

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche**  
**Scientifique**



**Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued**

**FACULTE DE TECHNOLOGIE**

**DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE**

**Mémoire de fin d'étude**

Présenté pour l'obtention du diplôme de

**MASTER ACADEMIQUE**

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : génie mécanique

Spécialité : Énergies renouvelables

**Thème**

**Etude et amélioration le rendement d'un système  
photovoltaïque autonome a triplé jonction.**

Devant le jury composé de :

Président ATIA Abdelmalek

Examineur ZINE Ali

Examineur MEZIANE Assia

Encadreur BEGGAT Feteh

Présenté par :

MCA - BEKKOUCHE ABDALLAH

MAA - SETTOU MOHAMED AMINE

MAA

MAB

**2021-2022**

# *Remerciements*

*Tout d'abord, nous remercions Dieu et le remercions pour sa compassion*

*Nous voulons aussi remercier l'encadreur BEGGAT FETEH qui nous a donné des informations et qui encouragements et son soutien pendant la préparation de ce mémoire*

*Nous remercions tous les enseignants religieux qui nous ont enseigné tout au long de notre carrière universitaire*

*Mes remerciements vont également à l'ensemble du personnel de département génie mécanique pour leurs collaborations et leurs amabilités*

*Nous voudrions remercier toutes les personnes qui ont contribué directement ou indirectement à mon travail.*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce travail à la mémoire de mes  
grandes mères et grand père*

*A mes très chers parents.*

*A mes frères et sœurs,*

*A tous les membres de ma famille,*

*A mes très chers amis,*

*A tous les étudiants de la promotion 2022,*

*A tous mes amis des Énergies renouvelables,*

*A tous les enseignants du département génie mécanique*

**BEKKOUCHE ABDALLAH**

## *Dédicaces*

*Je dédie ce travail à la mémoire de mes  
grandes mères et grand père*

*A mes très chers parents.*

*A mes frères et sœurs,*

*A tous les membres de ma famille,*

*A mes très chers amis,*

*A tous les étudiants de la promotion 2022,*

*A tous mes amis des Énergies renouvelables ,*

*A tous les enseignants du département génie mécanique*

**SETTOU MOHAMED AMINE**

## **Résumé:**

Les cellules photovoltaïques multi-jonctions (MJSC) sont une tendance actuelle dans le domaine des cellules photovoltaïques et constituent l'épine dorsale des systèmes photovoltaïques à concentration. C'est un choix idéal en raison de son rendement élevé et de sa meilleure productivité énergétique. Le but de cette note est de fournir un modèle mathématique MJSC approprié pour la simulation dans MATLAB. Ce modèle étudie les courbes de caractérisation des cellules. Deux types de cellules différents ont été testés, une cellule solaire normale à simple jonction et une cellule solaire à triple jonctions. Le mémoire présente également les résultats de simulation qui démontrent une augmentation du rendement et de l'efficacité des cellules triple-jonction par rapport aux cellules mono-jonction.

**Mots clés:** cellules photovoltaïques multi-jonctions, cellules mono-jonction, cellules triple-jonction

## **Abstract**

Multi-junction photovoltaic cells (MJSC) are a current trend in the field of photovoltaic cells and form the backbone of concentrator photovoltaic systems. It is an ideal choice because of its high efficiency and better energy productivity. The purpose of this note is to provide a suitable MJSC mathematical model for simulation in MATLAB. This model studies the cell characterization curves. Two different cell types were tested, a normal single junction solar cell and a triple junction solar cell. The thesis also presents simulation results that demonstrate an increase in yield and efficiency of triple-junction cells compared to single-junction cells.

**Keywords:** multi-junction photovoltaic cells, mono-junction cells, triple-junction cells.

## المخلص

تعد الخلايا الكهروضوئية متعددة الوصلات (MJSC) اتجاهًا حاليًا في مجال الخلايا الكهروضوئية وتشكل العمود الفقري للأنظمة الكهروضوئية المركزة. إنه خيار مثالي بسبب كفاءته العالية وإنتاجية أفضل للطاقة. الغرض من هذه المذكرة هو توفير نموذج رياضي MJSC مناسب للمحاكاة في MATLAB. يدرس هذا النموذج منحنيات توصيف الخلية. تم اختبار نوعين مختلفين من الخلايا ، خلية شمسية عادية أحادية الوصلة و خلية شمسية ثلاثية الوصلات. تعرض الأطروحة أيضًا نتائج المحاكاة التي توضح زيادة إنتاجية وكفاءة الخلايا ثلاثية الوصلات مقارنة بالخلايا أحادية الوصلة

الكلمات الرئيسية: خلايا ضوئية متعددة الوصلات ، خلايا أحادية الوصلات ، خلايا ثلاثية الوصلات.

# **Tableaux de matière**



---

## Tableaux de matière

Remerciements

Dédicaces

Abstract

### LISTE DES FIGURES

### LISTE DES TABLEAUX

### LISTE DES NOMENCLATURES

### INTRODUCTION GENERALE

<b>CHAPITRE I :</b> .....	<b>2</b>
<b>ETAT DE L'ART DES METHODES D'AMELIORATION</b> .....	<b>2</b>
I.1- INTRODUCTION .....	2
I.2- ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE: .....	2
I.3- DESCRIPTION D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE: .....	3
<i>I.3-1- Semi-conducteur:</i> .....	3
<i>I.3-2- Formation de la jonction PN:</i> .....	3
<i>I.3-3- Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque:</i> .....	4
I.4- LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE : .....	5
<i>I.4-1- Type de cellules:</i> .....	5
<b>I.4.1.1 cellules mono-cristallines:</b> .....	<b>5</b>
<b>I.4.1.2- cellules polycristallines:</b> .....	<b>6</b>
I.5- LES PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUE: .....	7
I.6- MODULE PHOTOVOLTAÏQUE: .....	8
I.7- ASSOCIATION DE CELLULES: .....	8
<i>I.7.1- Association de cellules en série:</i> .....	8
<i>I.7.2- Association de cellules en parallèle:</i> .....	9
<i>I.7.3- Association des cellules (série et parallèle):</i> .....	10
I.8- LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES: .....	11
<i>I.8-1- Eléments d'un système photovoltaïque :</i> .....	11
<i>I.8.2- Types de système photovoltaïque:</i> .....	11
<b>I.8.2.1- Systèmes PV autonomes:</b> .....	<b>12</b>
<b>I.8.2.2- Système PV accordée au réseau:</b> .....	<b>12</b>
<b>I.8.2.3- Systèmes hybrides:</b> .....	<b>13</b>
I.9 METHODES D'AMELIORATION LE RENDEMENT: .....	13
<i>I.9.1- L'améliorer le rendement d'un panneau solaire:</i> .....	13
<i>I.9.2 L'orientation du panneau solaire:</i> .....	13
<i>I.9.3 La dimension du panneau solaire:</i> .....	14
<i>I.9.4- Éviter les zones d'ombre:</i> .....	14
I.10- LE RENDEMENT DE L'ONDULEUR PHOTOVOLTAÏQUE: .....	14
I.11-CELLULES DE MULTI-JONCTIONS.....	15
I.12.CONCLUSION.....	16
<b>CHAPITRE II :</b> .....	<b>17</b>

<b>ETUDE ET MODELISATION DE SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE.....</b>	<b>17</b>
<b>II.1 Introduction .....</b>	<b>17</b>
II.2.MODELISATION DE PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES .....	17
II.2.1. Modélisation des cellules solaires à mono-jonctions : .....	17
<b>II.2.1.1. Modèle simplifié .....</b>	<b>17</b>
<b>II.2.1.2. Cellule photovoltaïque réelle : .....</b>	<b>18</b>
<b>II.2.1.3. Modèle à une diode.....</b>	<b>19</b>
<b>II.2.1.4. Modèle à deux diodes:.....</b>	<b>20</b>
<b>II.2.1.5. Paramètres d'une cellule photovoltaïque : .....</b>	<b>21</b>
II.3. Modélisation des cellules solaires à triples-jonctions : .....	24
II.3.2.Etude des cellules solaires à triples-jonctions: .....	25
<b>II.3.2.1.Les modèles du circuit équivalent à une seule diode: .....</b>	<b>25</b>
II.4- MODELISATION D'UN CONVERTISSEURS DC-DC : .....	28
II .4.1- Convertisseurs DC-DC :.....	28
II.4.2- Types des convertisseurs DC-DC (hacheur).....	28
II.6. CONCLUSION .....	29
<b>CHAPITRE III : .....</b>	<b>17</b>
<b>SIMULATION, RESULTAT ET DISCUSSIONS.....</b>	<b>17</b>
III.1 INTRODUCTION .....	30
III.2SIMULATION D'UN PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE MONO JONCTION: .....	30
III .3.PARAMETRES ELECTRIQUES DE MODULES PHOTOVOLTAÏQUES: .....	32
III .3.1Caractéristiques électriques des modules photovoltaïques : .....	32
III.3.2.Caractéristiques courant-tension et puissance-tension du modèle : .....	33
III .3.4-L'importance de la courbe I(V).....	34
III .3.5.Commentaire sur les courbes: .....	34
III .4.INFLUENCE DE LA TEMPERATURE ET DE L'ECLAIREMENT : .....	35
III .4.1.Influence de l'éclairément : .....	35
III .4.2.Influence de la temperature .....	36
III .4.3.Influence de la température et de l'éclairément : .....	38
III .5.SIMULATION D'UN PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES TRIPLES- JONCTION: .....	39
III.5.1.Caractéristiques courant-tension et puissance-tension du modèle : .....	39
III .5.2.Commentaire sur les courbes: .....	40
III .5.3.Influence de la température et de l'éclairément : .....	40
<b>III .5.3.1.Influence de l'éclairément :.....</b>	<b>40</b>
<b>III .5.3.2Commentaire sur les courbes: .....</b>	<b>41</b>
<b>III .5.3.3.Influence de la temperature: .....</b>	<b>41</b>
<b>III .5.3.4.Influence de la température et de l'éclairément :.....</b>	<b>42</b>
III .6.CONCLUSION : .....	43
<b>CONCLUSION GENERALE .....</b>	<b>31</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>45</b>

# Liste des figures

---

## LISTE DE FIGURE

### Chapitre I : Etat de l'art des methodes d'amelioration:

Figure I.1:energie photovoltaïque .....	2
Figure I.2:generation de la paire electron-trou.....	3
Figure I.3:la structure pn. ....	3
Figure I.4: structure d'une cellule photovoltaïque en silicium (presence d'une jonction pn. ....	4
Figure I.5 :cellule pv .....	5
Figure I.6 : cellule au silicium monocristallin .....	6
Figure I.7:cellule au silicium poly cristallin .....	6
Figure I.8:cellule au silicium amorphe.....	7
Figure I.9: module photovoltaïque. ....	8
Figure I.10: caracteristique courant tension de ns cellule en serie. ....	9
Figure I.11: caracteristique courant tension de (np) cellule en parallele. ....	9
Figure I.12: association des cellules pv mixtes (serie-parallele). ....	10
Figure I.13: caracteristique d'un assemblage serie/parallele .....	10
Figure I.14: schema fonctionnel d'un systeme photovoltaïque .....	11
Figure I.15: installation photovoltaïque .....	12
Figure I.16: installation photovoltaïque accordee au .....	13
Figure I.17 : (A) : recouvrement du spectre solaire par une cellule a triple-jonction ,(b) : schema d'une cellule a triple-jonction .....	15

### Chapitre II : Etude et modélisation de système photovoltaïque

Figure II.1: modele simplifie d'une cellule pv.....	17
Figure II.2 : modele de la cellule photovoltaïque reel .....	18
Figure II.3: caracteristique i - v courbe d'un dispositif photovoltaïque pratique et les trois points .....	19
Figure II.4: modele a une diode d'une cellule pv.....	19
Figure II.5: modele a deux diodes d'une cellule pv. ....	20
Figure II.6:differents regimes selon la puissance d'eclairment .....	22
Figure II.7: vue en coupe transversale d'une cellule solaire a triple jonction .....	25

Figure .II-8: circuit equivalent d'une cellule du modele a une seule diode.....	26
Figure II.9: convertisseurs dc-dc .....	28

### **Chapitre III : Simulation, Résultat et discussions**

Figure III.1 :schema block de courant $i_0$ .....	30.
Figure III.2 : schema block de courant $i_{pv}$ .....	31
Figure III.3 : schema block de courant $i_{ph}$ .....	31
Figure III.4 : synoptique du modele ameliore de la cellule photovoltaïque sous le logiciel matlab/simulink .....	31
Figure III.5 : presentation de module pv .....	33
Figure III.6: caracteristique $i(v)$ et $p(v)$ d'une cellule photovoltaïque.....	34
Figure III.7: influence de l'eclairment sur la caracteristique courant-tension .....	36
Figure III.8: influence de l'eclairment sur la caracteristique puissance-tension.....	36
Figure III.9: influence de la temperature sur la caracteristique courant-tension .....	37
Figure III.10: influence de la temperature sur la caracteristique puissance-tension.....	37
Figure III.11: influence de la temperature etl'eclairment sur la caracteristique puissance –tension.....	38
Figure III.12: influence de la temperature et l'eclairment sur la caracteristique puissance-tension.....	38
Figure III.13: presentation de module pv triple jonction .....	39
Figure III.14: caracteristique $i(v)$ et $p(v)$ d'une cellule photovoltaïque.....	40
Figure III.15: influence de l'eclairment sur la caracteristique courant-tension .....	40
Figure III.16: influence de l'eclairment sur la caracteristique puissance-tension.....	41
Figure III.17: influence de la temperature sur la caracteristique courant-tension.....	41
Figure III.18: influence de la temperature sur la caracteristique puissance-tension.....	42
Figure III.19: influence de la temperature etl'eclairment sur la caracteristique courant–tension.....	42
Figure III.20: influence de la temperature etl'eclairment sur la caracteristique puissance –tension.....	43



# Liste des tableaux

---

## LISTE DES TABLEAUX

<b>TABLEAU : VARIATION DE PUISSANCE DE PANNEAU SUIVANT SA DIMENSION. [9].....</b>	<b>14</b>
<b>TABLEAU : CARACTERISTIQUE ELECTRIQUE DU MODULE PHOTOVOLTAÏQUE .....</b>	<b>32</b>

---

## LISTE DES NOMENCLATURES

### Acronymes

**PV**: Photovoltaïque.

**GPV**: Générateur Photovoltaïque.

**FF**: Facteur de forme.

**N<sub>s</sub>** : Nombre de cellules en série.

**N<sub>p</sub>** : Nombre de cellules en parallèle.

**MPP** : Maximum power point

**DC**: Courant Continu (Direct Current).

**AC**: Courant Alternatif (Alternative Current).

### Symboles

**h** : Constante de Planck (6.62.10<sup>-34</sup> j.s).

**E<sub>g</sub>** : Energie de la bande interdite (eV).

**S** : Surface du module photovoltaïque (m<sup>2</sup>).

**E** : Eclairement (W/m<sup>2</sup>).

**I<sub>ph</sub>** : Le photo-courant (A).

**I<sub>sat</sub>** : Courant de saturation (A).

**R<sub>p</sub>** : Résistances parallèle shunt. ( $\Omega$ )

**R<sub>S</sub>** : Résistance série ( $\Omega$ ).

**T<sub>c</sub>** : Température de jonction ( $^{\circ}$ K).

**G** : L'éclairement de référence (1000 W/m<sup>2</sup>).

**T<sub>ref</sub>** : La température de référence (298  $^{\circ}$ K).

**$\alpha$**  : Le coefficient de courant en fonction de température (A/ $^{\circ}$ C).

**I<sub>cc</sub>** : Le courant de court-circuit (A).

**V<sub>co</sub>** : La tension de circuit ouvert (V).

**FF** : Facteur de forme.

**N<sub>s</sub>** : Nombre de modules dans le panneau en série.

**N<sub>p</sub>** : Nombre de modules dans le panneau en parallèle.

**P<sub>max</sub>** : La puissance maximale produite PV (W).

**V<sub>max</sub>** : Tension qui correspond à la puissance maximale (V).

**I<sub>max</sub>**: Courant qui correspond à la puissance maximale (A).

**V<sub>opt</sub>** : Tension optimale (V).

**I<sub>opt</sub>** : Courant optimum (A).

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

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

---

**K** : coefficient de Boltzman ( $1.38.10^{-23}$  J / K)

**Tamb** : Température ambiante (C°)

**Tc** : Température de la cellule (C°)

# **Introduction générale**

## Introduction générale

Depuis très longtemps on a recourt à l'énergie renouvelable dans ces différentes formes, celles-ci sont exploitées par l'homme depuis des temps lointins. Autre fois, malins à eau, à vent, feu de bois, fraction animale, bateau à voiles, ont largement contribué au développement de l'humanité. Elles étaient aussi importantes et aussi variées que la production alimentaire. Les énergies renouvelables se manifestent comme une solution potentielle à la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Par énergie renouvelable, on entend des énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse. A la différence des énergies fossiles, les énergies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée. Les énergies renouvelables regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue.

