \left( e^{\frac{q(V + R_s I_n)}{AKT}} - 1 \right)}{-1 - I_n \left( \frac{q \cdot R_s}{AKT} \right) \cdot e^{\frac{q(V + R_s I_n)}{AKT}}} \quad (\text{II.29})$$

La figure (II.26) représente la courbe  $I = f(V)$  et  $P=f(V)$  d'un module photovoltaïque dans des conditions constantes d'irradiation et de température. L'irradiation standard adoptée pour mesurer la réponse des modules photovoltaïques est une intensité rayonnante de  $1000 \text{ W/m}^2$  et une température de  $25^\circ\text{C}$ . [21]

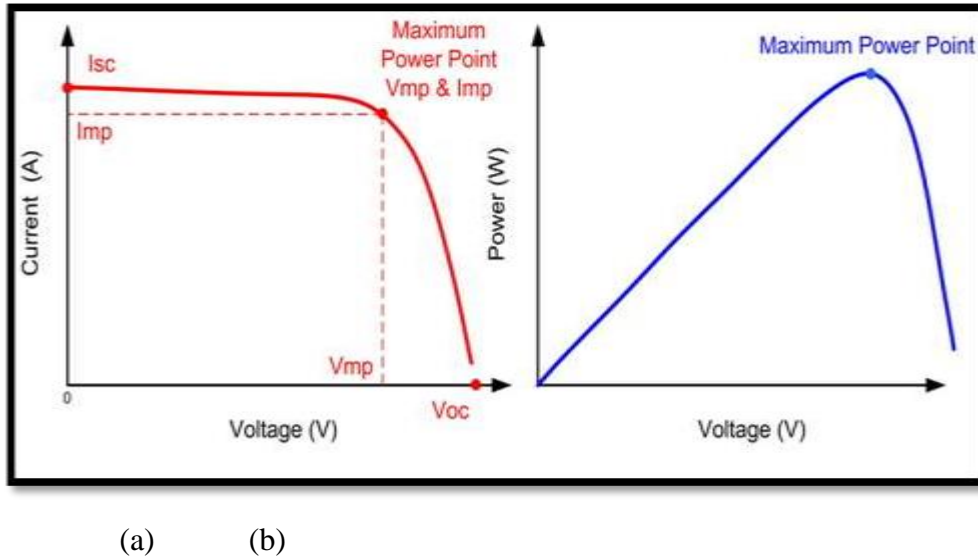


Figure II. 26 : (a) Caractéristique  $I=F(V)$ , (b) Caractéristique  $P=F(V)$  du générateur.

Il est difficile de donner un caractère source de courant ou de tension à un générateur photovoltaïque sur toute l'étendue de la caractéristique courant-tension. Par conséquent, le générateur photovoltaïque est considéré comme une source de puissance avec un point où la puissance se trouve être maximale. Il est donc intéressant de se placer sur ce point pour tirer le maximum d'énergie et ainsi exploiter au mieux la puissance crête installée. Il est important de noter que certains régulateurs solaires réalisent une adaptation d'impédance afin qu'à chaque instant on se trouve proche de ce point  $P_{max}$ . [21]

**a. Zones de fonctionnement d'un générateur photovoltaïque :**

Le comportement d'un générateur photovoltaïque (GPV) dépend de la zone dans laquelle se trouve le point de fonctionnement. [34] La Figure (II.27) montre les trois principales zones de fonctionnement de la caractéristique  $I(V)$ .

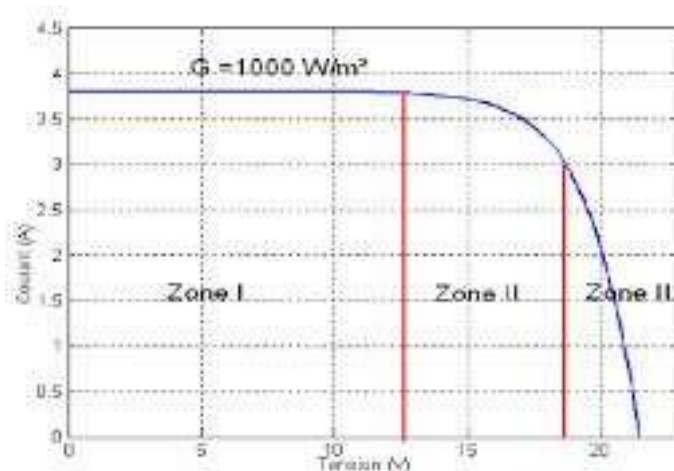


Figure II. 27 : Les différentes zones de la caractéristique  $I(V)$  aux conditions STC.

La caractéristique  $I(V)$  d'un GPV constitué de plusieurs cellules à une allure générale assimilable à celle d'une cellule élémentaire, sous réserve qu'il n'y ait pas de déséquilibre entre les caractéristiques de chaque cellule (irradiation et température uniformes). Nous pouvons décomposer la caractéristique  $I(V)$  d'un GPV en 3 zones :

- ✓ **La zone 1** : quand le point de fonctionnement appartient à cette zone, le courant reste constant quelle que soit la tension, le module photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant ;
- ✓ **La zone 2** : correspond au coude de la caractéristique  $I(V)$ . Elle représente la meilleure région pour le fonctionnement du générateur photovoltaïque. Autrement dit, quand le point de fonctionnement appartient à cette zone l'exploitation d'énergie est maximale et la puissance délivrée est maximisée par rapport aux deux autres zones ;
- ✓ **La zone 3** : quand le point de fonctionnement appartient à cette zone, la tension est presque constante malgré la variation du courant, dans ce cas le module photovoltaïque est assimilable à un générateur de tension. [34]

### **b. Protections classiques d'un GPV :**

Lorsque nous concevons une installation photovoltaïque, nous devons assurer la protection électrique de cette installation afin d'augmenter sa durée de vie en évitant notamment des pannes destructrices liées à l'association des cellules et de leur fonctionnement en cas d'ombrage. Pour cela, deux types de protections sont classiquement utilisées dans les installations actuelles :

- la protection en cas de connexion en parallèle de modules PV pour éviter les courants négatifs dans les GPV (diode anti-retour)
  
- la protection lors de la mise en série de modules PV permettant de ne pas perdre la totalité de la chaîne (diode by-pass) et éviter les points chauds. [35]

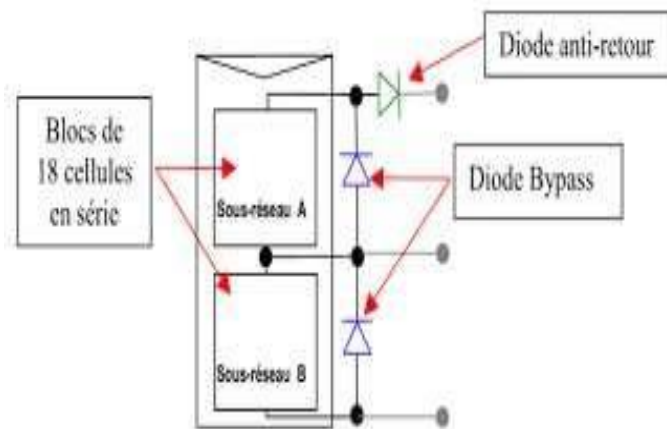


Figure II. 28 : Schématisation d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti- retour.

**c. Effets climatiques sur le générateur PV :**

✓ **Influence de l'éclairement :**

Les figures (II.29) et (II.30) représentent les caractéristiques I-V et P-V en fonction de l'éclairement. Il apparaît que le courant du court-circuit augmente avec l'intensité de l'éclairement, et la tension du circuit ouvert augmente légèrement avec l'éclairement. [36]

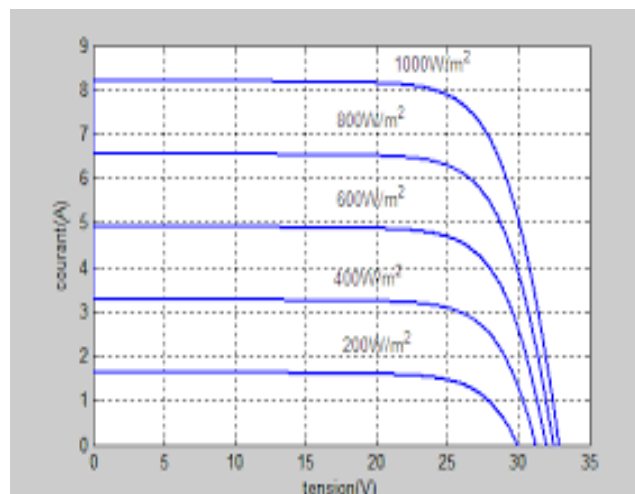
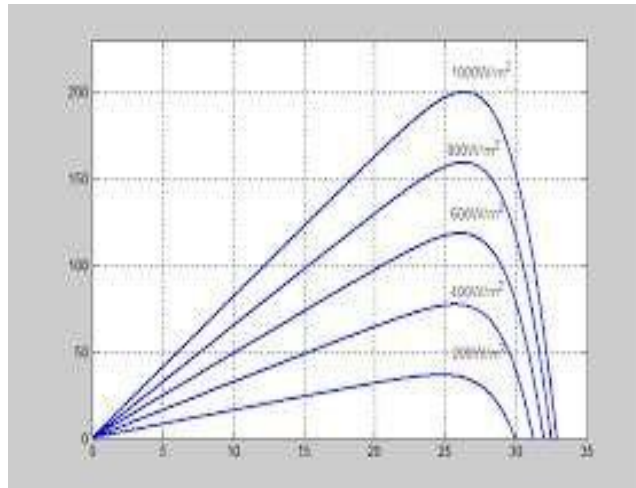


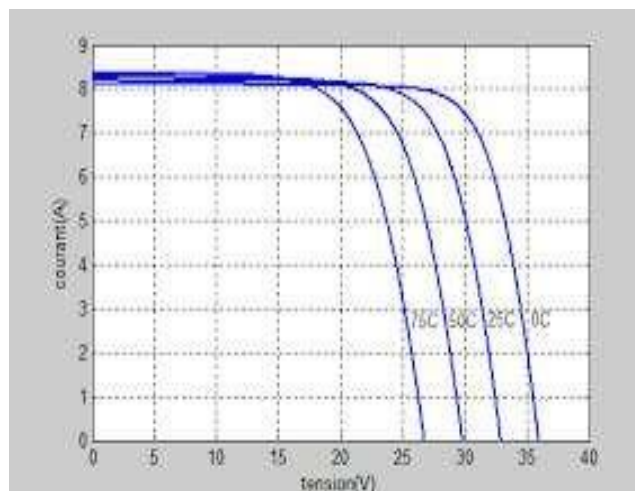
Figure II.29 : Caractéristique (I-V) pour différentes valeurs de rayonnement à 25°C.



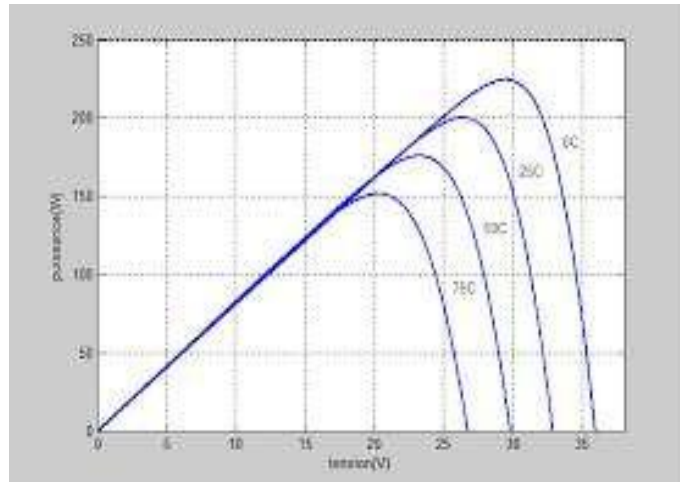
**Figure II. 30 :** Caractéristique P –V pour différentes valeurs de rayonnement à 25°C.

✓ **Influence de la température :**

Les figures (II.31) et (II.32) montrent respectivement l'influence de la température sur la caractéristique courant- tension du module photovoltaïque pour un éclairement donné ( $E=1\text{kW/m}^2$ ). On remarque que lorsque la température augmente, la tension du circuit ouvert  $V_{CO}$  diminue alors que le courant de court-circuit  $I_{CC}$  augmente.



**Figure II.31 :** Caractéristique I -V pour différentes valeurs des températures à 1000W/m².

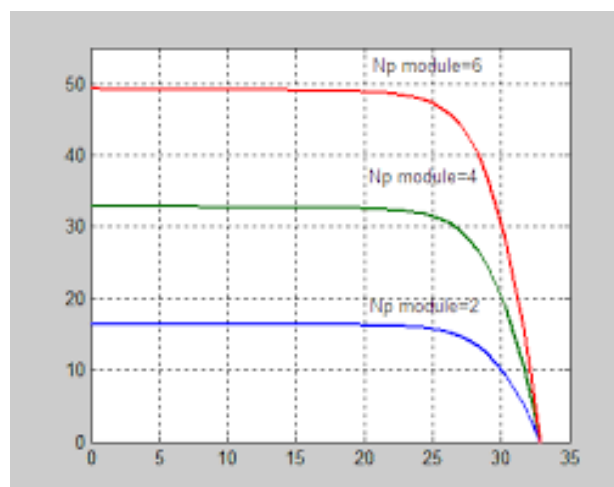


**Figure II.32 :** Caractéristique P –V pour différentes valeurs des températures a 1000W/m<sup>2</sup>.

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 PPM est proportionnelle à l'éclairement.

✓ **Influence de l'association parallèle des cellules PV :**

Un panneau photovoltaïque se compose d'un certain nombre de modules qui sont constitués par l'association de cellules en série. La mise en série et en parallèle des panneaux permet d'obtenir la tension et le courant exigés dont les performances dépendent de l'association des cellules et de la matière qui les compose. L'association en parallèle des modules délivre une courant égale à la somme des courants individuelles et une tension égale à celui d'un seul module. La caractéristique d'un groupement de  $N_p$  modules solaires en parallèle est représentée par la figure (II.33) (a) et (b). [37]



**Figure II. 33 (a) :** Influence du nombre de module parallèle sur la caractéristique I-V.

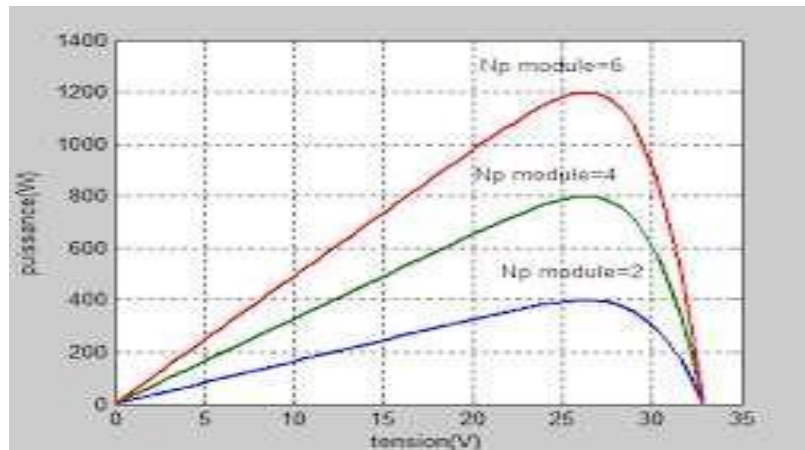


Figure II. 34 (b) : Influence du nombre de module parallèle caractéristique P –V.

