

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

*Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj*

*Faculté des Sciences et de la technologie*

*Département Génie Mécanique*

# **Mémoire**

*Présenté pour obtenir*

**LE DIPLOME DE MASTER**

**FILIERE : Génie Mécanique**

**Spécialité : Énergétique**

Par

- Benchina Hamza
- Babouche Elhassane

*Intitulé*

**Etude comparative des performances photovoltaïques des  
différentes technologies de cellules photovoltaïques**

*Devant le Jury composé de :*

*Nom & Prénom*

*Grade Qualité*

*Etablissement*

*Dr. SLIMANI Wahiba*

*MCA Président*

*Univ-BBA*

*MCA Encadreur*

*Univ-BBA*

*MCA Examineur*

*Univ-BBA*

*Année Universitaire 2021/2022*

---

# **R**emerciements

*On remercie tout d'abord notre dieu Allah, le tout puissant de nous avoir donné la force et l'audace pour dépasser toutes les difficultés.*

*On a le grand plaisir de réaliser notre mémoire de Master sous la direction de Dr. Slimani wahiba un grand remerciement à elle, particulièrement pour ses encouragements, ses conseils, et sa disponibilité durant la réalisation de ce travail.*

*Nos remerciements s'adressent aussi aux enseignants, pour avoir accepté d'examiner ce travail et participer au jury.*

*On exprime nos sincères remerciements également aux responsables de laboratoire de génie mécanique Mr. Kamel Zitouni et Mr. Amer Briki pour ses aides et ces conseils.*

*Enfin, On remercie toute personne ayant aidé de près ou de loin pour réaliser de ce travail.*

---

# Dédicaces

*On dédie ce modeste travail, spécialement,*

*À nos chers parents, Aucune dédicace ne saurait exprimer notre grand gratitude pour les sacrifices qu'ils ont faits pour notre éducation. On prie à Allah pour qu'il vous accorde une bonne santé et une longue vie.*

*À nos sœurs et nos frères,*

*À nos grandes familles pour leurs encouragements,*

*Benchina Hamza /Baabouche Elhassane*

## Sommaire

<b><u>Introduction générale</u></b> .....	8
Références .....	9
<b><u>Chapitres I : Les Technologies de Conception des Cellules Photovoltaïques</u></b> .....	10
I.1. Introduction .....	11
I.2 La cellule photovoltaïque .....	11
I.2.1 Principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques .....	12
I.2.2 Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque .....	12
I.2.2.1 Tension de circuit ouvert $V_{CO}$ (pour $I_{CC} = 0$ ) .....	13
I.2.2.2 Courant de court-circuit $I_{CC}$ (pour $V_{CO} = 0$ ).....	13
I.2.2.3 La puissance maximale d'une cellule PV.....	13
I.2.2.4 Facteur de forme .....	13
I.2.2.5 Rendement $\eta$ .....	13
I.2.2.6 La caractéristique courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V) d'une cellule photovoltaïque .....	13
I.3. Les technologies principales de cellules photovoltaïques.....	14
I.3.1 Les cellules au silicium cristallin .....	15
I.3.2 Les cellules à couches minces ou hétérojonction.....	16
I.3.2.1 Le tellurure de cadmium (CDTE) .....	17
I.3.2.2 Le cuivre indium gallium sélénium CIGS.....	17
I.3.2.3 L'Arséniure de Gallium (Ga-As) .....	17
I.3.3 Les cellules photovoltaïques organiques .....	17
I.4. Conclusion.....	17
I.5. Références.....	18
<b><u>Chapitre II : Les Nouvelles Techniques de Conception des Cellules Photovoltaïques</u></b> .....	19
II.1. Introduction .....	20
II.2. Technologie du Silicium micromorphe .....	20
II.3. Technologie du Silicium polycristallin en couche mince.....	21
II.4. Cellules photovoltaïque à colorant photosensible .....	22
II.5 Cellules à polymères.....	23
II.6 Cellules hybrides.....	24
II.6.1 Les applications des cellules hybrides .....	25

II.7. Cellules à pérovskites .....	22
II.8 Cellules photovoltaïques électrochimiques .....	26
II.9. Etude et Comparaison .....	26
II.10 Conclusion.....	28
II.11 Références.....	28
<b>Chapitre III : Modélisation et Simulation d'une cellule et d'un Module Photovoltaïque par Matlab Simulink.....</b>	<b>31</b>
III.1. Introduction.....	32
III.2. Matlab Simulink.....	32
III.3 Caractéristiques électroniques d'une cellule photovoltaïque .....	33
III.4. Simulation d'un système électrique de mesure d'une cellule photovoltaïque ...	34
III.4.1 Ajustement des paramètres du montage.....	35
III.4.2. Effet de L'éclairage E sur le courant I et la puissance P de la cellule ph .....	35
III.4.2.1 Interprétation.....	36
III.4.3. Effet de La Température T sur le courant I et la puissance P de la cellule ph .....	36
III.4.3.1 Interprétation .....	37
III.4.4. Effet de Résistance de séries $R_s$ sur le courant I et la puissance P de la cellule ph .....	38
III.4.4.1 Interprétation .....	39
III.5. Simulation de montage de mesure de module photovoltaïque <b>Error! Bookmark not defined.</b>	0
III.5.1 Ajustement des paramètres du module photovoltaïque LX190M.....	41
III.5.2 Caractéristiques I-V et P-V du panneau PV LX190M.....	41
III.5.3. Etude et Interprétation.....	40
III.6. Conclusion : .....	42
III.7. Références : .....	42
Conclusion générale.....	44
Résumé.....	45

## **Liste des figures :**

**Figure( I.1):** L'effet photovoltaïque [4].

**Figure( I.2) :** Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque [5].

**Figure (I.3) :** Caractéristiques I(V) et P(V) d'une cellule photovoltaïque[10].

**Figure( I.4):** Les principales technologies de cellules photovoltaïques.

**Figure( I.5):** Cellules au silicium cristallin [11].

**Figure( I.6):** Structure d'une cellule à hétérojonction et son image MEB [12].

**Figure( II.1) :** Cellules solaires photovoltaïque micromorphe.

**Figure (II.2):** Panneaux de Si polycristallin.

**Figure ( II.3) :** Cellule photovoltaïque à Silicium en couche mince.[22]

**Figure( II.4) :** Cellules solaires à colorant photosensible [24].

**Figure (II.5) :** Des cellules hybrides à colorant intégrées sur les fenêtres et les murs [26].

**Figure (II.6) :** Principe d'une cellule organique [27].

**Figure (II.7) :** Cellule photovoltaïque Hybride, coupe transversale[28].

**Figure(II.8) :** Structure hybride de la pérovskite [23].

**Figure (III.1) :** Interface Simulink/Matlab.

**Figure(III.2) :** Model électrique d'une cellule photovoltaïque.

**Figure (III.3) :** Montage de mesure des paramètres électrique de la cellule photovoltaïque par Matlab Simulink.

**Figure (III.4) :** Paramètres d'un PV LX-190M sous Matlab /Simulink.

**Figure (III.5) :** Caractéristiques P-V Pour différents éclaircment ( $T=25C^{\circ}$ ,  $R_s= 0.001\Omega$ ).

**Figure (III.6) :** Caractéristiques I-V Pour différents éclaircment ( $T=25C^{\circ}$ ,  $R_s= 0.001\Omega$ ).

**Figure (III.7) :** Caractéristiques P-V Pour différents température pour ( $E = 1000 \text{ w/m}^2$ ,  $R_s= 0.001\Omega$ ).

**Figure (III.8) :** Caractéristiques I-V Pour différents température pour ( $E = 1000 \text{ W/m}^2$ ,  $R_s= 0.001\Omega$ ).

**Figure (III.9) :** Caractéristiques P-V Pour différents Résistance ( $T=25C^{\circ}$ et  $E=1000\text{W/m}^2$ ).

**Figure (III.10) :** Caractéristiques I-V Pour différents Résistance ( $T=25C^{\circ}$ et $E=1000\text{W/m}^2$ ).

**Figure (III.11) :** Schéma d'un Système de mesure du module photovoltaïque LX190M.

**Figure (III.12) :** le paramétrage du panneau solaire LX190M sur Matlab Simulink.

**Figure (III.13) :** Caractéristiques I-V et P-V du panneau PV LX190M.

## **Liste des tableaux :**

**Tableaux [III.1] :** Caractéristique électrique d'un module photovoltaïque LX-190M.

## Introduction générale

---

L'ensemble des pays à travers le monde sont de plus en plus confrontés à des enjeux énergétiques et environnementaux, très sérieux, le long de leurs histoire.

Les ressources énergétiques primaires sont rares, et le réchauffement climatique causé par l'effet de serre s'agrandie encors plus. La réponse à ces deux questions est un véritable défi, elle nécessite d'agir tout en développant les énergies renouvelables et en les consommant avec modération.

L'énergie photovoltaïque est une source d'énergie inépuisable car elle est générée directement à partir du soleil. Son développement est une réponse nécessaire aux problèmes énergétiques actuels. En revanche, elle est limitée par son coût élevé et son rendement relativement faible. La réduction des coûts et l'amélioration des performances sont les principaux objectifs aux développeurs.

La première cellule solaire a été réalisée à partir de petits lingots de sélénium, en 1883 [1], puis elle s'est développée en silicium, pour un rendement de 6% [2].

Les recherches n'ont pas cessé de l'augmenter, ils visent à atteindre 31 % vers l'année 2035 [3].

En réalité, au niveau de la fabrication, leur rendement ne dépasse pas 24 %, et en plus, leurs coûts, qui empêche sa large utilisation, en raison de sa nécessité économique, est passé de 350 dollars par watt en 1956 à 50 cents par watt actuellement [4].

Depuis son invention, plusieurs générations ont été développées. Dans notre thèse on a fait une étude comparative sur les différentes technologies utilisées dans ce domaine. Et en pratique, on a modélisé un module photovoltaïque, d'une manière compréhensible, pour étudier ces performances, en variant les principales caractéristiques régissant, son rendement et sa durée de vie. Cette étude simpliste par Matlab simulink, est faite de telle manière à comprendre le principe de fonctionnement des cellules et des modules photovoltaïques.

Dans ce manuscrit, nous avons exposé dans le premier chapitre : Des généralités sur les cellules photovoltaïques depuis leur invention jusqu'à nos jours. Dans le deuxième chapitre on a étudié les nouvelles techniques de conception des cellules PV qui sont encore, au cours de développement de leurs performances photovoltaïques.



## Introduction générale

---

Dans la partie expérimentale on a discutés l'effet des paramètres extérieurs sur les performances de la cellule photovoltaïque, comme l'éclairage et la température et aussi l'effet de la valeur de résistance série sur le courant fournit et la puissance produite, par le module photovoltaïque, le LX190M.

Le montage de mesure conçu est réalisé par Matlab Simulink. On a étudié également, les caractéristiques (I-V) et (P-V) pour des conditions extérieurs standards, de température et d'éclairage du même module PV.

Et enfin on a terminé par une conclusion générale où sont résumés les principales remarques et interprétations des résultats obtenus, et les perspectives projetées pour cet axe de recherche.

### **Références :**

- [1] Fraas L.M, History of Solar Cell Development, Low-Cost Solar Electric Power, Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-07530-3\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-07530-3_1), 2014.
- [2] Ranabhat K, Patrikeev. L, & all, An Introduction to solar cell technology, Journal of Applied Engineering Science, 405, 481 – 491,2016.
- [3] Sumedha R.G. Weliwaththage, Udara S.P.R. Arachchige, Solar Energy Technology, Journal of research technology and engineering, vol1, Issue 3, 2020.
- [4] Fahrenbruch. Alan L, Bube Richard.H, Fundamentals of solar cells: photovoltaic solar energy conversion, Academic press, 1983.

**Chapitres I :**  
**Les Technologies de Conception des Cellules**  
**Photovoltaïques**

### I.1. Introduction :

Une heure d'énergies fournies par le soleil à la terre, peut couvrir la consommation énergétique mondiale pour un an. L'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) a calculé qu'une surface de 145000 km<sup>2</sup> (soit 4 % de la surface des déserts les plus arides) serait suffisante pour couvrir la totalité des besoins en électricité de la planète.[1].

Les premiers panneaux photovoltaïques destinés à la production d'électricité ont été développés industriellement par les laboratoires Bell aux USA dans les années 1960 [2].

### I.2 La cellule photovoltaïque :

C'est l'élément actif du panneau solaire, elle produit l'électricité à partir de l'effet photovoltaïque. Le matériau cellulaire capte l'énergie lumineuse (photons) et la convertit en énergie électrique, par un mouvement de charges positives et négatives, lorsqu'elles sont envoyées à un circuit externe, elles prennent la forme d'un courant continu.