L'énergie solaire photovoltaïque est l'une des énergies renouvelables les plus utilisées. Elle consiste à convertir directement le rayonnement électromagnétique en électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Les panneaux photovoltaïques (PV) ont la capacité de transformer les photons en électrons. L'énergie sous forme de courant continu est ainsi directement utilisable.

Jusqu'à présent, l'efficacité d'une cellule solaire à jonction simple conventionnelle varie de (15-20%). En raison de quoi l'efficacité du système global repose. Dans ce travail nous choisissons une cellule solaire à jonctions multiples pour rendre l'amélioration de rendement globale de système photovoltaïque. La cellule solaire à triple jonction est utilisée et simulée en utilisant ses équations électriques.

Cette thèse est divisée en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, nous présenterons un aperçu des générateurs photovoltaïques, puis les types de cellules solaires et comment améliorer le rendement.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons pour en savoir plus sur les cellules solaires, avec leurs détails et leurs composants.

Le troisième chapitre est là Dans cette section, nous présentons une simulation d'une cellule solaire à une et trois jonctions.

**Chapitre I :**  
**Etat de l'art des**  
**méthodes d'amélioration**

## I.1- Introduction

L'énergie photovoltaïque est produite de la transformation directe de la lumière du soleil en énergie électrique à l'aide de cellules généralement à base de silicium cristallin qui demeure la filière la plus développées sur les plans technologiques et industrielles, en effet le silicium est l'un des éléments les abondants sur terre sous forme de silice non toxique. Le mot photovoltaïque provient de la Grecque "photo" signifie lumière et "voltaïque" qui est déduit du nom du savon physique italien Alessandra Volta (1754-1827) qui a énormément contribué à la découverte de l'électricité bref : photovoltaïque signifie littérairement "lumière électricité". Dans ce chapitre nous donnons la brève généralité sur le système photovoltaïque. Le principe de la conversion de l'énergie photovoltaïque consiste à transformer le rayonnement solaire en électricité à l'aide des cellules photovoltaïque.

## I.2- Energie solaire photovoltaïque:

L'énergie photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. La conversion d'énergie photovoltaïque s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière.



Figure I.1: Energie photovoltaïque

## I.3- Description d'un système photovoltaïque:

### I.3-1- Semi-conducteur:

La filière la plus avancée sur le plan technologique et industrielle est la réalisation de cellules à base de silicium. Ce dernier est l'élément semi-conducteur le plus utilisé car il est peu coûteux et il se trouve en très grande quantité sur terre : il constitue 28% de l'écorce terrestre, sous forme de silice, parfaitement stable et non toxique.[1]

### I.3-2- Formation de la jonction PN:

Le silicium, comme tous les semi-conducteurs, a une bande de valence pleine et une bande de conduction vide. Mais grâce à un apport énergétique suffisant, il est possible de faire passer des électrons de la bande de valence (BV) à la bande de conduction (BC), d'où la génération d'électrons libres. Figure (I-2).

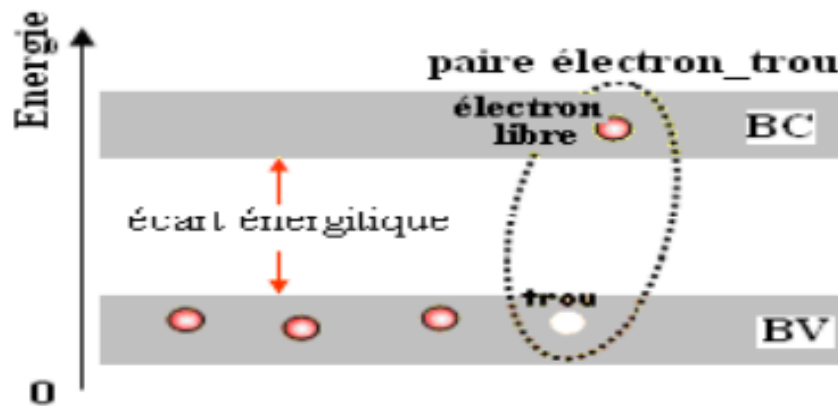


Figure I.2: Génération de la paire électron-trou

La présence d'électrons libres dans la bande de conduction d'un matériau n'est pas suffisante pour générer un courant : il est nécessaire de créer une différence de potentiel aux bornes de la photo génératrice afin d'entraîner les charges positives d'un côté et les charges négatives de l'autre. Cette opération est possible par dopage du Silicium. Une jonction PN est créée par l'assemblage de deux barreaux de Silicium de type N et P. Le composant ainsi créé est appelé diode.

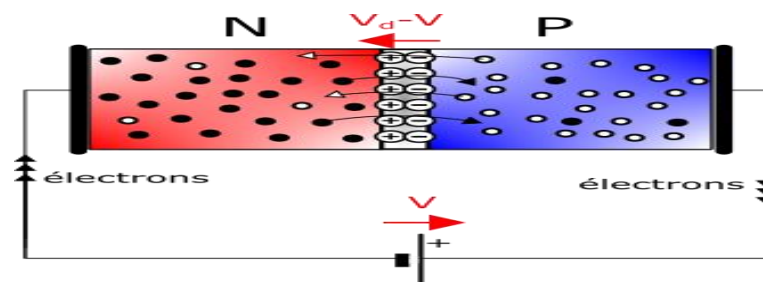


Figure I.3: La structure PN.

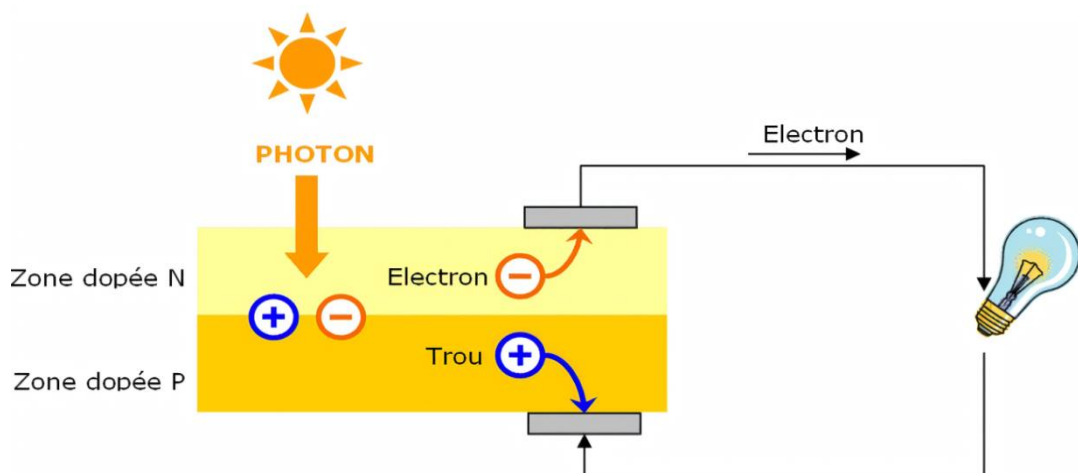
### I. 3-3- Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque:

L'effet photovoltaïque, c'est la transformation de l'énergie solaire « photon » en électricité « Volt ». Il a été découvert en 1839, par le physicien français A. BECQUEREL. Son utilisation industrielle n'est apparue qu'au début des années soixante, principalement pour les applications spatiales, d'autres applications ont vu le jour pour répondre dans un premier temps aux besoins des professionnels et dans un second temps à ceux des particuliers [2]

Une cellule photovoltaïque est un capteur constitué d'un matériau semi-conducteur qui transforme l'énergie lumineuse absorbée en courant électrique. Le principe de fonctionnement est basé sur les propriétés d'absorption du rayonnement lumineux par des matériaux semi-conducteurs. Le choix des matériaux utilisés pour la construction des cellules PV se fait en fonction des propriétés physiques des électrons qui sont susceptibles d'être libérés de leurs atomes lorsqu'ils sont excités par des photons provenant du spectre solaire. [3].

La conversion photovoltaïque effectuée à l'aide de matériaux semi-conducteurs tel que le silicium (Si), le germanium (Ge), le sélénium (Se), le matériau le plus utilisé est le silicium (Si).

Une fois libérée, le déplacement de ces électrons dans le matériau forme un courant électrique de type continu, qui donne naissance à une force électromotrice aux bornes de la cellule. Ce phénomène physique est appelé effet photovoltaïque. Comme pour le cas d'une diode classique, une cellule PV peut donc être réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée positivement et l'autre dopée négativement. Entre les deux zones se développent une jonction PN avec une barrière de potentiel.[4].



**Figure I.4: Structure d'une cellule photovoltaïque en silicium (présence d'une jonction PN.**

## I.4- La cellule photovoltaïque :

La cellule photovoltaïque élémentaire constitue un générateur de très faible puissance de quelques dizaines de centimètres carrés délivre, au maximum, quelques watts sous une tension inférieure au un volt. Pour produire plus de puissance, plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer un module ou un champ photovoltaïque.

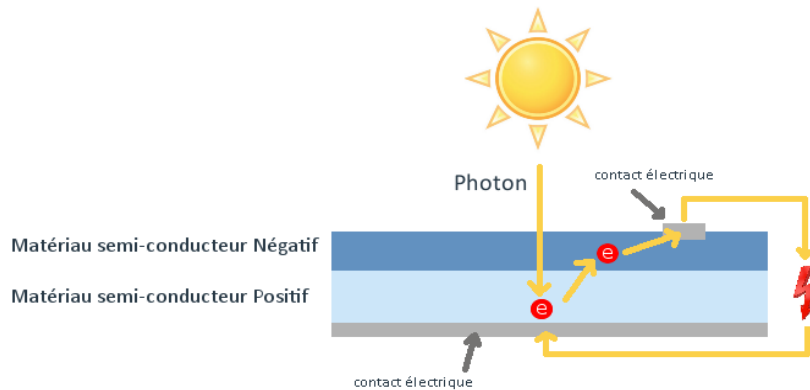


Figure I.5 : Cellule PV

### I. 4-1- Type de cellules:

Il existe différents types de cellules en fonction de la nature et des caractéristiques des matériaux utilisés. Le type le plus commun est la cellule de silicium cristallin (Si). Ce matériau est coupé en tranches minces en forme de disque, monocristallin, poly-cristallin, amorphe ou nanocristallin en fonction du procédé de fabrication de la barre de silicium.[5].

#### I. 4.1.1 cellules mono-cristallines:

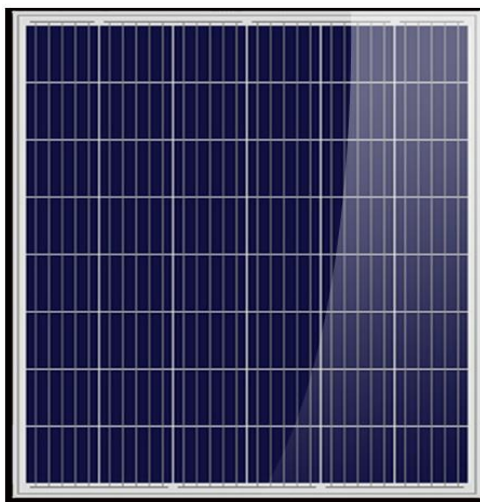
- Très bon rendement : 14 à 20 %.
- Durée de vie : importante (30 ans)
- Coût de fabrication : élevé.
- Puissance : 100 à 150 Wc/m<sup>2</sup>.
- Rendement faible sous un faible éclaircissement.
- Perte de rendement avec l'élévation de la température.
- Fabrication : élaborés à partir d'un bloc de silicium fondu qui s'est solidifié en formant un seul cristal
- Couleur bleue uniform



**Figure I.6 : Cellule au silicium monocristallin**

**I .4.1.2- cellules polycristallines:**

- Bon rendement : 11 à 15 %.
- Durée de vie : importante (30 ans)
- Coût de fabrication : meilleur marché que les panneaux monocristallins
- Puissance : 100 Wc/m<sup>2</sup>.
- Rendement faible sous un faible éclairciment.
- Perte de rendement avec l'élévation de la température.
- Fabrication : élaborés à partir de silicium de qualité électronique qui en se refroidissant forme plusieurs cristaux.



**Figure I.7:Cellule au silicium poly cristallin**

### I .4.1.3- Les cellules amorphes:

- Rendement faible : 5 à 9 %.
- Durée de vie : assez importante (20 ans)
- Coût de fabrication : peu onéreux par rapport aux autres technologies
- Puissance : 50 Wc/m<sup>2</sup>.
- Fonctionnement correct avec un éclairage faible.
- Peu sensible aux températures élevées.
- Utilisables en panneaux souples.
- Surface de panneaux plus importante que pour les autres panneaux au silicium.
- Rendement faible en plein soleil.
- Performances diminuant avec le temps



Figure I.8:Cellule au silicium amorphe

### I .5- Les panneaux photovoltaïque:

Le panneau solaire ou champ solaire se compose de modules photovoltaïque interconnecté en série et/ou en parallèle à fin de produire la puissance requise. Ces modules sont monté sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique pour chaque panneau, on peut avoir autant de sortie que des modules, ce qui fait qu'on aura besoin des boites de dérivation qui les regroupent. Alors cette boîte de dérivation fixée sur une structure de montage qui à comme rôle d'effectuer les connections entre les modules pour obtenir une puissance optimale en sortie.

## I.6- Module photovoltaïque:

Le composant indispensable de toute l'installation PV est le module photovoltaïque composé de cellules solaires en la connectées. Ces modules sont relies entre eux à fin de produire des champs pour nous permettre à aboutir à différents niveaux de besoins en énergie la représente un module photovoltaïque. Des modules de plus en plus robustes et puissants sont disponibles sur le marché, essentiellement pour la connexion aux réseaux, par contre il y a tout de même un seul lié



Figure I.9: module photovoltaïque.

## I.7- Association de cellules:

### I.7.1- Association de cellules en série:

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 I.4. Ce système d'association est généralement le plus communément utilisé pour les modules photovoltaïques du commerce.

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.[6]

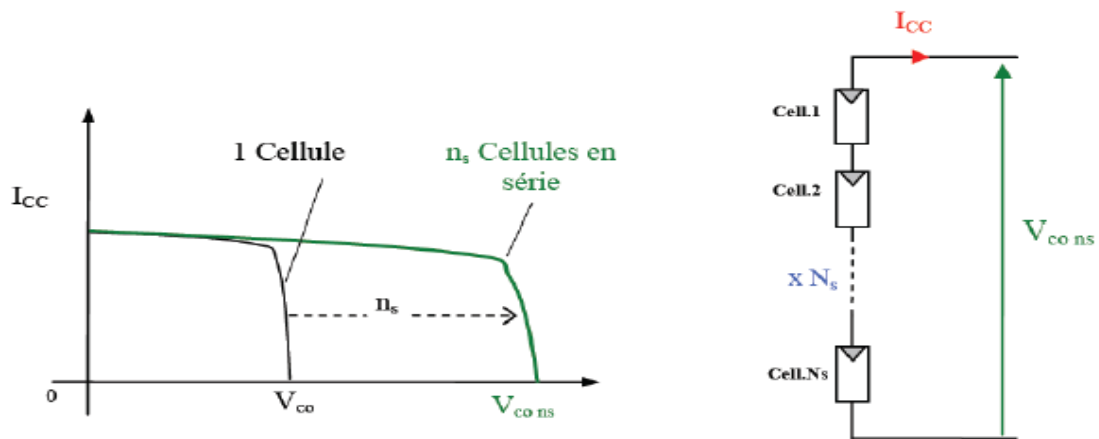


Figure I.10: Caractéristique courant tension de Ns cellule en série.

