

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-MSILA

FACULTE DES SCIENCES  
DEPARTEMENT DE PHYSIQUE  
N° :PH MAT 05/2019.....



DOMAINE : SCIENCE DE LA MATIERE  
FILIERE : PHYSIQUE  
OPTION : PHYSIQUE DES MATÉRIAUX

**Mémoire présenté pour l'obtention**

**Du diplôme de Master Académique**

**Par : BOUSSAADIA KHALISSA**

**Intitulé**

**Etude de la dégradation de rendement électrique  
d'une cellule photovoltaïque**

**Soutenu le 09 / 07 /2019 devant le jury composé de :**

M.SALMI	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Président
A.NAHOUI	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Examineur
Z.HADAD	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Examineur
M.BEN HEMAIDA	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Rapporteur
Z. TORKI	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Co- Rapporteur

**Année universitaire : 2019/2018**

# *Dédicaces*

*Je dédie ce travail*

*A mes parents qui ont toujours été là pour  
moi tout au long  
de mes études.*

*A mes frères et mes sœurs et mon marie  
SALMI LAZHAR et mon bébé  
MOHAMAD DJAWAD.*

*A toute la famille BOUSSADIA et  
SALMI.*

*A mes amis et tous ceux qui me sont  
chers.*

*A tous ceux qui ont contribué de loin ou  
de près à ce travail.*

**BOUSSADIA KHALISSA**

## *Remerciements*

Je tiens à remercier ALLAH qui ma donné la force de faire ce modeste travail.

Je suis très heureuse de témoigner de ma profonde estime à mon encadreur M. «**BEN HAMIDA MOHAMEDE**» je lui suis très reconnaissante de m'avoir fait bénéficier de ses compétences scientifiques, ses avis et d'avoir proposé et dirigé ce travail. Je tiens à lui exprimer mon grand respect et mon admiration pour sa générosité et je le remercie de m'avoir orienté pour la réalisation de ce travail.

Je remercie vivement «**M. SALMI**», «**TORKI ZOHIRE**», «**BEN HAMIDA MOHAMEDE** » et «**Baaziz Hakim**».

J'exprime ma profonde reconnaissance à MR «**M.SALMI** » qui je bénéficiais de sa connaissance scientifique approfondis.

Un grand merci à «**torki zohire**» pour ses aides techniques, son savoir scientifique de qualité, ses avis, sa gentillesse, sa disponibilité et sa patience.

Mes remerciements vont également à tous les professeurs du département de physique.

Je me saurais aussi oublier mes amis et mes collègues, ainsi tous ceux qui ont participé de loin ou de près pour L'élaboration de ce mémoire.

# SOMMAIRE

<b>Chapitre I: Généralité Sur L'énergie Solaire</b>	
<b>I.1. introduction</b>	03
<b>I. 2. le soleil</b>	03
<b>I.3.rayonnement solaire</b>	04
<b>I.4. physique d'un cellule solaire</b>	06
<b>I.4.1. proprietes fondamentales des semi-conducteurs</b>	07
<b>I.4.2. structure a bandes dans un semi-conducteur</b>	08
<b>II.4.3. dopage d'un semi-conducteur</b>	09
<b>I.5. l'effet photovoltaïque</b>	10
<b>I.6. la cellule photovoltaïque</b>	11
<b>I.7. le circuit électrique équivalent</b>	12
<b>1.8. les grandeurs caractéristiques d'une cellule pv</b>	13
<b>1.8.1. le courant de court-circuit (icc)</b>	13
<b>1.8.2. tension de circuit ouvert (vco)</b>	13
<b>1.8.3. facteur de forme (ff)</b>	14
<b>1.8.4: le rendement de la conversion pv</b>	14
<b>I.9. modélisation de la cellule photovoltaïque</b>	14
<b>1.10. les modules photovoltaïques</b>	16
<b>1.10.1. association en série</b>	16
<b>1.10.2. association en parallèle</b>	17
<b>1.10.3. association en série parallèle</b>	17
<b>1.10.4. déséquilibres dans les groupements de modules</b>	18
<b>1.10.5. protection par diode</b>	19
<b>I.11. facteurs de dégradation dans la littérature</b>	20