De manière générale, les cellules photovoltaïques sont une sorte d'un empilement de matériaux :

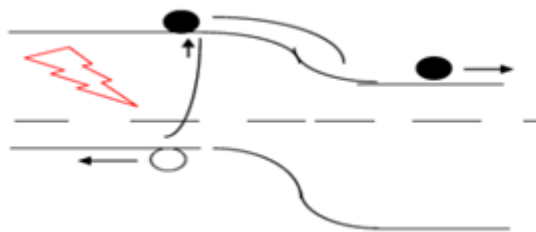
- 1- Absorbeur :** constitué d'un matériau accepteur d'électrons et d'un second matériau **Donneur** d'électrons, formant une jonction donneur-accepteur.
  
- 2- Les contacts métalliques avant et arrière :** ou circulent les charges (+) et (-) qui forme le courant généré.
  
- 3- Des couches supplémentaires :** Comme un anti-reflet ou une couche plus fortement dopée permettant d'améliorer les performances de la cellule : meilleure absorption de la lumière plus, meilleure diffusion des porteurs de charges dans le matériau ...etc.

Ce qui différencie une technologie photovoltaïque à une autre, c'est essentiellement la qualité de l'absorbeur, ses propriétés physico-chimiques qui dépendent des procédés de dépôt utilisés, les caractéristiques des autres composants de la cellule : couche anti-reflet, électrodes, ainsi que l'architecture globale : type de substrat, les épaisseurs, positionnement des électrodes etc [3].

**I.2.1 Principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques :**

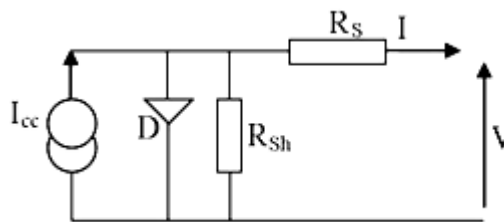
Le phénomène photovoltaïque a été découverte en 1839 par Antoine Becquerel, dans les matériaux semi-conducteurs, lorsqu'ils reçoivent un rayonnement solaire.

Quand un photon incident interagit avec les électrons du matériau, il cède son énergie  $h\nu$  à l'électron qui se retrouve libéré de sa bande de valence et subit donc le champ électrique intrinsèque. Sous l'effet de ce champ, l'électron migre vers la face supérieure laissant place à un trou qui migre en direction inverse. Des électrodes placées sur les faces supérieure et inférieure permettent de récolter les électrons et de leur faire réaliser un travail électrique pour rejoindre le trou de la face antérieure [4].



**Figure( I.1):** L'effet photovoltaïque [4].

**I.2.2 Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque :**



**Figure( I.2) :** Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque [5].

La cellule PV est formée par le courant du court circuit  $I_{cc}$  , la diode  $D$ , les résistances : de fuite  $R_{sh}$  et série  $R_s$ .

La dépendance du courant de court-circuit  $I_{cc}$  avec l'éclairement  $E$  , d'unité  $W/m^2$ , est donnée par la formule[5]:

$$I_{cc} = 0.005 \times E - 0.013 \tag{1.1}$$

Cette caractéristique montre que nous pouvons déduire l'intensité de l'éclairement par une simple mesure du courant de court-circuit ( $I_{CC}$ ) [6].

### **I.2.2.1 Tension de circuit ouvert $V_{CO}$ (pour $I_{CC} = 0$ ) :**

On l'obtient en branchant directement un voltmètre aux bornes de la cellule [7].

### **I.2.2.2 Courant de court-circuit $I_{CC}$ (pour $V_{CO} = 0$ ) :**

Tension nulle correspondant au courant maximum, on obtient sa valeur en branchant un ampèremètre aux bornes de la cellule [7].

### **I.2.2.3 La puissance maximale d'une cellule PV [7] :**

Une cellule PV possède un point pour lequel sa puissance débitée est maximale. On la nomme  $P_{max}$ .

$$P_{max} = I_{max} \times V_{max} \quad (1.1)$$

### **I.2.2.4 Facteur de forme [7] :**

On appelle facteur de forme  $f$  le rapport entre la puissance maximale fournie par la cellule  $P_{max}$ , dans des conditions d'éclairement, de température et de vitesse de circulation de l'air ambiant donnés, et le produit du courant de court-circuit  $I_{CC}$  par la tension de circuit ouvert  $V_{CO}$  (c'est à dire la puissance maximale d'une cellule idéale) [7]:

$$f = \frac{P_{max}}{V_{CO} \times I_{CC}} \quad (1.2)$$

### **I.2.2.5 Rendement $\eta$ [8]:**

Le rendement de conversion photovoltaïque est défini comme le rapport entre la puissance maximale produite par la cellule PV et la puissance du rayonnement solaire incident :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_i} \quad (1.3)$$

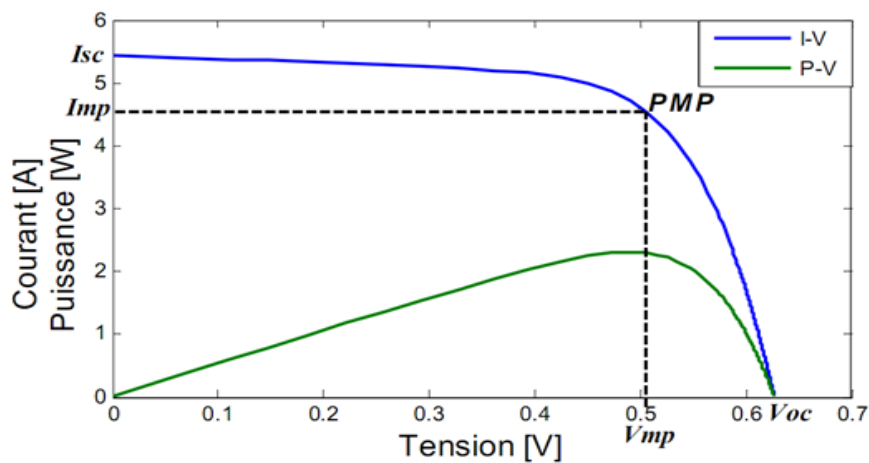
$$P_i = G.S \quad (1.4) [9]$$

$G$  : étant l'éclairement incident global en ( $W/m^2$ ) et  $S$  la surface active de la cellule ( $m^2$ ).

### **I.2.2.6 La caractéristique courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V) d'une cellule photovoltaïque :**

L'étude de l'évolution du courant produit et de la puissance délivrée par rapport à la tension  $I=f(V)$  et  $P=f(V)$ , d'une cellule photovoltaïque, pour un éclairement et une température choisis, nous

permet d'évaluer les performances et le comportement électrique de cette cellule PV.



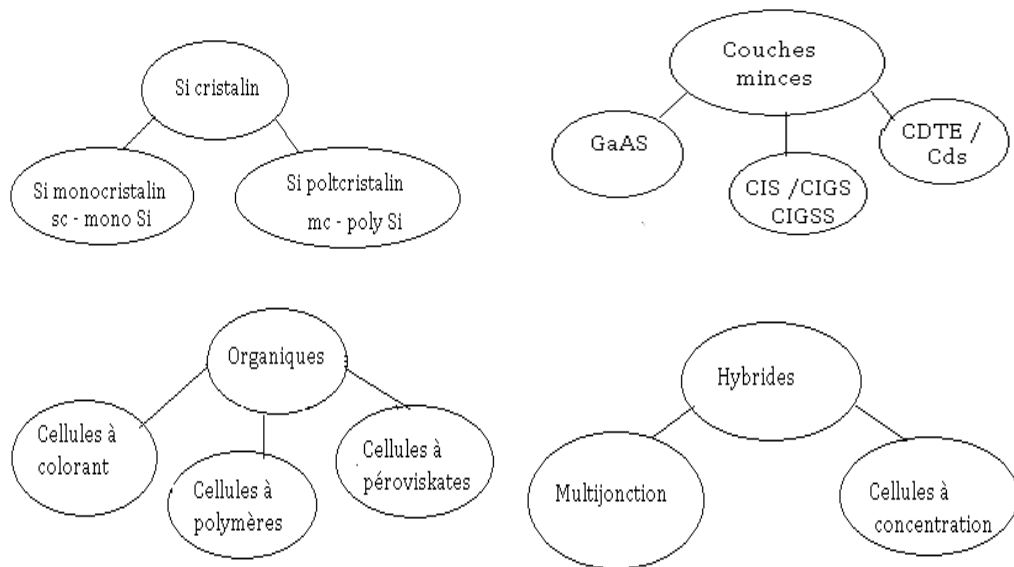
**Figure (I.3) :** Caractéristiques I(V) et P(V) d'une cellule photovoltaïque [10].

### **I.3. Les technologies principales de cellules photovoltaïques :**

On peut distinguer trois grandes familles de cellules solaires

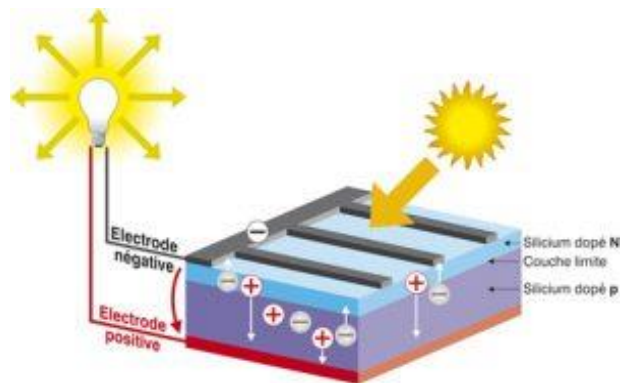
- **Les cellules au silicium cristallin :** Ou le silicium dopé est l'élément actif. Cette technologie est la plus ancienne elle représente la grande totalité des parts de marché, du fait de sa robustesse et de ses performances (rendement modules allant de 12 à 20 % et durée de vie presque 30 ans) [3].
- **Les cellules hétérojonctions (de couches minces) :** dont l'épaisseur peut varier de quelques dizaine de micromètres pour absorber l'essentiel du rayonnement solaire, leurs rendement est légèrement inférieur : de 7 à 13 %, ils utilisent des couches absorbantes polycristallines ou amorphes, concerne actuellement le a-Si hydrogéné, le GaAs, le CdTe, CuInSe<sub>2</sub> et sa variante Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> : le CIGS. mais à cause de la nocivité de ces matériaux et leur coût élevé, ce genre de cellules ne dépasse pas 15% du marché [9].
- **Les cellules photovoltaïque organique :** Ce sont des cellules à très bas coût, avec un rendement de l'ordre de 3 à 5 %, leur durée de vie reste encore limitée [1].

- **La famille des hybrides :** Leurs procédé de fabrication fait appèle à plusieurs technologies de différente principe.



**Figure( I.4):** Les principales technologies de cellules photovoltaïques.

### I.3.1 Les cellules au silicium cristallin :

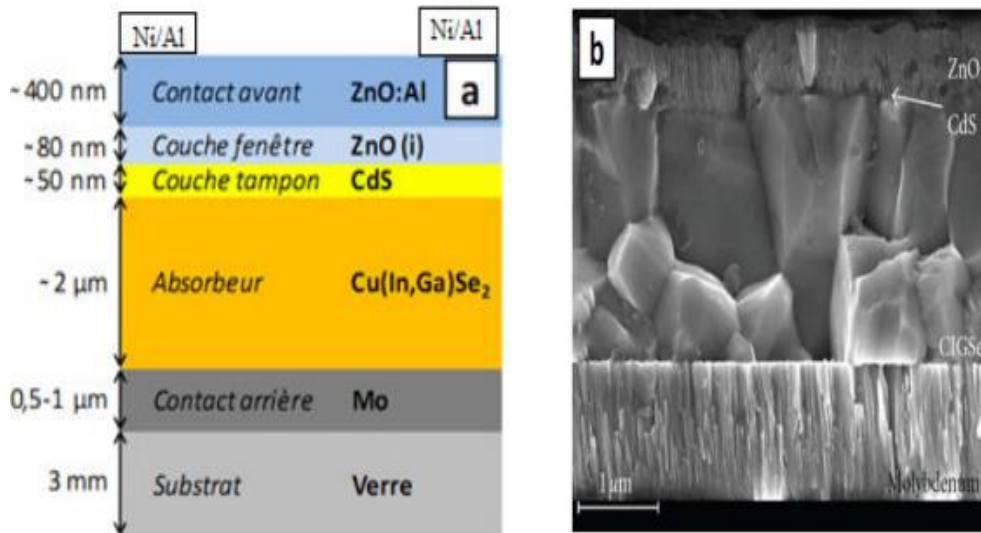


**Figure( I.5):** Cellules au silicium cristallin [11].

Les cellules au silicium cristallin sont fabriquées à partir de silicium pure, une couche est dopée par des atomes de bore et la deuxième couche est dopée par des atomes de phosphore afin de créer des zones chargées inversement et pour former la jonction donneur-accepteur. Cette famille regroupe la catégorie du silicium monocristallin (sc-Si) où l'arrangement des atomes est homogène, et celles du silicium polycristallin (polc-Si) lorsqu'il est composé de plusieurs

réseaux cristallins juxtaposés. Le rendement moyen pour les cellules : mono 16 à 24 %, et poly 14 à 18 % [3].