### I.7-2- Association de cellules en parallèle:

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.[7]

$$I_{CC} \cdot N_P = N_P \cdot I_{SC} \quad (I.1)$$

$$V = V_{CO} \cdot N_P \quad (I.2)$$

$I_{CC} \cdot N_p$ : la somme des courants de court circuit de ( $N_p$ ) cellule en parallèle

$V_{CO} N_p$ : la tension du circuit ouvert de ( $N_p$ ) cellules en parallèle

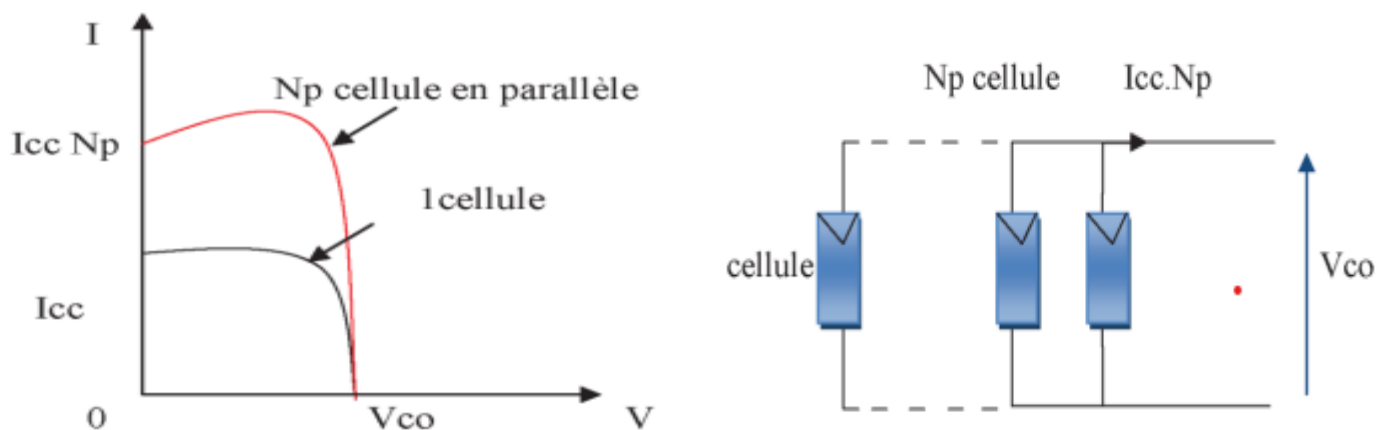
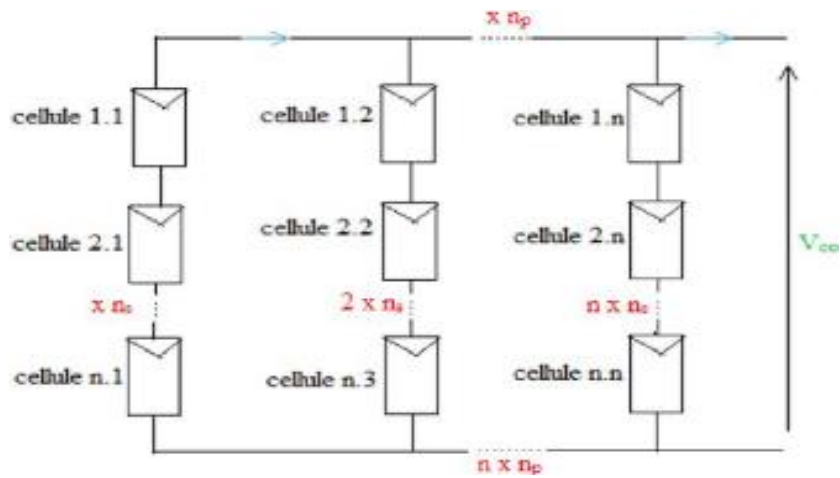


Figure I.11: Caractéristique courant tension de ( $N_p$ ) cellule en parallèle.

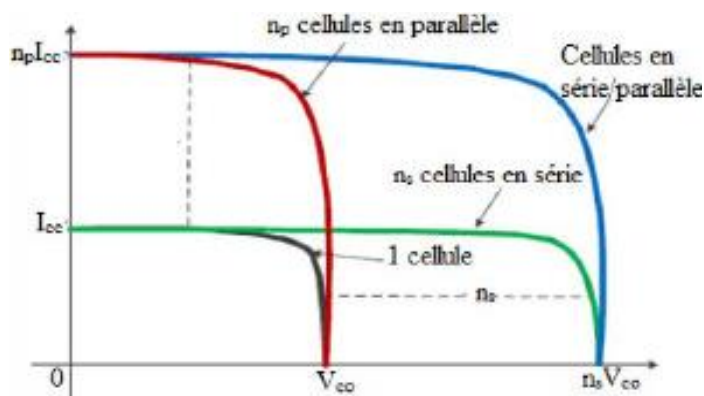
**I.7-3- Association des cellules (série et parallèle):**

On utilise généralement ce type d'association pour en tirer une tension importante puisque l'association en série des photopiles délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'une seule cellule. La caractéristique d'un groupement de deux modules solaires est représentée ci-dessous, ce qui peut être généralisé sur une gamme de  $N_s$  modules solaires en série. Ce genre de groupement augmente le courant.



**Figure I.12: Association des cellules PV mixtes (série-parallèle).**

Afin d'obtenir des puissances de quelques kW, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en panneaux et de monter les panneaux en rangées de panneaux série et parallèle pour former ce que l'on appelle un générateur photovoltaïque [8]. La caractéristique  $I(V)$  d'un générateur solaire peut être considérée comme le résultat d'une association d'un réseau de  $n_s * n_p$  cellules en série/parallèle



**Figure I.13: Caractéristique d'un assemblage série/parallèle**

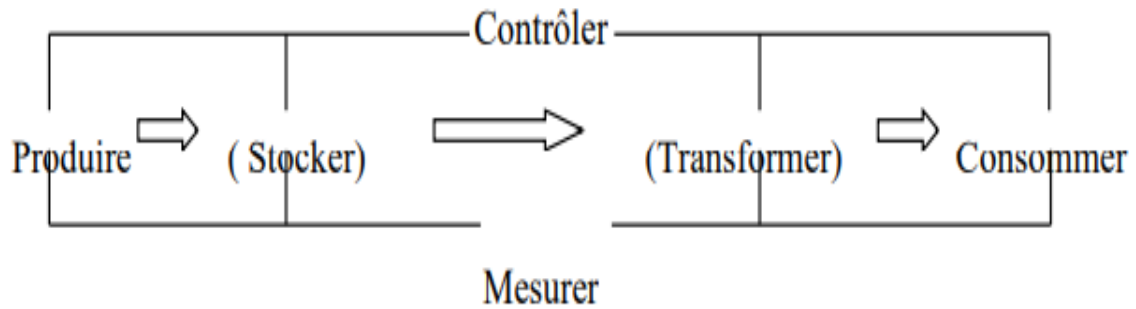


Figure I.14: Schéma fonctionnel d'un système photovoltaïque

## I .8- Les systèmes photovoltaïques:

Dans ce paragraphe nous allons définir l'effet photovoltaïque puis une description de la cellule ensuite nous présenterons les différents types des cellules par rapport à leur structure physiques suivie d'une explication du phénomène qui se passe dans la jonction PN après nous présentons les différents modèles de la cellule photovoltaïque et ses caractéristiques électriques. Nous terminerons avec les différents types de systèmes photovoltaïques selon qu'il soit associé à une autre source d'énergie ou raccordé au réseau électrique.

### I .8-1- Eléments d'un système photovoltaïque :

Les composants d'un système photovoltaïque dépendent de l'application considérée : habitation isolée ou à proximité d'un réseau, utilisation de batterie ou « au fil du soleil », convertisseurs de puissance. Il existe plusieurs composants d'un système photovoltaïque:

- Les cellules solaires ou panneau solaires qui forment le champ photovoltaïque
- Les régulateurs de charge qui ont pour rôle de transférer le maximum de charge aux batteries
- Les convertisseurs, soit des convertisseurs DC/DC ou bien DC/AC.
- Les batteries de stockage comme leurs noms l'indiquent ,ont pour rôle de stocker l'énergie afin de l'utiliser ultérieurement.
- Autres composants.

### I .8.2- Types de système photovoltaïque:

Les systèmes PV peuvent être réalisés selon les exigences en trois types : autonome, raccordée au réseau et hybride.

### I .8.2.1- Systèmes PV autonomes:

Autonomes ou « stand-alone », ces installations isolées ne sont pas connectées au réseau, mais elles doivent assurer la couverture de la demande de la charge en tout temps. La puissance à la sortie du générateur photovoltaïque n'est pas suffisante pour satisfaire la demande de charge. Aussi, l'autonomie du système est assurée par un système de stockage d'énergie. En général ces installations comprennent quatre éléments :

- Un ou plusieurs modules PV.
- Le système de régulation.
- Une ou plusieurs batteries.
- L'onduleur.

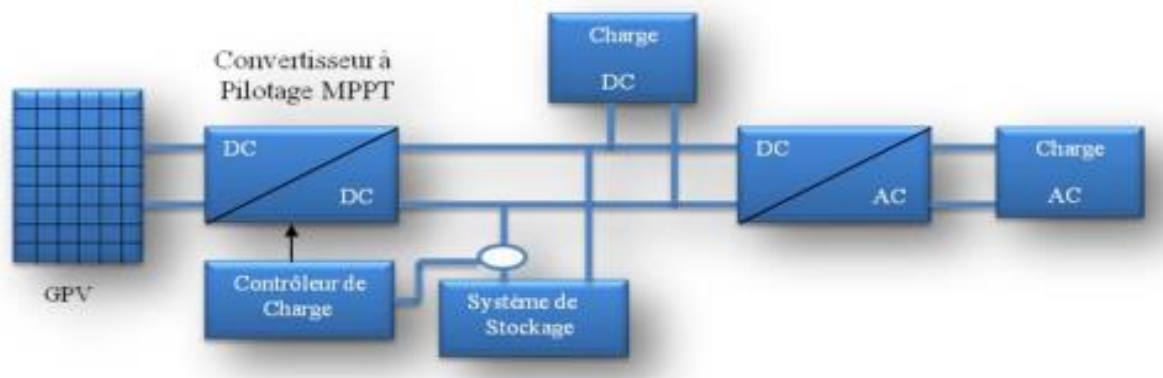
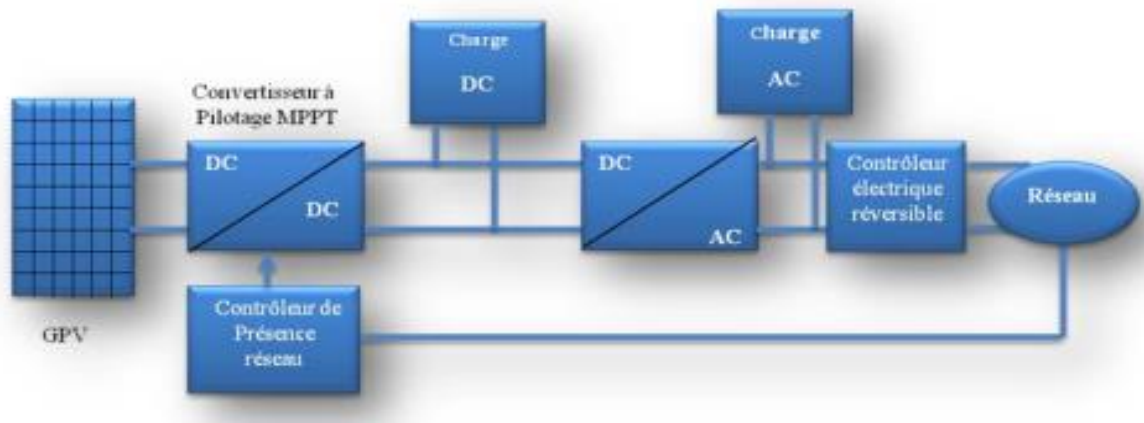


Figure I.15: Installation photovoltaïque

### I .8.2.2- Système PV accordée au réseau:

Les systèmes photovoltaïques connectés à un réseau permettent la décentralisation de la production sur ce réseau électrique (Figure I.8). L'énergie est produite plus près des lieux de consommation et non pas seulement par de grandes centrales nucléaires, thermiques ou hydroélectriques. Au fil du temps, les systèmes PV connectés à un réseau réduiront la nécessité d'augmenter la capacité des lignes de transmission et de distribution en ayant besoin d'acheminer uniquement son excédent d'énergie vers les zones en manque de production.

Cette mise en commun des productions permet aussi un sous-dimensionnement des équipements de production complémentaire. Ces transferts éliminent la nécessité d'acheter et d'entretenir une batterie d'accumulateurs. Il est toujours possible d'utiliser ceux-ci pour servir d'alimentation d'appoint lorsque survient une panne de réseau.



**Figure I.16: Installation photovoltaïque accordée au**

### I .8.2.3- Systèmes hybrides:

Les systèmes hybrides reçoivent une partie de leur énergie d'une ou plusieurs sources supplémentaires, qui sont également indépendantes des réseaux de distribution d'électricité. En pratique le générateur photovoltaïque est combiné à une éolienne ou à un groupe électrogène à combustible, ou aux deux à la fois avec des accumulateurs de stockage de l'énergie. Un tel système offre un bon choix pour les applications qui nécessitent une alimentation continue d'une puissance assez élevée.

Un système hybride photovoltaïque optimise l'utilisation combinée de plusieurs sources d'énergies renouvelables et, ou fossiles et des moyens de stockage associés.

## I .9 Méthodes d'amélioration le rendement:

### I 9.1- L'améliorer le rendement d'un panneau solaire:

La puissance d'un panneau solaire et son rendement dépendent de 4 paramètres [9] :

- son orientation.
- sa dimension.
- les zones d'ombre.
- la qualité des autres composants.

### I .9.2 L'orientation du panneau solaire:

L'orientation des panneaux solaires est super importante. Ils doivent capter un maximum de rayonnement solaire tout au long de la journée. Comme le soleil se lève à l'est et se couche à l'ouest, une orientation plein sud permet de profiter d'une plus grande quantité de rayonnement. C'est vrai pour l'hémisphère nord mais en dessous de l'équateur il faut inverser. Si vous n'avez pas d'exposition plein sud ce n'est pas très grave. Vos modules solaires seront

## Chapitre I : Etat de l'art des méthodes d'amélioration

quand même rentables à l'est et à l'ouest, il faut juste bannir le nord. L'orientation des panneaux solaires joue un rôle important sur leur production[9].

### I .9.3 La dimension du panneau solaire:

Je vous ai préparé un tableau avec les surfaces à prévoir. Je vous ai mis trois dimensionnements différents :

**Tableau : Variation de puissance de panneau suivant sa dimension. [9]**

Puissance installée requise	Puissance moyenne d'un panneau à l'unité	Nombre de panneaux requis	Mesure moyenne d'un panneau à l'unité	Surface nécessaire
3 000 Wc	375 Wc	8 panneaux	1,7 m <sup>2</sup>	16 m <sup>2</sup>
6 000 Wc	375 Wc	16 panneaux	1,7 m <sup>2</sup>	32 m <sup>2</sup>
6 000 Wc	375 Wc	24 panneaux	1,7 m <sup>2</sup>	48 m <sup>2</sup>

Attention, la dimension d'un panneau solaire n'est pas vraiment un élément à prendre en compte. On regarde plutôt le nombre de cellules photovoltaïques par mètre carré. L'équation est simple : plus la surface de panneaux solaires est grande, plus on peut mettre de cellules. Forcément plus il y a de cellule, plus le module produit d'électricité

### I .9.4- Éviter les zones d'ombre:

Ce n'est un secret pour personne, les zones d'ombrage font diminuer la production de vos capteurs. Il faut donc bien faire attention à tous les obstacles qui pourraient faire de l'ombre à votre installation (arbre, cheminée, maison voisine...)[9]

### I .10- Le rendement de l'onduleur photovoltaïque:

L'onduleur joue aussi un rôle important, est l'appareil qui transforme le courant électrique continu, générée par les panneaux solaires, en courant alternatif. C'est le courant alternatif qu'est consommé par la charge. Il contrôle également le bon fonctionnement de l'installation et permet de suivre la consommation quotidienne. Un onduleur performant améliore le rendement global de votre installation photovoltaïque.