## SOMMAIRE

<b>I.12. Conclusion</b>	21
<b>Chapitre II : Performances Et Dégradation Des Modules PV</b>	
<b>II.1. Performances et dégradation des modules pv</b>	22
<b>II.1. 1. Détermination des paramètres des modules</b>	22
<b>II.1. 2. Problème de dégradation</b>	23
<b>II.2. Dégradation des modules pv</b>	24
<b>II.2. 1. Facteur de dégradation</b>	25
<b>II.2. 2. Causes probables de la dégradation</b>	25
<b>II.3. Dégradation en physique de matériaux</b>	26
<b>II.3.1. Fonctionnement d'une cellule solaire</b>	26
<b>II.3. 1.1. L'absorption</b>	27
<b>II.3. 1.2. Semi-conducteur à gap indirect</b>	27
<b>II.3. 1.3. Semi-conducteur à gap direct</b>	28
<b>II.3. 3.4. Jonction p-n à l'équilibre thermique</b>	29
<b>II.3. 3.5. Jonction p-n hors équilibre</b>	30
<b>II.4. Cas de la cellule solaire au silicium</b>	31
<b>II.5. Caractéristique I-V d'une cellule solaire</b>	33
<b>II.5. 1. paramètres caractérisant une cellule solaire</b>	34
<b>II.5. 2. la caractéristique d'une cellule solaire réelle</b>	35
<b>II.6. Influence des paramètres environnementaux sur la caractéristique I-V d'une cellule solaire</b>	36
<b>II.6. 1. Influence de la température</b>	36
<b>II.6. 2. Influence de l'éclairement</b>	37
<b>II.6. 3. Efficacité d'une cellule solaire</b>	38
<b>II.7. Conclusion</b>	39

## SOMMAIRE

<b>Chapitre III : Résultats de simulation</b>	
<b>III.1 introduction</b>	40
<b>III.2 logiciels de simulation des cellules solaires photovoltaïques</b>	40
<b>III.3 AMPS-1D</b>	41
<b>III.3.1 utilisation de l'AMPS</b>	41
<b>III.3.2 propriétés générales du dispositif et du matériau</b>	42
<b>III.3.2.1 les propriétés du matériau</b>	42
<b>III.3.2.2 propriétés générales du dispositif</b>	43
a) <b>Contactes avant et arrière</b>	43
b) <b>Recombinaisons aux surfaces</b>	43
c) <b>Réfectivité à la surface avant et arrière</b>	43
<b>III.3.1.2 paramètres de modélisation</b>	44
<b>III.3.1.3 conditions environnementales</b>	46
<b>III.3.3 avantages et inconvénients de l' AMPS</b>	46
<b>III.4 principe de la simulation numérique</b>	46
<b>III.5 présentation de la cellule étudiée</b>	48
<b>III.6 les paramètres du dispositif étudié</b>	48
<b>III.6.1 propriétés générales du substrat</b>	49
<b>III.6.2 propriétés des différentes couches</b>	49
<b>III.7. Modèle de simulation</b>	49
<b>III.8 effet de l'épaisseur</b>	50
<b>III.8.1 effet de la couche fenêtre ZNO</b>	50
<b>III.8.2 effet de l'épaisseur de la couche tampon CDS</b>	52
<b>III.9. Effet de température de la couche tampon CDS</b>	55
<b>III.10 Conclusion</b>	56

## SOMMAIRE

<b>Conclusion générale</b>	57
<b>La références La bibliographiques</b>	

## Listes des figures

<b>Figure I.1</b> : Coupe schématique du soleil	04
<b>Figure I.2</b> : Analyse spectrale du rayonnement solaire	05
<b>Figure I.3</b> : Composantes du rayonnement solaire au sol	06
<b>Figure I .4</b> : Cellule solaire conventionnelle.	06
<b>Figure I .5</b> . Niveaux énergétiques dans un semi-conducteur	08
<b>Figure I .6</b> : Niveau Donneur et accepteur dans un semi-conducteur.	10
<b>Figure I .7</b> : Structure en bande d'un semi-conducteur en génération-recombinaison. Bas : illustration du dopage du silicium par le phosphore et le bore et formation d'une jonction pn. Sous éclairement, les charges photo-générées sont séparées par la jonction pn.	11
<b>Figure I.8</b> : Structure et principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.	12
<b>Figure I.9</b> : Schéma équivalent d'une cellule PV sous éclairement.	12
<b>Figure I.10</b> : Densité de courant de court-circuit et tension de circuit ouvert en fonction de l'illumination.	14
<b>Figure I.11</b> . Caractéristiques I(V) d'une cellule photovoltaïque soumise à différents éclairements	15
<b>Figure I.12</b> . Circuit équivalent complet d'une cellule photovoltaïque	15
<b>Figure 1.13</b> : Groupement de cellules en série.	17
<b>Figure 1.14</b> : Groupement de cellules en parallèle.	17
<b>Figure 1.15</b> : Groupement de modules en série- parallèle.	18
<b>Figure 1.16</b> : La caractéristique I(V) d'une cellule PV éclairée et polarisée par une source extérieure.	19
<b>Figure I.17</b> : Protection par diodes séries et parallèles dans un groupement de modules.	20