### I.3.2 Les cellules à couches minces ou hétérojonction :



**Figure( I.6):** Structure d'une cellule à hétérojonction et son image MEB [12].

Le besoin de perfectionner les propriétés des cellules solaires a poussé l'apparition d'une diversité de technologies et l'utilisation des complexes matériaux en couches minces.

Les plus courantes sont [3] :

- Le **Tellure de Cadmium (CdTe)**, qui présente l'avantage d'une très grande stabilité dans le temps et d'un coût modéré.
- Le **Cuivre/Indium/Sélénium (CIS)**, le **Cuivre/Indium/Gallium/Sélénium (CIGS)** et le **Cuivre/Indium/Gallium/Diséléride/Disulphide (CIGSS)**, qui présentent les rendements les plus élevés parmi les couches minces mais à un coût plus élevé.
- L'**Arséniure de Gallium (Ga-As)** dont le grand rendement et le coût très élevé réserver pour le domaine spatial.

Leurs industrialisation est moins avancée, les matières premières sont limitées, leur recyclage est plus complexe, et ajoutant que ces matériaux ont une toxicité élevée.



### **I.3.2.1 Le tellurure de cadmium (CDTE) :**

A un moment récent, la catégorie CdS/CdTe est très prometteuse des cellules solaires hétérogènes. Le CdTe d'énergie de gap  $E_g = 1,45 \text{ eV}$ , est une valeur très bonne pour la conversion photovoltaïque, très proche de l'optimum théorique  $E_g = 1.4 \text{ eV}$  [13]

La méthode de fabrication est relativement facile et son coefficient d'absorption est bon dans le spectre visible. Le rendement de la cellule CdS / CdTe a été amélioré significativement, son rendement de conversion maximal est de 18.7% [14]. Le CdTe associé avec le Cds est plus facile à déposer donc, il est approprié à la production de module PV de surface importante. Mais, sa toxicité reconnue, recule son large utilisation [15].

### **I.3.2.2 Le cuivre indium gallium sélénium CIGS :**

Leurs rendements de conversion qui s'approche à 20.8 % [9], les positionnent, comme le CdTe, au dessus des cellules de silicium en termes de compromis coût-rendement. L'amélioration de la performance de ces cellules s'est appuyée sur la chimie des chalcopyrites : famille de minéraux faisant référence au  $\text{CuFeS}_2$ , pour l'élargissement de la bande interdite, en plus cette filière possède certaines caractéristiques exceptionnelles telles que: le coefficient d'absorption qui a presque le même seuil que celui du (c-Si) mais il est 100 à 1000 fois plus fort dans la gamme : de 1,1 à 2,6 eV, ce qui permet une épaisseur d'absorbeur de 1 à 2  $\mu\text{m}$  [9].

### **I.3.2.3 L'Arséniure de Gallium (Ga-As) :**

Matériau monocristallin fabriqué à partir du semiconducteur GaAs dit multijonction (III – V), de rendement de cellule de l'ordre de 44 %, utilisé pour les application spatiale à cause de son cout élevé. Leurs rendement élevé s'obtient par l'utilisation de la fenêtre AlGaAs pour la réduction de la vitesse de recombinaison en surface ainsi que par l'amélioration de la qualité du GaAs [17].

### **I.3.3 Les cellules photovoltaïques organiques :**

Pour ce genre de cellules photovoltaïques, la couche active est constituée de molécules organiques, un polymère. La première cellule PV a fait apparition en 1985 de rendement de conversion faible. Ces cellules ont une forte absorption optique, elles sont fine, flexible, moins chères à produire tout en étant résistantes, mais leurs rendement ne dépasse pas 10% [16].

## **I.4. Conclusion :**

Nous avons exposé dans ce chapitre, les technologies courantes utilisée pour la conception des cellules photovoltaïques, nous avons tout d'abord définit la cellule photovoltaïque, son fonctionnement son schéma électrique équivalent, son principe de fonctionnement, ses grandeurs

caractéristiques et ses paramètres, ainsi les différentes filières de conception des cellules photovoltaïques.

Ces filières sont en progression étonnante d'où nous allons citer dans le prochain chapitre les nouvelles inventions dans ce domaine et faire notre comparaison sur la base de l'efficacité de chaque méthode, les matériaux utilisés, leurs disponibilité, et le rendement atteints.

### **1.5. Références :**

- [1] Zouhair El Jouad, « Réalisation et caractérisation des cellules photovoltaïques organiques », Thèse de doctorat de l'université d'Angers, 2016.
- [2] A. Labouret et al : « Cellules solaires : Les bases de l'énergie photovoltaïque », Collection: ETSF, ETSF, 5ème Edition, 2010.
- [3] <https://www.technologies-de-cellules-solaires-photovoltaïques>.
- [4] Arras Aida , Caractérisation des cellules photovoltaïques à base d'hétérojonction de silicium a-Si/c-Si, Master en physique, Université abou-bekr belkaid, Tlemcen, 2018.
- [5] S.M. Sze, 'Physics of Semiconductors Devices', A. Wiley, Interscience Publication, New York, 1981.
- [6] T. Mrabti et al, Modélisation des propriétés électriques et caractérisation des panneaux photovoltaïques, Revue des Energies Renouvelables Vol. 12 N°1 (2009) 105 – 116.
- [7] M. Moulay-Amar et M. Loghouini, « Etude et réalisation d'un système de poursuite de point de puissance maximale à base de microcontrôleur destiné à une installation photovoltaïque », Mémoire d'ingénieur, université de Ouargla, Algérie, 2005.
- [8] Goudjil Tawous, Etude de l'oxyde de titane en couches minces en hétérojonction avec le silicium, application photovoltaïque, Magister, : Microélectronique , Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2013 .
- [9] Naïma TOUAFEK , Contribution à l'étude d'une cellule solaire en couches minces à base de  $\text{CuIn}_{1-x}\text{GaxSe}_2$ , Doctorat en Sciences en Electronique /Université Des Frères Mentouri – Constantine, 2015.
- [10] Iratni Sabah, Djedoui Layachi , Développement d'une approche de diagnostic dédiée à la détection de défauts dans les systèmes PV, Mémoire de Master, Département d'Electronique, Université bordj bou arreridj, 2014.

- [11] [https://bcltnergie.com/\\_home/2017/05/26/fonctionnement-dun-panneau-photovoltaïque](https://bcltnergie.com/_home/2017/05/26/fonctionnement-dun-panneau-photovoltaïque)
- [12] W. Shockley, « Electrons and Holes in Semiconductors », D. Van Nostrand Co., Princeton, NJ, 1956, pp. 254.
- [13] C.S. Jiang, F.S. Hasoon, H.R. Moutinho, H.A. Al-Thani, M.J. Romero, M.M. Al-Jassim, Applied Physics Letters 82, 127 (2003).
- [14] J. Petterson, C. Platzer-bjorkman, U. Zimmermann, M. Edoff, Thin Solid Films 519, 7476 (2011).
- [15] T. Minemoto, T. Matsui, H. Takakura, Y. Hamakawa, T. Negami, Y. Hashimoto, T. Uenoyama, M. Kitagawa, Solar Energy Materials and Solar cells 67, 83 (2001).
- [16] Moufdi Hadjab, Etude et simulation des cellules photovoltaïques à rendement élevé, Université Djillali Liabès de Sidi Bel Abbes, 2018.
- [17] E. Yablonovitch, R. Bhat, J.P. Habison and R.A. Logan, Appl. Phys. Lett 50, p. 1197.

**Chapitres II :**

**Les nouvelles Techniques de Conception des Cellules  
Photovoltaïques.**

## **II.1. Introduction :**

L'intégration des énergies renouvelables dans la production électrique ne cesse de croître. L'évolution de cette filière et sa mise en challenge avec les procédés traditionnels de production d'énergie passe à moyen terme par un progrès ferme de la technologie et une réduction des coûts de mise en oeuvre. [18].

Demain, il y aura de nouvelles technologies avec des noms plus ou moins étrangers. Systèmes de concentration, cellules à colorants ou polymères, pérovskites, puits quantiques, ...Elles sont aujourd'hui en phase de recherche, il existe de nombreuses options différentes, chacune apportant ses propres atouts qu'ils s'agissent d'une réduction de coût remarquable, de rendements très élevés, ou mise en œuvre simple.

Ce chapitre présente des techniques qui sont encors en cours de perfectionnement pour concevoir des cellules solaires dans le cadre de : fabrication moins chers, plus rentables et économes en énergie, en entamant une étude comparative de ces méthodes à la fin.

## **II.2. Technologie du Silicium micromorphe :**

Le concept de "micromorphes" a commencé en 1994 avec l'annonce de ces premières cellules de nouveau type à l'IMT. La cellule micromorphe développée par son groupe, par la suite, ont significativement amélioré son rendement, estimée de 11 à 12 % en laboratoire [19].

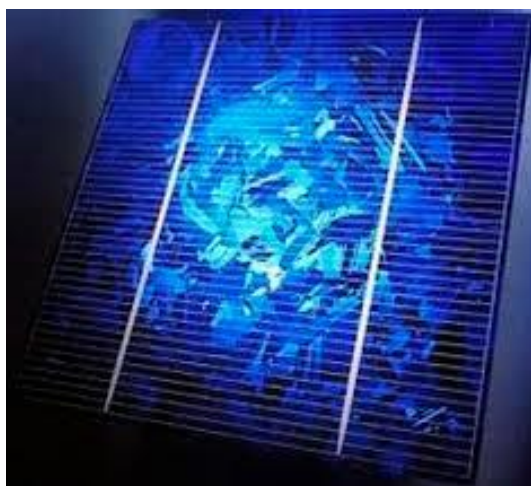


**Figure( II.1) :** Cellules solaires photovoltaïque micromorphe.

Ce sont des cellules à couches minces de quelques micromètres d'épaisseur seulement. Elles nécessitent près de 100 fois moins de matière. De plus, on peut les concevoir pour des surfaces plus importantes (1m<sup>2</sup>). Des procédés de dépôt direct sont possibles. Cela offre le plus grand potentiel de réduction du coût des modules PV [19].

### **II.3. Technologie du Silicium polycristallin en couche mince :**

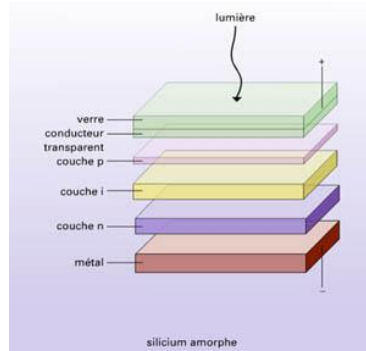
Le silicium polycristallin (pol-Si) est employé en couches minces inférieures à 3  $\mu\text{m}$ , en raison de ses propriétés optoélectroniques dans l'industrie des semi-conducteurs, pour des applications microélectroniques et photovoltaïques. Malgré les avancées actuelles, le (Pol-Si) a encore de la place pour la recherche, notamment pour améliorer ses propriétés électriques. En conséquence, du procédé de fabrication utilisé. Le (Pol-Si) évolue en fonction de la concentration des défauts présents, modifiant ses propriétés ferroélectriques [20].



**Figure (II.2):** Panneaux de Si polycristallin.

En 2005, le silicium monocristallin (c-Si) et le silicium polycristallin, en ligots ou en films, font plus de 93 % de la production mondiale de cellules solaires, évaluée à 1,8 gigawatts crête (GWc). Le reste concerne des modules en couches minces (moins de 1 micron d'épaisseur) à base de silicium amorphe (4,7%), CdTe ou CuInSe<sub>2</sub>, comme des films minces déposés sur des substrats peu coûteux tels que le verre [21].

Il s'agit de déposer une couche fine de silicium polycristallin d'épaisseur de : 10-40  $\mu\text{m}$  sur divers substrats de silicium métallurgique peu purifié, quartz, céramique ou métal, pour obtenir des rendements de conversion du même ordre qu'une cellule de matériau massif, en d'autre part le confinement optique et le champ arrière répulsif pour les porteurs minoritaires, du fait que la distance qu'ils ont à parcourir est plus faible, on peut se contenter d'une pureté moindre pour le matériau de base [22].