## I.11-Cellules de multi-jonctions

La technologie des cellules multi-jonctions permet d'optimiser l'absorption du spectre solaire et ainsi d'obtenir de meilleurs rendements. Pour cela, plusieurs jonctions P-N, possédant des gaps d'énergie différents, sont empilées. Les cellules du haut ont un gap optimisé pour les petites longueurs d'onde dans le bleu (grandes énergies). Les cellules du milieu possèdent un gap dans le visible ou le proche infrarouge. Enfin, les cellules du bas ont un gap optimisé dans l'infrarouge moyen et les grandes longueurs d'onde (petites énergies). Les cellules sont connectées en série grâce à des jonctions tunnel. Le plus souvent, ces cellules sont composées de trois jonctions, mais idéalement, il faudrait un très grand nombre de jonctions afin de capter au mieux le spectre solaire. La figure (I-17) (a), présente l'absorption du spectre solaire pour une cellule triple-jonction et la figure (I-17) (b), montre le schéma de la structure d'une telle cellule. [37]

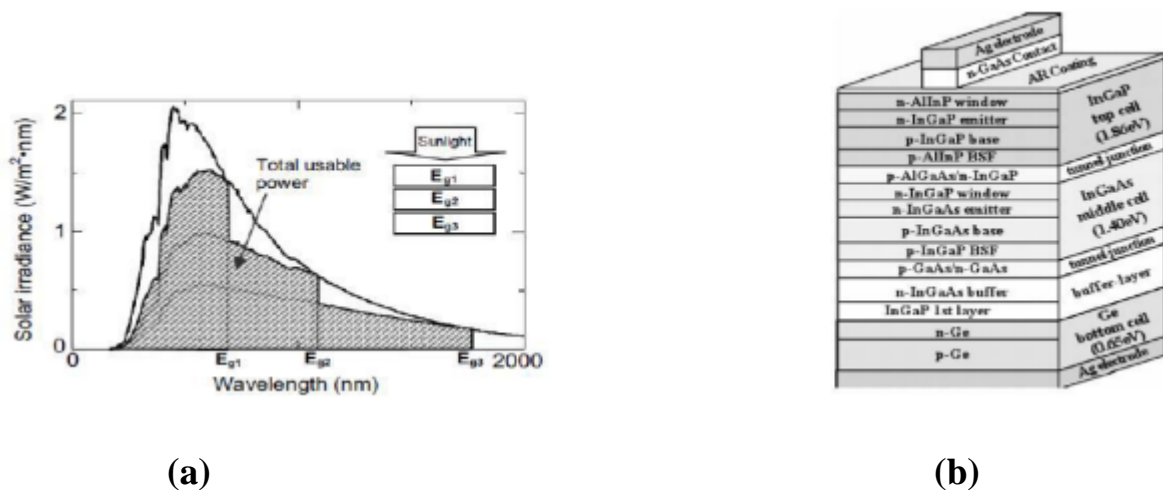


Figure I.17 : (a) : Recouvrement du spectre solaire par une cellule à triple-jonction, (b) : Schéma d'une cellule à triple-jonction

## I.12. Conclusion

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par la cellule photovoltaïque basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule

L'association de plusieurs cellules en série et/ou parallèle donnent lieu à un module photovoltaïque qui a une caractéristique courant-tension non linéaire présentant un point de puissance maximale.

**Chapitre II :**  
**Etude et modélisation**  
**de système**  
**photovoltaïque.**

## II.1 Introduction

La caractérisation de la performance des cellules solaires multi-jonctions est essentielle pour la conception du photovoltaïque de haute concentration (HCPV). Ces cellules peuvent fonctionner sur une plage de flux du rayonnement incident, généralement entre quelques centaines jusqu'à 1000 soleils, et une gamme de températures de fonctionnement allant jusqu'à environ 100°C. La dépendance de la performance de la cellule sur ces deux paramètres devrait alors être bien définie

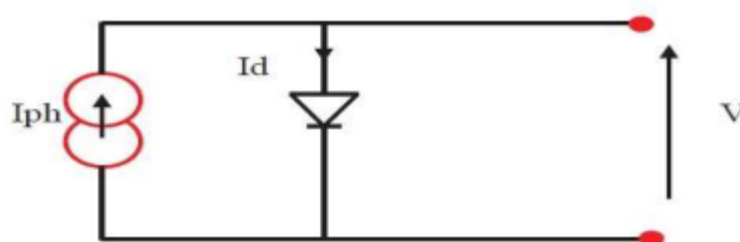
## II.2. Modélisation de panneaux photovoltaïques

De nombreux modèles mathématiques de modules photovoltaïques, ont été développés, dont le but est l'obtention de la caractéristique Courant-Tension et Puissance-Tension pour l'analyse et l'évaluation des performances des systèmes photovoltaïques.

### II.2.1. Modélisation des cellules solaires à mono-jonctions :

#### II.2.1.1. Modèle simplifié

La cellule sera modélisée par une source du courant  $I_{ph}$  en parallèle avec une diode et pour optimiser la modélisation de quelques phénomènes au niveau de la cellule, le modèle comme le montre la figure II.10 contient une résistance série  $R_s$  qui modélise les pertes ohmiques



FigureII.1: Modèle simplifié d'une cellule PV.

Ce modèle électrique modélise la cellule en un générateur du courant idéal, selon la loi des nœuds, le courant résultant  $I$  est donné par :

$$I = I_{ph} - I_d \quad (II.3)$$

## Chapitre II : Etude et modélisation de système photovoltaïque.

Avec :

$I_{ph}$  : Constant pour un ensoleillement donné.

$$I_d = I_s \left( \exp \left( \frac{V + R_s I}{A V_t} \right) - 1 \right) \quad (II.4)$$

Avec :

A : Facteur d'idéalité de la diode.

Le courant fourni par ce modèle est donc donné par :

$$I = I_{ph} - I_s \left( \exp \left( \frac{V + R_s I}{A V_t} \right) - 1 \right) \quad (II.5)$$

Le modèle de l'expression est nommé aussi « modèle à quatre paramètres » ( $I_{ph}$ ,  $I_s$ ,  $R_s$ , A)

### II. 2.1.2. Cellule photovoltaïque réelle :

Le model photovoltaïque précédent ne rendait pas compte de tous les phénomènes présents lors de la conversion d'énergie lumineuse. En effet, dans le cas réel, on observe une perte de tension en sortie ainsi que des courants de fuite. On modélise donc cette perte de tension par une résistance en série  $R_s$  et les courants de fuite par une résistance en parallèle  $R_p$ [17]

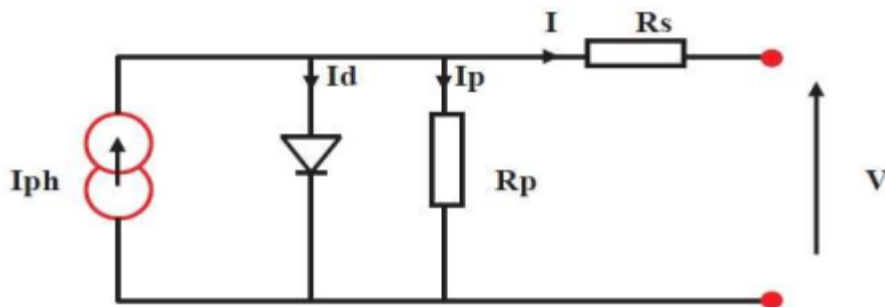


Figure II.2 : Modèle de la cellule photovoltaïque réel

Le courant de saturation de la diode est donné par la suite:

$$I_0 = \frac{I_{cc}}{\exp \left( \frac{V + I R_p}{n k t} \right)} - 1 \quad (II.6)$$

Avec:

$I_{ph}$ : Le courant fourni par la cellule

$I_d$ : Le courant de saturation de la diode.

K : constante de Boltzmann ( $1,381 \cdot 10^{-23}$  joule/Kelvin).

q:charge d'électron =  $1,602 \cdot 10^{-19}$  C.

n: Le facteur de qualité de diode.

## Chapitre II : Etude et modélisation de système photovoltaïque.

T: La température de cellule en kelvin.

Cette équation est originaire la courbe I-V visible sur la figure II.5, où trois points remarquable sont mis en évidence: court-circuit ( $0, I_{cc}$ ), la puissance maximale Point ( $V_{mp}, I_{mp}$ ) et en circuit ouvert ( $V_{co}, 0$ ).

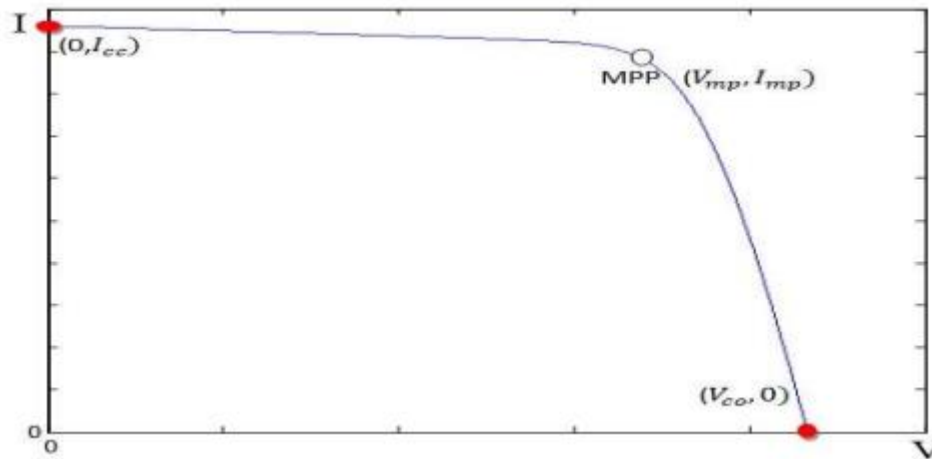
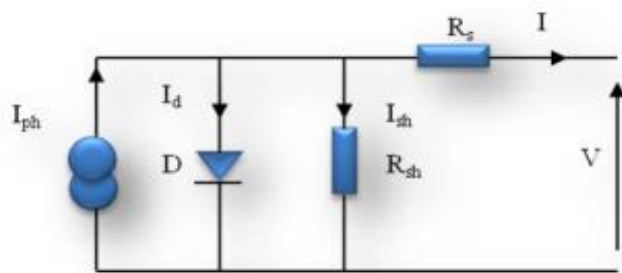


Figure II.3: Caractéristique I - V courbe d'un dispositif photovoltaïque pratique et les trois points

### II.2.1.3. Modèle à une diode

C'est un modèle semblable au modèle simplifié. Comme le montre la figure I.2, une source de courant et une diode en parallèle avec une résistance en série, mais dans ce modèle une résistance shunt  $R_{sh}$  est ajoutée ayant une grande influence sur le courant généré par le modèle et qui est proche du courant d'une cellule réelle. Physiquement, la résistance shunt sert à la modélisation des pertes autour de la jonction dues aux impuretés et sur les coins de la cellule.[18] [19].



FigureII.4: Modèle à une diode d'une cellule PV.

## Chapitre II : Etude et modélisation de système photovoltaïque.

Ce modèle est le plus utilisé dans de nombreuses recherches grâce à son comportement qui est plus proche à une cellule PV par rapport au modèle à résistance série (simplifié) d'une part, et sa simplicité pour le calcul mathématique par rapport au modèle à deux diodes (décrit ci-après) d'une autre part.

Le courant généré par ce modèle est donné par :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (\text{II.7})$$

Avec :

$$I_{sh} = \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (\text{II.8})$$

Donc :

$$I = I_{ph} - I_s \left( \exp \left( \frac{V + R_s I}{A V_t} \right) - 1 \right) - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (\text{II.9})$$

Le modèle de l'expression est nommé aussi « modèle implicite avec cinq paramètres » ( $I_{ph}$ ,  $I_s$ ,  $R_s$ ,  $R_{sh}$ ,  $A$ ) [20]

### II.2.1.4. Modèle à deux diodes:

Actuellement le modèle électrique le plus proche d'une cellule photovoltaïque est celui à deux diodes (double exponentiel), où la cellule est bien sûr présentée comme un générateur de courant électrique dont le comportement est équivalent à une source de courant avec deux diodes en parallèle. Et pour tenir compte des phénomènes physiques au niveau de la cellule, comme les modèles précédents, ce modèle est complété par les deux résistances série  $R_s$  et parallèle  $R_{sh}$  comme le montre le schéma électrique équivalent de la figure II.3 [18] [19].

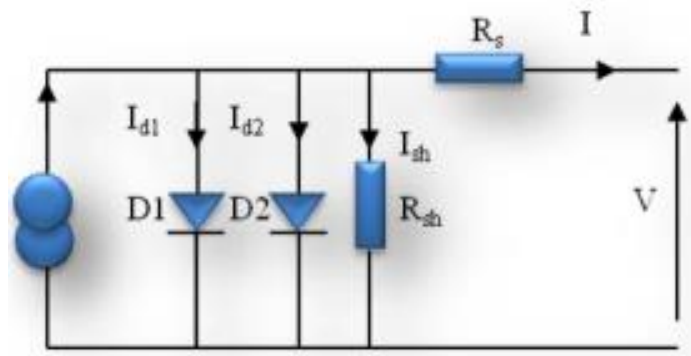


Figure II.5: Modèle à deux diodes d'une cellule PV.

## Chapitre II : Etude et modélisation de système photovoltaïque.

Avec quelques difficultés de calcul et développement mathématique, ce modèle donne un courant presque semblable au courant d'une cellule PV selon la relation :

$$I = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} \quad (\text{II.10})$$

Donc :

$$I = I_{ph} - I_{s1} \left( \exp \left( \frac{V+R_s I}{A_1 V_t} \right) - 1 \right) - \frac{V+R_s I}{R_{sh}} \quad (\text{II.11})$$

Avec :

A1 et A2 : Facteurs d'idéalité des diodes D1 et D2 respectivement.

Is1 et Is2 : Courants de saturation des diodes D1 et D2 respectivement.

### II.2.1.5. Paramètres d'une cellule photovoltaïque :

Il existe de nombreux paramètres qui permettent de caractériser une cellule solaire. Ces paramètres sont appelés paramètres photovoltaïques et sont déduits de la caractéristique I(V).

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

Il s'agit du courant lorsque le potentiel appliqué à la cellule est nul. C'est le plus grand courant que la cellule peut fournir. Celui-ci est fonction de la température, de la longueur d'onde du rayonnement, de la surface active de la cellule, de la mobilité des porteurs ce courant est linéairement dépendant de l'intensité lumineuse reçue.

#### b. Tension de circuit ouvert (V<sub>co</sub>)

Comme son nom l'indique, c'est la tension aux bornes de la cellule lorsqu'elle n'est pas connectée à une charge ou lorsqu'elle est connectée à une charge de résistance infinie. Elle dépend essentiellement du type de cellule solaire (jonction PN, jonction Schottky), des matériaux de la couche active et de la nature des contacts de la couche active électrode. Elle dépend de plus de l'éclairement de la cellule

$$V_{co} = \frac{K.Tc}{q} \log \left( \frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \quad (\text{II.12})$$

Deux régimes peuvent être observés suivant le degré d'éclairement figure.

Régime des faibles flux lumineux : dans ce cas, I<sub>ph</sub> - I<sub>s</sub>, ce qui permet d'écrire :

$$\frac{I_{ph}}{I_s} = \log \left( \frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \quad (\text{II.13})$$

D'où :

$$V_{co} = \frac{K.Tc}{q} \left( \frac{I_{ph}}{I_s} \right) \quad (\text{II.14})$$

C'est la zone de comportement linéaire de la cellule. La formule précédente peut s'écrire aussi  $V_{oc} = R_0 \cdot I_{ph}$ , en posant  $R_0 = \frac{K.Tc}{q.I_s}$  est la résistance interne de la diode en polarisation externe nulle (circuit ouvert) et sous faible flux lumineux.

Régime des flux lumineux suffisamment intenses pour que  $I_{ph} \gg I_s$ , soit :

$$\frac{I_{ph}}{I_s} \gg 1$$

D'où :

$$V_{co} = \frac{K.Tc}{q} \log\left(\frac{I_{ph}}{I_s}\right) \quad (II.15)$$

C'est le domaine du comportement logarithmique.

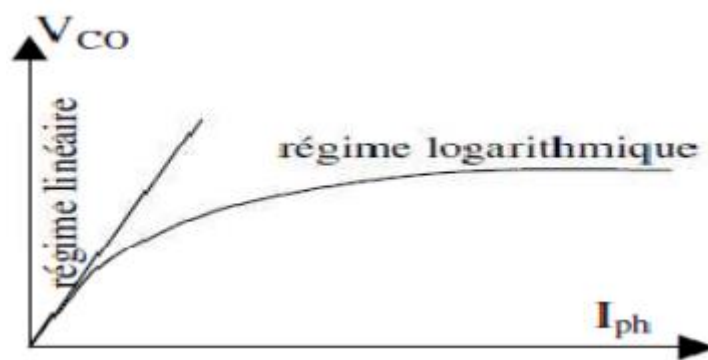


Figure II.6: différents régimes selon la puissance d'éclairement

### c. Facteur de forme, FF

Un paramètre important est souvent utilisé à partir de la caractéristique  $I(V)$  pour qualifier la qualité d'une cellule ou d'un générateur PV : c'est le facteur de remplissage ou fill factor (FF). Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée  $P_{max}$  et la puissance formée par le rectangle  $I_{cc} \cdot V_{oc}$ . Plus la valeur de ce facteur sera grande, plus la puissance exploitable le sera également. Les meilleures cellules auront donc fait l'objet de compromis technologiques pour atteindre le plus possible les caractéristiques idéales [21]. Il est défini par la relation suivante:

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (II.16)$$

**d. Le rendement:**

Le rendement des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente,  $P_{in}$ .

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{FF.V_{co}.I_{cc}}{P_{in}} \quad (II.17)$$

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert. Le rendement de conversion est un paramètre essentiel. En effet, la seule connaissance de sa valeur permet d'évaluer les performances de la cellule.