<b>Figure (II .1)</b> Lissage de la caractéristique I-V expérimentalement	22
<b>Figure (II .2)</b> Caractéristique expérimentale et translaturée du module de référence.	25
<b>Figure (II .3)</b> Décoloration de l'EVA	26
<b>Figure (II .4)</b> Coefficient d'absorption optique pour le silicium (gap indirect)	28
<b>Figure (II .5)</b> Polarisation d'une jonction p-n par une source extérieure	30
<b>Figure (II .6)</b> Exemple d'une caractéristique I-V d'une cellule solaire	33
<b>Figure (II .7)</b> Influence de la température sur la caractéristique d'une cellule solaire	37
<b>Figure (II .8)</b> Influence de l'éclairement sur la caractéristique d'une cellule solaire	38
<b>Figure III.1:</b> Ensemble de sous - fenêtre pour introduire les différentes paramètres	42
<b>Figure III.2 :</b> Fenêtre des Propriétés générales du dispositif et du matériau	42
<b>Figure III.3 :</b> Fenêtre d'informations des couches	42
<b>Figure III.4 :</b> Fenêtre d'informations du dispositif	43
<b>Figure III.5:</b> L'interface de l'exécution.	44
<b>Figure III.6 :</b> Interface des résultats	44
<b>Figure III.7:</b> Le spectre solaire AM1.5 utilisé dans ce travail par l'AMPS-1D.	46
<b>Figure III.8 :</b> Schéma simplifié d'une cellule solaire.	48
<b>Figure III.9.</b> Variation du courant en fonction de l'épaisseur.	50
<b>Figure III.10.</b> Variation de rendement en fonction de l'épaisseur	51
<b>Figure III.11.</b> Variation de facteur de forme en fonction de l'épaisseur	51
<b>Figure III.12.</b> Variation de la tension en fonction de l'épaisseur.	51
<b>Figure III.13.</b> Variation du courant en fonction de l'épaisseur.	53

<b>Figure III.14.</b> Variation du rendement en fonction de l'épaisseur.	53
<b>Figure III.15.</b> Variation du facteur de forme en fonction de l'épaisseur.	53
<b>Figure III.16.</b> Variation de la tension en fonction de l'épaisseur.	54

## Liste des tableaux

<b>Tableau I.1:</b> Caractéristiques principales du soleil	03
<b>Tableau II.1:</b> Performance de quelque module PV	24
<b>Tableau II.2:</b> Paramètres de variation du gap $E_g(0)$	37
<b>Tableau III.1 :</b> propriétés du substrat	49
<b>Tableau III.2 :</b> propriétés des trois couches ZnO, CdS et CZTS	49
<b>Tableau III.3 :</b> Paramètres de la densité de défauts des matériaux en ZnO, CdS et CIGS	50
<b>Tableau III.4 :</b> Les paramètres de sortie de la cellule avec l'effet de l'épaisseur de la couche fenêtre.	52
<b>Tableau III. 5:</b> Les paramètres de sortie de la cellule avec l'effet de l'épaisseur de la couche tampon	54
<b>Tableau III. 6:</b> Les paramètres de sortie de la cellule avec l'effet de température de la couche tampon	55

## Liste des Symboles et Abréviations

Symboles	Signification	Unité
J	La densité de courant	mA/cm <sup>2</sup>
V	Le voltage	v
QE	Le rendement quantique	%
$\lambda$	La longueur d'onde de la lumière	$\mu\text{m}$
J <sub>CC</sub>	La densité de courant de court circuit	mA/cm <sup>2</sup>
V <sub>CO</sub>	La tension de circuit ouvert	v
FF	Le facteur de forme	%
E	Energie	ev
h	Constante de Planck (6.62 x 10 <sup>-34</sup> J.s)	J.s
$\alpha$	Coefficient d'absorption	cm <sup>-1</sup>
$\epsilon_r \epsilon_0$	La permittivité du semi-conducteur	F cm <sup>-1</sup>
$\mu_n$ et $\mu_p$	La mobilité des électrons et des trous respectivement	cm <sup>2</sup> .V <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup>
E <sub>g</sub>	L'énergie de bande interdite	eV
ZnO	Oxyde de Zinc	-
CdS	Sulfure de Cadmium	-
CIGS	Di-sélénium de galium d'indium de cuivre (Cu (In, Ga)Se <sub>2</sub> )	-
CdTe	Tellure de Cadmium	-
AM 1.5	Spectre de la lumière solaire	-
Mo	Molybdénium	-