✓ **Influence de l'association série des cellules PV :**

L'association en série des photopiles délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'un seul module. La caractéristique d'un groupement de  $n_s$  modules solaires en série est représentée par la figure (II.34) (a) et (b). [37]

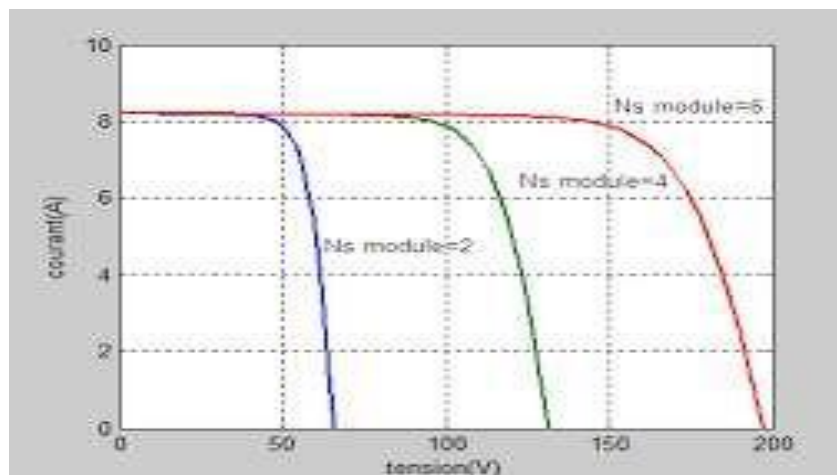


Figure II. 35 (a) : Influence du nombre de module série sur caractéristique I-V.

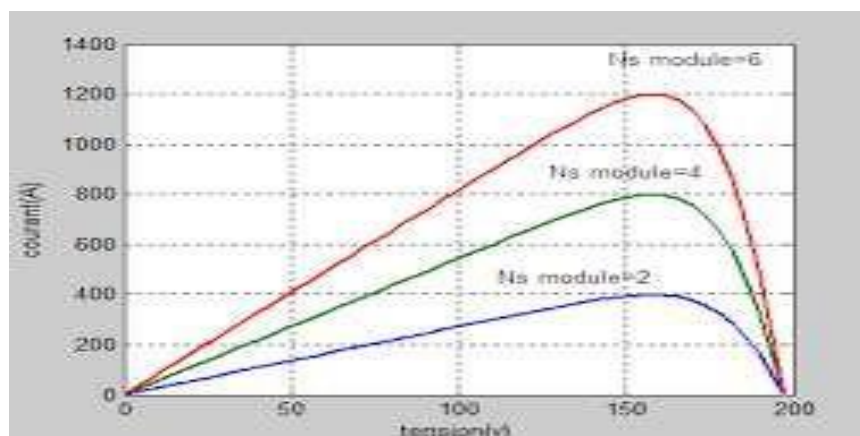


Figure II.36 (b) : Influence du nombre de module série sur caractéristique P-V.

✓ **Avantages et inconvénients d'un générateur photovoltaïque :**

Un générateur photovoltaïque possède les avantages et les inconvénients suivants [38]:

**Les avantages :**

- Un GPV est une source renouvelable qui prend sa matière primaire du soleil et ses rayonnements.
- Il a une grande fiabilité, avec un nombre limité des pièces auxiliaire mobiles.
- Un taux de pollution nulle, sachant que les panneaux solaires transforment l'énergie solaire en énergie électrique sans aucune pollution.
- Il ne nécessite pas un grand entretien, ce qui nous donne un coût relativement faible.
- Son caractère modulaire permet un montage simple et flexible.

**Les inconvénients:**

- Un GPV est une source renouvelable qui dépend des conditions climatiques météorologiques.
- Un GPV est souvent complété par un dispositif de stockage, donc une augmentation du coût.
- Pour une utilisation autonome, ces systèmes nécessitent par fois un champ des panneaux énorme présente une grande taille d'installation.

**II.7 Connexion directe source-charge :**

Actuellement, il reste encore beaucoup d'applications où une connexion directe entre un générateur photovoltaïque et une charge est effectuée. Ce choix est principalement lié à la simplicité de l'opération et le très faible degré de fiabilité, dû fondamentalement à l'absence d'électronique, sans parler d'un faible coût. Si cette charge était une batterie, lorsque le module n'est pas éclairé, celui-ci pourrait fonctionner en tant que récepteur, la batterie pourrait donc se décharger sur le générateur photovoltaïque et l'endommager irréversiblement, Ainsi, pour éviter cette situation, la connexion doit être assurée à l'aide d'une diode anti-retour placée entre le GPV et la charge. Cette configuration est illustrée à la figure II.35.

L'inconvénient de cette configuration, c'est qu'elle n'offre aucun type de limitation et/ou réglage de la tension. Le transfert de puissance maximale disponible aux bornes du générateur photovoltaïque vers la charge n'est pas non plus garanti. [39]

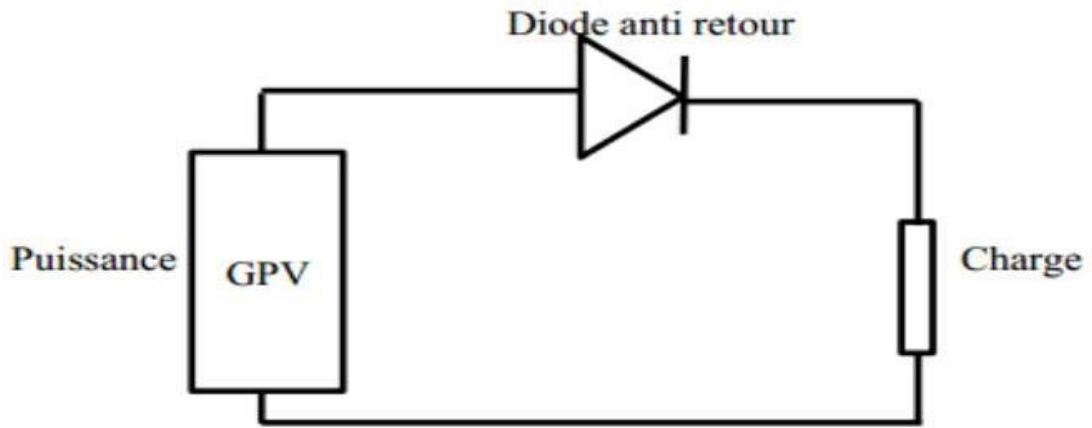


Figure II. 37 : Connexion directe source-charge.

### II.8 Étage d'adaptation entre un Générateur PV et une charge :

Les générateurs photovoltaïques présentent des caractéristiques (I-V) non linéaires avec un point de puissance maximal MPP. Ces propriétés dépendent entre autre du niveau d'éclairement et de la température des cellules. De plus, selon les caractéristiques de la charge sur laquelle le GPV débite, on peut voir un écart important entre la puissance potentielle du générateur et celle réellement transférée à la charge en mode de connexion directe.

Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du générateur photovoltaïque et de la transférer à la charge, la technique utilisée classiquement est d'utiliser un étage d'adaptation entre le générateur photovoltaïque et la charge, cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments en assurant à travers une action de contrôle, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche possible de puissance maximale disponible . [39]

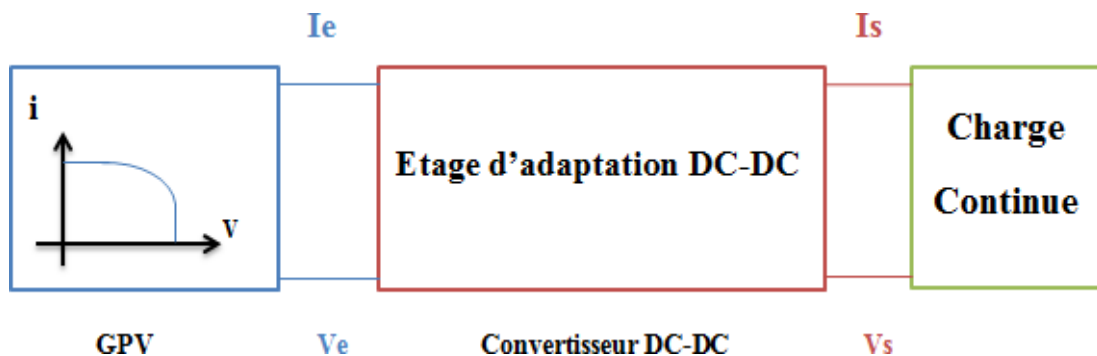


Figure II.38 : L'étage d'adaptation dans une chaîne photovoltaïque.

Pour que le générateur PV fonctionne le plus souvent possible dans son régime optimal, la solution communément adoptée est alors d'introduire un convertisseur statique qui joue le rôle d'adaptateur source-charge.

Le rôle du convertisseur DC-DC est de faire fonctionner les modules à leur point puissance optimale, quelques soient l'éclairement et la charge pour délivrer cette puissance à l'utilisation.

## **II.9 Les convertisseurs DC-DC :**

Par définition, Le convertisseur continu-continu ou le hacheur est un dispositif d'électronique de puissance permettant de convertir une énergie continue à un niveau donné de tension (ou du courant) en une énergie continue à un autre niveau de tension (ou du courant). Son utilisation est nécessaire pour stocker l'énergie photovoltaïque dans des batteries, ou pour alimenter des charges continues [40]. Il se compose de condensateur, d'inductance et de commutateur, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle il donne des bons rendements.

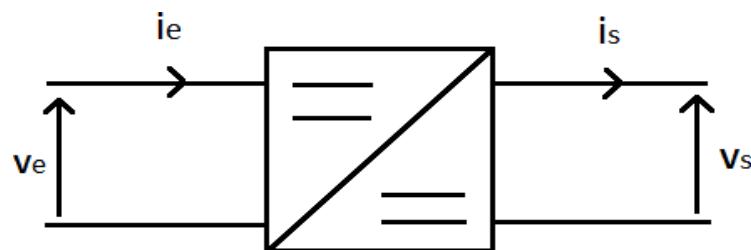


Figure II.39 : Symbole d'un hacheur.

### **II.9.1 Les types des convertisseurs DC /DC :**

Il y a plusieurs topologies des convertisseurs DC-DC. Ils sont classés en deux types : les convertisseurs non isolés et les convertisseurs isolés de la source. [40]

#### **a) Convertisseurs non isolés de la source :**

Les topologies non isolées ne comportent pas de transformateurs d'isolement. Elles sont généralement utilisées dans l'entraînement des moteurs à courant continu. Ces topologies sont encore classées en plusieurs catégories :

- Abaisseurs (Buck);
- Élévateurs (Boost);

- Abaisseurs-Élévateurs (Buck-Boost) ;
- Convertisseur « SEPIC », « Cuk ».

**b) Convertisseurs isolés de la source :**

La topologie isolée utilise un transformateur d'isolement qui fonctionne à haute fréquence et elle est couramment utilisée dans les alimentations à découpage. Les topologies les plus connues utilisées dans la plupart des applications sont le flyback, le demi-pont et le pont complet. On préfère ces types de topologies lorsque l'isolation électrique dans les systèmes photovoltaïques reliés au réseau pour raison de sécurité. [40]

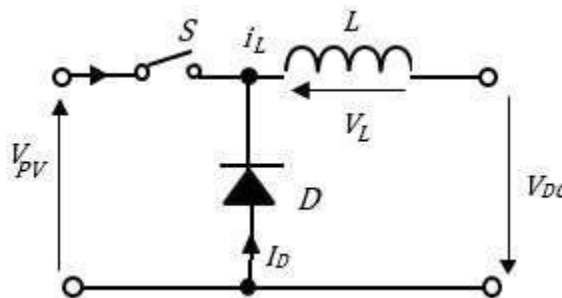
❖ Trois topologies de base de circuit de conversion (DC-DC) seront décrites dans les paragraphes suivants : Dans cette partie nous présentons le principe des trois types de convertisseurs DC/DC (Buck, Boost et Buck-Boost), utilisés fréquemment dans les systèmes photovoltaïques pour générer les tensions et les courants souhaités.

➤ Dans ce qui suit, on notera :

- $\alpha$  : Le rapport cyclique, il est défini comme étant le rapport entre la durée de conduction de l'interrupteur K et la période de commutation T.
- $T_d$  : La période des impulsions.

✓ **Hacheur buck (série/abaisseur) :**

Ce hacheur commande le débit d'une source de tension dans une charge de courant. Il permet de convertir la tension d'entrée en une tension de sortie inférieure. [41]



**Figure II.38 :** Schéma de principe d'un hacheur Buck.

Le cycle de fonctionnement, de période de hachage T, comporte deux étapes :

-Lors de la première, on ferme l'interrupteur et la diode, polarisée en inverse, est bloquée. La source  $V_{pv}$  fournit de l'énergie à la charge et à l'inductance. Cette phase dure de 0 à  $\alpha T$ , avec le rapport cyclique ' $\alpha$ ' compris entre 0 et 1.

-Lors de la seconde, on ouvre l'interrupteur. La diode devient passante car l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D. Cette phase dure de  $\alpha T$  à  $T$ .