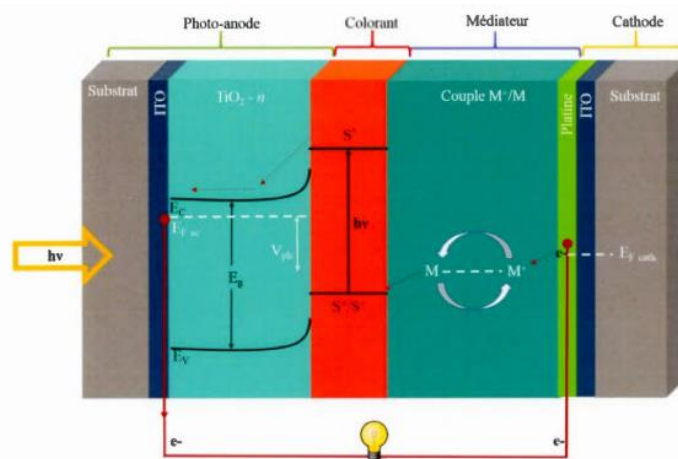


**Figure ( II.3) :** Cellule photovoltaïque à Silicium en couche mince [22].

**II.4. Cellules photovoltaïque à colorant photosensible :**

Ce sont des cellules solaires de la troisième génération, appelées aussi cellules de Gratzel, prenant le nom de leur inventeur. Leur fonctionnement ne nécessite pas l'emploi du matériau semi-conducteur coûteux, elles comprennent une photo-anode, soit un film semiconducteur transparent mésoporeux de  $\text{TiO}_2$  d'une épaisseur de l'ordre de 12  $\mu\text{m}$  sur lequel est adsorbée une monocouche d'un pigment photosensible responsable de l'absorption des photons. La cellule contient aussi un médiateur, constitué d'un couple redox responsable de la régénération du colorant.

Le rendement de ces cellules photovoltaïques est de 8 – 12 % [23].



**Figure( II.4) :** Cellules solaires à colorant photosensible [24].

Pour créer l'effet photovoltaïque, les photons doivent arrachés les électrons du matériau, de la bande de valence à la bande de conduction. De plus, les électrons ainsi libérés doivent circuler dans une seule direction : un semi-conducteur fixé à une anode (une plaque de verre conductrice) est donc employé. C'est l'oxyde de titane ( $\text{TiO}_2$ ). Ce dernier, néanmoins, absorbe les photons dans la gamme ultraviolette, c'est pourquoi ces cellules sont transparentes. Le colorant sur la surface du dioxyde de titane aide à capturer les photons dans le domaine visible, où donne l'effet à la cellule d'être colorée [25].



**Figure (II.5) :** Des cellules hybrides à colorant intégrées sur les fenêtres et les murs [26].

### **II.5 Cellules à polymères :**

Les cellules photovoltaïques en polymères désignent un type de cellules solaires organiques à base de sandwichs de semi-conducteurs en polymère organique (des macromolécules naturelles), produisant de l'électricité à partir de la lumière, lancé dans les laboratoire, les groupes industriels et des universités à travers le monde en 2011.

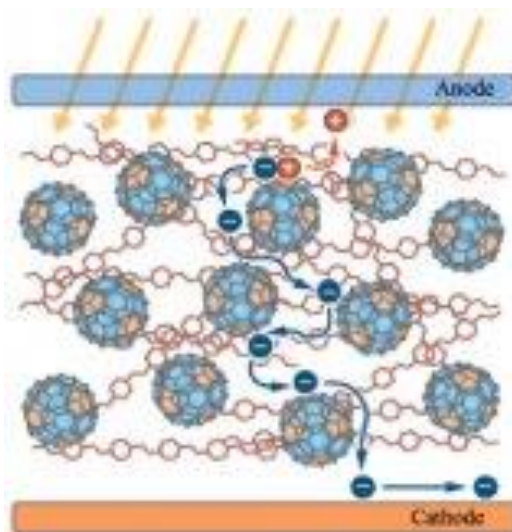
Le principe de fonctionnement des cellules à polymères organiques est le même que celui des cellules à colorant. Le matériau absorbant (ou donneur d'électrons) peut être :

- Soit de **petites molécules organiques** comme des phthalocyanines, des polyacenes, ou des squarenes combinées avec des perylene ou des fullerènes comme accepteur [3].



- Soit des **molécules à longue chaîne** (ex : polymères de type P3HT, MDMO-PPV, PEDOT:PSS, PET, PC61BM, PCDTBT...) combinées avec des dérivés des fullerènes comme accepteurs (e.g., PC60BM, PC70BM).[3].

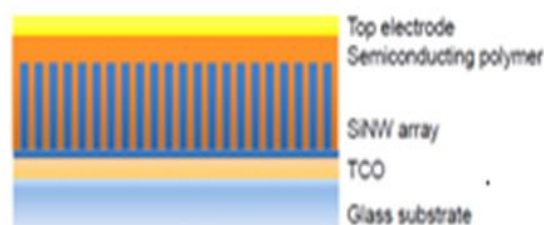
Le domaine des cellules solaires à polymères progresse de façon régulière en parallèle des avancées dans le domaine des matériaux. mais leurs rendement reste plus faible, et leurs durée de vie est estimée de l'ordre de trois à quatre ans. L'objectif majeur est donc l'augmentation de la longévité de ces cellules [3].



**Figure (II.6) :** Principe d'une cellule organique[27].

## **II.6. Cellules hybrides :**

Les cellules solaire à base de matériaux organiques soulèvent actuellement beaucoup d'intérêt sur l'échelle internationale du fait de leur simplicité de mise en œuvre par des techniques d'impression potentiellement à moindres coûts. Cependant, le rendement de conversion énergétique est encore faible et la longévité des dispositifs est trop réduite. Les matériaux inorganiques nanostructurés (nanoparticules, nanofils...) peuvent être une solution intéressante et complémentaire pour faire face à ses inconvénients comme la faible mobilité des porteurs de charge et la mauvaise stabilité. Dans ce contexte, les nanofils de silicium (SiNWs) offrent des avantages uniques améliorant les caractéristiques électriques de cette catégorie de cellules [28].



**Figure (II.7) :** Cellule photovoltaïque Hybride, coupe transversale [28].

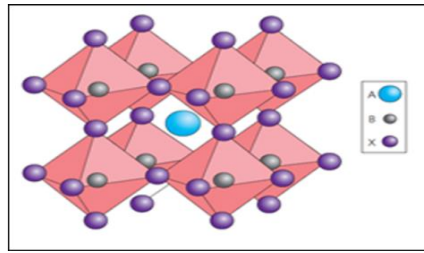
### **II.6.1. Les applications des cellules hybrides :**

Le faible poids et la flexibilité mécanique donnent aux cellules hybrides une très bonne réputation pour toutes les applications mobiles, et d'un autre part leur rendement en lumière faible (diffusée) permet une utilisation à l'intérieur des immeubles pour le cas de faible ensoleillement.

Puisque les technologies sans-fil sont privilégiées, l'application des cellules hybrides à colorant aux chargeurs portatifs pour les téléphones portables, les ordinateurs ou encore les baladeurs audios, est attrayant. De plus, ce type de cellules peuvent être incorporer sur n'importe quel objet, comme un sac à dos ou une tente de camping, ou bien un appareil portatif, puisqu'elle sont légère, elle ouvrent en plus, une multitude de possibilités en matière d'esthétique originale [29].

### **II.7. Cellules à pérovskites :**

Il s'agit des cellules photovoltaïque de troisième génération, ce sont des dériver de cellules solaire à pigments photosensible (à colorant) qui ont démontré une efficacité élevée par Micheal Gratzel et Brian O'Regan en 1990 [30]. Le premier prototype de cellule à pérovskite, PSC a été réalisé avec la structure de cellule PV à colorant liquide, en 2009 avec l'absorbeur de pérovskite remplaçant le colorant conventionnel [31]. La pérovskite est un minéral décrit en 1839 par le minéralogiste allemand Gustav Rose à partir d'échantillons provenant de l'Oural. À l'origine, le terme désignait l'oxyde de calcium et de titane de formule  $\text{CaTiO}_3$ . Mais ce nom est aussi maintenant associé à une structure cristalline absorbant :  $\text{ABX}_3$ . Ce matériau est conceptuellement un composé hybride d'halogénure d'organo et de -plomb obtenu à partir d'une synthèse relativement simple et déposé par des techniques conventionnelles traitées en solution. Ces cellules solaires ont suscité un grand intérêt ces dernières années, l'efficacité de ces cellules s'est développée très rapidement, atteignant récemment un record historique de 25,2 %. La nature hybride (organique et inorganique) confère à cette classe de matériaux des propriétés optoélectroniques intéressantes, telles qu'une absorption élevée de la lumière, de longues longueurs de propagation pour les porteurs de charge, une facilité de solution et un faible coût de fabrication. [31]



**Figure(II.8) :** Structure hybride de la pérovskite [32].

Avec les élément A,B et X peuvent êtres (Anaya, Lozano, Calvo, &Míguez, 2017).

A: cation ( $\text{Cs}^+$ ,  $\text{Rb}^+$ ,  $\text{MA}^+$ ,  $\text{FA}^+$ , ...),

B: cation ( $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Sn}^{2+}$ ,  $\text{Ge}^{2+}$ , ...),

X: anion (halogénures ( $\text{I}^-$ ,  $\text{Br}^-$ ,  $\text{Cl}^-$ , ...)) [33].

## **II.8 Cellules photovoltaïques électrochimiques :**

Ce type de cellule est présenté comme un alternative à la technologie basée sur la jonction p-n ordinairement constituée d'une photo-anode d'un semi-conducteur de type n déposé sur un support de verre bordée d'une couche conductrice comme l'oxyde d'étain dopé au fluor, d'une cathode (catalyseur) et d'une solution électrolytique adéquate posée entre les deux électrodes. serve aux échanges électroniques aux électrodes, ainsi qu'un sel support qui garantit une conductivité suffisante de la solution [34].

La première cellule photovoltaïque électrochimique (CPE) a été développée par Gerisher et Goberecht en 1976 avec une efficacité de conversion de 5,5 %. Elle était à l'origine constituée d'une photo-anode à base de n-CdSe, d'une cathode de  $\text{SnO}_2$  et du couple redox réversible et ce, en milieu humecté. Néanmoins, Une dégradation du matériau semi-conducteur photosensible (CdSe) avait lieu se propduire. En effet, cette dégradation est due à l'effet de photocorrosion, en considérant le milieu aqueux dans lequel se trouvent les électrodes. La photocorrosion se produit quand les trous photogénérés par le CdSe provoque l'oxydation du matériau photosensible au lieu d'oxyder les espèces réduites du couple redox. Ceci peut être dû au fait que le phénomène d'oxydation des espèces réduites se fait trop lentement. C'est ainsi que l'idée d'utiliser un milieu électrolytique organique a prie une bonne réputation, mais cette cellule a prouvé une stabilité intéressante [34].

## **II.9 Etude et Comparaison :**

L'énergie photovoltaïque est incontestable pour une grande durée de vie allant jusqu'à 25 ans. Sa source, le soleil, est considérée comme un combustible puissant et gratuit, cette énergie seine et propre ne génère pas des effets nocifs sur la nature. Les panneaux solaires sont recyclables et les

matériaux utilisés pour la mise en oeuvre peuvent être récupéré et repris pour fabriquer de nouveaux modules photovoltaïque [32]. Malgré tous ça, la matière première coute chère, donc on opte à des technologies moins couteuse, comme on vient de cité quelques une dans ce chapitre.

Les cellules multijonction sont constitués de plusieurs semi conducteurs ayant chacun une bande limitée. Si on choisit des matériaux qui absorbent dans un spectre de longueurs d'ondes très proche les unes des autres, cela peut permettre à ces cellules d'absorber un spectre plus large qui va faire augmenter le rendement jusqu'à 50%. mais leurs developpement se limite pour les applications spatiales, car les matériaux utilisés sont rares ou leurs cout de fabrication est vraiment élevé.

Pour le cas des cellules polymères, quelques problèmes au niveau de l'électrolyte polymère ont été observés. Entre autres, le polymère avait l'habitude d'augmenter la résistance de la cellule photovoltaïque, car il est partiellement cristallisé, ce qui fait diminuer sa conductivité ionique ainsi que le mouillage des électrodes. Pour surmonter cette difficulté, cet électrolyte a ensuite été remplacé par un électrolyte sous forme de gel [35]. mais la sécheresse du ce gel par le temps, cause de la pression de vapeur élevée des solvants utilisés.

Le semi-conducteur  $TiO_2$  a une énergie de gap de 3,2 eV sous la forme cristalline anatase [36], et donc absorbe seulement dans le spectre de l' Ultra-Violet, réduisant de ce fait son efficacité de conversion d' énergie. L'utilisation d' un colorant adsorbant à la surface du  $TiO_2$  sert à résoudre ce problème, améliorant ainsi le transfert de charge. Le  $TiO_2$  est fortement désiré, à cause de son caractère mésoporeux avec des réseaux cristallins à l' échelle nanométrique. ou ces pores peuvent être remplis d'un matériau semiconducteur, d' un milieu conducteur, d' un polymère ou d' un milieu électrolytique. Ceci résulte un transport de charges simplifier [36].