***Introduction général***

## INTRODUCTION GENERALE

Aujourd'hui, plus de 85% d'énergie utilisée dans le monde provient de gisements de combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz) ou d'uranium, constitués au fil des âges et de l'évolution géologique. Ces énergies sont considérées comme des énergies de stock. En d'autres termes, elles sont épuisables. Actuellement d'utilisations largement majoritaires, les ressources fossiles posent plusieurs problèmes : épuisement des réserves naturelles pour des applications généralement non recyclables (combustibles et souvent mauvais rendements) au dépens d'applications plus intéressantes, tensions géopolitiques qu'elles génèrent, impacts économiques et environnementaux tout comme la participation au réchauffement climatique avec des émissions de gaz à effet de serre.

L'énergie photovoltaïque provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité. Cette conversion se produit au sein de matériaux semi-conducteurs, qui ont comme propriété de libérer leurs porteurs de charge (électrons et trous) sous l'influence d'une excitation extérieure.

Dans le domaine de la conversion photovoltaïque, bien que différentes filières et technologies se partagent le marché, on constate que c'est toujours le silicium cristallin qui en occupe la plus grosse place. Néanmoins, dans un souci de réduction de coût, un autre axe de recherche s'est créé à partir des années 1980, avec un objectif prioritaire la réduction du coût de fabrication. L'un des moyens proposés pour la diminution du coût par watt, est de diminuer le coût de fabrication de la cellule photovoltaïque. Autrement dit, diminuer considérablement la quantité de matériaux semi-conducteurs entrant dans la composition de chaque cellule et augmenter sa durée de vie. Ceci a par conséquent conduit à l'émergence de nouvelles filières technologiques, dites de « deuxième et troisième génération », basées sur l'utilisation de couches minces et de nanomatériaux.

A ce titre, le développement de cellules photovoltaïques de deuxième génération à base de couches minces  $\text{Cu(In,Ga)Se}_2$  ou CZTS semble prometteur. En effet, le rendement de ces cellules a dépassé les 20% ces dernières années. Récemment, beaucoup de laboratoires de recherche à travers le monde travaillent sur les semi-conductrices chalcopyrites pour comprendre les propriétés électroniques, structurales, élastiques, mécaniques et optiques de ces matériaux.

Cet engouement à ces matériaux est dû à leurs propriétés optiques et électroniques intéressantes et à leurs diverses applications pratiques dans les cellules solaires, les détecteurs photovoltaïques et l'électronique. Ils servent de base surtout pour la cellule solaire ainsi que les modules et capteurs photovoltaïques. La recherche dans ce domaine a toujours comme but majeur d'améliorer le rendement électrique et quantique de ces cellules photovoltaïques à base de couches minces.

Notre but principal dans ce travail est l'identification des verrous technologiques qui se posent actuellement à la fabrication de cellules photovoltaïques en couches minces à base de matériaux chalcopyrites CZTS en se focalisant surtout sur l'amélioration du rendement de conversion de ces dispositifs. Pour cela, une étude de simulation et de conception d'une structure spécifique de cellule solaire à base de CIGS a été menée dans le but d'obtenir un rendement de conversion électrique optimal. Dans ce travail de modélisation et de simulation, nous utilisons le logiciel AMPS -1D, pour étudier les performances des cellules solaires à base de  $\text{Cu(In,Ga)Se}_2$  (CZTS).

Notre mémoire comporte trois chapitres. Nous avons commencé dans le premier chapitre par une présentation de l'énergie solaire et le principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques, ainsi des aspects physique autour les semi conducteur.

Étant donné que nous sommes intéressés à l'étude de dégradation énergétique des cellules photovoltaïques à base de couches minces, le deuxième chapitre on présente les performances de dégradation d'une cellule photovoltaïque.

Dans le dernier chapitre nous avons présenté la modélisation et la simulation d'une structure à hétérojonction  $\text{ZnO/CdS/ CZTS}$  sous environnement AMPS -1D, dans le but d'étudier l'influence de la température sur le rendement électrique d'une structure à hétérojonction  $\text{ZnO/CdS/ CZTS}$ . Nous avons par la même occasion, déterminé l'influence des paramètres physiques et technologiques, tels que l'épaisseur, sur les performances du dispositif.