La relation entre la tension d'entrée et celle de sortie est la suivante :

$$V_{dc} = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} V_{dc}.dt = \int_0^{\alpha T} V_{pv}.dt = \alpha.V_{pv} \quad (\text{II.30})$$

A pertes minimales on a :

$$P_{pv} = P_{dc} \Leftrightarrow V_{pv}.I_{pv} = V_{dc}.I_{dc} \Leftrightarrow I_{pv} = \frac{V_{dc}}{V_{pv}} I_{dc}$$

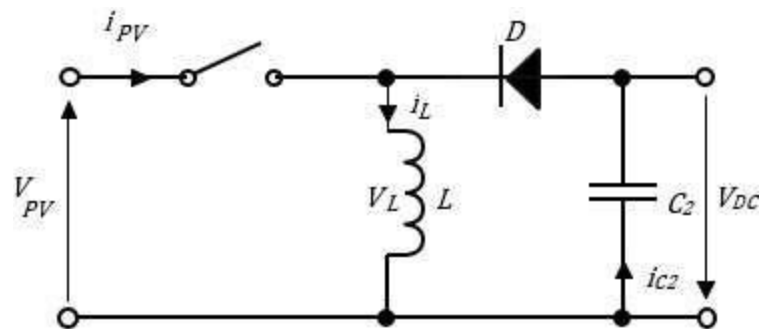
$$\Leftrightarrow I_{pv} = \alpha.I_{dc} \Leftrightarrow \alpha = \frac{V_{dc}}{V_{pv}} = \frac{I_{pv}}{I_{dc}} \quad (\text{II.31})$$

✓ **Hacheur Buck - Boost (abaisseur - élévateur) :**

Ce convertisseur statique permet d'avoir une tension continue variable supérieure ou inférieure à la tension d'entrée qui est fixe.

-Lors de la première phase de conduction, de 0 à  $\alpha T$ , l'interrupteur commandé est fermé. La diode n'est pas passante et l'inductance stocke l'énergie fournie par le générateur d'entrée.

-Lors de la seconde phase, de  $\alpha T$  à  $T$ , on ouvre l'interrupteur commandé et la diode devient passante. L'inductance restitue son énergie à la charge. [41]



**Figure II.39 :** Schéma de principe d'un hacheur Buck – Boost.

En conduction continue et sachant que la valeur moyenne aux bornes de l'inductance est nulle on a :

$$V_{pv}.\alpha T = V_{dc}.(1 - \alpha)T$$

Doc

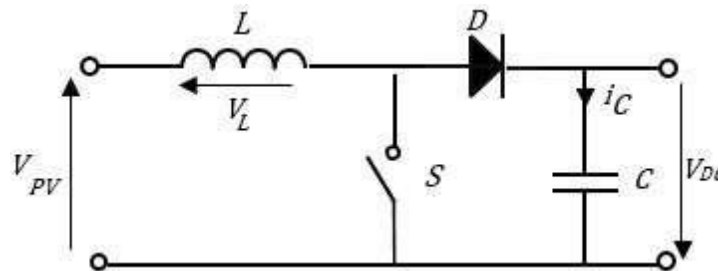
$$V_{dc} = \frac{\alpha}{(1 - \alpha)} V_{pv} \quad (\text{II.32})$$

Suivant la valeur du rapport cyclique  $\alpha$ , la tension moyenne de sortie peut être supérieure ou inférieure à la tension d'entrée :

- Lorsque  $\alpha > 0.5$ , le hacheur Buck-boost fonction comme un hacheur boost (élevateur).
- Lorsque  $\alpha < 0.5$ , le hacheur Buck-boost fonction comme un hacheur Buck (abaisseur).

✓ **Hacheur Boost (parallèle/élevateur) :**

Le hacheur élevateur dit aussi boost ou parallèle, avec ses paires : les hacheurs dévolteur et survolteur-dévolteur sont fréquemment utilisés dans les systèmes photovoltaïques. Ce type de convertisseurs n'est constitué que par des éléments réactifs (Selfs, Capacités) qui, dans le cas idéal, ne consomment aucune énergie. C'est pour cette raison qu'ils sont caractérisés par un grand rendement. Le hacheur survolteur, comme son nom l'indique, permet de convertir une tension continue en une autre tension continue de plus grande valeur. Il va, de ce fait, dans notre application, élever la tension générée par le GPV au niveau de la tension désirée du bus. Comme tous les convertisseurs continu-continu, le hacheur survolteur peut avoir deux modes de fonctionnement, l'un est continu dans lequel le courant inductif ne s'annule jamais ; l'autre (mode) est discontinu, pendant lequel le courant inductif s'annule un laps de temps. [41]



**Figure II.40 :** Schéma de principe d'un hacheur Boost.

Dans la phase dure de 0 à  $\alpha T$ , l'interrupteur commandé est fermé, la tension à ses bornes est nulle. La source et la charge ne sont pas en contact durant cette phase. La diode est alors bloquée et le courant dans l'inductance croît linéairement. Pour la seconde phase, de  $\alpha T$  à  $T$ , on ouvre l'interrupteur commandé et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode qui devient passante.

$$V_{pv} = \frac{1}{T} \int_0^T V_{pv} dt = \frac{1}{T} \int_{\alpha T}^T V_{dc} dt = (1 - \alpha) V_{dc} = \frac{V_{pv}}{(1 - \alpha)} \quad \text{(II.33)}$$

A pertes minimales on a :

$$\begin{aligned}
 P_{pv} = P_{dc} &\Leftrightarrow V_{pv}.I_{pv} = V_{dc}.I_{dc} \Leftrightarrow I_{dc} = \frac{V_{pv}}{V_{dc}} I_{pv} \\
 \Leftrightarrow I_{pv} &= (1-\alpha)I_{dc} \Leftrightarrow (1-\alpha) = \frac{V_{pv}}{V_{dc}} = \frac{I_{dc}}{I_{pv}}
 \end{aligned}
 \tag{II.34}$$

Le fonctionnement du convertisseur en question dépend étroitement de la commande de son interrupteur. Les quatre paramètres principaux sont :

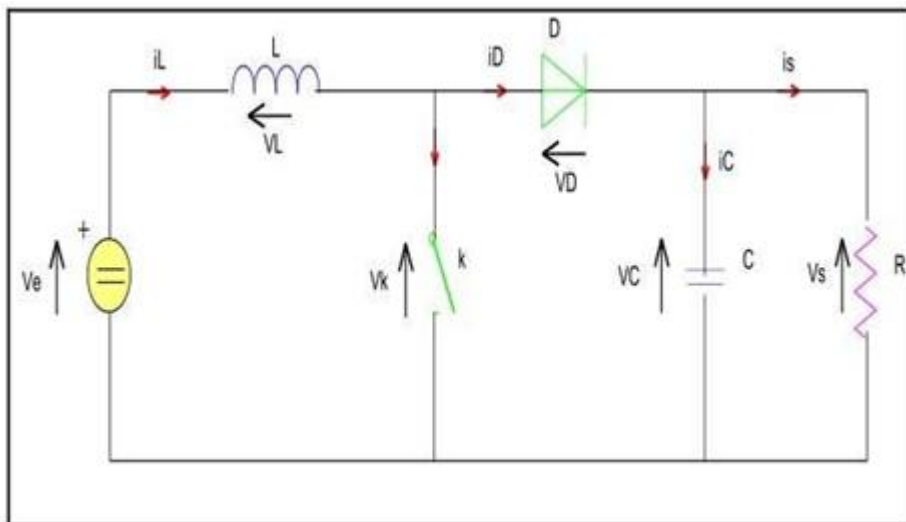
- Durée de conduction :  $T_{ON} = \alpha Td$  **(II.35)**

- Durée de blocage :  $T_{OFF} = (1 - \alpha) Td$  **(II.36)**

- Période de découpage :  $Td = T_{ON} + T_{OFF}$  **(II.37)**

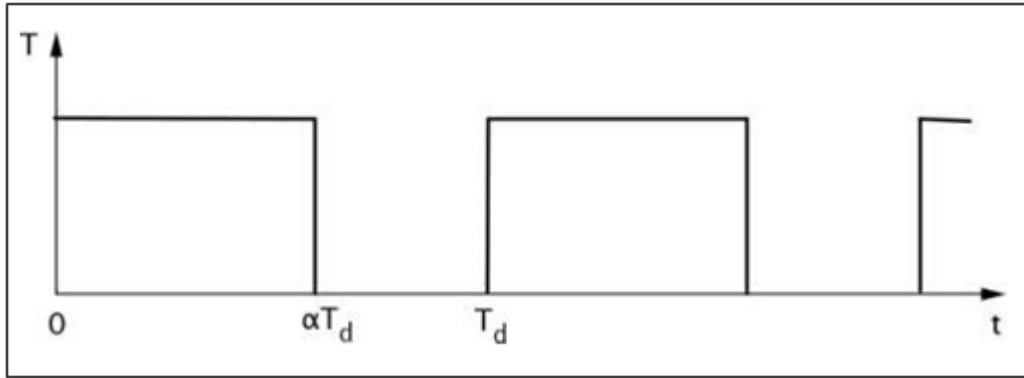
- Le Rapport cyclique :  $\alpha = T_{on} / Td$  **(II.38)**

Selon l'état de l'interrupteur K et de la diode D, on peut distinguer deux phases de fonctionnement :



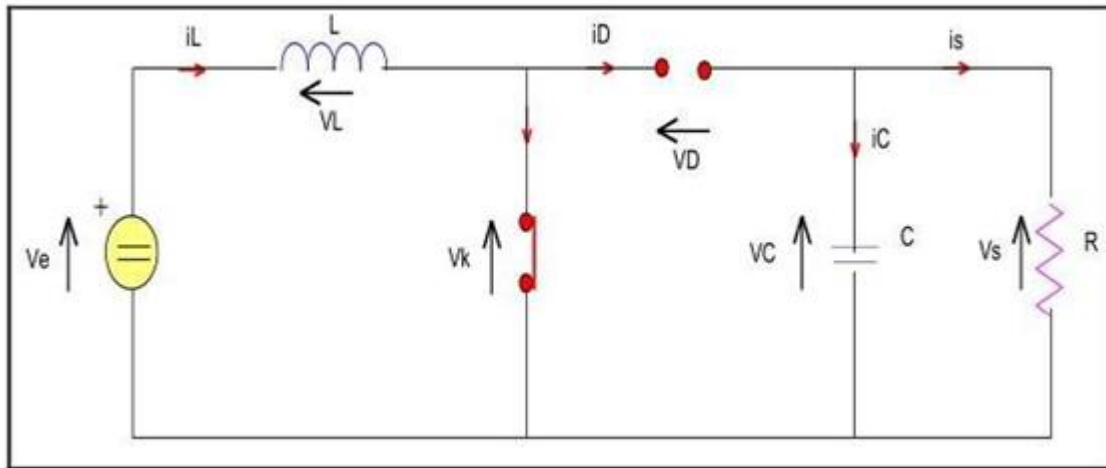
**Figure II.41** : Schéma de principe d'un hacheur élévateur.

A l'instant  $t = 0$ , on ferme l'interrupteur K pendant une durée  $\alpha Td$ .



**Figure II.42 :** Signal de commande de l'interrupteur K.

✓ **La phase active :**



**Figure II.43 :** Schéma de phase active.

De l'analyse du circuit on déduit l'équation suivante :

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_e}{L} \quad \text{(II.40)}$$

Dont la solution est:

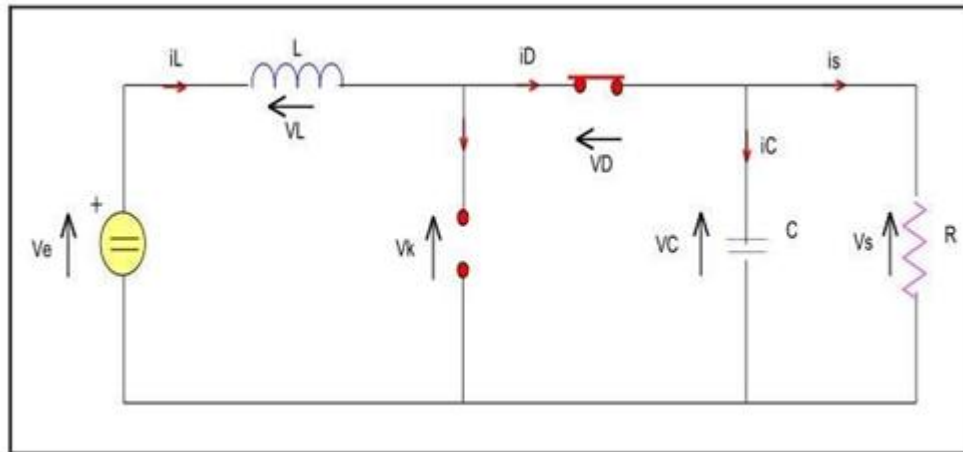
$$\frac{d^2V}{dt} = -\frac{V^2}{R.C} \quad \text{(II.41)}$$

✓ **La phase de roue libre :**

Lorsque l'interrupteur *K* est ouvert et l'interrupteur *D* est fermé. Durant cette séquence, l'énergie emmagasinée dans l'inductance *L* est restituée au condensateur et à la charge *R*. Lors

de cette phase, le fait que l'inductance  $L$  soit en série avec la source de tension d'entrée permet d'obtenir un montage survolteur. [41]

A l'instant  $t = \alpha * T_d$ , on ouvre l'interrupteur  $K$  pendant la durée  $T_d * (1 - \alpha)$  ce qui nous donne le circuit équivalent de la figure suivante :



**Figure II.44 :** Schéma de phase de roue libre.

De l'analyse du circuit on déduit l'équation suivante :

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_s - V_e}{L} \quad (\text{II.42})$$

Dont la solution est :

$$\frac{d^2V}{dt} = \frac{i_L}{C} = \frac{V_s}{R.C} \quad (\text{II.43})$$

✓ **Avantage du convertisseur boost :**

Bien que les convertisseurs abaisseurs soient très efficaces dans les systèmes utilisant des alimentations électriques conventionnelles, les convertisseurs éleveurs peuvent être plus adaptés aux systèmes photovoltaïques avec le contrôleur du point de puissance maximale (MPPT), puisque le convertisseur fonctionne en mode CC, tirant autant de puissance que possible de la cellule solaire. Par conséquent, l'efficacité énergétique d'un convertisseur éleveur peut être supérieure à celle d'un convertisseur abaisseur. Les convertisseurs éleveurs sont généralement utilisés pour obtenir des tensions de sortie plus élevées, tandis que les convertisseurs abaisseurs sont utilisés pour les courants élevés. [42]

### **II.10 Conclusion :**

Le fonctionnement du générateur photovoltaïque à un rendement optimal nécessite l'insertion des convertisseurs statiques (les hacheurs) entre le générateur et le récepteur (charge) à une tension constante peut être optimisé en ajustant le rapport cyclique. Le convertisseur pour qu'il puisse fonctionner au MPP il faut introduire une commande MPPT que nous allons l'étudier dans le chapitre suivant.