En ce qui concerne les cellules à colorant, malgré les nombreux avantages reliés à l' utilisation de la cellule à pigment photosensible, le plus grand ennui réside dans l'utilisation d'un électrolyte liquide. Des résultats importantes peuvent être aboutis, dans le cas d'une température trop élevée, mais dans le cas contraire la basse température fait geler le liquide, et peut nuire significativement la production d'énergie. L'emploi de liquides ioniques thermiquement stables sur une large fenêtre de températures offre un avenir prometteur [34].

L'efficacité de la cellule PV dépend bien sûr de la nature du semi-conducteur absorbant, qui doit être compatible avec le spectre solaire. En effet, les perovskites sont des matériaux cristallins peu coûteux déjà utilisés dans des cellules solaires comme un matériau absorbant. En 2009, les perovskites à base de plomb, d'iode et de méthylammonium ( $CH_3NH_3Pb$ ) avaient une efficacité de conversion de 3,8%, alors qu'elle est aujourd'hui supérieure à 20% [37]. Il serait donc intéressant

d'intégrer un film composé de ce matériau dans des systèmes à jonctions multiples, ou encore de l'ajouter aux cellules à base de silicium pour en augmenter l'efficacité.

Les critères de choix d'un semi-conducteur, tels que  $E_g$ , la durée de vie, et la longueur de diffusion ( $L_0$ ) des porteurs de charge minoritaires, ainsi que la vitesse de recombinaison de surface ( $S_r$ ) [38], les matériaux les plus réputés sont : GaAs, CdTe, CdS, Cu<sub>2</sub>S, Zn<sub>3</sub>P<sub>2</sub>, InP et CuInSe<sub>2</sub> considérant leurs propriétés électriques et optiques, Cependant, il faut non seulement considérer leurs propriétés, mais aussi leurs disponibilité, accessibilité et abondance [38].

Les semi-conducteurs ternaires, soit le CuInSe<sub>2</sub> (CISE) et le CuGaS<sub>2</sub> (COS). Ces deux semi-conducteurs de structure chalcopyrite sont particulièrement intéressants dans les cellules solaires à hétérojonction, considérant leurs valeur de bande interdite respective de 1,04 eV [16] et 2,43 eV [26]. Les couches sont produites par plusieurs techniques, soit évaporation, pulvérisation, évaporation éclair, pyrolyse par pulvérisation et épitaxie par jet moléculaire. Encore selon la température de réaction, de différentes phases peuvent être obtenues.

## **II.10 Conclusion :**

Les innovations et les progrès dans le domaine photovoltaïque s'accélèrent de plus en plus, l'intérêt pour une technologie, de conception de cellules photovoltaïques, par rapport à l'autre, dépend du coût, du procédé de mise en œuvre et du domaine d'application des modules photovoltaïques. Donc la qualification d'une technologie d'une autre, dépend de nos budgets consacrés à leur installation et nos objectifs d'utilisation.

## **II.11 Références :**

[18] <https://www.amazon.com/Cellule-photovolta%C3%AFque-3%C3%A8me-g%C3%A9n%C3%A9ration-nanocristallines/dp/3838140982>.

[19] <https://endirect.univ-fcomte.fr/publication/le-concept-micromorph-une-cellule-solaire-basee-sur-du-silicium-en-couche-mince/>

[20] Zabardjane Saidbacar, Élaboration et caractérisations du silicium polycristallin par cristallisation en phase liquide du silicium amorphe, Thèse de doctorat, université parissud, 13/02/2012 .

[21] Bourée, Jean-Eric & Cabarrocas, Pere. (2007). Cellules solaires en couches minces à base de silicium. <http://dx.doi.org/10.1051/refdp/2007062>. 10.1051/refdp/2007062.

- [22] Laurent Schlur. « Elaboration de cellules photovoltaïques hybrides solides à base d'oxyde de zinc nanostructuré. Thèse the doctorat. Université de Strasbourg, 2012.
- [23]<http://www.ens-lyon.fr/actualite/recherche/cellules-solaires-colorant-lenergie-de-lavenir>
- [24]<http://physique.unice.fr/sem6/2011-2012/PagesWeb/PT/Cellule/Photovolaïque.pdf>
- [25] L. Schmidt-Mende; U. Bach; R. Humphry-Baker; T. Horiuchi; H. Miura; S. Ito; S. Uchida; M. Grätzel, Adv. Mater., 2005, 17, 813-815.
- [26] KAIDI Abdallah KAAL Abdellatif, « Le Photovoltaïque à base des Panneaux Solaires Hybrides »,Projet Tutoré Semestre S6,Université Sidi Mohamed Ben Abdallah de Fès,22/05/2020 .
- [27] ©DGS.
- [28][https://iramis.cea.fr/Phocea/Vie\\_des\\_labos/Ast/ast\\_visu.php?id\\_ast=1965](https://iramis.cea.fr/Phocea/Vie_des_labos/Ast/ast_visu.php?id_ast=1965).
- [29]Ludmil Stoyanov, Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables, Thèse de Doctorat, Université technique de sofia , 2011.
- [30]Brian O'Regan & Michael Grätzel, A low-cost, high-efficiency solar cell based on dyesensitized colloidal TiO<sub>2</sub> films, Nature volume 353, pages 737–740 (24 October 1991), doi:10.1038/353737.
- [31] KACHA Kalinka, Contribution à l'amélioration du rendement de cellule solaire à heterostructures, Thèse de Doctorat, Université de Batna 2, 2018.
- [32]Moulay Ahmed Slimani , Cellules solaires pérovskites imprimées et optimisation descouches pérovskites pour les cellules tandems , partielle à l'obtention de la maîtrise , école de technologie supérieure université du québec, 07 novembre 2019.
- [33][https://www.researchgate.net/publication/339774391\\_Cellules\\_Solaires\\_a\\_base\\_de\\_Materiaux\\_Perovskites\\_De\\_la\\_caracterisation\\_des\\_materiaux\\_a\\_l'amelioration\\_des\\_rendements\\_et\\_de\\_la\\_stabilite](https://www.researchgate.net/publication/339774391_Cellules_Solaires_a_base_de_Materiaux_Perovskites_De_la_caracterisation_des_materiaux_a_l'amelioration_des_rendements_et_de_la_stabilite).
- [34] Mary Hanna, Synthèse et caractérisation de nanoparticules de CuO pour application dans des cellules photovoltaïques, Maîtrise en chimie, Université du Québec à Montréal, 2016.
- [35] Wang, M. , Chamberland, N., Breau, L., Moser, J.-E., Humphry-Baker, R., Marsan, B., Zakeeruddin, S.M. et Grätzel, M. (2010). A Novel Organic Redox Electrolyte Based on Triiodide/iodide in Dye-Sensitized Solar Cells, Nature Chemistry , 2, 385- 389.
- [36] O'Regan B., et Grätzel M. (1991). A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO<sub>2</sub> films. Nature, 353(6346), 737-740.
- [37] Grätzel, M. (2001). Photoelectrochemical cells. Nature, 414(6861), 338-344.
- [38] Seamless integration of thin-film PV, International Solar, PV Management magazine, Issue 2015 : 14-15.

[39] Chopra, K. L. et Das, S. R. (1983). Thin films solar cells. New York: Plenum Press.

**ChapitreIII :**  
**Modélisation et Simulation d'une cellule et d'un Module  
Photovoltaïque par Matlab Simulink.**



### III.1. Introduction :

L'ensemble des cellules photovoltaïques forme des modules PV. Ces modules regroupés forment des champs photovoltaïques. Ces cellules rassemblées peuvent être connectées en série et / ou parallèle. L'objectif de ce chapitre est de modéliser une cellule PV d'une manière compréhensible, et d'étudier ces performances en variant les principales caractéristiques régissant son rendement et sa durée de vie. Cette étude simpliste est faite de telle manière à comprendre le principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques, par la variation de la température, l'irradiation, et des caractéristiques électriques.

Pour achever cet objectif nous avons simulé un système de mesure d'une cellule photovoltaïque du module LX-190M (selon la bibliothèque installée dans le logiciel Matlab, prise de NREL : Laboratoire National des Energies Renouvelables aux états- Unis). Le Matlab Simulink est un outil de modélisation complet d'une bibliothèque très riche en tous composants électroniques, composants d'affichage, de mesure, de conversion... Il donne la possibilité d'implémenter aisément les stations solaires photovoltaïques avec des résultats de contrôle similaire à la réalité.

### III.2. Matlab Simulink :

Matlab SIMULINK est une plate-forme de simulation multi-domaine et de modélisation des systèmes dynamiques. Il fournit un espace graphique et une bibliothèque de blocs de modélisation qui permettent le design précis, la simulation, l'implémentation et le contrôle de systèmes de communications et de traitement du signal [40].

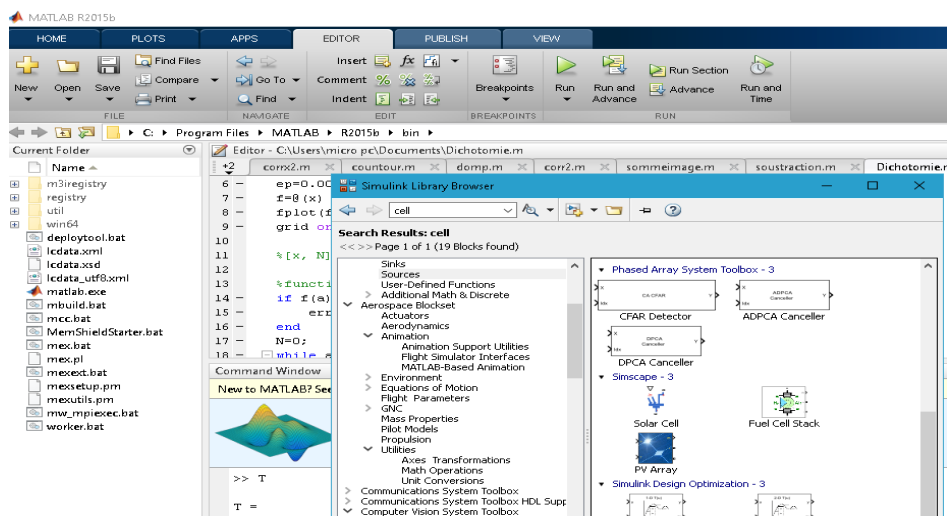
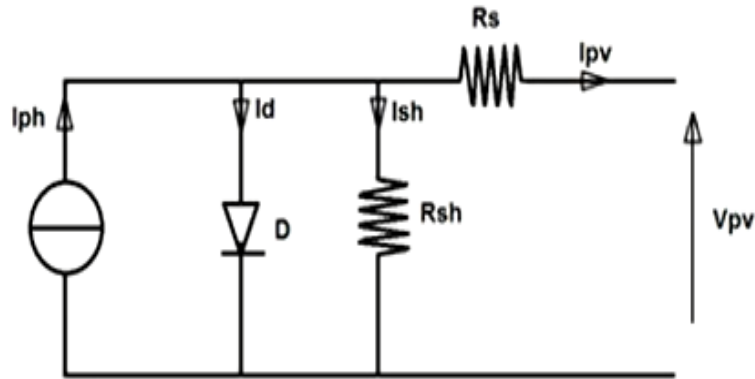


Figure (III.1) : Interface Simulink/Matlab.