# **CHAPITRE I**



***Généralités***

## I.1. Introduction

Le soleil est l'origine de toute forme d'énergie sur terre, que ce soit pour les énergies conventionnelles d'origine fossile comme les hydrocarbures ou pour les énergies renouvelables dont les plus importantes sont le solaire, l'éolien et la biomasse.

L'énergie solaire est la plus dominante de toutes les énergies renouvelables, elle est l'une des plus facilement exploitables comme la plupart des énergies douces, elle donne à l'usager la possibilité de subvenir sans intermédiaire à une partie de ses besoins.

Dans cette partie nous allons définir quelques notions préliminaires sur le rayonnement solaire nécessaires à la compréhension du principe de la photovoltaïque.

## I. 2. Le soleil

Sur le plan cosmogonique le soleil est une étoile quelconque dont ni les propriétés physiques ni la position ne la distinguent des milliards d'autres étoiles formant la Galaxie. Sur le plan humain cette étoile a une importance primordiale puisque sans elle la vie n'existerait pas sur terre. Le tableau suivant montre quelques caractéristiques principales du soleil :

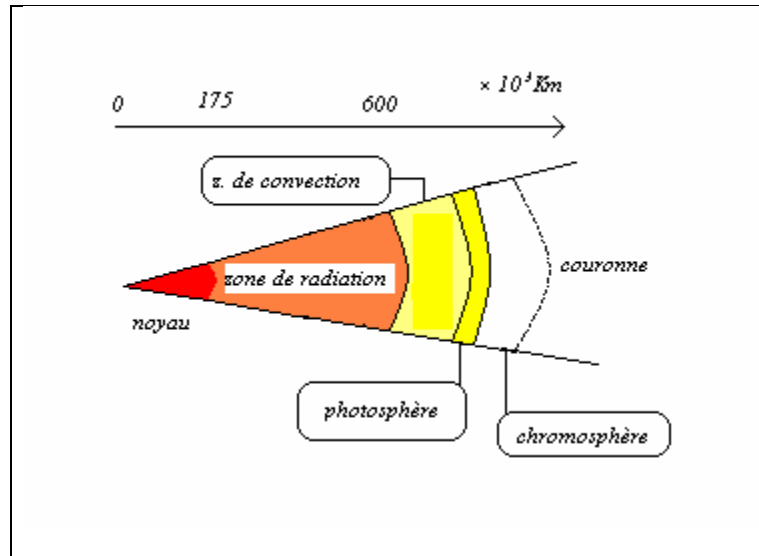
<i>Caractéristique</i>	<i>Valeur</i>
<i>Masse</i>	$1,989 \times 10^{30} \text{ Kg}$
<i>Diamètre</i>	$1,392 \times 10^9 \text{ m}$
<i>Masse volumique moyenne</i>	$1410 \text{ Kg m}^{-3}$
<i>Puissance rayonné</i>	$3,83 \times 10^{26} \text{ W}$
<i>Température superficielle</i>	$5770 \text{ K}$

**Tableau I.1:**Caractéristiques principales du soleil [1].

La structure du soleil est schématisée sur la figure (I.1). On distingue quatre zones particulières; le noyau, la photosphère, la chromosphère et la couronne [1]:

- ❖ Le noyau : c'est le cœur du soleil, sa température est très élevée ( $15 \times 10^6 \text{ K}$ ) ainsi que sa pression ( $2 \times 10^{11} \text{ bars}$ ) et sa densité ( $\sim 105 \text{ Kg m}^{-3}$ ), on note que cette dernière diminue avec l'éloignement au centre. L'énergie produite au sein du noyau se propage par diffusion radiative puis par convection turbulente jusqu'à la photosphère d'où elle s'échappe sous forme de rayonnement électromagnétique vers l'espace.
- ❖ La photosphère : est une couche d'environ 300 Km d'épaisseur avec une température de 5770 K. Elle donne l'image visible du soleil

- ❖ La chromosphère : est l'atmosphère du soleil. Elle a une épaisseur d'environ 8 000Km et une température de 20 000 K environ.



**Figure I.1 :** Coupe schématique du soleil [1].

- ❖ La couronne : est le prolongement de la photosphère. Sans limite précise, elle est formée de gaz peu denses et ionisés. Invisible depuis la terre, car son éclat (brillance) se confond avec celui du ciel bleu. Elle ne peut être observée que pendant une éclipse solaire. Sa température est très élevée puisqu'elle dépasse le million de degrés.