# ***CHAPITRE III :***

## ***La Commande MPPT (P&O)***

### III.1 Introduction :

La puissance délivrée par un GPV dépend fortement du niveau d'ensoleillement, de la température des cellules, de l'ombrage et aussi de la nature de la charge alimentée. La courbe de puissance du GPV présente un point de puissance maximale MPP (Maximum Power Point) correspondant à un certain point de fonctionnement de coordonnées  $V_{MPP}$  pour la tension et  $I_{MPP}$  pour le courant. Vu que la position du MPP dépend du niveau d'ensoleillement et de la température des cellules, elle n'est jamais constante dans le temps. Un convertisseur MPPT (Maximum Power Point Tracker) doit donc être utilisé afin de suivre ces changements. La commande MPPT est un système de conversion de puissance muni d'un algorithme de contrôle approprié permettant d'extraire le maximum de puissance que le GPV peut fournir. Les premières utilisations du MPPT remontent à 1968 par BOEHRINGER dans le cadre d'applications spatiales ayant pour générateur électrique des panneaux photovoltaïques. Le développement du MPPT a constitué un thème techniquement attrayant, si bien que finalement, un grand nombre de procédures et techniques ont été développées, parmi ces techniques la méthode de perturbation et observation qui est largement utilisée en raison de sa facilité et sa simplicité.

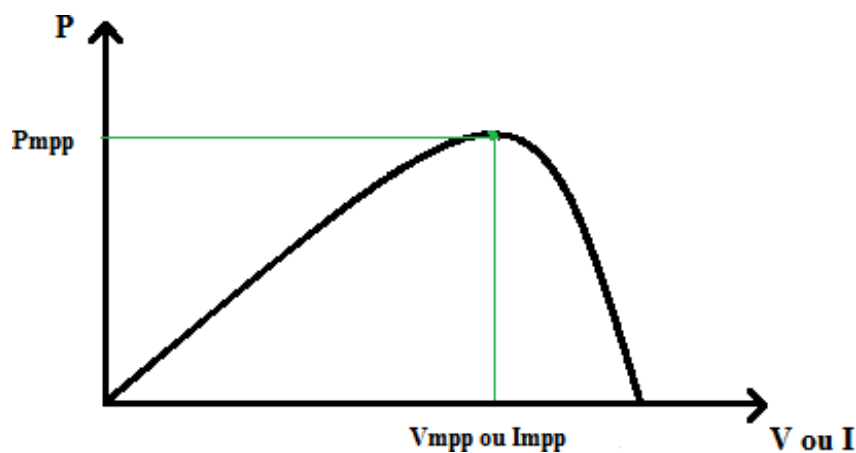


Figure III.1: Courbe caractéristique de puissance d'un GPV.

### III.2 Le principe de la Commande MPPT :

La commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un GPV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quel que soit les conditions météorologiques (température et irradiation), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum ( $V_{MPP}$  et  $I_{MPP}$ ). La

Chaîne de conversion photovoltaïque sera optimisée à travers un convertisseur statique (CS) commandé par une MPPT. Il peut être représenté par le schéma de la Figure ci-dessous :

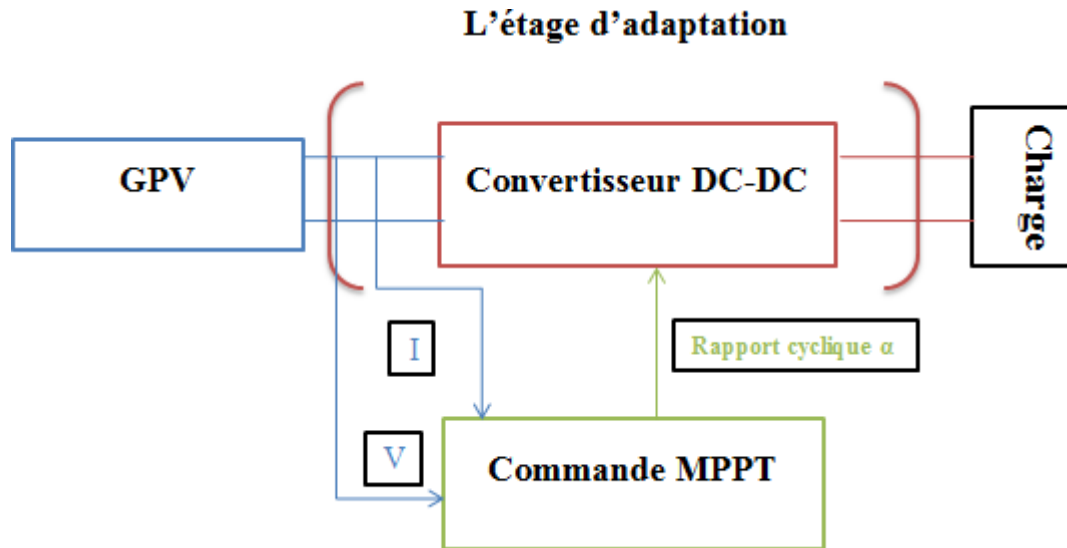


Figure III.2 : Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, un convertisseur BOOST, une commande MPPT et une charge.

La commande MPPT fait varier le rapport cyclique du convertisseur statique (CS), à l'aide d'un signal électrique approprié, pour tirer le maximum de puissance que le GPV peut fournir. L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le MPP. En général, il est basé sur la variation du rapport cyclique du CS en fonction de l'évolution des paramètres d'entrée de ce dernier (I et V et par conséquent de la puissance du GPV) jusqu'à se placer sur le MPP. [44]

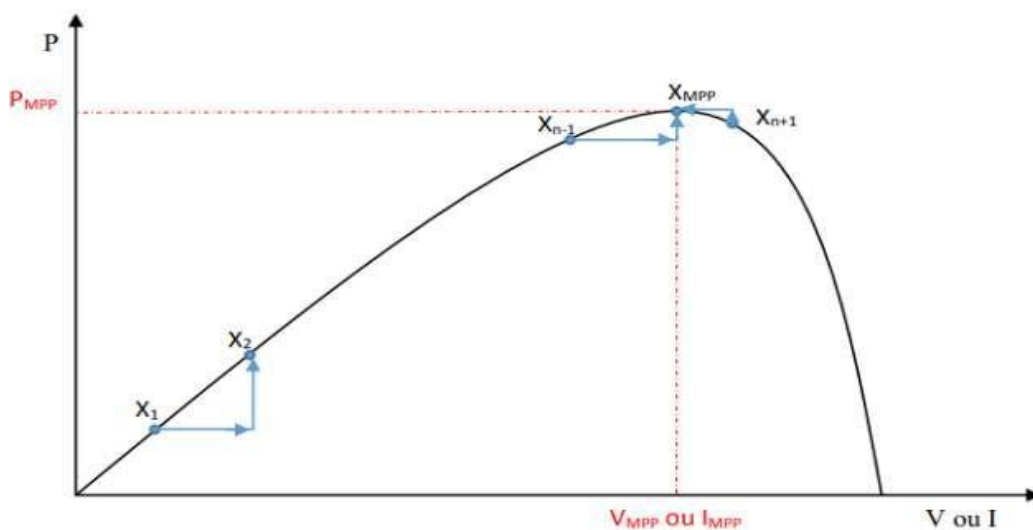


Figure III.3 : Principe de la commande MPPT.

➤ Les premiers types de la commande MPPT :

BOEHRINGER a appliqué la première commande MPPT au PV en 1968. C'est un algorithme simple pouvant être implanté numériquement (Figure III-4). Il est destiné aux applications spatiales qui avaient beaucoup moins de contraintes en variation de température et d'éclairement que les applications terrestres. [45]

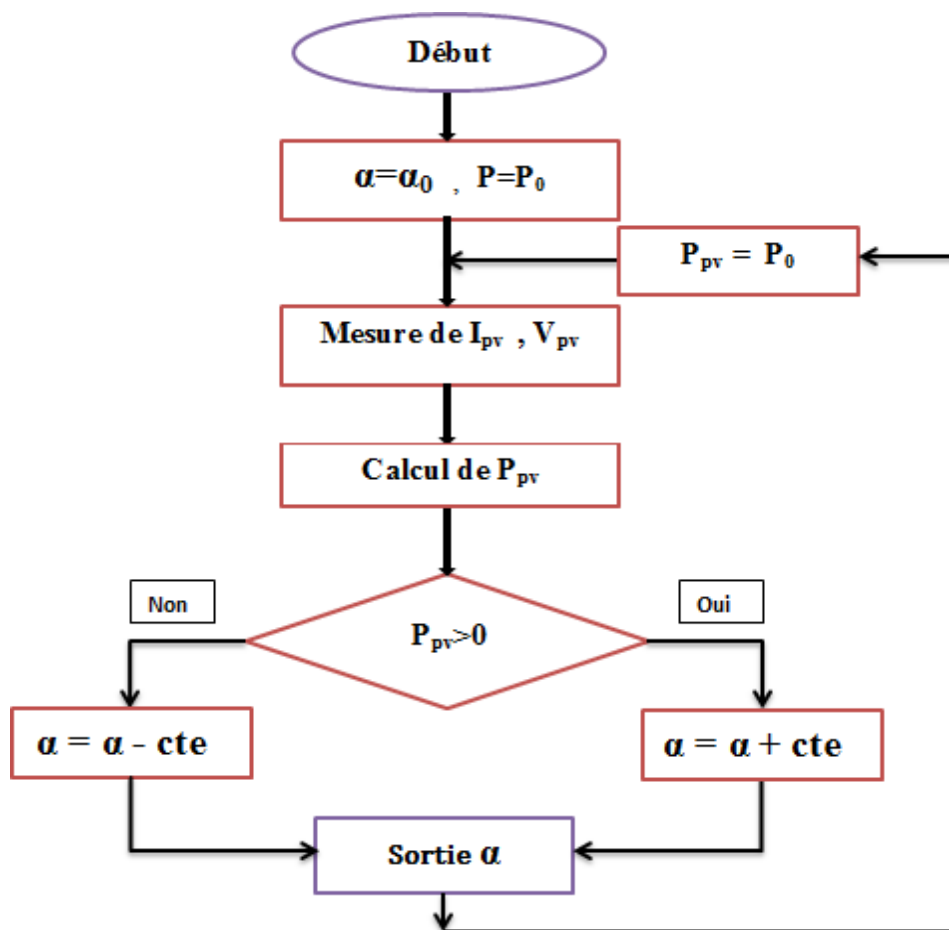


Figure III.4 : Organigramme de la première commande MPPT.

III.3 Classification Des Commandes MPPT :

La classification des algorithmes du suiveur peut être basée sur la fonction des techniques ou des stratégies de commande utilisées. Ainsi, deux catégories peuvent être présentées : méthodes directes et indirectes. [46]

**a) MPPT indirect :**

Les méthodes indirectes utilisent des bases de données regroupant les caractéristiques des panneaux photovoltaïques (PV) dans différentes conditions climatiques (température ensoleillement...) mais aussi des équations mathématiques empiriques permettant de déterminer le point de puissance maximum. Ces méthodes sont souvent propres à chaque type de panneau et donc difficile à généraliser : la méthode d'ajustement de courbe, la méthode « look up table », la méthode de la tension de circuit ouvert du générateur, la méthode de court-circuit. [46]

**b) MPPT direct :**

Les méthodes directes sont des méthodes qui utilisent les mesures de tension et de courant des panneaux et dont l'algorithme est basé sur la variation de ces mesures. L'avantage de ces algorithmes est qu'ils ne nécessitent pas une connaissance préalable des caractéristiques des panneaux PV. Parmi ces méthodes, on retrouve la méthode de différenciation, la méthode Perturbe & Observe (P&O), l'incrément de conductance. [47]

- La méthode qui nous intéresse est la méthode Perturbation et Observation (P&O). Nous allons expliquer dans ce qui suit son principe de fonctionnement.

**III .4 La méthode de perturbation et observation (P&O) :**

L'algorithme de perturbation et observation (communément désignée par P&O) est de type « hill climbing » (mot anglais qui veut dire « grimper une colline »). Il est le plus utilisé dans la littérature et surtout dans la pratique en raison de sa facilité de mise en œuvre. Et comme son nom l'indique, la méthode de P&O fonctionne par la perturbation de la tension de fonctionnement du panneau et l'observation de son impact sur le changement de la puissance à sa sortie. Elle génère des perturbations en diminuant ou en augmentant le rapport cyclique et d'observer l'effet sur la puissance délivrée par le générateur photovoltaïque. Quatre cas de situation pour P&O sont envisagés par la figure IV-4 et récapitulés dans le Tableau III -1. [47]

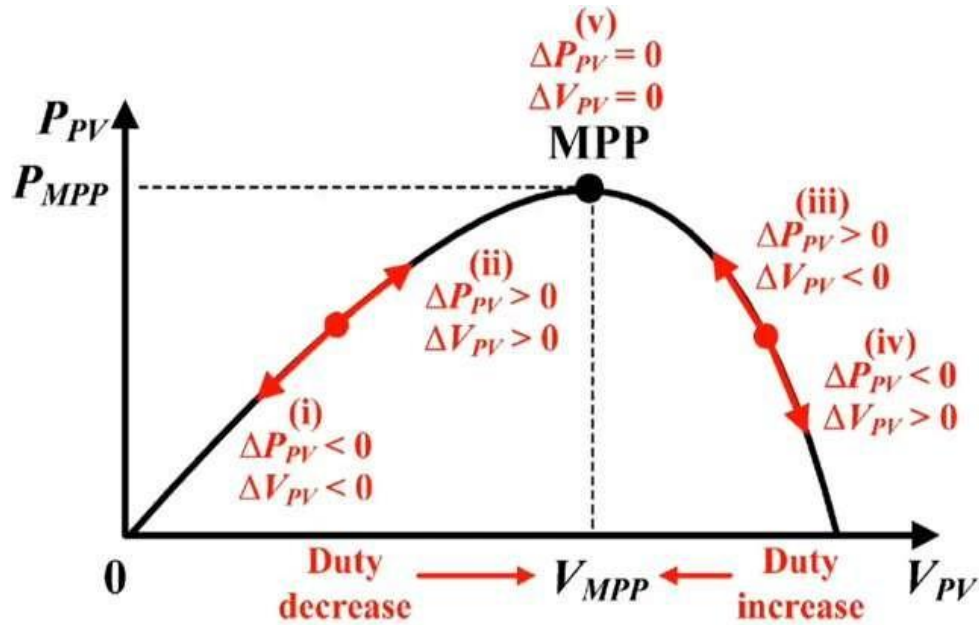


Figure III.5 : caractéristique de fonctionnement de la méthode P&O.