Le courant généré par le générateur photovoltaïque est directement proportionnel à l'ensoleillement. Au-dessus

Le courant généré par la figure PV est régi par les équations suivantes:

$$I_{ph} = I_m - I_{sh} \quad (II.18)$$

Où  $I_{sh}$  est le courant traversant la résistance shunt donné par:

$$I_{sh} = \left( \frac{V + I_{ph}.R_s}{R_p} \right) \quad (II.19)$$

$$I_m = I_g - I_d \quad (II.20)$$

Où  $I_g$  est le courant PV généré proportionnel à l'ensoleillement donné par :

$$I_g = (I_{g,n} + K_i \Delta T) \frac{G}{G_n} \quad (II.21)$$

Où  $I_d$  est le courant de diode donné par :

$$I_{sh} = I_0 \left( \exp \left( \frac{V + I_{ph}.R_s}{V_t.n} \right) - 1 \right) \quad (II.22)$$

Où  $I_0$  est le courant de saturation inverse de la diode donnée par:

$$I_0 = \frac{I_{sc,n} + K_1 \Delta T}{\exp \left( \frac{I_{oc,n} + K_v \Delta T}{\alpha V_t} \right)} \quad (II.23)$$

La tension équivalente de température est-elle donnée par:

$$V_t = \frac{N_s K T}{q} \quad (\text{II.24})$$

L'expression finale pour le courant de sortie de cellule PV est donnée par:

$$I_{pv} = I_g - I_0 \left( \exp \left( \frac{V + I_{pv} R_s}{V_t n} \right) - 1 \right) - \left( \frac{V + I_{pv} R_s}{R_p} \right) \quad (\text{II.25})$$

### **II.3. Modélisation des cellules solaires à triples-jonctions :**

Des données expérimentales ont été publiées pour les cellules à triples-jonctions largement utilisées InGaP/InGaAs/Ge: pour les cellules faites par Sharp, les données sont pour des températures de 25 à 120°C et une concentration de 1 à 200× [22-23], et pour les cellules faites par Spectrale les données sont pour 25 à 120°C et 1 à 1000× de concentration [24-25]

Des modèles semi-empiriques pour les cellules ont été proposées pour relier la performance de la cellule, pour connaître des mécanismes physiques et pour la prédire comme une fonction de la température et de la concentration [24-26-27]. Les modèles à deux diodes pour les circuits équivalents ont été proposées dans [26-28], mais les effets combinés de la haute température et le flux élevé du rayonnement incident n'ont pas été étudiés. Le modèle présenté dans [26] était étalonné par rapport aux données de la cellule InGaP/InGaAs/Ge seulement à température ambiante et 1 soleil. Le modèle présenté dans [29] a été calibré par rapport aux mesures à température ambiante et à une gamme de concentration de 1 à 1000×. Les prédictions de la sensibilité à la température du modèle donné dans [28-29] ont été comparées avec succès avec les données de la cellule Sharp à 1 soleil en utilisant des températures inférieures 120°C [27]. Les coefficients ont été optimisés pour s'adapter aux données mesurées pour les courbes I-V. Dans tous les cas, les coefficients semi-empiriques obtenus n'ont pas été signalés

Un modèle de circuit équivalent à une seule diode, calibré à la fois pour des niveaux élevés de concentration et de température, a été présenté en [30]. Le modèle comprenait une relation I-V distinct pour chaque sous-cellule. Les prévisions du modèle ont été calibrées par rapport aux données de la cellule Sharp [31-32], en optimisant les coefficients pour adapter le rendement mesuré en tant que les données I-V n'étaient pas disponibles. Les résultats ont montrés qu'à des concentrations élevées, la tension du circuit ouvert et les prévisions des

## Chapitre II : Etude et modélisation de système photovoltaïque.

coefficients de température du rendement qu'ils sont essentiels, sont écartées par rapport aux données. Un modèle à une seule diode, calibrée par rapport aux données de la cellule faite par Spectrale C1MJ à température et à intensité élevées, a été proposé plus tard dans [33] où une relation a été considérée entre I-V d'une cellule localisée et un seul facteur d'idéalité. Les coefficients résultants ont été de loin dépassés la fourchette prévue. Une comparaison qualité-

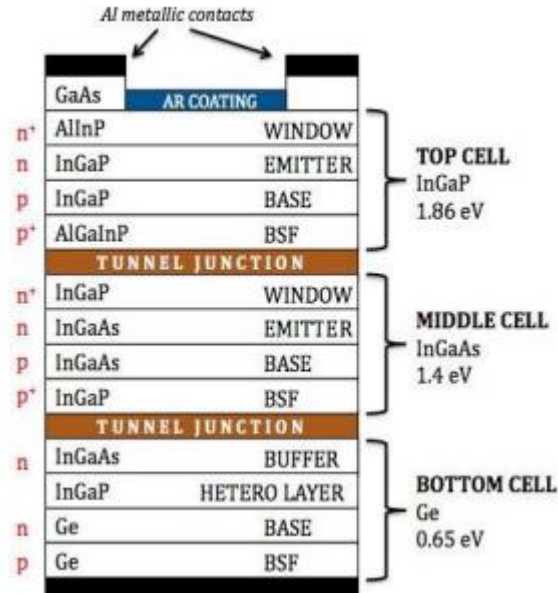


Figure II.7: vue en coupe transversale d'une cellule solaire à triple jonction

### II.3.2. Etude des cellules solaires à triples-jonctions:

#### II.3.2.1. Les modèles du circuit équivalent à une seule diode:

Un modèle de circuit équivalent à deux bornes d'une cellule à triple-jonction avec une seule diode pour chaque jonction est présenté sur la figure (II.1). La relation des sous cellules est donnée par :

$$J_L = J_{sc,i} - J_{0,i} \left( \exp \left( \frac{q(V_i + J_L R_{s,i})}{n_i K_B T} \right) - 1 \right) - \frac{V + J_L R_{s,i}}{R_{sh,i}} \quad (II.26)$$

Où  $i$  représente le numéro de la sous-cellule (1 = haut, 2 = milieu et 3 = bas),  $J_{sc}$ ,  $J_0$  et  $J_L$  sont les densités du : courant du court-circuit, courant inverse de saturation de la diode et courant de charge, respectivement (courant par unité de surface de la cellule),  $K_B$  est la constante de Boltzmann,  $T$  est la température absolue,  $V$  est la tension,  $q$  est la charge élémentaire,  $n$  est le facteur d'idéalité de la diode,  $R_s$  et  $R_{sh}$  sont les résistances série et shunt, respectivement, et  $A$  est l'aire de la cellule.

## Chapitre II : Etude et modélisation de système photovoltaïque.

On suppose que la température de la cellule est uniforme. La densité du courant inverse de saturation est fortement dépendante de la température et elle est donnée par :

$$J_{0,i} = K_i T^{(3+\gamma_i)/2} e^{(-E_g/n_i K_B T)} \quad (\text{II.27})$$

est typiquement  $\gamma$  sont des constantes telle que  $\gamma$  où est l'énergie de la bande interdite,  $k$  et comprise entre 0 et 2. En raison de l'équation (II.1) , le courant inverse de saturation est modélisé par un seul terme , il représente la recombinaison dans la région d'épuisement et la région quasineutre à la fois

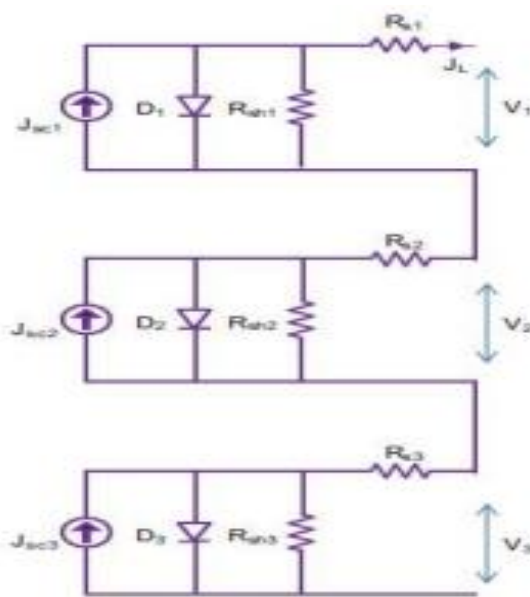


Figure .II-8: Circuit équivalent d'une cellule du modèle à une seule diode.

L'énergie de la bande interdite est une fonction faiblement décroissante de la température ; donc le courant du court-circuit augmente avec la température. Cette variation est parfois négligée dans les modèles de cellule publiés où l'écart du gap est considéré comme une constante. Cependant, quand une grande précision des prédictions du modèle sur une large gamme de température est souhaitée, cet effet du second ordre peut être important. La largeur de la bande est donnée en fonction de la température :

$$E_g = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T - \sigma} \quad (\text{II.28})$$

sont des constantes qui dépendent du matériau.  $\sigma$  et  $\alpha$  où

Lorsque les jonctions dans une cellule sont fabriquées à partir d'alliages plutôt qu'un matériau pur, et la composition d'alliage choisi par chaque fabricant est quelque peu différente, les différences de la bande interdite peut se produire même si les matériaux sont nominalemt similaires. Y compris l'incidence de la composition du matériau dans un modèle de cellule permet une plus grande souplesse pour représenter des cellules différentes dans le même modèle.

La largeur de la bande interdite des alliages semi-conducteurs peut être déterminée par la superposition linéaire suivante:

$$E_g(A_{1-x}B) = (1-x)E_g(A) + xE_g(B) - x(1-x)P \quad (\text{II.29})$$

$A_{1-x}B_x$  étant la composition d'alliage et  $P$  [eV] est un paramètre dépendant d'alliage qui tient compte des écarts par rapport à l'approximation linéaire. Le courant du court-circuit,  $J_{sc}$  dépend de l'énergie de la bande interdite et est donc fonction de la température.. Les deux premières sou cellules des cellules abordées sont composées d'alliages, l'équation (II.4) doit être utilisée afin de modéliser correctement la dépendance en température de la bande interdite. Si la résistance shunt est suffisamment importante pour être négligée, la tension simple jonction peut être extraite à partir de l'équation (II.1) comme suite.

$$V = \sum_{i=1}^3 V_i, \quad V_i = \frac{n_i K_B T}{q} \ln \left( \frac{J_{sc,i}}{J_{0,i}} + 1 \right) - J_L A R_s \quad (\text{II.30})$$

Réarrangeant l'équation (II.5) on obtient :

$$V = \frac{K_B T}{q} \left[ n_1 \ln \left( \frac{J_{sc,1}}{J_{0,1}} + 1 \right) + n_2 \ln \left( \frac{J_{sc,2}}{J_{0,2}} + 1 \right) + n_3 \ln \left( \frac{J_{sc,3}}{J_{0,3}} + 1 \right) \right] - J_L A R_s \quad (\text{II.31})$$

La résistance série totale est . Les diodes tunnels situées entre les sous-cellules sont modélisées comme des résistances faisant partie de la résistance  $R_s$ . La tension du circuit ouvert est obtenue pour  $J_L$

$$V_{oc} = \frac{K_B T}{q} \left[ n_1 \ln \left( \frac{J_{sc,1}}{J_{0,1}} + 1 \right) + n_2 \ln \left( \frac{J_{sc,2}}{J_{0,2}} + 1 \right) + n_3 \ln \left( \frac{J_{sc,3}}{J_{0,3}} + 1 \right) \right] \quad (\text{II.32})$$

Le point de puissance maximale (MPP: maximum power point) est obtenu par la mise en

$\frac{dP}{dJ_L} = 0$  où la puissance est  $P = J_L V A$  L'équation résultante est :

$$\frac{K_B T}{q} \left[ n_1 \ln \left( \frac{J_{sc,1} - J_L}{J_{0,1}} + 1 \right) + n_2 \ln \left( \frac{J_{sc,2} - J_L}{J_{0,2}} + 1 \right) + n_3 \ln \left( \frac{J_{sc,3} - J_L}{J_{0,3}} + 1 \right) \right] - J_L \left[ \frac{K_B T}{q} \left( \frac{n_1}{J_{sc,1} - J_L + J_{0,1}} + \frac{n_2}{J_{sc,2} - J_L + J_{0,2}} + \frac{n_3}{J_{sc,3} - J_L + J_{0,3}} \right) + 2AR_s \right] = 0 \quad (II.33)$$

Ceci doit être résolu numériquement pour la densité du courant  $J_m$  à la MPP. La tension  $V_m$  à la MPP, est alors obtenue en substituant  $J_L = J_m$  dans l'équation (II.6). Le modèle à une seule diode contient dix paramètres empiriques qui doivent être déterminés par un étalonnage par rapport aux données mesurées expérimentalement:  $K_i, \gamma_i, n_i$  et  $R_s$

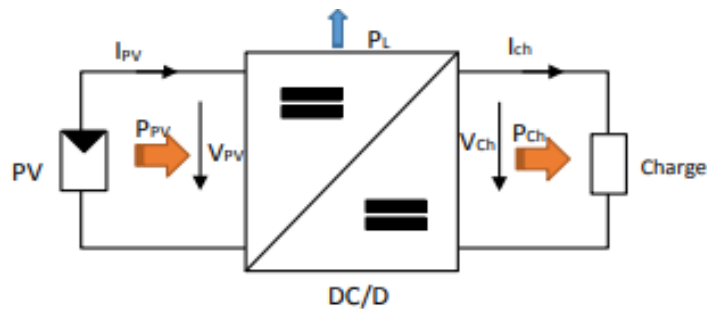
## II.4- Modélisation d'un Convertisseurs DC-DC :

### II .4.1- Convertisseurs DC-DC :

Les hacheurs sont des convertisseurs de type continu-continu permettant de contrôler la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé. Le hacheur se compose de condensateurs, d'inductance et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle qu'on a de bons rendements pour les hacheurs.[34].

### II.4.2- Types des convertisseurs DC-DC (hacheur)

Il y a un plusieurs topologies des convertisseurs DC-DC. Ils sont classés par catégorie selon que la topologie isolée ou non isolée. Les topologies isolées emploient un transformateur



FigureII.9: convertisseurs DC-DC

d'isolement fonctionnant à haute fréquence, elles sont très employées souvent dans les alimentations à découpage. Les topologies les plus connues dans la majorité des applications sont le Fly back, en demi-point et en pont complet. Dans les applications photovoltaïques

## **Chapitre II : Etude et modélisation de système photovoltaïque.**

(PV), les systèmes de couplage avec le réseau électrique emploient souvent ces types de topologies quand l'isolement électrique est préféré pour des raisons de sûreté.[35].

Les topologies non isolées ne comportent pas de transformateurs d'isolement. Elles sont généralement utilisées dans l'entraînement des moteurs à courant continu [35].. Ces topologies sont encore classées en trois catégories : - Abaisseurs (Buck); - Elévateurs (Boost); - Elévateurs - Abaisseurs (Buck - Boost).

La topologie Buck est employée pour les faibles tensions. Dans les applications PV, le convertisseur Buck est habituellement employé comme chargeur de batteries et dans des systèmes de pompage de l'eau. La topologie Boost est employée pour augmenter la tension. Les systèmes de production de l'énergie emploient un convertisseur boost pour augmenter la tension de sortie au niveau du service avant l'étage de l'onduleur. Puis, il y a des topologies capables d'augmenter et de diminuer la tension telles que le Buck-Boost, le Cuk, et le Sepik. Les convertisseurs DC-DC peuvent être vus comme des transformateurs DC-DC.

### **II.6. Conclusion**

Les modèles mono-jonction et triple-jonction du circuit équivalent ont été présentés, ils sont Les cellules à mono jonction sont constituées d'une seule couche et sont principalement en silicium à faible rendement

Les cellules à triple jonction se composent de trois couches tandis que le matériau à Eg intermédiaire au milieu : (InGaP pour la cellule du haut, InGaAs au milieu et Ge pour la cellule du bas Il est également très efficace et est actuellement une nouvelle technologie en cours de développement.

**Chapitre III :**  
**Simulation, Résultat et**  
**discussions**

### III.1 Introduction

La simulation est un outil puissant pour l'évaluation des performances théoriques d'un système. En effet, ce dernier peut être testé sous des conditions facilement contrôlables et ses performances peuvent être aisément surveillées. La procédure de simulation lie les deux principales parties de la conception d'un système, à savoir, l'étude théorique et la réalisation d'un prototype. Vu que des changements dans la conception peuvent facilement être faits à l'étape de la simulation, il est possible d'expérimenter avec un large ensemble de variations des conditions de fonctionnement afin d'aboutir à une solution optimale. Matlab/Simulink est un logiciel de simulation, qui fournit une interface graphique permettant de construire des modèles sous forme de diagrammes blocs. Il offre l'avantage de construire des modèles hiérarchisés qui offrent la possibilité de voir le système à différents niveaux. Simulink offre également la possibilité de construire des modèles modulaires, qui ont l'avantage d'être facilement reliés entre eux afin de simuler un certain système.