Le soleil est composé chimiquement [2] de 70 % d'hydrogène et d'environ 28 % d'hélium et le 2 % restant étant mélange de plus de 100 éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques connus. La distance terre-soleil est égale en moyenne et approximativement à [1]  $150 \times 10^6$  Km; cette distance est si grande que sa lumière nous parvient [2] 8 minutes après avoir été émise.

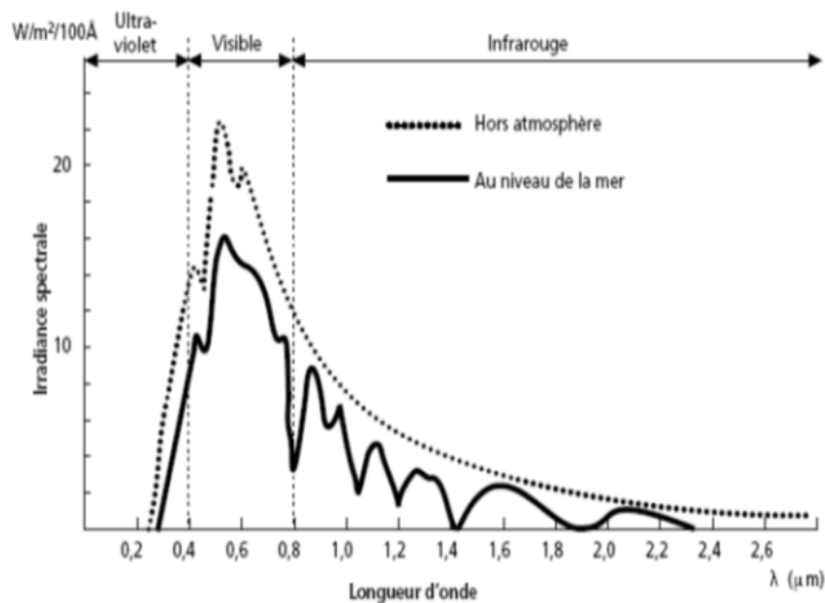
### I.3.Rayonnement solaire

Le rayonnement ou spectre solaire est comparable à celui d'un corps noir à une température de 5800 K, il est compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0,22 à  $10\mu\text{m}$  et se décompose approximativement sur 3 bandes :

- 9% dans la bande des Ultraviolets ( $< 0,4 \mu\text{m}$ )
- 47% dans la bande visible ( $0,4 \text{ à } 0,8 \mu\text{m}$ )

- 44% dans la bande des infrarouges ( $> 0,8 \mu\text{m}$ )

L'énergie solaire reçue sur terre en dehors de l'atmosphère est estimée à  $1370 \text{ W/m}^2$  cependant elle s'atténue et perd son intensité en traversant l'atmosphère ne dépassant pas les  $1000 \text{ W/m}^2$  à la surface de la terre en raison de l'absorption dans ce dernier, ce chiffre variera par la suite en fonction de la localisation géographique du site (latitude), la saison, l'heure, les conditions météorologiques (nébulosité, poussière, humidité...), et l'altitude du lieu.[3]

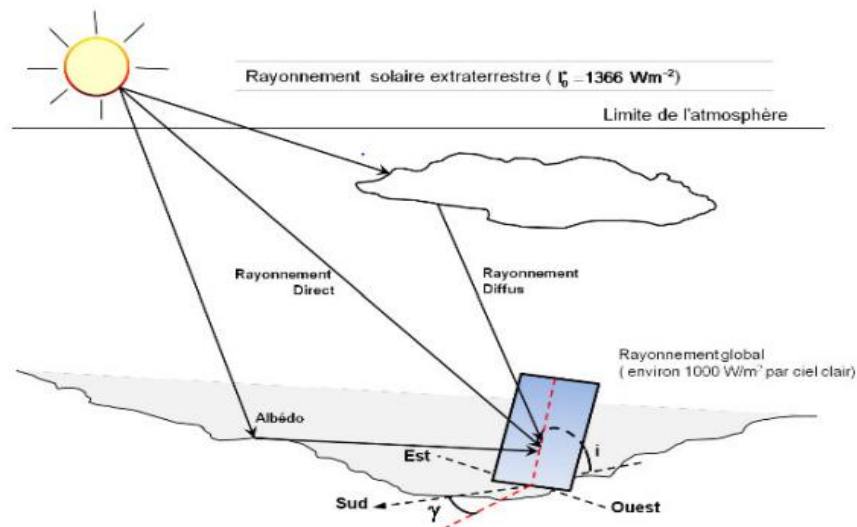


**Figure I.2:** Analyse spectrale du rayonnement solaire. [4]

Etant absorbé et diffusé en traversant l'atmosphère seul une fraction modifiée du Rayonnement solaire parvient à la surface de la terre se composant de 3 différents types de Rayonnements :