Tableaux III. 1 : Fonctionnement de P&O

Cas	$\Delta V$	$\Delta P$	$\frac{\Delta P}{\Delta V}$	Sens de la poursuite	Action de Contrôle
(i)	-	-	+	Mauvais	Incrémenter $V_{ref}=V_{ref}+\Delta V$
(ii)	+	+	+	Bon	Incrémenter $V_{ref}=V_{ref}+\Delta V$
(iii)	-	+	-	Bon	Décrémenter $V_{ref}=V_{ref}-\Delta V$
(iv)	+	-	-	Mauvais	Décrémenter $V_{ref}=V_{ref}-\Delta V$

### III.4.1 Le principe de la commande P&O :

Cette méthode consiste à provoquer une perturbation de faible valeur sur la tension  $V_{PV}$ , ce qui engendre une variation de la puissance. Si une augmentation de la tension provoque un accroissement de la puissance, le point de fonctionnement se trouve à gauche

du MPP, si au contraire la puissance décroît, il est à droite. De la même manière, on peut faire un raisonnement pour une diminution de la tension. [43]

III.4.2 L’algorithme de la méthode P&O:

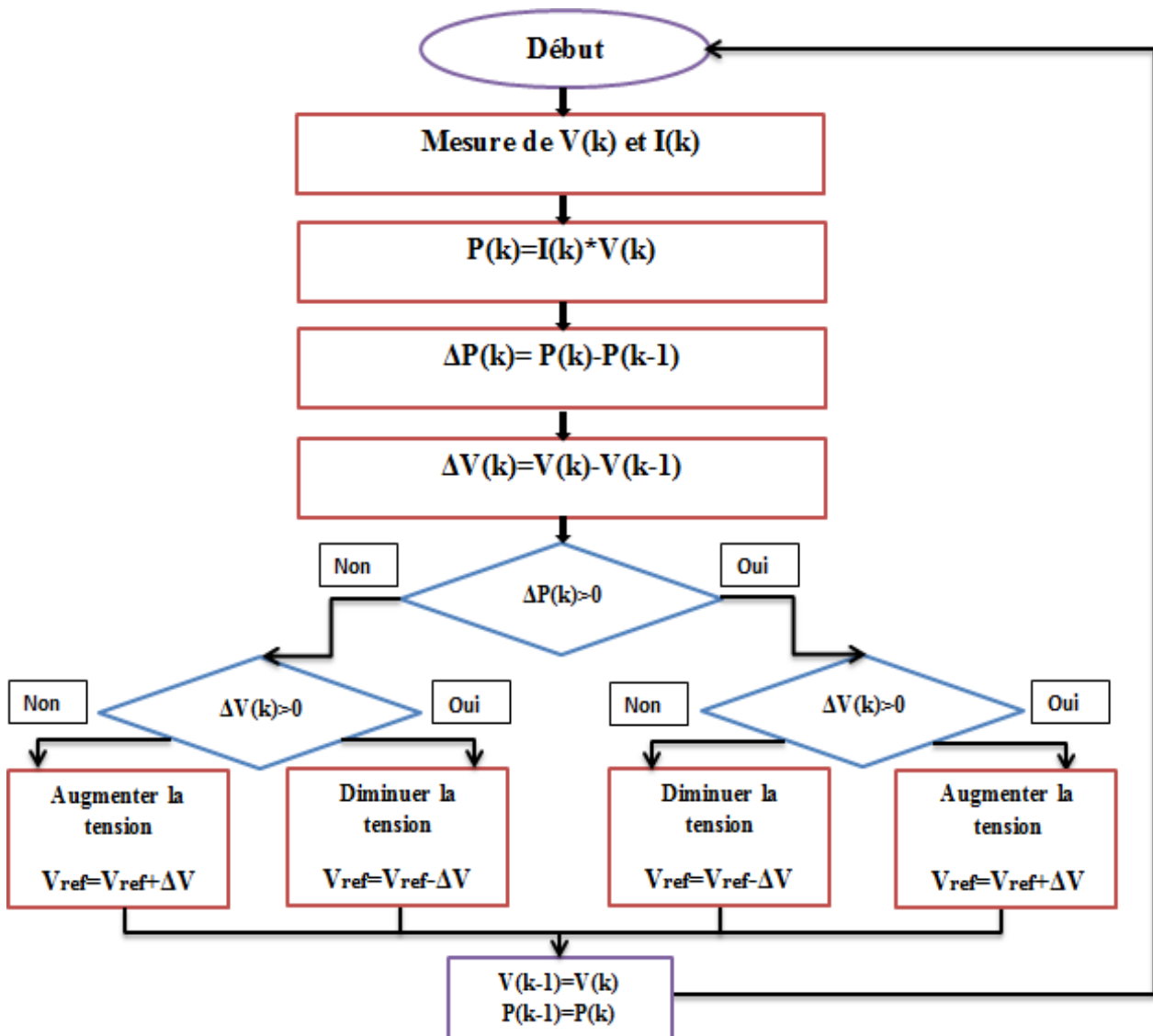


Figure III.6 : Organigramme de l’algorithme P&O.

➤ Algorithme Hill Climbing :

La technique Hill Climbing (HC) est une méthode mathématique d’optimisation, elle fait monter le point de fonctionnement le long d’une caractéristique pour atteindre le maximum de la fonction puissance du GPV contre le rapport cyclique du convertisseur  $\alpha$  (Figure III-7). La perturbation est appliquée pour plusieurs itérations sur le paramètre  $\alpha$  en l’incrémentant ou en le décrémentant de  $\Delta\alpha$  jusqu’à avoir la dérivée  $dP/d\alpha$  nulle.

La figure III-8 présente l’algorithme d’exécution de cette technique. La méthode HC est plus simple à mise en œuvre car elle possède une seule boucle de régulation. Cependant, elle présente des oscillations et peut même diverger lors du changement rapide des conditions atmosphériques. [47]

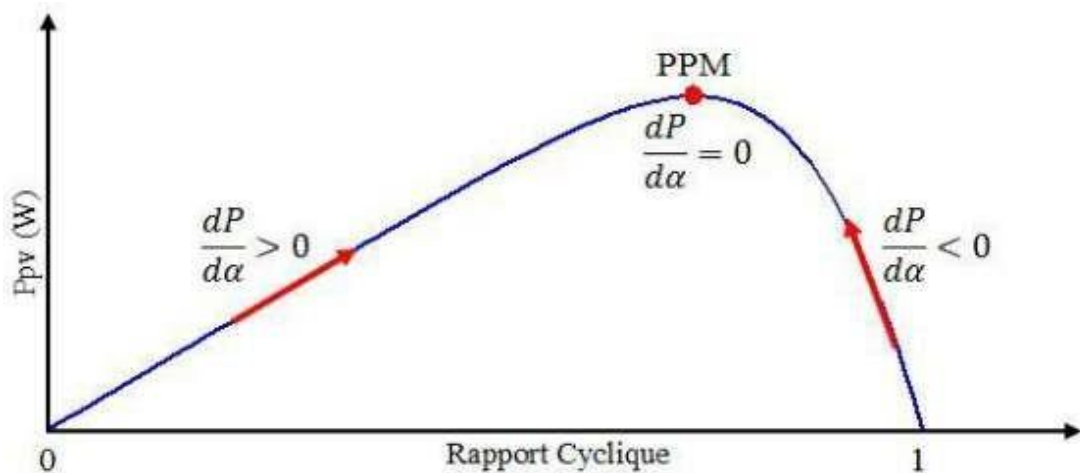


Figure III.7: Principe de la méthode HC.

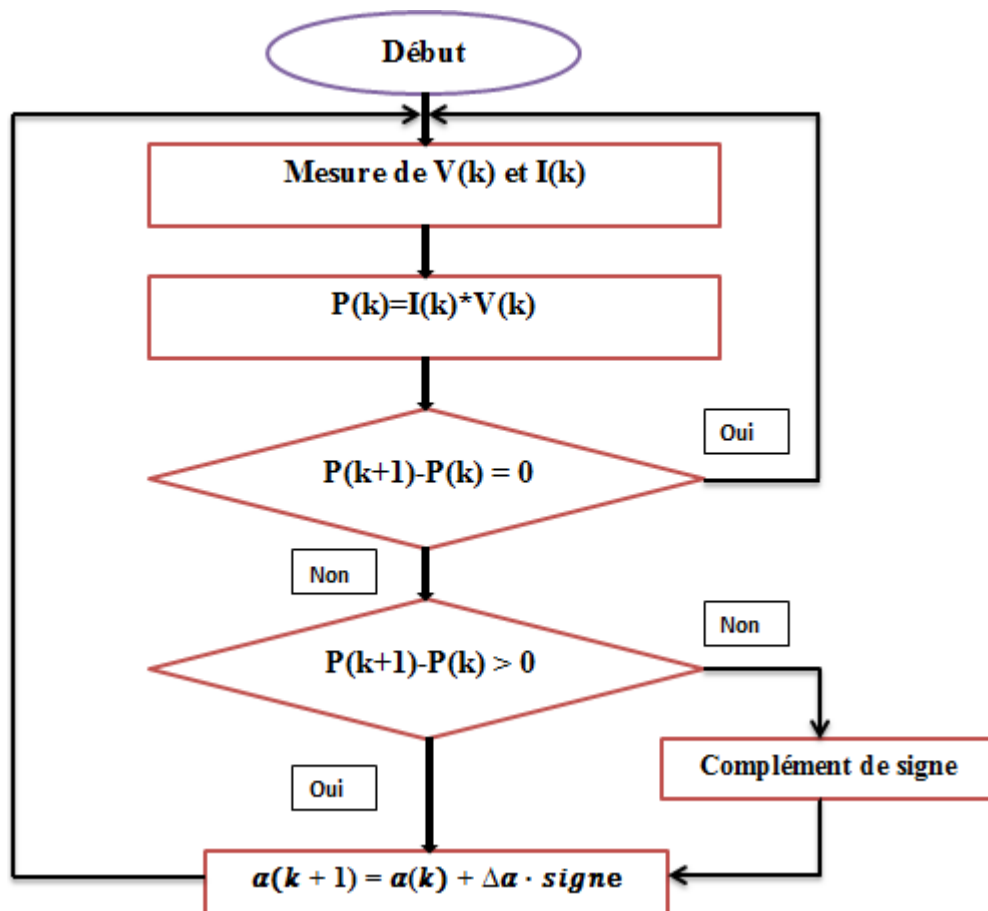


Figure III.8 : Organigramme de l’algorithme de Hill Climbing.

III.4.3 Les avantages et les inconvénients de P&O :

✓ **Avantages :**

- Le rendement de MPPT de l'algorithme P&O est essentiellement identique.
- Structure de régulation simple.
- Nombre des paramètres des mesures réduit. [48]

✓ **Inconvénients :**

- Dépassement du point maximum optimal en cas de changement brusque des conditions d'atmosphère. [48]

Si la puissance de sortie a augmenté depuis la dernière mesure, c'est-à-dire que le point de puissance maximum n'a pas été atteint, la perturbation de tension continuera dans la même direction que le dernier cycle. Lorsque le point de puissance maximum est atteint, la tension du panneau oscille autour de MPP car la recherche doit être répétée périodiquement pour forcer le système à osciller autour de MPP. Une fois que la puissance de sortie a diminué depuis les dernières mesures, c'est-à-dire que le point de puissance maximale est dépassé, la tension est perturbée dans le sens opposé à l'itération précédente. [43]

III.5 Simulation d'un système PV adapté par la commande MPPT (P&O) :

Cette figure présente le schéma Matlab/Simulink de la commande MPPT du type P&O appliquée à notre système PV :

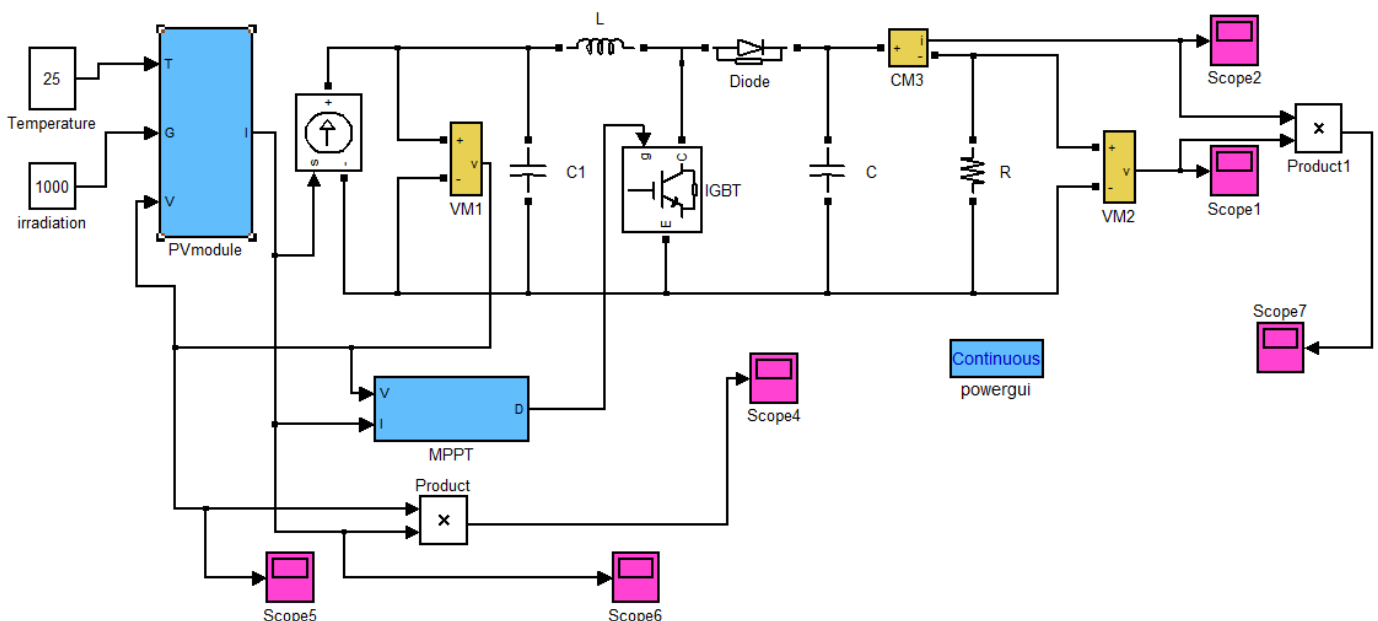
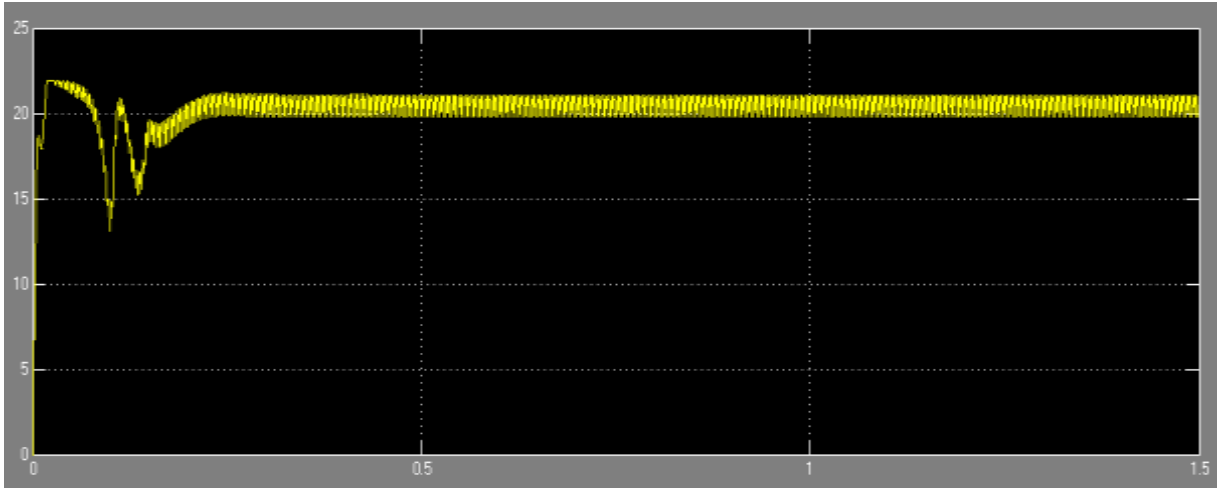