### III.2 Simulation d'un panneau photovoltaïque mono jonction:

Pour simuler le comportement du GPV, nous avons utilisé le logiciel Matlab/Simulink en se basant sur le modèle mathématique décrit dans le chapitre II. L'implémentation sous Simulink du modèle mathématique du GPV est illustrée.

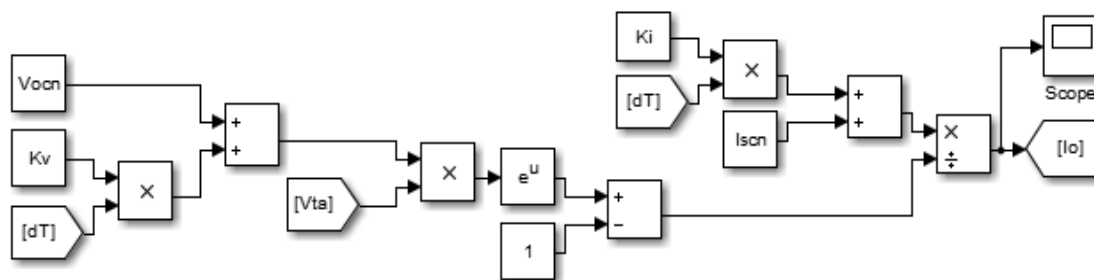


Figure III.1 :Schéma Block de courant  $I_0$

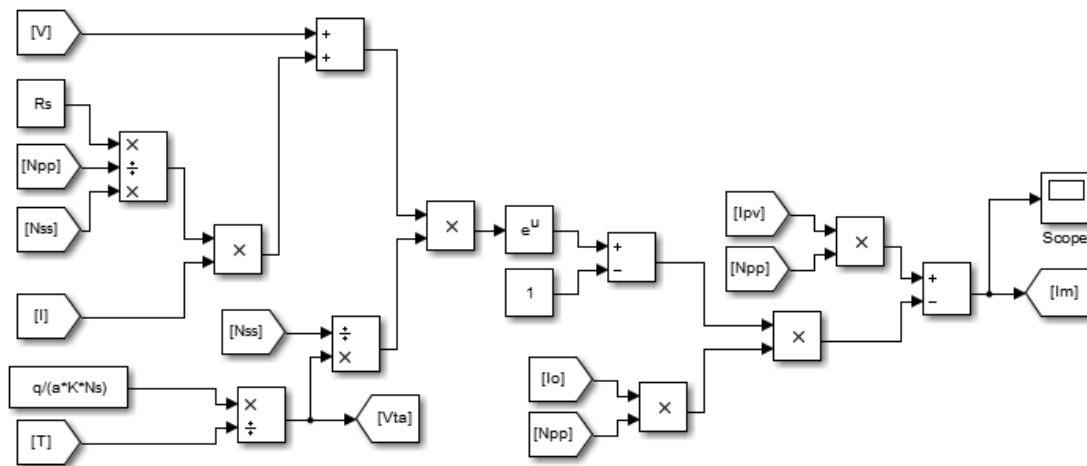


Figure III.2 : Schéma Block de courant  $I_{pv}$

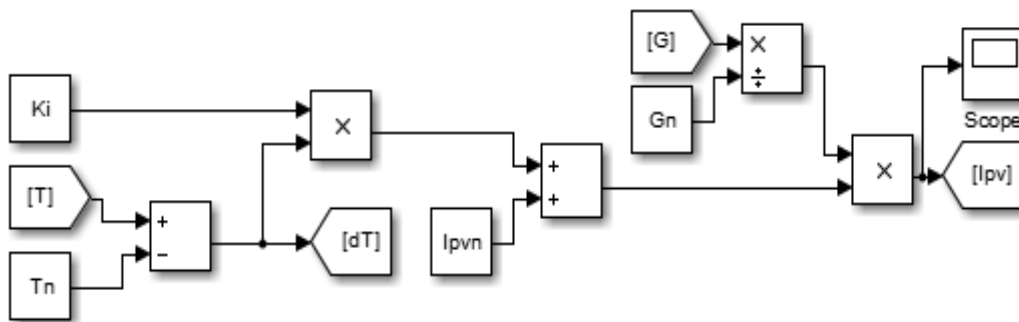


Figure III.3 : Schéma Block de courant  $I_{ph}$

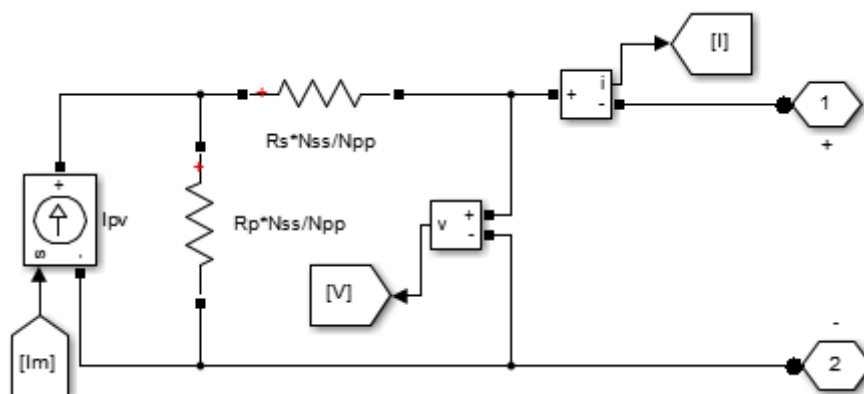


Figure III.4 : Synoptique du modèle amélioré de la cellule photovoltaïque sous le logiciel MATLAB/Simulink

### III .3.paramètres électriques des panneaux photovoltaïques:

Tableau : caractéristique électrique du module photovoltaïque

paramètres	valeurs
number of PV panels in parallel	Npp=1
number of PV panels in series	Nss=1
Rs(O)	0.38572
Rp(O)	153.5644
Ki	0.0024
Kv(K)	-0.08
Tn	298.15
Gn(W/m <sup>2</sup> )	1000
Ipvn(A)	3.8128
Vocn(V)	21.1
Iscn(A)	3.8
A	268.2578758
q(C)	1.60217646e-19
K(J/K)	1.3806503e-23
a	0.97484
Ns	36

#### III .3.1Caractéristiques électriques des modules photovoltaïques :

Il existe plusieurs indicateurs permettant de mesurer les performances des modules PV. La puissance crête (Wc) est un des indicateurs les plus significatifs, elle représente la puissance électrique maximale que le panneau peut fournir dans les conditions de mesures normalisées, c'est-à-dire lorsqu'il est connecté à une charge optimale, lorsque la température à la jonction des cellules est de 25 °C et lorsqu'il reçoit du soleil à une puissance de 1000w/m<sup>2</sup> (ceci correspond approximativement à une exposition perpendiculaire aux rayons du soleil le midi par temps clair).

La caractéristique courant-tension ( $I=f(V)$ ) illustre la variation du courant de sortie en fonction de la tension de sortie. Elle représente aussi un indicateur important permettant de mesurer les performances des modules PV. A partir de cette caractéristique on peut tracer la caractéristique puissance-tension ( $P=f(V)$ ).

### III.3.2. Caractéristiques courant-tension et puissance-tension du modèle :

La Figure II.7 représente la caractéristique courant-tension  $I(V)$  et puissance-tension  $P(V)$  d'une cellule photovoltaïque en utilisant le modèle sous conditions standards.

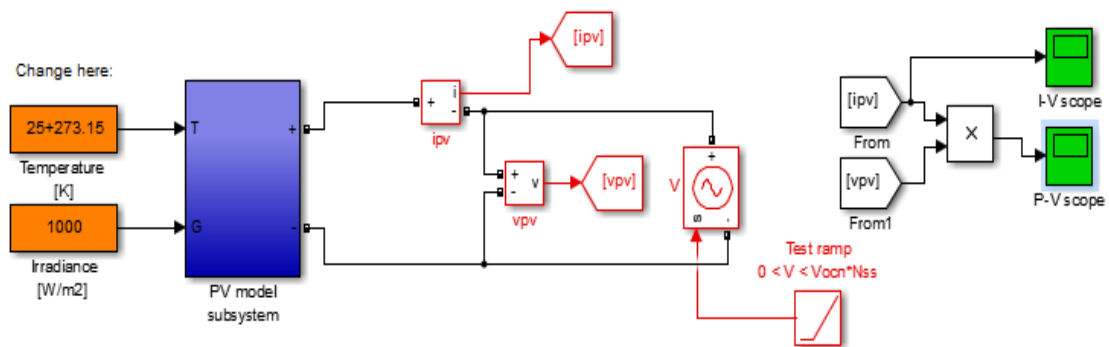


Figure III.5 : Présentation de module PV

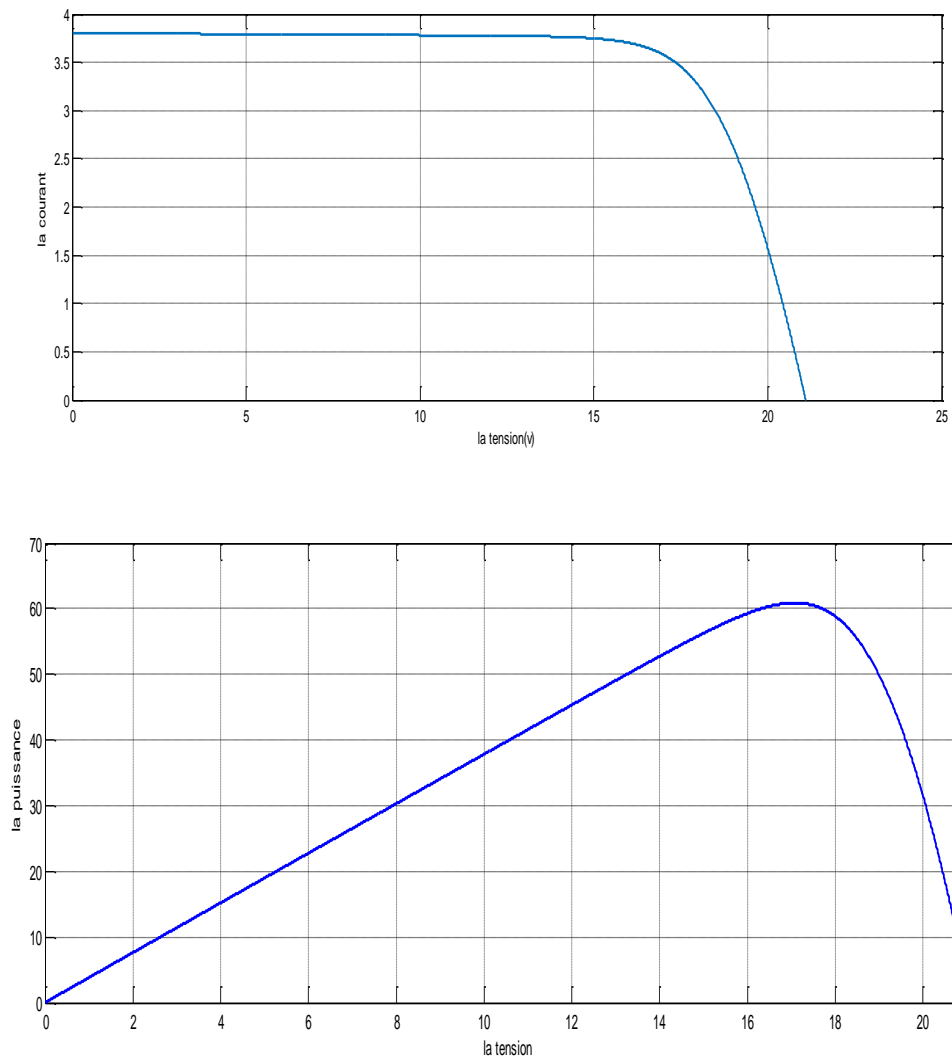


Figure III.6: Caractéristique I(V) et P(V) d'une cellule photovoltaïque

### III .3.4-L'importance de la courbe I(V)

Il décrit la capacité de convertir l'énergie d'une cellule solaire pour convertir l'énergie de rayonnement qui tombe dessus en énergie électrique sous une quantité spécifique de rayonnement solaire incident et à une certaine température.

### III .3.5.Commentaire sur les courbes:

-la courbe I(V)

Cellules PV produit un courant maximal quand il n'y a pas de résistance dans le circuit. -À-dire lorsqu'il y a un court-circuit entre les extrémités de la cellule PV positive et négative. Cette tendance est connue sous le nom courant du palais (court-circuit:  $I_{cc}$ ) Dans le cas de courant de court-circuit est une tension nulle.

### **Chapitre III : Simulation, Résultat et discussions**

---

Au contraire, la tension maximale se produit lorsqu'un circuit ouvert. Le soi-disant effort dans ce cas, la tension en circuit ouvert (circuit ouvert Tension: Voc) Dans ce cas, la résistance entre les extrémités de la planche cellulaire Alkahrodona infiniment élevé et il n'y a pas de courant car le circuit est incomplet.

-la courbe P(V):

Représente la courbe de puissance de la PV de la cellule, où cette courbe montre l'énergie électrique produite à un point quelconque de lot sur la courbe courant-tension, et l'énergie produite est simplement un produit de la tension et du courant à ce point.

dans le flux de palais le point de produire l' énergie est égale à zéro parce que la valeur de tension dans cette situation est égal à zéro et dans le point de tension en circuit ouvert est l'énergie produite parce que la valeur actuelle Sakura dans ce cas nulle.

Le point de puissance maximale (maximum Power Point PP) sont situés au-dessus de la courbe de puissance, un point fonctionnement qui peut être obtenu au niveau des panneaux d'énergie les plus élevées possibles.

#### **III .4.Influence de la température et de l'éclairement :**

La caractéristique d'une cellule PV (ou d'un générateur PV) est directement dépendante de l'éclairement et de la température.

##### **III .4.1.Influence de l'éclairement :**

Les variations du courant et de la puissance en fonction de la tension pour différents niveaux d'éclairements à température maintenue constante 25°C, figure **III.7** et figure **III.8**, montrent clairement l'existence de maxima sur les courbes de puissance correspondant aux Points de Puissance Maximale Pmax. Lorsque l'irradiation varie pour une température donnée, le courant de court-circuit Icc varie proportionnellement à l'irradiation. Dans un même temps, la tension de circuit ouvert Vco (à vide) varie très peu.

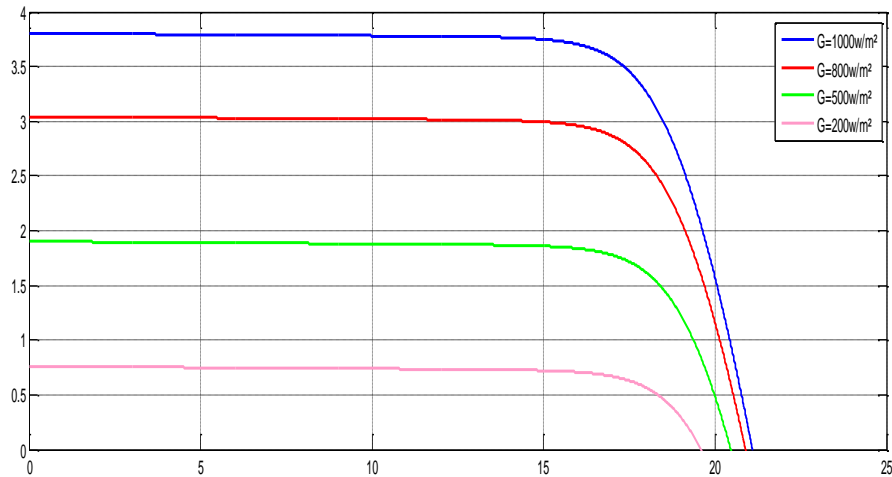


Figure III.7: Influence de l'éclairement sur la caractéristique courant-tension

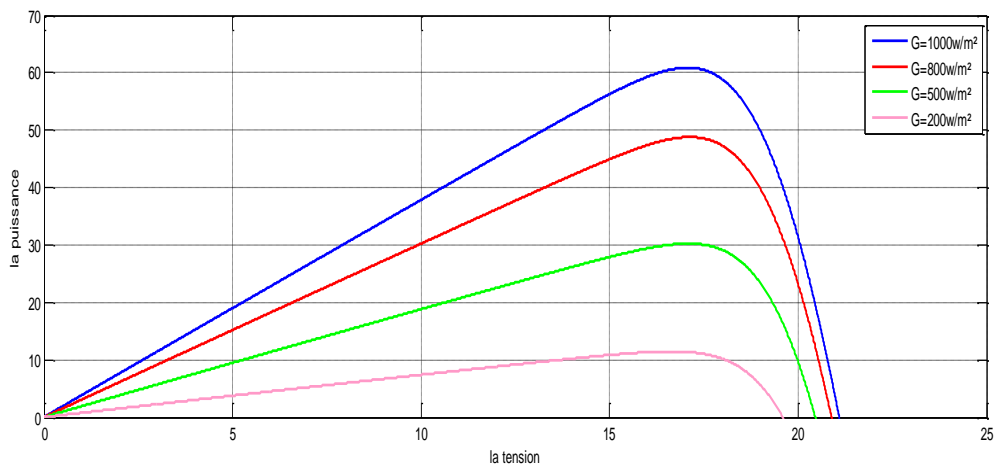


Figure III.8: Influence de l'éclairement sur la caractéristique puissance-tension.