**III.3 Caractéristiques électroniques d'une cellule photovoltaïque :**



**Figure(III.2) :** Model électrique d'une cellule photovoltaïque.

D'après ce circuit, et on appliquant la loi de Kirchoff, on déduit ces équations [41]:

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

$$I_{pv} = N_p I_{ph} - N_p I_{rs} \left[ e^{q \left( \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{A K T N_s} \right)} - 1 \right] - N_p \left( \frac{q(V_{pv} + R_s I_{pv})}{R_s R_{sh}} \right) \tag{III-2}$$

Où  $I_{ph}$  est proportionnel à l'irradiation solaire, donné par l'équation suivante :

$$I_{ph} = [I_{rs} + k_i(T - T_r)] \frac{G}{G_r} \tag{III-3}$$

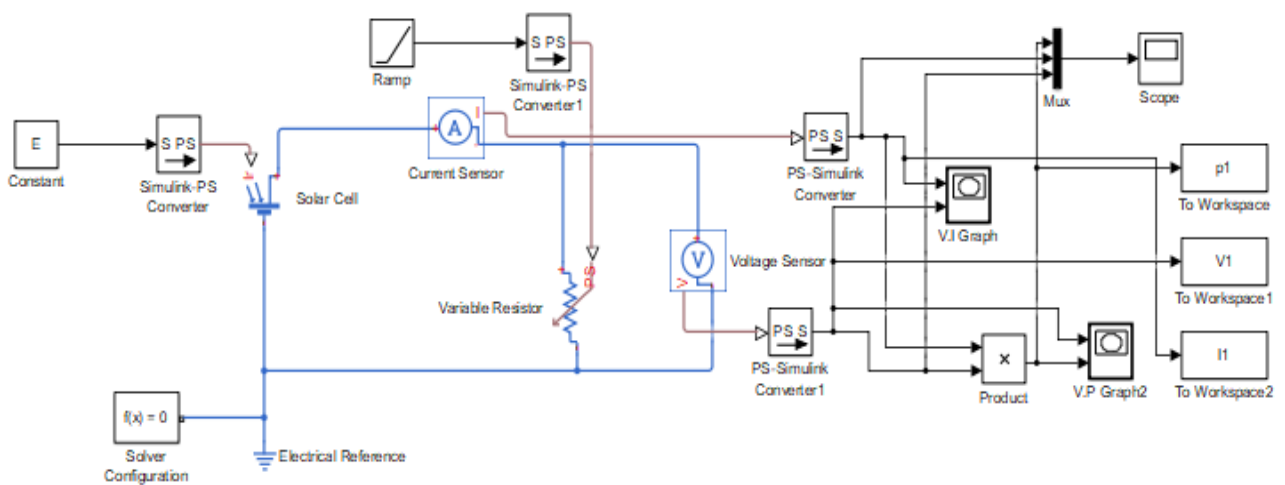
$$I_{rs} = I_{rr} \cdot \left[ \frac{T}{T_r} \right]^3 \cdot \exp \left( \frac{q \cdot E_G}{K \cdot A} \left[ \frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right] \right) \tag{III-4}$$

**Tableaux [III.1] :** Spécifications du module photovoltaïque LX-190M

Puissance nominale	190w
Tension Nominale	36.14 V
Intensité Nominale	5.26 A
Vco	43.66V
Icc	5.69A
Coefficient de température de voltage Kv	-0.35%
Coefficient de température de l'intensité Ki	0.04%
Coefficient de température de puissance Kp	-0.45%
Rendement à STC	14.9%
Rendement à 200 w/m <sup>2</sup>	14.48%
Nombre et type de cellule PV	72 Monocristalline
Dimension de la cellule	125mmx125mm

**III.4. Simulation d'un système électrique de mesure d'une cellule photovoltaïque :**

On a conçu un montage de mesure par Simulink/Matlab d'une cellule photovoltaïque, qui fait part du module photovoltaïque LX190M, avec les caractéristique définit dans le tableau précédant, pour déduire les valeurs de : courant et de puissance, fournit en dépendance de la tension, on faisant varier les facteurs climatiques comme l'éclairage E et la température T et aussi la résistance en série Rs [42]. Les résultats sont projetés vers le workspace pour interpréter leurs évolution.



**Figure (III.3) :** Montage de mesure des paramètres électrique de la cellule photovoltaïque par Matlab Simulink.

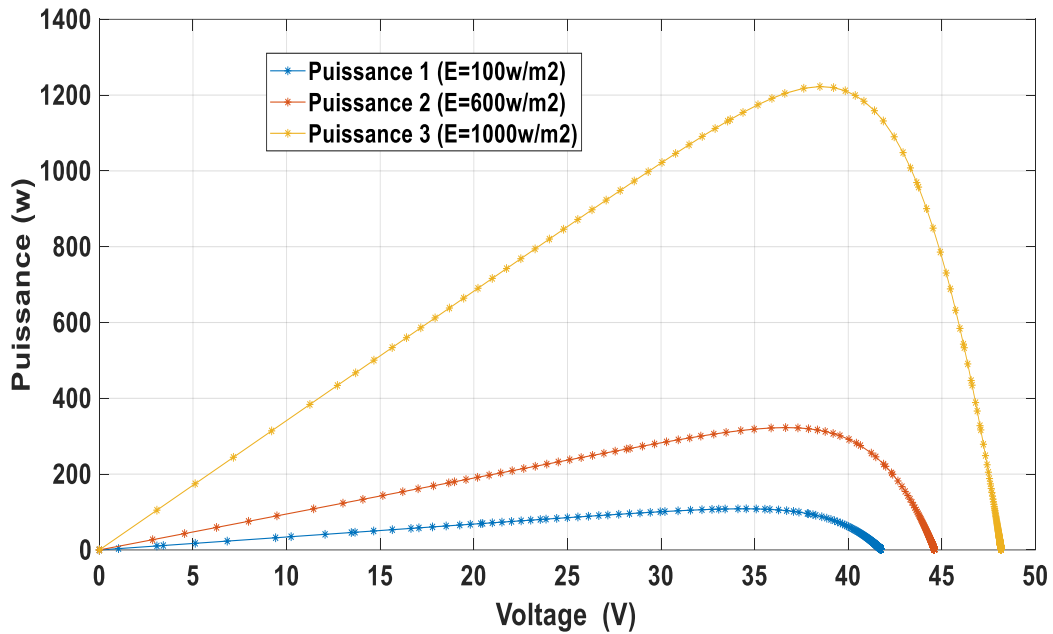
**III.4.1 Ajustement des paramètres du montage :**

Cell Characteristics		Configuration		Temperature Dependence	
Parameterize by:	By s/c current and o/c voltage, 5 parameter				
Short-circuit current, Isc:	5.69		A		
Open-circuit voltage, Voc:	0.6		V		
Irradiance used for measurements, Ir0:	1000		W/m^2		
Quality factor, N:	1.5				
Series resistance, Rs:	RS		Ohm		
Cell Characteristics		Configuration		Temperature Dependence	
First order temperature coefficient for Iph, TIPH1:	0.04		1/K		
Energy gap, EG:	1.11		eV		
Temperature exponent for Is, TXIS1:	3				
Temperature exponent for Rs, TRS1:	0.008				
Measurement temperature:	25		degC		
Device simulation temperature:	25		degC		

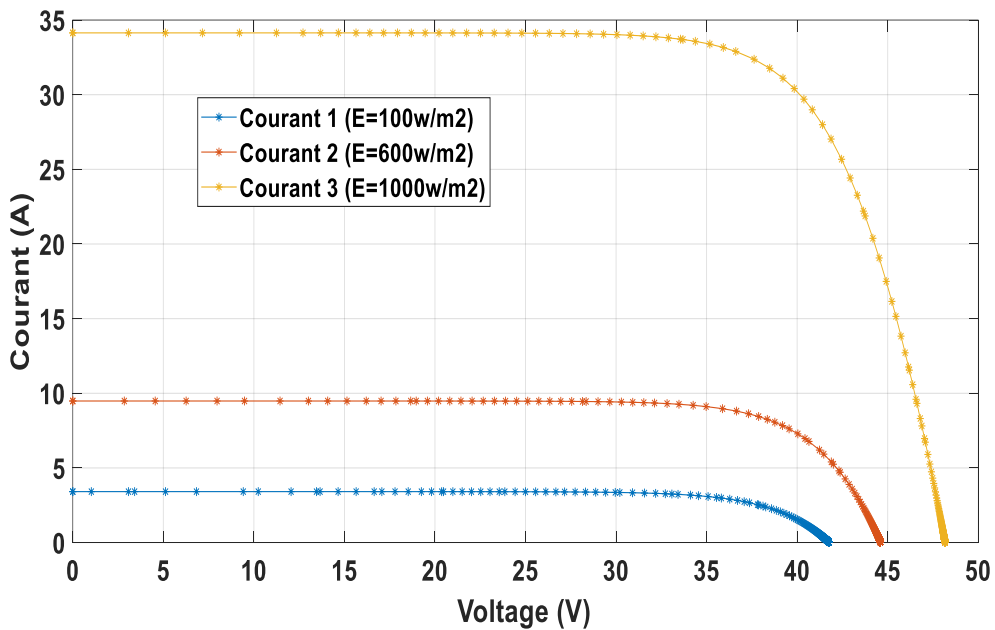
**Figure (III.4) :** Paramètres d'un PV LX-190M sous Matlab /Simulink.

**III.4.2. Effet de L'éclairage E sur le courant I et la puissance P de la cellule PV :**

Variation de la puissance P et du courant I, par rapport à la tension, en fonction de l'éclairage pour ( $E = 1000 \text{ w/m}^2$ ,  $E = 600 \text{ w/m}^2$  et  $E = 100 \text{ w/m}^2$ ) et  $T=25^\circ\text{C}$ , Résistance de séries  $R_s= 0.001\Omega$ .



**Figure (III.5) :** Caractéristiques P-V Pour différent éclairements ( $T=25^\circ\text{C}$ ,  $R_s= 0.001\Omega$ ).



**Figure (III.6) :** Caractéristiques I-V Pour différent éclairement ( $T=25^\circ\text{C}$ ,  $R_s= 0.001\Omega$ ).

#### **III.4.2.1 Interprétation :**

Les figures (III.5) et (III.6) représentent les variations de la puissance  $P$  et du courant  $I$  en fonction de la tension  $V$  respectivement, à la température  $T = 25^\circ\text{C}$ , et la résistance série  $R_s = 0.001\Omega$ , et ceci pour trois valeurs d'éclairement comme suit ( $E = 1000 \text{ W/m}^2$ ,  $E = 600 \text{ W/m}^2$  et  $E = 100 \text{ W/m}^2$ ).

On constate que plus la luminosité est grande, la valeur de la puissance sera grande, et vice versa, dans l'intervalle de  $[0, 38]$  volts, mais au-delà de ça, elle chute jusqu'à l'annulation à la valeur de  $V_{co}$  qui est égale à :

\* 44v pour  $E = 100 \text{ W/m}^2$ .

\* 49v pour  $E = 600 \text{ W/m}^2$ .

\* 56v pour  $E = 1000 \text{ W/m}^2$ .

Donc c'est une proportion directe entre ces deux paramètres dans cet intervalle.

Il en va de même pour le courant de court circuit  $I_{cc}$ , pour l'intervalle qui s'étend de  $[0, 33\text{v}]$ , le courant de saturation est constant à une valeur maximale de :

\* 7A pour  $E = 100 \text{ W/m}^2$

\* 9A pour  $E = 600 \text{ W/m}^2$

\* 34A pour  $E = 1000 \text{ W/m}^2$

Le courant de saturation augmente avec l'éclairement.

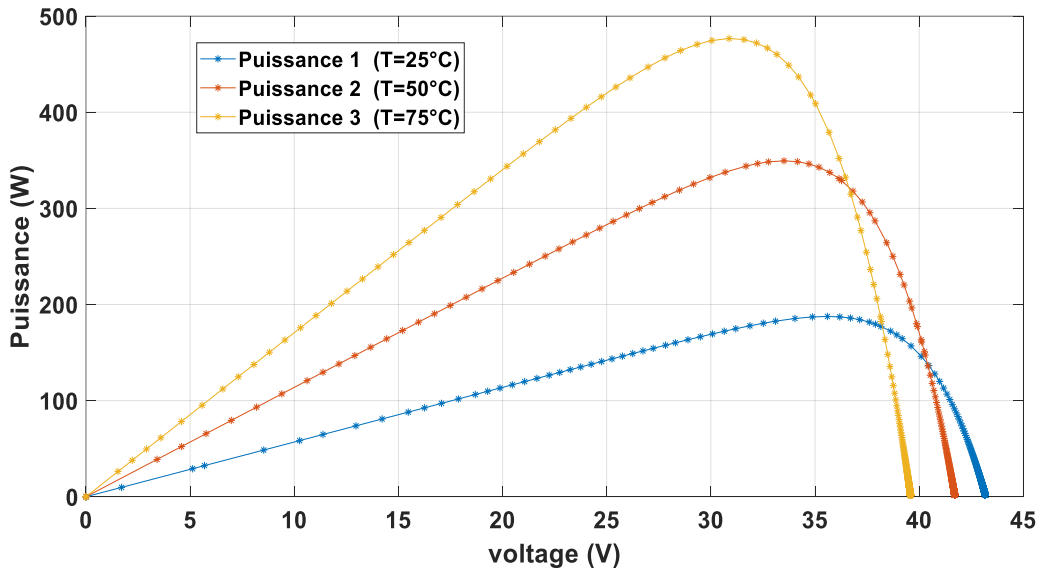
Lorsque  $V_{co}$  est à sa valeur minimale, le courant  $I_{cc}$  est à sa valeur maximale

D'après les courbes ci-dessus nous remarquons que l'éclairage a un impact notable sur la puissance et le courant électrique fournis par la cellule photovoltaïque, nous pouvons dire que le rendement d'un module PV augmente considérablement avec l'augmentation de l'irradiation  $E$  pour un intervalle de voltage bien précis selon les caractéristiques physiques de la cellule photovoltaïque.