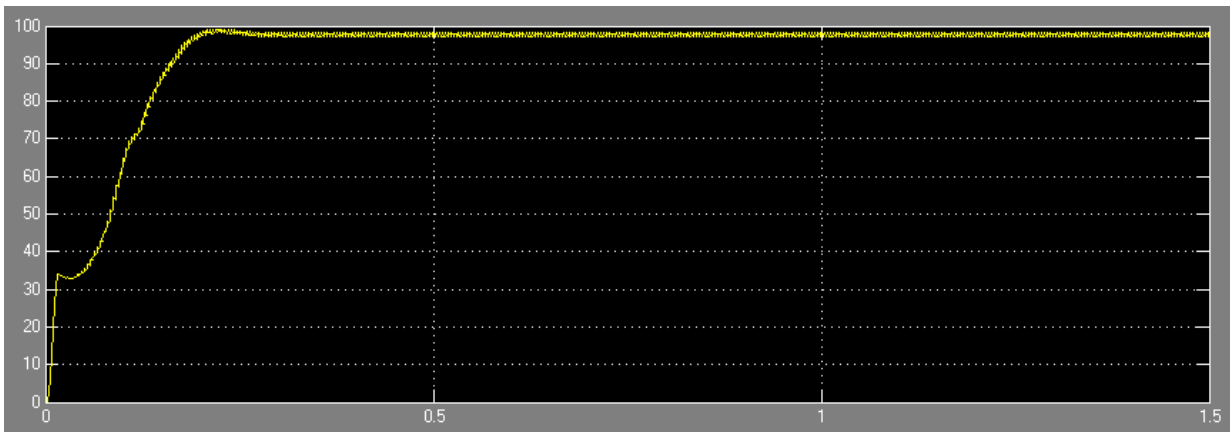
Figure III.9 : Schéma Matlab/Simulink de la commande MPPT

➤ **Les résultats de simulation avec la technique P&O :**

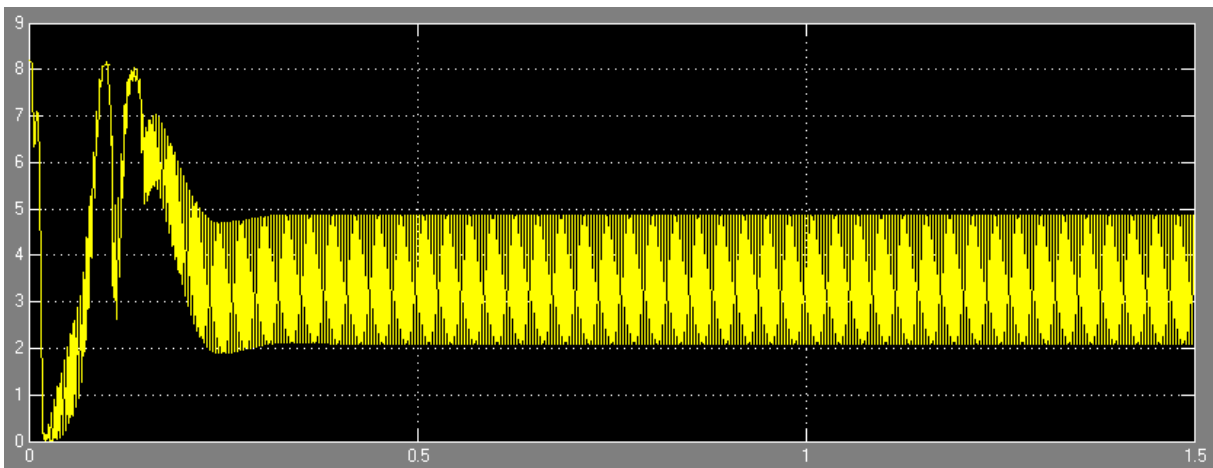
Nous avons simulé le fonctionnement de système photovoltaïque sous les conditions atmosphériques fixe : Pour l'irradiation  $I_r=1000 \text{ w/m}^2$  et la température  $T=25^\circ\text{c}$ , les résultats obtenues sont montrées par les figures suivantes :



**Figure III.10 :** Variation de tension du panneau.



**Figure III.11 :** Variation de tension de la charge.



**Figure III.12 :** Variation du courant du panneau.

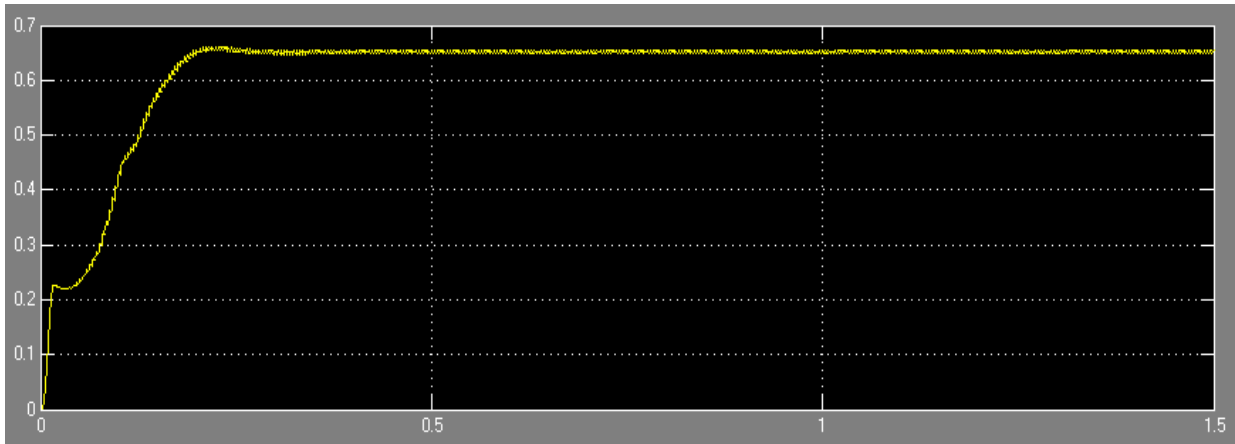


Figure III.13: Variation de courant de la charge.

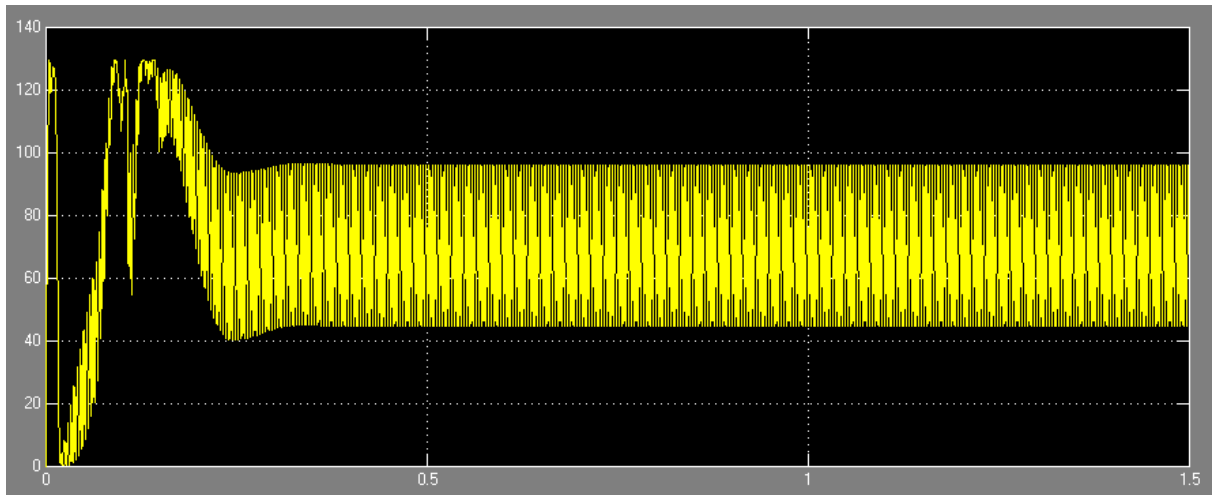


Figure III.14 :Variation de puissance du panneau.

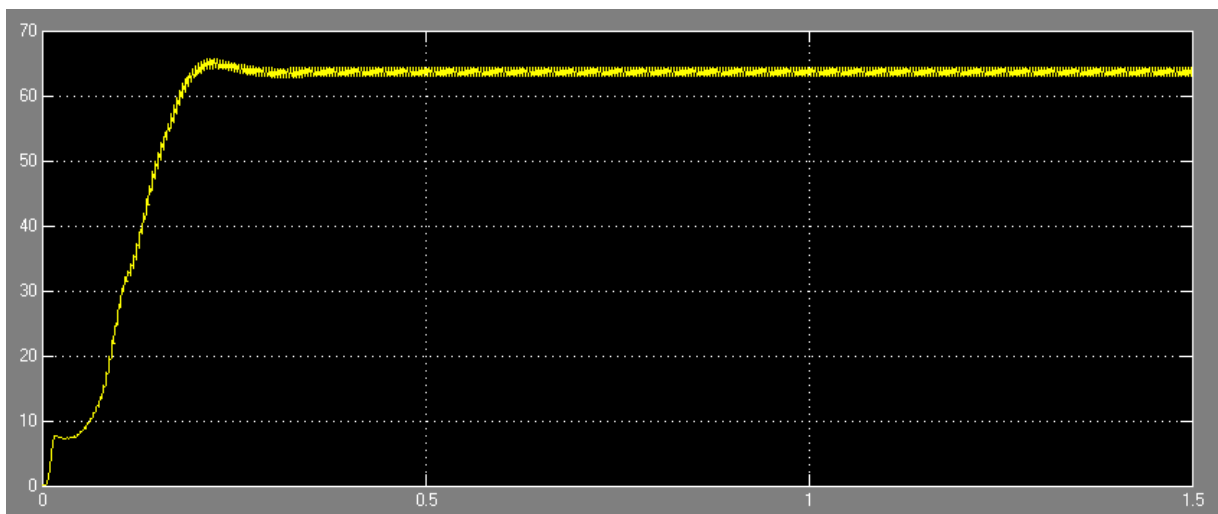


Figure III.15 : Variation de puissance de la charge.

➤ Variation de l'éclairement :

Nous avons fixé la température et changé l'éclairement : l'irradiation  $I_r=400 \text{ w/m}^2$  et la température  $T=25^\circ\text{c}$  : on retient les caractéristiquessuivantes :

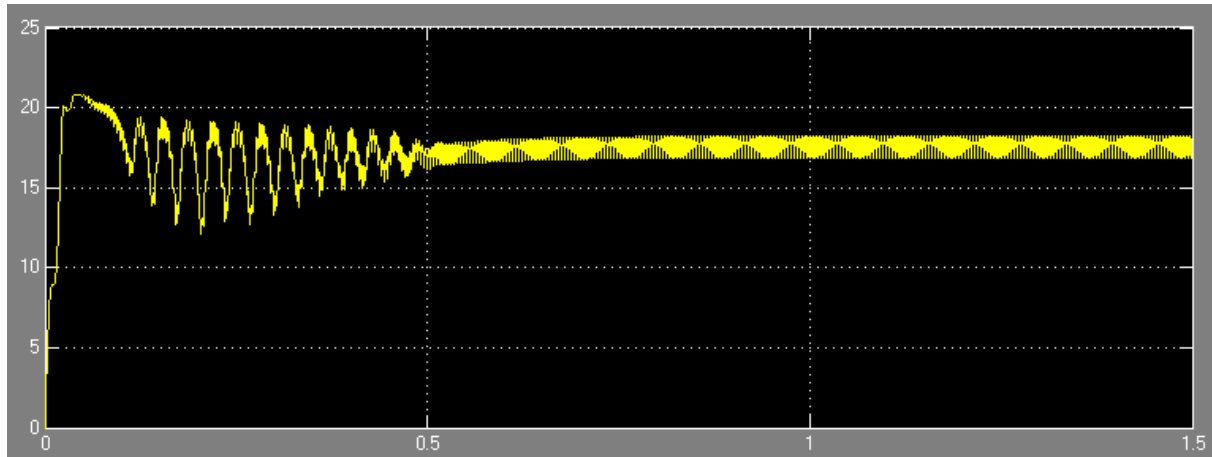


Figure III. 16 : Variation de tension du panneau.

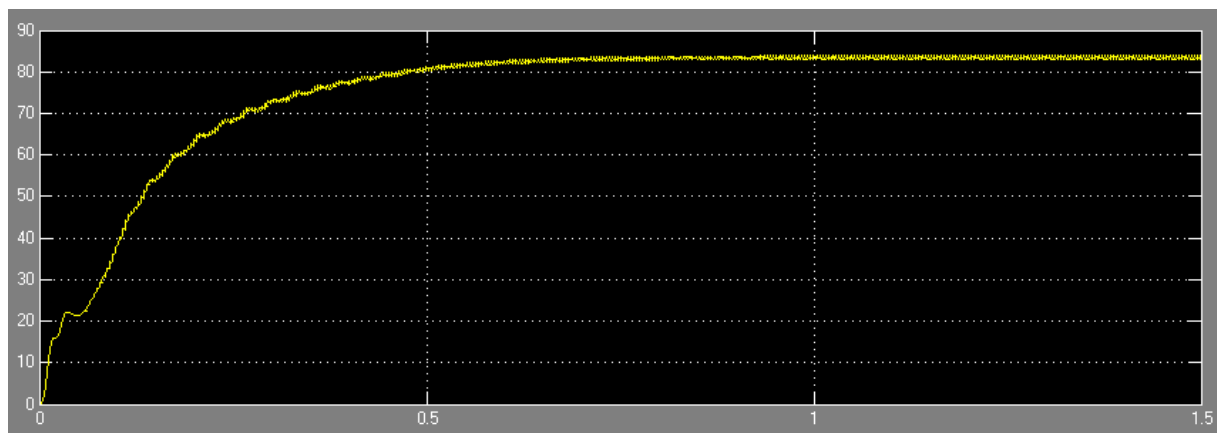


Figure III.17 : Variation de tension de la charge.