- Le rayonnement direct : Rayonnement provenant du soleil en ligne droite du seul Disque solaire, il est nul lorsque le soleil est complètement couvert par les nuages.
- Le rayonnement diffus : Radiation solaire arrivant sur la surface de la terre après Déviation de la lumière par les nuages et les molécules diverses, elle est donc nulle que la nuit.
- Le rayonnement réfléchi (albédo) : Radiation solaire incidente réfléchi par une Surface.

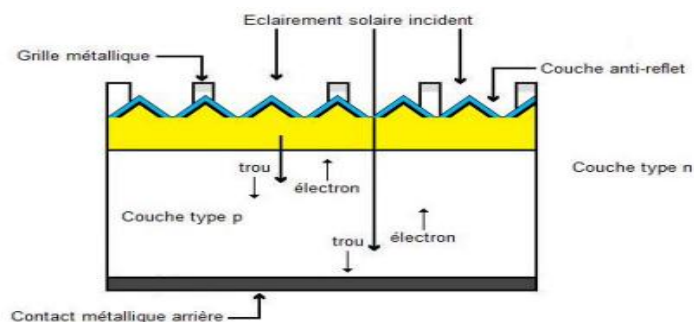
Le rayonnement global est donc la somme des 3 rayonnements directs, diffus, et réfléchi Comme illustrer dans la figure si dessous :



**Figure I.3:** Composantes du rayonnement solaire au sol.

#### II.4. PHYSIQUE D'UN CELLULE SOLAIRE

Un semi-conducteur est un matériau dont la concentration en charges libres est très faible par rapport aux métaux [33]. Les cellules solaires à base de semi-conducteur sont essentiellement des dispositifs tout à fait simples. Les semi-conducteurs ont la capacité d'absorber la lumière et de délivrer une portion de l'énergie des photons absorbés aux porteurs du courant électrique: les électrons et les trous [Antonio]. Ce procédé, découvert par E. Becquerel en 1839, est appelé effet photovoltaïque. Mais il faudra attendre près d'un siècle pour que les scientifiques approfondissent et exploitent davantage ce phénomène de la physique. Pratiquement, une cellule solaire est une diode qui a été conçue pour absorber et convertir, de manière efficace, l'énergie de la lumière du soleil en électricité [34]. La structure d'une cellule solaire conventionnelle est montrée dans **la figure 1.1**.



**Figure I .4 :** Cellule solaire conventionnelle.

La surface avant de la cellule solaire capte la lumière du soleil. Une grille métallique forme l'un des contacts électriques de la diode et permet à la lumière de pénétrer dans le semi-conducteur entre les lignes de la grille et d'être absorbée et convertie en énergie électrique. Une couche antireflet entre les lignes de la grille sert à augmenter la quantité de lumière transmise au semi-conducteur en minimisant la réflexion. La diode est façonnée quand on réunit ensemble un semi-conducteur de type n et un autre de type p pour former une jonction métallurgique. Ceci est typiquement réalisé par diffusion ou implantation d'impuretés spécifiques appelées dopants. L'autre contact électrique est formé par une couche métallique sur la surface arrière de la cellule solaire [34, 35].

$$E_{\lambda} = \frac{hc}{\lambda} \quad (\text{I.1})$$

*c* : célérité de la lumière dans le vide ( $2,998. 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ ),

*h* : constante de Planck ( $6,626. 10^{-34} \text{ Js}$ ).

Seulement les photons ayant une énergie suffisante pour la création des paires électron-trou, c'est-à-dire, ceux ayant une énergie supérieure ou égale au gap du semi-conducteur, vont contribuer à la conversion de l'énergie lumineuse. Par conséquent la nature spectrale de l'éclairement solaire est une considération importante dans la conception des cellules solaires efficaces [33].