On remarque que la tension maximale  $V_M$  correspondante à la puissance maximale ne varie que très peu en fonction de l'éclairement, contrairement au courant  $I_M$  qui augmente fortement avec l'éclairement.

### III .4.2. Influence de la température

La température est un paramètre très important dans le comportement des cellules solaires. La température a également une influence sur la caractéristique d'un générateur PV. La figure II.8 et figure II.9 présente la variation des caractéristiques d'une cellule PV en fonction de la température à un éclairement donné. L'éclairement est ici fixé à  $1000W.m^{-2}$ .

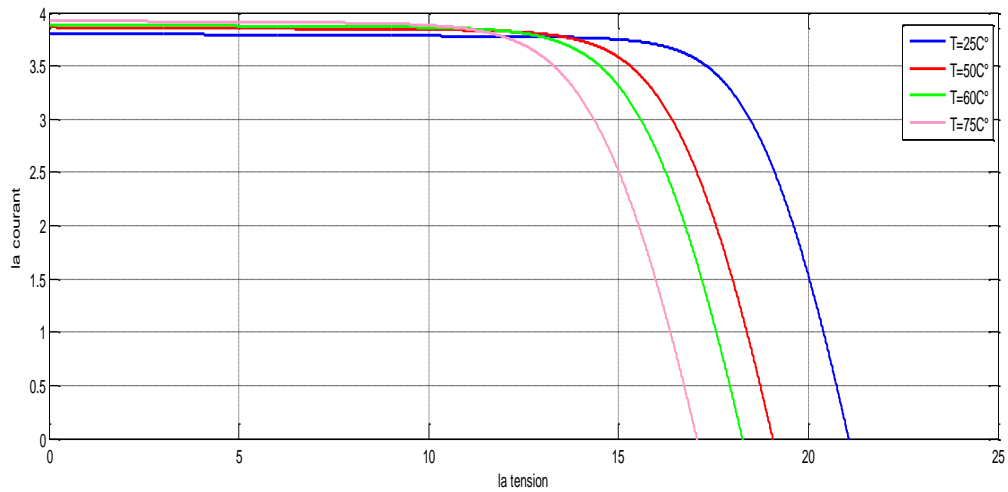


Figure III.9: Influence de la température sur la caractéristique courant-tension

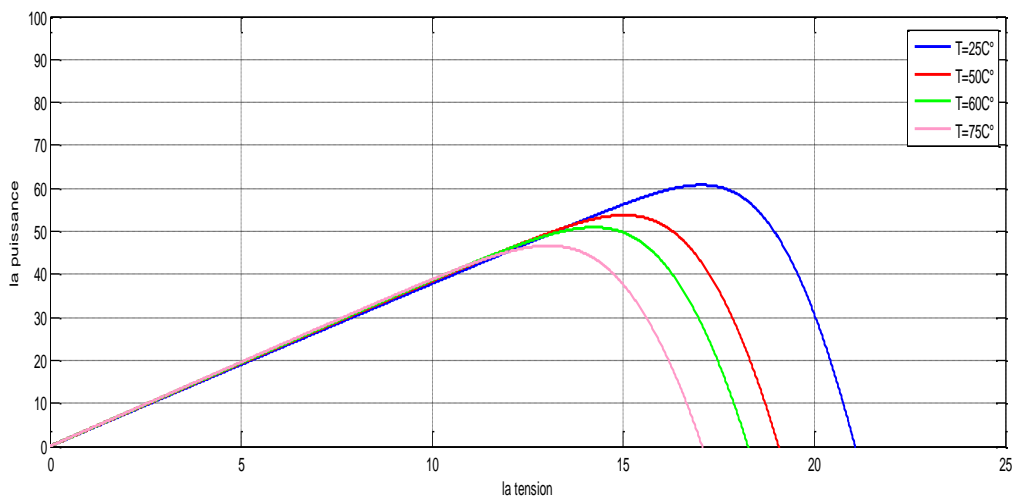
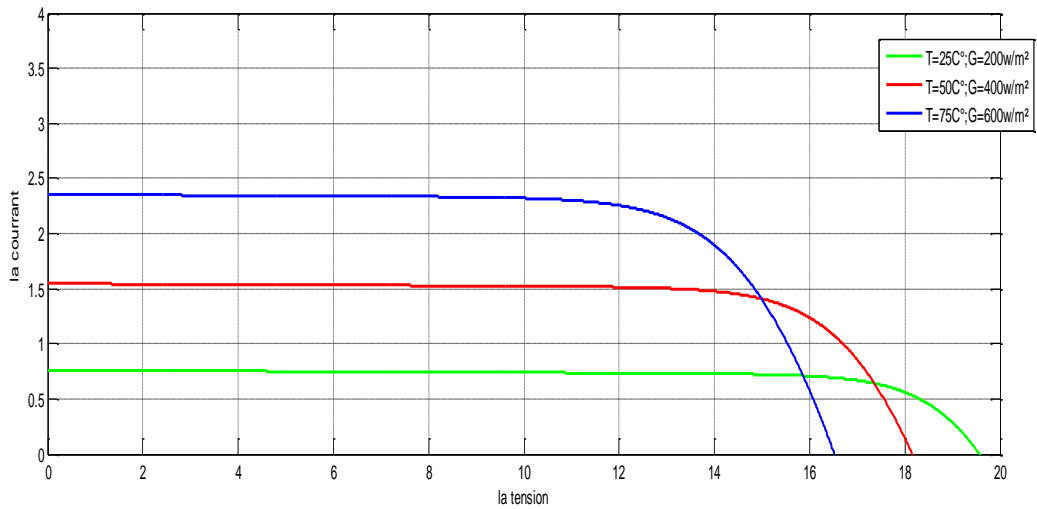


Figure III.10: Influence de la température sur la caractéristique puissance-tension.

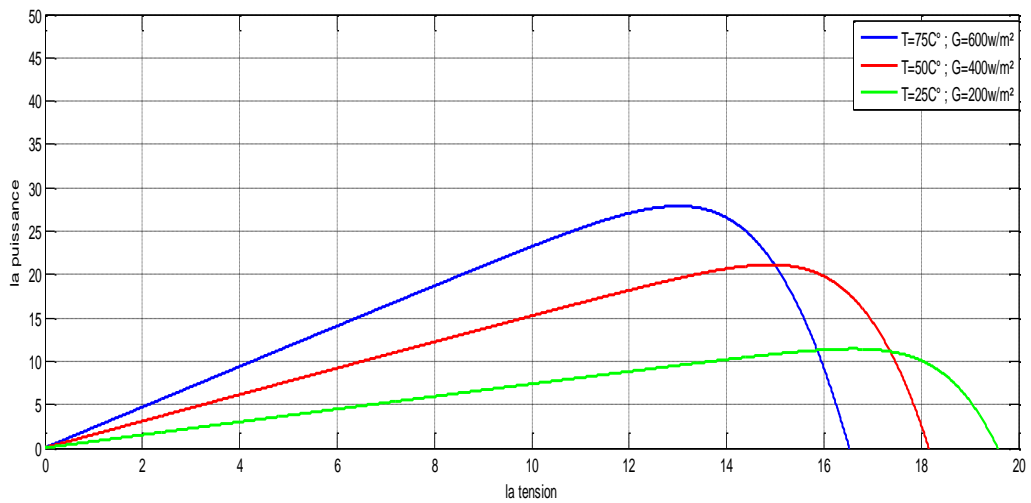
L'expérience montre que la tension de circuit ouvert d'une cellule solaire diminue avec l'augmentation de la température de la cellule.

Nous remarquons que la température influe négativement sur la tension de circuit ouvert (Plus la température est élevée plus  $V_{co}$  est faible et le courant de court-circuit  $I_{cc}$  augmente avec la température). Et par contre la puissance maximale du générateur subit une diminution lorsque la température augmente.

### III .4.3.Influence de la température et de l'éclairement :



**Figure III.11: Influence de la température et l'éclairement sur la caractéristique courant –tension**



**Figure III.12: Influence de la température et l'éclairement sur la caractéristique puissance-tension.**

On remarque Le courant électrique est directement proportionnel à la quantité de rayonnement solaire. Avec un léger changement de tension.

On remarque que lorsque la température et le rayonnement augmentent, l'énergie augmente

### III .5.Simulation d'un panneau photovoltaïque triples- jonction:

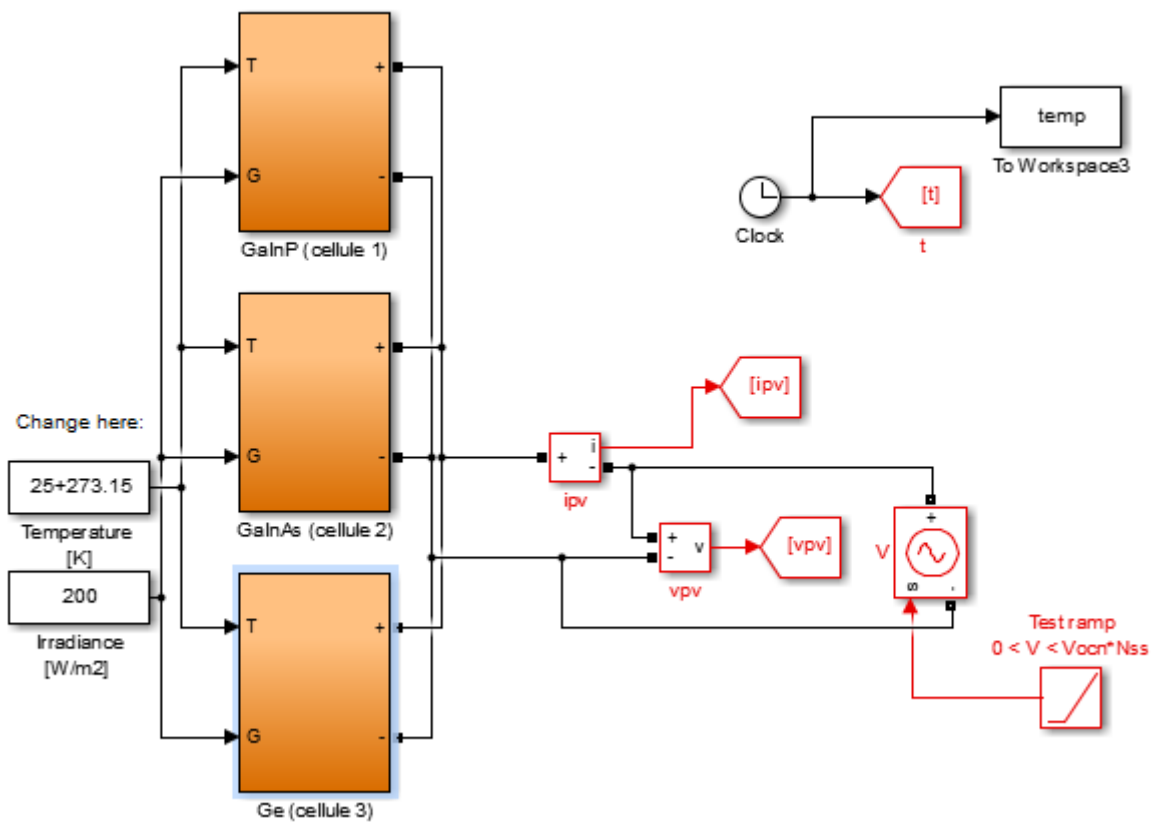
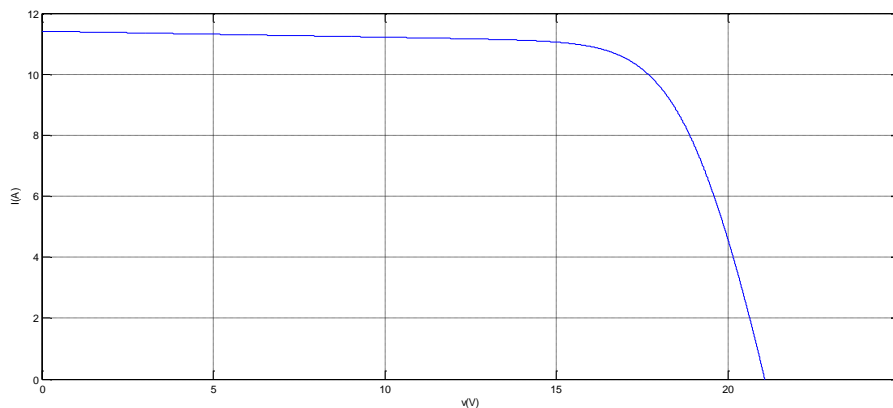


Figure III.13: Présentation de module PV triple jonction

#### III.5.1.Caractéristiques courant-tension et puissance-tension du modèle :

La Figure II.7 représente la caractéristique courant-tension  $I(V)$  et puissance-tension  $P(V)$  d'une cellule photovoltaïque en utilisant le modèle sous conditions standards.



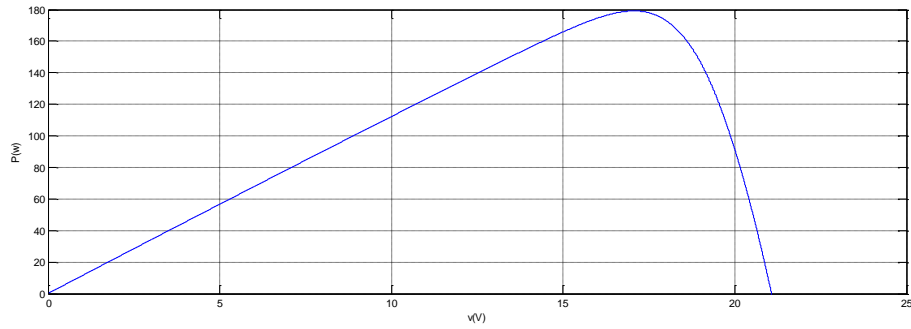


Figure III.14: Caractéristique I(V) et P(V) d'une cellule photovoltaïque

### III .5.2.Commentaire sur les courbes:

-la courbe I(V)

On remarque une augmentation du courant contrairement à la tension, qui reste constante

-la courbe P(V):

On remarque une augmentation de la puissance Mais la tension reste constante

### III .5.3.Influence de la température et de l'éclairement :

#### III .5.3.1.Influence de l'éclairement :

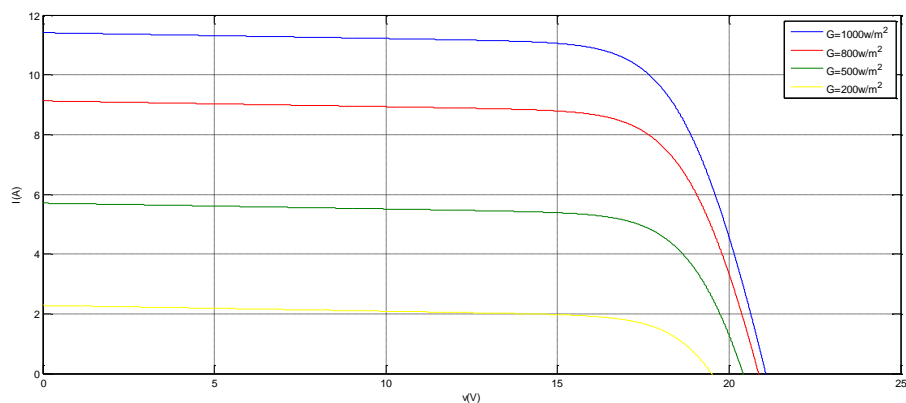
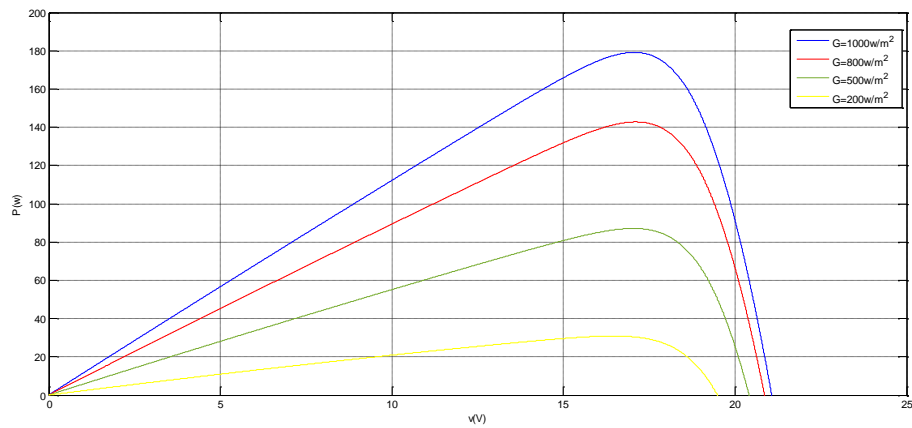