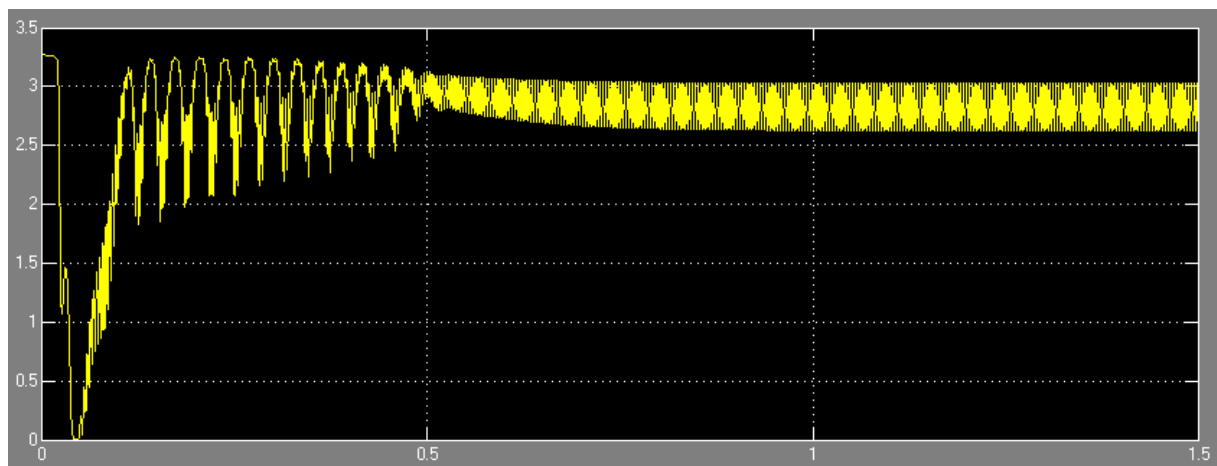


Figure III.18 : Variation du courant du panneau.

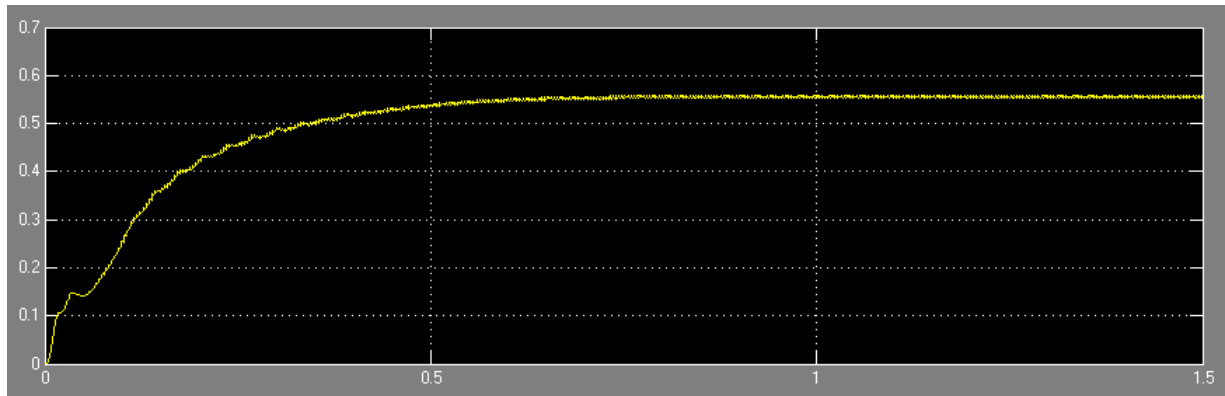


Figure III.19 : Variation du courant de la charge.

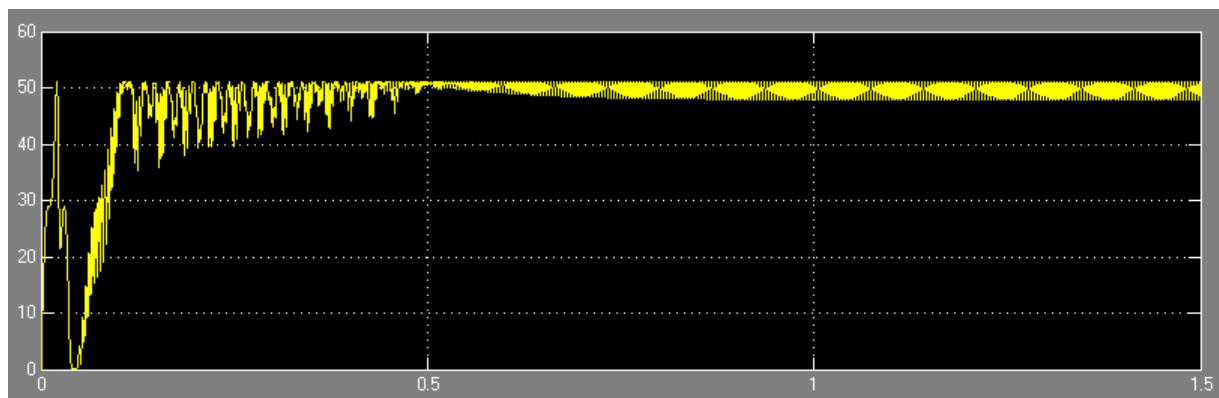


Figure III.20 : Variation de puissance du panneau.

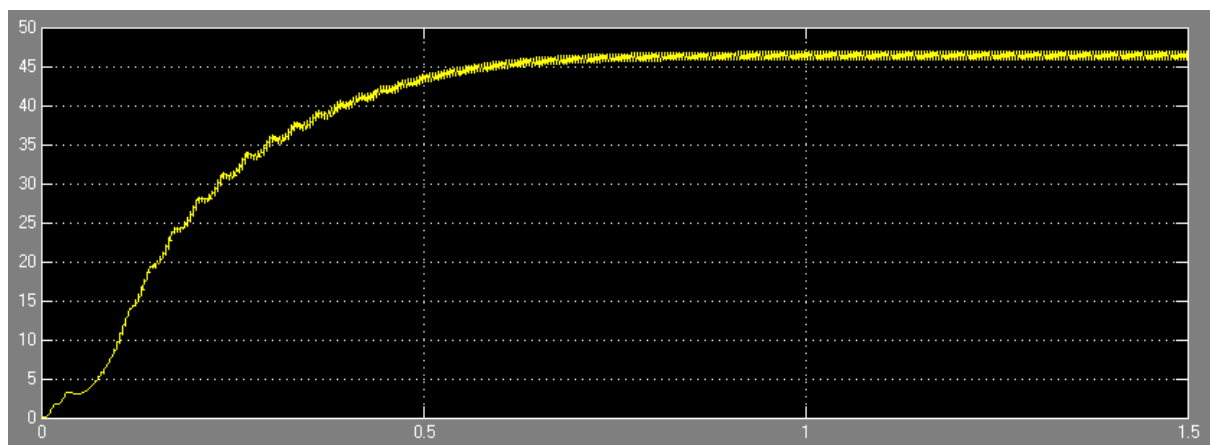


Figure III.21 : Variation de puissance de la charge.

➤ Variation de température :

Pour cette simulation nous avons changé la température et gardé l'éclairement fixe :  $I_r=1000 \text{ w/m}^2$  et la température  $T=35^\circ\text{c}$  : on retient les caractéristiques suivantes :

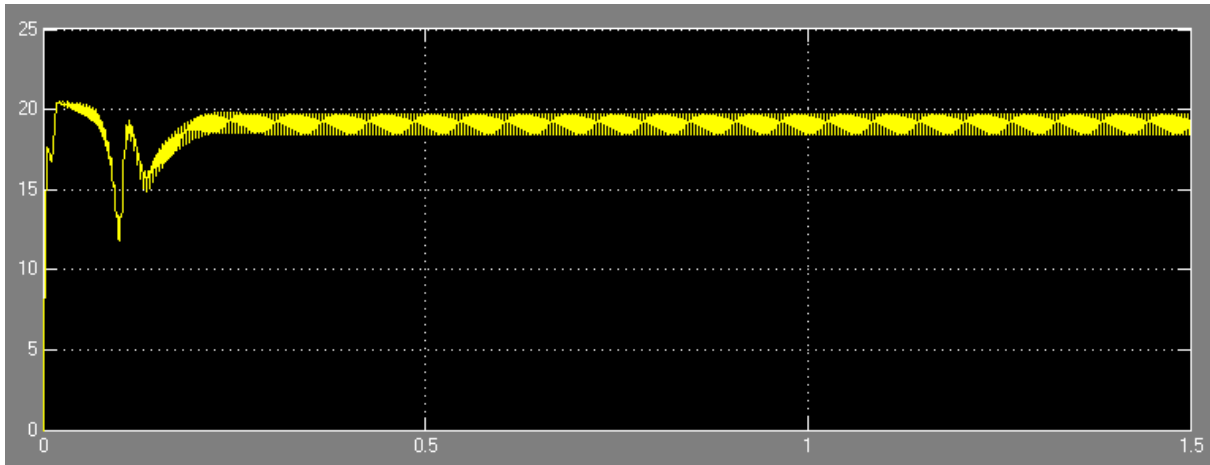


Figure III.22 : Variation de tension du panneau.

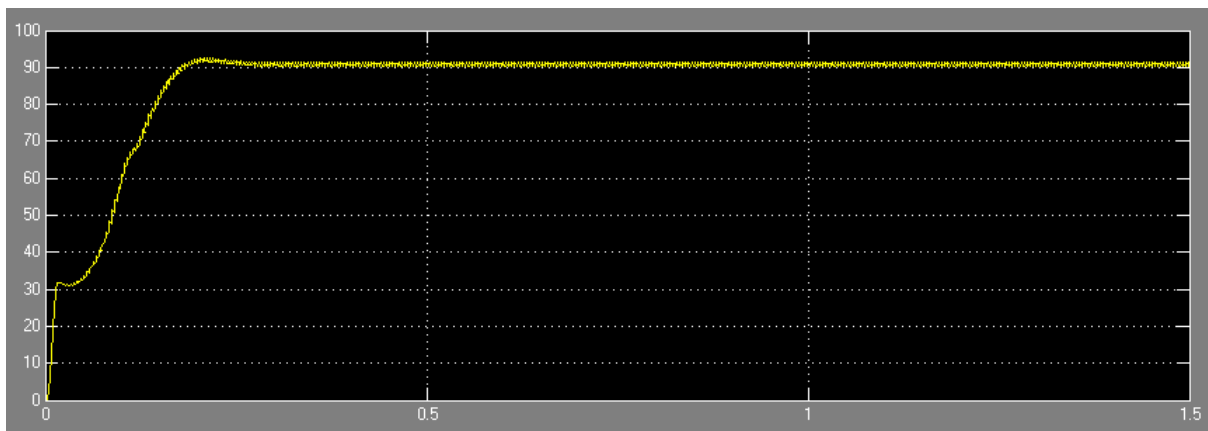


Figure III.23 : Variation de tension de la charge.

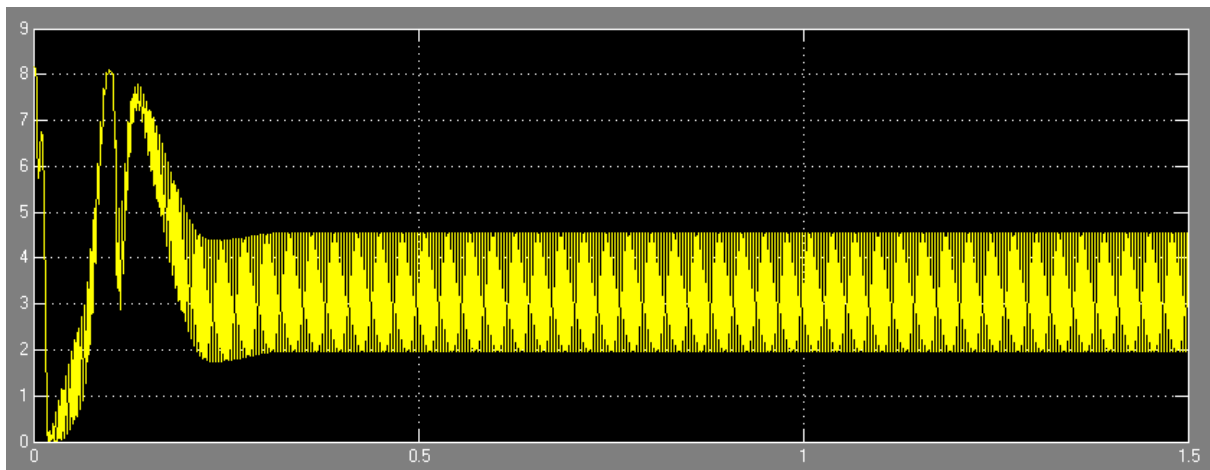


Figure III.24 : Variation du courant du panneau.

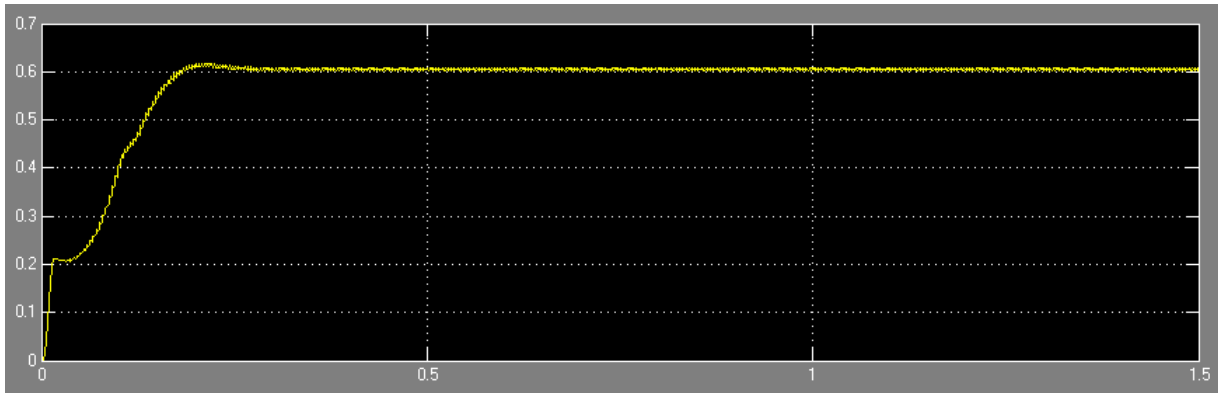


Figure III.25 : Variation du courant de la charge.