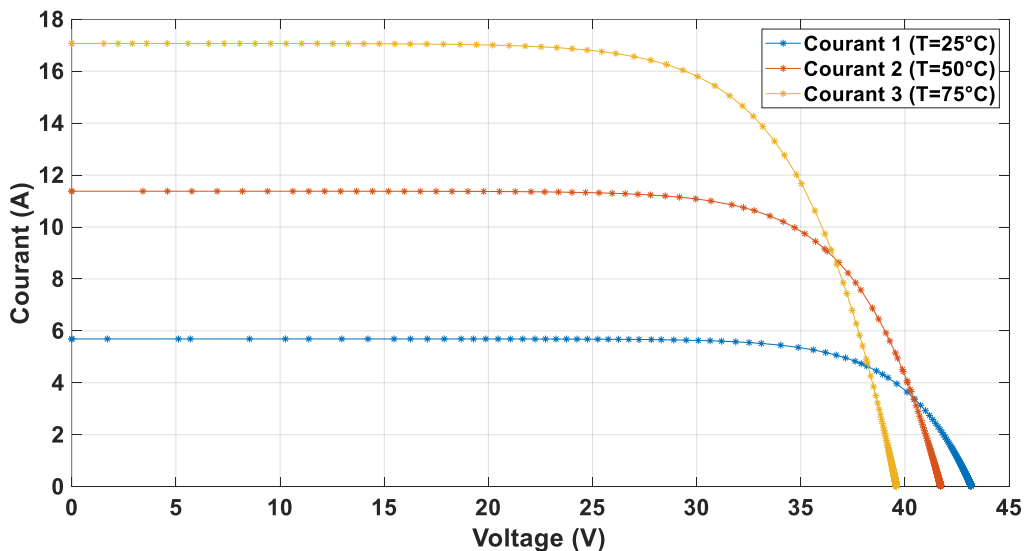
**III.4.3. Effet de La Température T sur le courant I et la puissance P de la cellule PV :**

La température est un paramètre très important dans le comportement des cellules solaires, elle affecte également les caractéristiques du générateur photovoltaïque.

On étudie cette fois ci, la variation de la puissance : P et du courant : I, par rapport au courant, en fonction de la température pour un Eclairage  $E=1000 \text{ w/m}^2$ , et une Résistance de séries  $R_s=0.001\Omega$  et une température varie selon les valeurs suivante:  $T=25^\circ\text{C}$ ,  $T=50^\circ\text{C}$ ,  $T=75^\circ\text{C}$ .



**Figure (III.7) :** Caractéristiques P-V Pour différents température pour ( $E = 1000 \text{ w/m}^2$  et  $R_s= 0.001\Omega$ ).



**Figure (III.8) :** Caractéristiques I-V Pour différents température pour ( $E = 1000 \text{ W/m}^2 \cdot R_s= 0.001\Omega$ ).

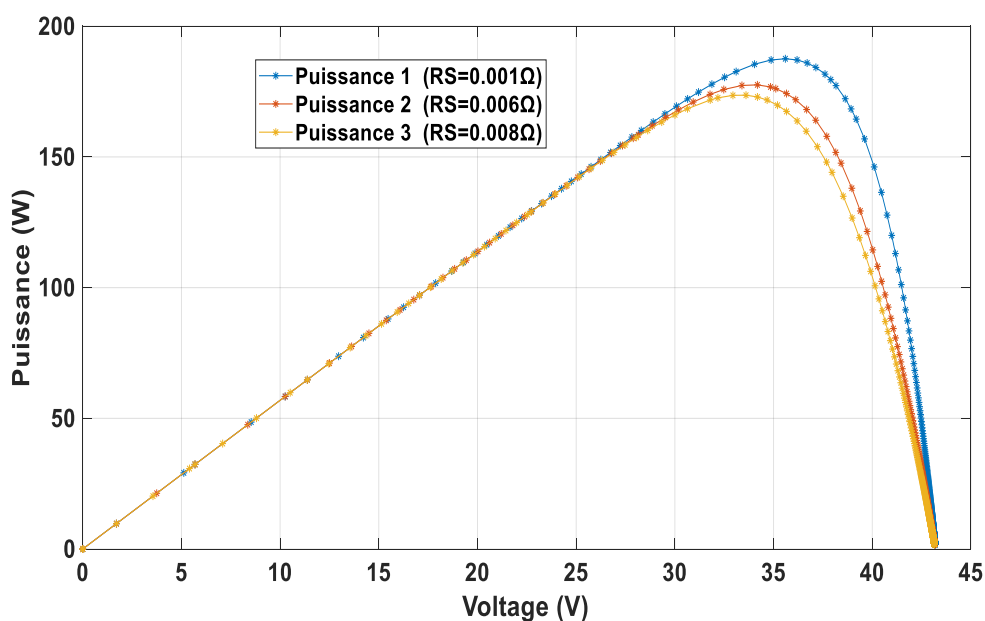
#### III.4.3.1 Interprétation :

Les figures (III.7) et (III.8) représentent les courbes de la puissance  $P$  et du courant  $I$ , en fonction de la tension, pour  $E=1000 \text{ w/m}^2$  et  $R_s=0.001\Omega$ , on prenant trois valeurs de température :  $T=25^\circ\text{C}$ ,  $T=50^\circ\text{C}$  et  $T=75^\circ\text{C}$ .

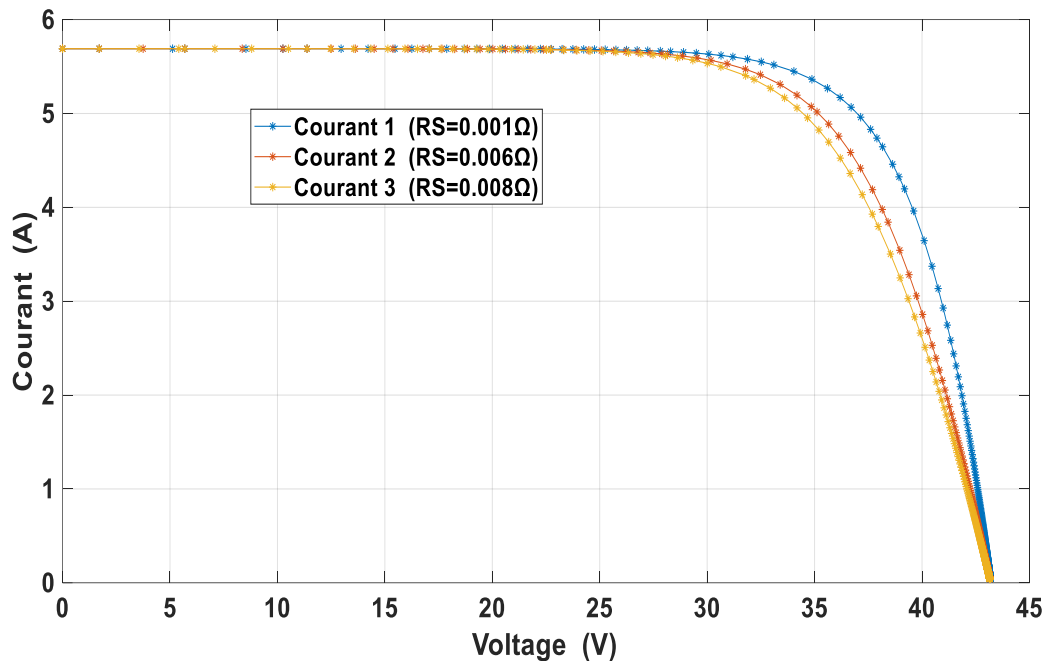
Comme il est évident, plus la température est élevée, plus la valeur de la puissance et du courant est grande, et vice versa, et ça pour l'intervalle de voltage  $[0, 30]$  à peu près, c'est une proportion directe aussi. Mais ce paramètre s'il est ajouté à l'échauffement dû au rayonnement, il peut déplacer le point de la puissance maximale à des valeurs basses, et de ce fait, il dégrade le panneau solaire à cause du phénomène de suréchauffement, où une partie du rayonnement absorbée n'est pas convertie en électricité, mais plutôt émise sous forme de chaleur.

#### III.4.4. Effet de Résistance en séries $R_s$ sur le courant $I$ et la puissance $P$ de la cellule PV :

La résistance série dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisée, de la résistance de contact et des grilles collectrices. On a varié cette résistance  $R_s$  selon les valeurs suivantes :  $R_s=0.001\Omega$ ,  $R_s=0.006\Omega$ ,  $R_s=0.008\Omega$ , pour voir l'évolution de la puissance  $P$ , et du courant  $I$ , par rapport à la tension au borne de la cellule photovoltaïque, pour une Température choisie ambiante  $T= 25^\circ\text{C}$ , et un Eclairage standard  $E=1000\text{W/m}^2$ .



**Figure (III.9) :** Caractéristiques P-V Pour différents Résistance  $R_s$  pour ( $T=25^\circ\text{C}$  et  $E=1000\text{W/m}^2$ ).



**Figure (III.10) :** Caractéristiques I-V Pour différents Résistance  $R_s$  pour ( $T=25^\circ\text{C}$  et  $E=1000\text{W/m}^2$ ).

#### **III.4.4.1 Interprétation :**

Les figure (III.9) et (III.10) représentent les courbes de puissance  $P$  et du courant  $I$  en fonction de la tension,  $P(v)$ ,  $I(v)$ , respectivement pour un éclairage standard  $E=1000\text{w/m}^2$ , et une température ambiante :  $T=25^\circ\text{C}$ , ceci pour trois valeurs de la résistance série :  $R_s= 0.001\Omega$ ,  $R_s=0.006\Omega$  et  $R_s=0.008\Omega$ .

On remarque que l'impact de la variation de la résistance en série n'a aucun effet dans l'intervalle de tension de  $[0, 29\text{v}]$ , la proportion est direct, les courbes sont superposées, mais, à partir de cette valeur de tension, l'influence de la résistance en série est évidente et proportionnelle inversement avec les valeurs de courant et de puissance, plus que la résistance  $R_s$  augmente, plus que la puissance et le courant diminues, c'est logique puisque cette résistance  $R_s$  englobe les toutes les pertes dans le circuit électrique équivalent. Alors pour un bon rendement et une haute performance du module PV, la résistance  $R_s$  doit être minimisée.

#### **III.5. Simulation de montage de mesure d'un module photovoltaïque :**

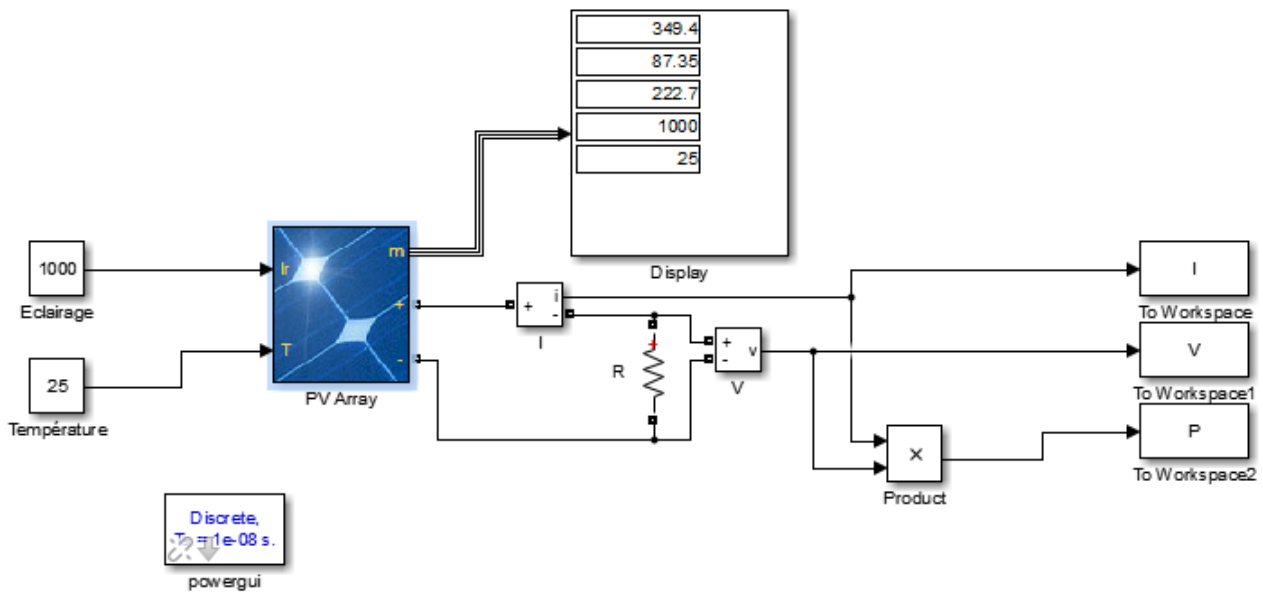
Dans cette deuxième partie, nous allons étudier les caractéristiques ( $I$ ,  $V$ ) et ( $P$ ,  $V$ ), du panneau solaire photovoltaïque LX190M, Pour un l'éclairage standard et une température ambiante :