Figure III.15: Influence de l'éclairement sur la caractéristique courant-tension

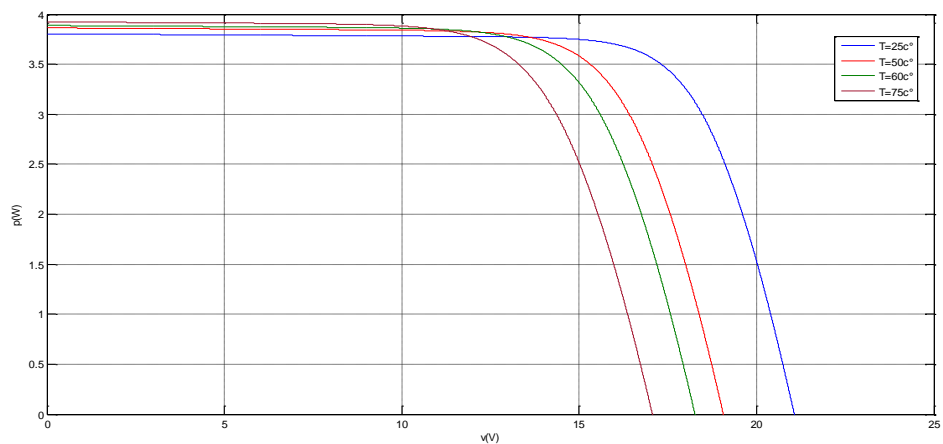


**Figure III.16: Influence de l'éclairement sur la caractéristique puissance-tension.**

### III .5.3.2 Commentaire sur les courbes:

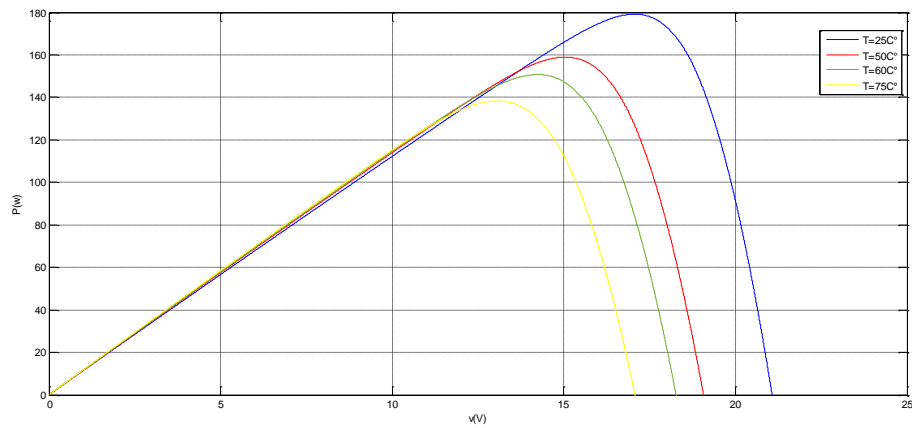
On remarque que la tension maximale  $V_m$  correspondante à la puissance maximale ne varie que très peu en fonction de l'éclairement

### III .5.3.3. Influence de la température:



**Figure III.17: Influence de la température sur la caractéristique courant-tension**

L'expérience montre que la tension de circuit ouvert d'une cellule solaire diminue avec l'augmentation de la température de la cellule, Nous remarquons que la température influe négativement sur la tension de circuit ouvert, la température entraîne une diminution de la tension de circuit ouvert.

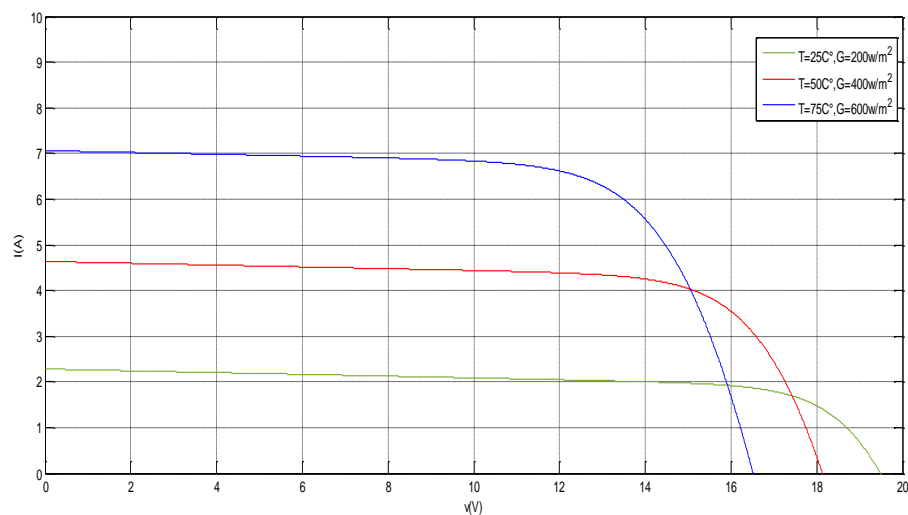


**Figure III.18: Influence de la température sur la caractéristique puissance-tension.**

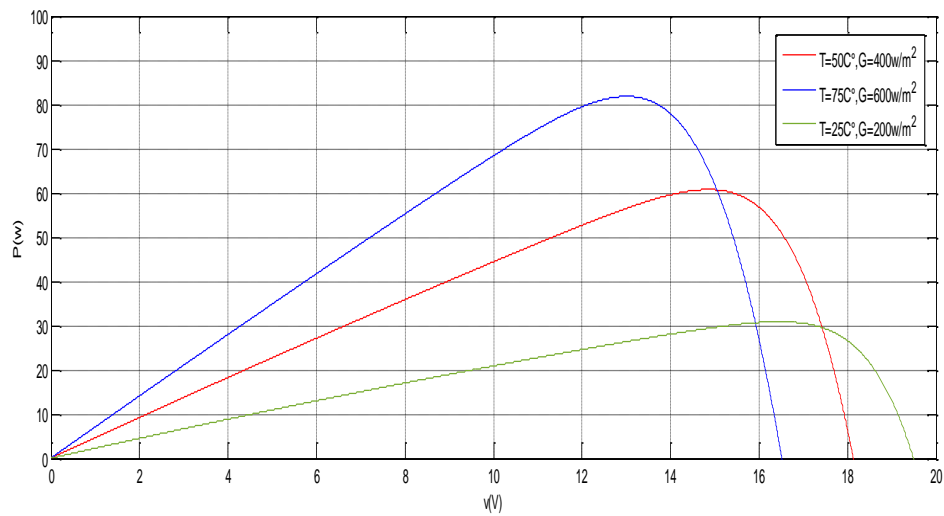
On remarque La puissance de sortie est réduite par une augmentation de la température de panneau.

la puissance maximale du générateur subit une diminution lorsque la température augmente.

#### III .5.3.4. Influence de la température et de l'éclairement :



**Figure III.19: Influence de la température et l'éclairement sur la caractéristique courant-tension**



**Figure III.20: Influence de la température et l'éclairement sur la caractéristique puissance –tension**

On remarque Le courant électrique est directement proportionnel à la quantité de rayonnement solaire. Avec un léger changement de tension.

On remarque que lorsque la température et le rayonnement augmentent, l'énergie augmente

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

Dans ce chapitre, nous avons présenté une simulation d'une cellule photovoltaïque à simple jonction et d'une cellule à trois jonctions avec l'effet de la température et de l'éclairage, nous sommes donc arrivés à la conclusion que la cellule solaire à trois jonctions est bien meilleure que la simple jonction cellule en termes de rendement, et nous avons également conclu que la température et l'éclairage affectent le rendement de la cellule

# **Conclusion Générale**





## Conclusion Générale

Les développements récents dans le domaine du photovoltaïque à semi-conducteur ont été introduits et des stratégies possibles pour ces améliorations du rendement ont été exposées. Environ 40% de rendement a été obtenu avec des cellules solaires multi-jonctions. Pour améliorer encore l'efficacité, on recherche actuellement dans les semi-conducteurs à bande interdite directe fortement absorbants et de comptabiliser la dissipation d'énergie dans ces matériaux.

Ces simulations ont fourni différents types de caractéristiques de cellules solaires, telles que les cellules solaires mono- et tri-jonction. Ces cellules solaires sont conçues à l'aide d'une diode.

Les facteurs qui ont affecté les performances de la cellule solaire ont été identifiés. Tels que la température, le rayonnement solaire, l'énergie de la bande interdite.

Les cellules solaires à triple jonctions sont considérées comme un développement majeur dans le domaine de l'énergie solaire, car elles ont un rendement élevé et de bons rendements par rapport aux cellules à mono jonction, mais le problème des cellules à triple jonctions reste qu'elles sont chères et que les scientifiques sont encore sous-développement.

# **BIBLIOGRAPHIE**

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] F. HEROGUEL, "Les Cellules Photovoltaïques," Ecole Normale Supérieure, Lyon Epreuvede projet, 2007 .
- [2] A. JELALI « interconnexion d'un système photovoltaïque sur le réseau électrique », Thèse de Doctorat, L'université du Québec à Trois-Rivières. 2012
- [3] S. ABOUDA, « Contribution à la commande des systèmes photovoltaïques :
- [4] Électricité photovoltaïque <http://www.outilesolaires.com/pv/default.htm>
- [5] <https://www.nouvelr-energie.com>
- [6] S .Petibon, « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques », Thèse de doctorat de l'université de Toulouse, Janvier 2009
- [7] S.Moussa, A.Kaabèche et M. Belhamel, 'Evaluation des Performances d'un Système. Hybride de Production d'Electricité', Revue. Energie Renouvelable, 1999, pp 247-250.
- [8] H. BELGHITRI et H. ' Modélisation, simulation et optimisation d'un système hybride éolien-photovoltaïque' mémoire de magister, 2009
- [9] <https://www.nouvelr-energie.com>
- [10] Connolly, J. P., Mencaraglia, D., Renard, C. and Bouchier, D. 'Designing III-V multijunction solar cells on silicon'. Prog. Photovolt :Res. Appl., 22: 810–820. doi:10.1002/pip.2463, 2014 .
- [11] Yousefi, A.; Kabutov, Q., "High efficiency multijunction solar cells :Overview of important developments," in Computer Applications and Industrial Electronics (ISCAIE), 2012 IEEE Symposium on , vol., no ., pp.14-19, 3-4 Dec. 2012 .
- [12] Narottam Das, Hendy Wongsodihardjo, Syed Islam "Modeling of multijunction photovoltaic cell using MATLAB/Simulink to improve the conversion efficiency" Renewable Energy Journal, vol. 74, pp. 917-924 .Feb. 2015 .
- [13] Andreas W. Bett, Frank Dimroth, Wolfgang Guter, Raymond Hoheisel 'Eduard Oliva, Simon P. Philipps, Jan Schone, Gerald Siefer, Marc Steiner, Alexander Wekkeli, Elke Welser, Matthias Menusel, Wolfgang Kostler, Gerhard Strobl "Highest Efficiency Multi-Junction Solar Cell for Terrestrial and Space Applications" Fraunhofer ISE 'Heidenhofstrasse 2, 79110 Freiburg, Germany. September 2009 .
- [14] Kinsey G, Hebert P, Barbour K, Krut D, Cotal H, Sherif R .Concentrator multijunction solar cell characteristics under variable intensity and temperature". Prog Photovoltaics Res Appl 2008;16:503–8 .
- [15] N.A Kalyuzhnyy, A.S Gudovskikh, V.V Evstropov, and V.M Lantratov 'Current flow and efficiency of GE P-N junctions in tripple junction GAINP/GA(IN)AS/GE solar cells for space applications," Proc. EUPVSEC, pp. 865-871, St-petersburg academic University, St-petersburg, Russia, 2010 .

- [16] Dexter Johnsonn “Quantum Dot Solar Cells Break ConversionEfficiency Record” , IEEE Spectrum, May 2014 .Yusivar F, Tito B. “Solar cell MPPT technique based on PI Controller. ”Adv Mater Res 2013;608–609:89–96
- [17] A. T.SINGO ‘ Système d’alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l’habitat énergétiquement autonome’ Thèse de doctorats, université Henri Poincaré, Nancy-I,2010.
- [18] H.-L. Tsai, C.-S.Tu, and Y.-J. Su, “Development of generalized photovoltaic model using MATLAB/SIMULINK,” in Proceedings of the world congress on Engineering and computer science, 2008, vol. 2008, pp. 1–6.
- [19] D. Sera, “Real-time modelling, diagnostics and optimised MPPT for residential PV systems.” These Dr.Aalborg University, 2009.
- [20] D. Rekioua and E. Matagne, Optimization of photovoltaic power systems. book, Springer-Verlag London Limited 2012.
- [21] HELALI KAMELIA ,Modélisation D’une Cellule Photovoltaïque , Etude Comparative , Université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou, Thèse de Magister 2012 .
- [22] PETIBON, S., Thèse de Doctorat Université Toulouse III (2009).
- [23] N. H. Karam, R. R. King, et al. "Recent Developments in High-Efficiency Ga<sub>0.5</sub>In<sub>0.5</sub>P/GaAs/Ge Dual- and Triple-Junction Solar Cells: Steps to Next-Generation PV Cells". Solar EnergyMaterials and Solar Cells, 2000
- [24] Les technologies de fabrication des modules. Photovoltaïque.info. [Cited: 12 21, 2011.] <http://www.photovoltaïque.info/Les-differentes-technologies.html>.
- [25] ADEME. Energies et matières renouvelables - Solaire photovoltaïque. Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie. [Cited: 01 12, 2012.] [http:// ademe.fr/servlet/KBaseShow?sort=-1&cid=96&m=3&catid=13924](http://ademe.fr/servlet/KBaseShow?sort=-1&cid=96&m=3&catid=13924).
- [26] Wu, J. When group-III nitrides go infrared: New properties and perspectives. Journal of Applied Physics.2009, Vol. 106, 011101.
- [27] Pereira, S., et al. Compositional dependence of the strain-free optical band gap in In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N layers. Applied Physics Letters.2001, Vol. 78, 2137.
- [28] Bechstedt, F., et al. Energy gap and optical properties of In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N. Physica Status Solidi a. 2003,Vol. 195, 628.
- [29] Ruterana, P., et al. Nitride Semiconductors: Handbook on Materials and devices. s.l.: Wiley-VCH VerlagGmbH, 2003. 978-3527403875.
- [30] Kribus A., et al. Practical cogeneration with concentrating PV, 4th International Conference on Concentrated Solar Concentrators for the Generation of Electricity or Hydrogen (ICSC-4), El Escorial, Spain, 2007.
- [31] K. Nishioka, et al. Evaluation of temperature characteristics of high-efficiency In-GaP/InGaAs/Ge triple junction solar cells under concentration, Solar energy materials and solarcells 85 (2005) 429–436.
- [32] M. Yamaguchi, et al. Super high-efficiency multi-junction and concentrator solar cells,

Solar Energy Materials and Solar Cells 90 (2006) 3068–3077.

[33] G.S. Kinsey, et al. Concentrator multi-junction solar cell characteristics under variable intensity and temperature, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 16 (2008) 503–508.

[34]. N. Abouchabana, « Etude d'une nouvelle topologie buck-boost appliquée à un MPPT », Mémoire de Magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2009

[35] A. Oi, Design and simulation of photovoltaïque water pumping système, Thèse de Magister de l'université California, USA, Septembre 2005.

[36] A. Rufer, P. Barrade, « Cours d'électronique de puissance Conversion DC/DC », octobre 2001, EPFL, 90 pages. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.

[http://leiwww.epfl.ch/cours/cvs\\_dcdc.pdf](http://leiwww.epfl.ch/cours/cvs_dcdc.pdf)

[37] SKENDER Ayoub, «Etude et simulation des cellules solaires à triples-jonctions à concentration à base des semi-conducteurs III-V», MÉMOIRE DE MAGISTER, UNIVERSITE MOULOUD MAAMRI DE TIZI-OUZOU, 2016.