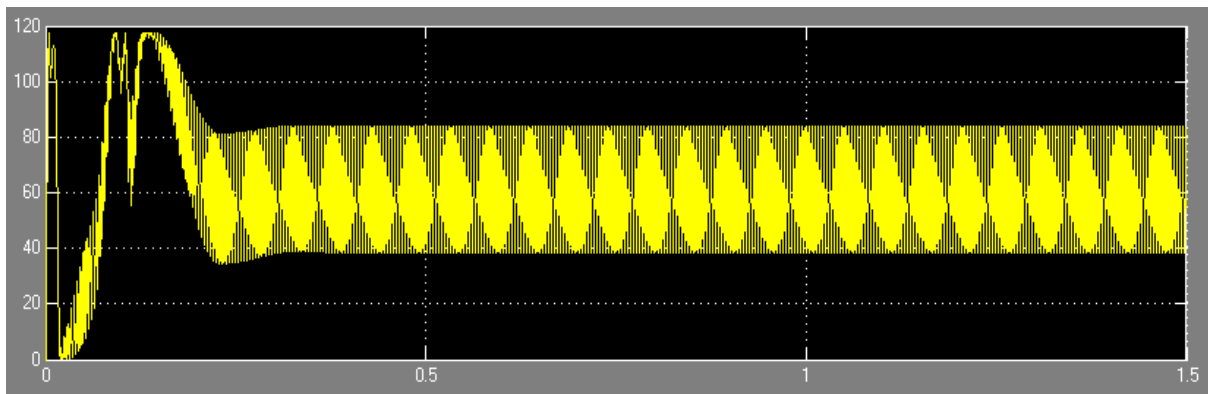


Figure III.26 : Variation de puissance du panneau.

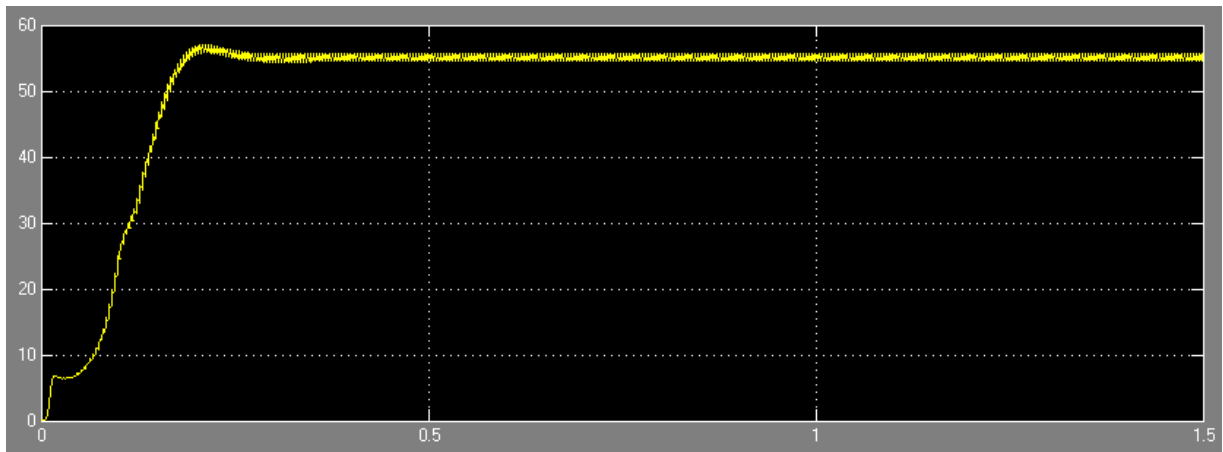


Figure III. 27 : Variation de puissance de la charge.

### III.6 Interprétation des résultats :

Bien que nous ayons remarqué une diminution du courant, la puissance de ce système n'a pas diminué grâce à la commande MPPT qui n'augmente que la tension, nous avons également remarqué l'effet négatif de la température élevée et l'irradiation faible parce qu'il réduisait la puissance du système.

**III.7 Conclusion :**

Notre objectif dans ce chapitre c'était l'optimisation de puissance du système photovoltaïque par la commande MPPT précisément la méthode de "Perturbation et Observation", nous avons appliqué cette technique sur logiciel Matlab/Simulink pour température de  $T=25^{\circ}$  et l'irradiation de  $1000\text{W/m}^2$ , ensuite on a les varié pour voir leurs influences sur la puissance, les résultats étaient satisfaisants, une réponse rapide avec moins d'oscillations.

# *Conclusion générale*

## ***Conclusion générale***

---

Ce mémoire est basé sur l'analyse d'une modélisation et simulation du fonctionnement d'un système photovoltaïque (PV) adapté par une commande MPPT numérique « perturbation et observation » pour assurer la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur PV.

Le générateur photovoltaïque est un transformateur d'énergie caractérisé par un point de fonctionnement où la puissance générée est optimale, ce point se déplace en fonction de conditions environnementales. Un système de poursuite s'avère alors indispensable pour que le générateur photovoltaïque puisse fonctionner avec efficacité. Grâce à la présence d'un processus de poursuite de point de puissance maximale, connu sous le nom de contrôleur MPPT, une adaptation source/charge est réalisée, permettant un transfert maximal de puissance.

En premier lieu, nous avons défini l'énergie solaire et le système photovoltaïque, puis nous avons montré l'effet de l'irradiation solaire et de la température sur les caractéristiques de base du modèle mathématique d'une cellule photovoltaïque. Nous avons suivi cette partie par le fonctionnement du convertisseur continu-continu notamment l'élevateur et son rôle important pour l'amélioration de la puissance dans une chaîne PV.

Dans le dernier chapitre nous avons étudié la méthode de perturbation et observation qui est l'une des méthodes directes de la commande MPPT, après nous avons effectués une simulation de cette dernière sur Matlab/Simulink, en tenant compte des effets des paramètres atmosphériques (le rayonnement et la température).

Cette méthode utilise seulement la tension et le courant du panneau photovoltaïque pour poursuivre le point de fonctionnement correspondant à la puissance maximale.

Les résultats de simulation montrent que ce mécanisme peut s'adapter aux incertitudes et donner une réponse rapide et une très bonne performance.

Enfin nous avons déduit que le défaut principal de l'algorithme P&O est son mauvais contrôle de positionnement de MPP lors d'un changement rapide des conditions climatiques.

# ***BIBLIOGRAPHIE***

## Bibliographie

- [1] B. & F. G. Mhenna, Alimentation d'un moteur à courant continu par une source photovoltaïque , Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri, 2018.
- [2] K. A. N DIAYE Papa Amadou, Production d'énergie électrique à partir d'un système photovoltaïque., 2019.
- [3] Z. CHIBI, Effet du refroidissement sur les performances des panneaux PV (Doctoral dissertation), 2016.
- [5] H. A. K. & S. M. Mounir, Etude et simulation d'un étage MPPT pour un générateur photovoltaïque à base d'un kit Arduino. Mémoire de master., Université d'adrar., 2017.
- [6] K. NOUDJOU, Commande non linéaire d'un système d'énergie renouvelable , Doctoral dissertation, 2021.
- [7] I. BENDJAMAA, Modélisation et commande d'un système de stockage photovoltaïque , Doctoral dissertation, 2012.
- [8] Abadeli Moussa ,Niss brahim,zaoui Houssam el dine, Etude et amélioration le rendement d'un système photovoltaïque en utilisant les cellules PV multi-jonction, 2021.
- [10] M. A.Labouret, Energie solaire photovoltaïque (Le manuel du professionnel), édition DUNOD, Paris (France), août 2003.
- [11] A. Belkaid, Onception et implémentation d'une commande MPPT de haute performance pour une chaine de conversion photovoltaïque autonome , Doctoral dissertation, 2018.
- [12] O. Azzi, Réalisation d'un système de Suiveur à base arduino, 2020.
- [13] M. R. I. C. K. & R. D. Gaouas, Etude D'une Chaîne De Conversion De L'énergie Solaire Avec Système De Suiveur Solaire., 2021.
- [14] D. Boukhers, OPTIMISATION D'UN SYSTEME D'ENERGIE PHOTOVOLTAIQUE APPLICATION AU POMPAGE, mémoire de majester, 2007.
- [15] A. & B. M. Bouchaker, Structure et commande d'une installation photovoltaïque en site isolé. Mémoire de Master, Département d'Electrotechnique, Université Badji Mokhtar, Annaba, Algérie, 2018.
- [16] F. Chekired, Etude et implémentation d'une commande MPPT neuro-floue sur FPGA , Doctoral dissertation, Ecole nationale polytechnique, 2008.
- [17] B. & H. A. O. Karim, Etude du processus de dégradation d'une cellule photovoltaïque , Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri, 2015.
- [18] F. & R. A. HANANOU, Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque , Doctoral dissertation, 2014.
- [19] A. K. N. & Y. M. BERRAH, Caractérisation et étude du fonctionnement d'un générateur photovoltaïque , Doctoral dissertation, Université Ahmed Draïa-Adrar, 2019.
- [20] F. Slama, Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique , Doctoral dissertation, 2018.
- [21] B. Yaacoub, Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT, 2013.
- [22] I. & O. C. N. BENGHERBIA, Identification paramétrique d'une cellule photovoltaïque par des techniques d'optimisation métaheuristiques, 2020.
- [23] T. A. T. I. & O. B. L. Fethallah, Etude et Réalisation d'un Système Photovoltaïque Optimisé par Logique Floue, Mémoire MASTER ACADEMIQUE, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, 2018.
- [24] N. & M. A. Goar, Réalisation d'un convertisseur DC/DC dans une chaine de conversion d'énergie photovoltaïque, 2017.
- [25] S. Petibon, Nouvelles architectures distribuées de gestion et conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques, Doctoral dissertation, Université Paul Sabatier-Toulouse III, 2009.
- [26] T. & M. C. A. H. Ahamouda, Modélisation et commande MPPT à base de logique floue d'un système photovoltaïque autonome, 2020.
- [27] M. A. M. A. Fersadou, Performances de la poursuite du point de puissance maximale (MPPT) d'un système photovoltaïque par les techniques intelligent, Doctoral dissertation, université SAAD DAHLAB - BLIDA, 2017.
- [28] K. Amara, Contribution à l'étude de conception d'une centrale photovoltaïque de puissance (1MW) interconnectée au réseau de distribution électrique moyenne tension , Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri, 2015.
- [29] S. Bensalem, Effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires , Doctoral dissertation, 2018.
- [30] A. Y. A. O. C. N. & A. BETTACHE, Application de la technique du Mode Glissant pour la Poursuite du Point de Puissance Maximale (MPPT) d'un générateur photovoltaïque, 2014.

## Bibliographie

- [31] A. & I. B. Mahmoud, Maximisation de la production d'un système photovoltaïque à base de MPPT soumis à des éclaircissements différents. Mémoire de master, Université BADJI MOKHTAR de Annaba, 2017.
- [32] C. Cabal, Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque , Doctoral dissertation, Université Paul Sabatier-Toulouse III, 2008.
- [33] Y. Azzoug, Commande de la charge d'une batterie dans une installation photovoltaïque , Doctoral dissertation, Université du Québec à Trois-Rivières, 2008.
- [34] M. & B. I. BEZZAOUCHA, ETUDE ET SIMULATION D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAIQUE , Doctoral dissertation, Université Ibn Khaldoun-Tiaret, 2021.
- [35] A. C. Pastor, Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques , Doctoral dissertation, INSA de Toulouse, 2006.
- [36] A. & B. S. Talha, Développement d'une Méthode MPPT pour un Système Photovoltaïque. Premier Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables, SIENR, 2010.
- [37] M. T. A. M. M. S. & D. D. Ouada, Etude et caractérisation sous Matlab/Simulink d'un générateur photovoltaïque. Le 2ème Séminaire, International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables, Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, Ghardaïa, Algérie, 2012.
- [38] 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 , Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider-Biskra, 2016.
- [39] M. & K. L. Hacid, Caractérisation et commande d'un système photovoltaïque (Doctoral dissertation, UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI TIZI-OUZOU, 2021.
- [40] S. & B. M. Belhout, Optimisation énergétique de chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque , Doctoral dissertation, université - Msila, 2021.
- [41] O. & S. H. C. Fellah, de la production énergétique d'une chaîne photovoltaïque, 2019.
- [42] S. & M. N. Larbi, Etude d'un onduleur hybride et réaliser Un basculement avec une carte Arduino , Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri, 2018.
- [43] M. L. M. I. & H. M. E. Bouchama, Commande par mode glissant des systèmes photovoltaïques , Doctoral dissertation, Université de Jijel, 2018.
- [44] F. Benadel, Etude et simulation d'une commande MPPT pour système PV, 2016.
- [45] T. & H. N. Touama, Commande d'un MPPT avec un convertisseur DC/DC pour un système photovoltaïque , Doctoral dissertation, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA, 2019.
- [46] B. & t. D. E. Benzait, Etude comparative des algorithmes P&O et INC pour l'optimisation de l'énergie photovoltaïque, Doctoral dissertation, جامعة غرداية, 2020.
- [47] A. Belkaid, Conception et implémentation d'une commande MPPT de haute performance pour une chaîne de conversion photovoltaïque autonome, Doctoral dissertation, Université Ferhat Abbas - Sétif 1, 2015.
- [48] S. & B. H. Y. Leghighane, Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dans une chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque , Doctoral dissertation, University of M'sila, 2022.

## Webographie

[4] « <https://opera-energie.com/energie-solaire>,».

[9] «<[http://staff.univbatna2.dz/sites/default/files/azzoui\\_boubaker/files/chapitre2\\_systeme\\_photovoltaique-partie1.pdf](http://staff.univbatna2.dz/sites/default/files/azzoui_boubaker/files/chapitre2_systeme_photovoltaique-partie1.pdf),».

## Annexe :

Les caractéristiques du panneau :

Les paramètres	Valeur
La tension de circuit-ouvert	$V_{oc} = 32.9$
Le courant de court-circuit	$I_{cc} = 3 \text{ A}$
La tension de puissance maximale	$V_{max} = 20.36$
Le courant de puissance maximale	$I_{max} = 3.7$
La puissance maximale	$P_{max} = 76.3$