$E=1000\text{w/m}^2$ ,  $T= 25^\circ\text{C}$ , La simulation est illustrée dans la figure suivante :



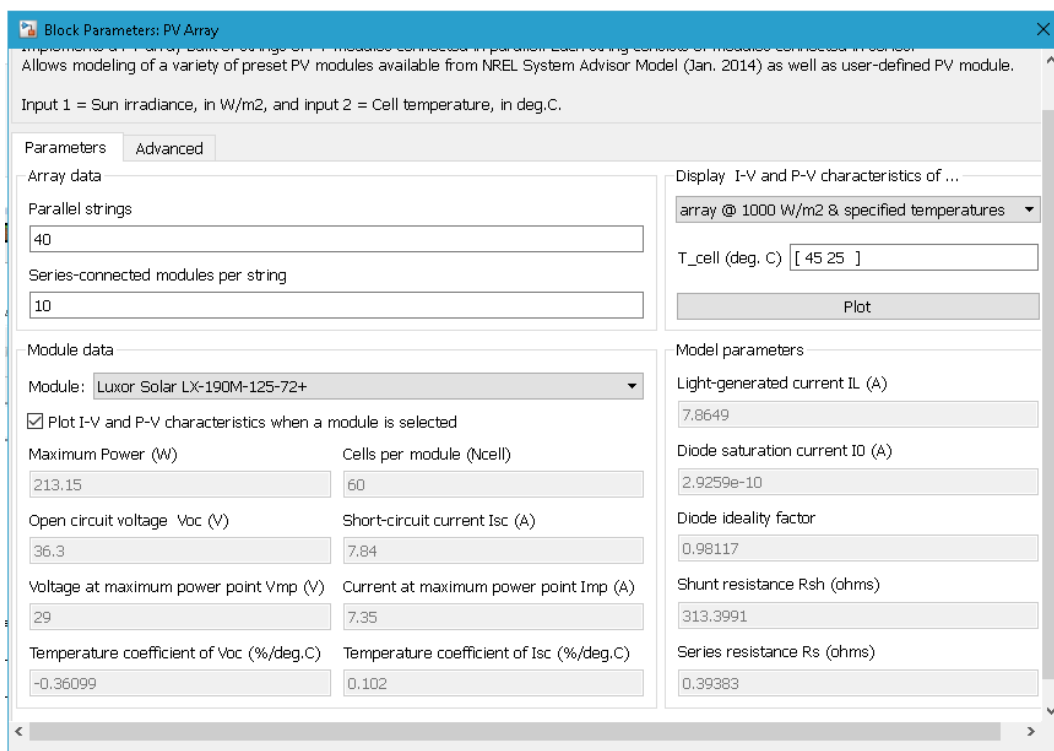
## Chapitre III : Modélisation et Simulation d'une cellule et d'un panneau photovoltaïque par Matlab

### Simulink



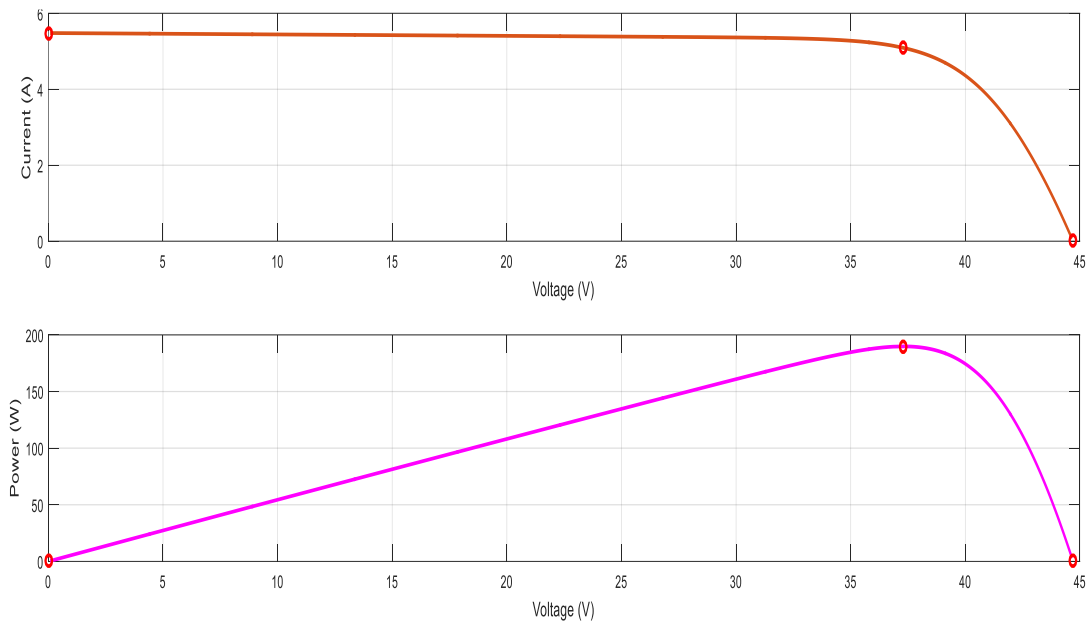
**Figure (III.11) :** Schéma d'un Système de mesure du module photovoltaïque LX190M.

### III.5.1 Ajustement des paramètres du module photovoltaïque LX190M :



**Figure (III.12) :** Le paramétrage du panneau solaire LX190M sur Matlab Simulink.

#### III.5.2 Caractéristiques I-V et P-V du panneau PV LX190M :



**Figure (III.13) :** Caractéristiques I-V et P-V du panneau PV LX190M [43].

#### III.5.3. Etude et Interprétation :

C'est un module PV prédéfini dans la base de données NREL System Advisory Model. Plus de 10 000 modules sont répertoriés d'après les principaux fabricants et classés par ordre alphabétique dans Matlab Simulink. La base de données NREL comprend les fiches techniques et paramètre d'usine des modules photovoltaïques, dans des conditions de test standard (STC) (éclairage  $E = 1000 \text{ W/m}^2$ , et température  $T = 25 \text{ degrés C}$ ).

La figure (III.13) représente les évolutions de la puissance  $P$ , et du courant  $I$ , pour un éclairage  $E = 1000 \text{ kw/m}^2$  et de température  $T = 25^\circ\text{C}$ , en fonction de la tension  $V$ , où l'on remarque pour l'intervalle de tension de  $[0, 37\text{v}]$ , il y a une proportion directe de la puissance avec la tension plus la tension est élevée plus la puissance  $P$  est grande, jusqu'à ce qu'elle atteigne la valeurs maximale de puissance  $P_{\text{max}} = 198\text{w}$  et pour le courant de court circuit, il garde sa valeur maximale constante  $I_{\text{cc}} = 5,4\text{A}$  jusqu'au point  $V = 37\text{v}$ , il chute progressivement.

Et pour l'intervalle de tension de  $[37\text{v}, 45\text{v}]$ , on constate une diminution de la valeur puissance  $P$  et du courant  $I_{\text{cc}}$ , jusqu'à l'annulation à la valeur de  $V_{\text{co}}$  à  $45\text{v}$ .

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

Dans ce chapitre, nous avons fait la modélisation et la simulations sous matlab/simulink de la cellule PV, et module PV composés de 60 cellules connectés en série fonctionnant dans les conditions standard  $E=1000\text{w/m}^2$ ,  $T=25\text{C}^\circ$ .

Nous avons vu l'effet des conditions climatiques, température et éclairement, sur leurs performances, par l'étude de leurs caractéristiques électriques. Nous avons vu que la variation du courant et de la puissance par rapport à la tension est non linéaire, le point de puissance maximale (PPM) est caractérisé par le courant ( $I_{\text{max}}$ ) et la tension ( $V_{\text{max}}$ ), qui peut être défini à partir de ces courbes.

Nous avons présenté l'influence d'un facteur intérieur sur ces caractéristiques qui englobe toute les pertes sous forme d'une résistance appelée, la résistance en série.

On a déduit que le courant et la puissance, augmentent proportionnellement avec l'éclairement  $E$ , et la température  $T$ , jusqu'à une valeur de seuil de tension où ces caractéristiques diminuent brusquement et s'annulent à la valeur de  $V_{\text{co}}$ , mais la résistance séries, ont fait, elle a un effet inverse sur la puissance et le courant fournit par la cellule PV.

### **III.7 Références :**

- [40] Y.djeriri, Présentation de Matlab Simulink, cours de Licence et Master, Université Djilali El Yabes, Département d'électrotechnique, Algérie, 2014/2015.
- [41] V. Benamara, Etude et simulation d'un panneau solaire raccordé au réseau avec périphérique de stockage, École De Technologie Supérieure Université Du Québec, M. Ing , Montréal, 2012.
- [42] Ouada Mehdi, 1Tarfaya Anis, 1Dr M.S. Meridjet, 2Dr Dib Djalel, 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, 2012.
- [43] NREL/ Matlab Simulink.

## Conclusion Générale

---

### Conclusion Générale

La demande mondiale d'énergie évolue rapidement et les ressources naturelles pour l'énergie telles que l'uranium, le gaz naturel et le pétrole diminuent en raison de la prolifération et du développement généralisés des industries, ces dernières années. Afin de répondre aux besoins énergétiques, des recherches sur les énergies renouvelables sont menées. Les énergies renouvelables sont un bon candidat pour répondre à la demande, comme il est connu, c'est une énergie propre, silencieuse, utilisable et gratuite.

Dans ce travail, nous avons étudié les différentes technologies utilisés pour la conception des cellules photovoltaïque et nous avons vu les différentes méthodes appliquées pour pouvoir arriver à une conception moins chère, efficace et d'une longue durée de vie.

Dans notre pratique, nous avons divisé le travail en deux parties.

Dans un premier temps, pour comprendre le rôle des facteurs climatiques sur le taux de production d'électricité, nous avons étudié l'effet de l'intensité d'éclairement  $E$  et de la température  $T$ , ainsi que la valeur de la résistance  $R_s$ , sur les performances de la cellule photovoltaïque.

Nous avons simulé par Matlab Simulink des systèmes de mesures pour déduire l'évolution du courant et la puissance fournie par rapport à la tension, on a choisi le module photovoltaïque de type LX 190M.

Les variations obtenues sont en accord avec la théorie, le courant et la puissance sont en proportion directe avec la tension mais pour un intervalle bien précis, c'est une caractéristique intrinsèque appropriée à chaque cellule photovoltaïque.

Et comme perspective on estime à simuler des stations de modules photovoltaïque et étudier les problèmes rencontrés au cours de leur production d'énergie et proposer des montages et des structures plus efficaces.

## Résumé

**Résumé :** Le but de cette étude est de comprendre le rôle des facteurs climatiques sur le taux de production d'électricité, nous avons étudié l'effet de l'intensité d'éclairement  $E$  et de la température  $T$ , ainsi que la valeur de la résistance  $R_s$ , et voir leurs effets sur les performances de la cellule et du panneau solaires.

Nous avons fait des simulations avec MATLAB, et les résultats montrent que ces facteurs ont un effet direct sur les performances de la cellule et du panneau solaires.

**Mots clés :** Eclairage, Température,  $R_s$ , Cellule solaire, Panneau solaire, Matlab Simulink.

**Abstract:** The purpose of this study is to understand the role of climatic factors on the rate of electricity production, we have studied the effect of the intensity of illumination  $E$  and the temperature  $T$ , as well as the value of the resistance  $R_s$ , and see their effect on the performance of the solar cell and panel.

We have done simulations with MATLAB, and the results show that these factors have a direct effect on the performance of the solar cell and panel.

**Key words:** Lighting, Temperature,  $R_s$ , Solar cell, Solar panel, Matlab Simulink.

**الملخص:** الغرض من هذه الدراسة هو فهم دور العوامل المناخية في معدل إنتاج الكهرباء ، وقد درسنا تأثير شدة الإضاءة  $E$  ودرجة الحرارة  $T$  وكذلك قيمة المقاومة  $R_s$  ، ومعرفة تأثيرها. على أداء الخلية الشمسية واللوح الشمسية. لقد أجرينا عمليات محاكاة باستخدام MATLAB ، وأظهرت النتائج أن هذه العوامل لها تأثير مباشر على أداء الخلية واللوح الشمسية.

**كلمات مفتاحية:** الإضاءة ، درجة الحرارة ،  $R_s$  ، الخلايا الشمسية ، الألواح الشمسية ، Matlab Simulink.