#### **II.4.1. PROPRIETES FONDAMENTALES DES SEMI-CONDUCTEURS**

Afin de comprendre le fonctionnement des cellules solaires aux semi-conducteurs, il faut se familiariser avec quelques concepts de base de la physique du solide . Les cellules solaires peuvent être fabriquées à partir d'un nombre de matériaux semi-conducteurs. Généralement, les plus utilisés sont le silicium (Si) monocristallin, polycristallin et amorphe. On trouve aussi les cellules à base de matériaux comme GaAs, GaInP, Cu(InGa)Se<sub>2</sub>, CdTe,...etc [33]. Les matériaux des cellules solaires sont largement choisis sur la base de leurs caractéristiques d'absorption, devant s'adapter avec le spectre solaire et sur la base de leurs coûts de fabrication. Le silicium a été, pour longtemps, un choix adéquat dû au fait qu'il présente une assez bonne absorption adaptée au spectre solaire et aussi au fait que sa technologie est bien développée en raison de sa dominance dans l'industrie électronique des semi-conducteurs [33].

### II.4.2. STRUCTURE A BANDES DANS UN SEMI-CONDUCTEUR

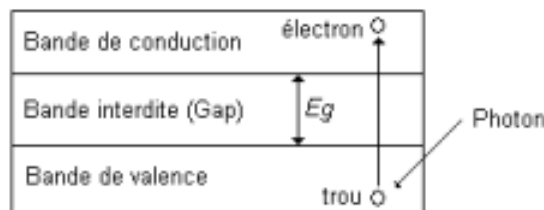
Les propriétés chimiques et électriques de l'atome sont liées aux électrons qui gravitent autour du noyau. Les électrons se répartissent en orbites ; la dernière définit, en fait, les principales propriétés de l'élément correspondant. L'électron possède, par rapport au noyau, une certaine énergie  $E$  à laquelle correspond un potentiel  $\phi$  :

$$E = -q\phi + \text{Constante} \quad (\text{I.2})$$

*E est en électron-volt.*

Le comportement dynamique de l'électron peut être déduit par la résolution de l'équation de Schrödinger. L'application de la mécanique quantique à l'atome n'a pas modifié fondamentalement les résultats de la théorie de Bohr. Basée sur le principe d'exclusion de Pauli et le principe d'incertitude d'Heisenberg, la mécanique quantique montre que, pour un atome isolé, l'électron ne peut occuper que des niveaux discrets (quantifiés) d'énergie. Les orbites, c'est-à-dire, les états d'énergie permis aux électrons, dépendent (équation de Schrödinger) de la fonction potentielle dans laquelle ces électrons se meuvent (fonction en  $1/r$  dans l'atome isolé) [17].

Ainsi, pour un monocristal, on peut montrer qu'il existe des domaines d'énergie appelés bandes dont certaines sont permises et d'autres interdites (**figure I.5**) [33, 36].



**Figure I.5.** Niveaux énergétiques dans un semi-conducteur

La solution conduit à la définition de la structure à bandes (niveaux d'énergie permis pour l'électron) et la relation entre l'énergie de l'électron et le moment du semi-conducteur [33]. En ne considérant que les électrons de la couche périphérique, c'est-à-dire les électrons ayant l'énergie la plus élevée, les éléments chimiques peuvent être classés en deux catégories principales [37] :

- ✓ Les isolants et les semi-conducteurs : caractérisés par une bande interdite qui sépare deux bandes permises,
- ✓ Les métaux : il n'y a pas de bande interdite et les bandes permises se recouvrent.

La largeur de la bande interdite est appelée gap ( $E_g$ ). Elle est d'autant plus grande que le matériau est isolant. Dans un semi-conducteur à une température absolue nulle, la bande de valence est complètement pleine et la bande de conduction est vide de telle sorte qu'aucune conduction électrique n'est possible (tous les électrons sont liés à leurs atomes). Cependant, dans un semi-conducteur, l'énergie nécessaire pour séparer les électrons externes de leurs atomes est relativement faible. Cette énergie correspond à l'énergie du gap  $E_g$  de telle sorte que les électrons reçoivent une énergie suffisante pour faire une transition de la bande de valence vers la bande de conduction. Cette énergie peut être une augmentation de la température ou une interaction avec un photon lumineux [38].

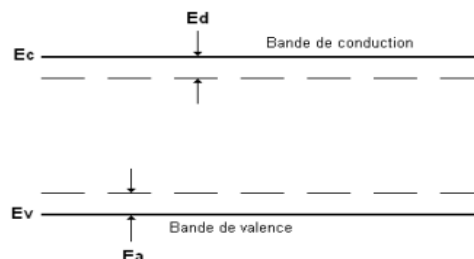
Le gap  $E_g$  et sa structure en fonction du vecteur d'onde sont des caractéristiques clés du matériau semi-conducteur et de l'importance fondamentale de l'opération de la cellule solaire. Les principales caractéristiques sont la variation du gap sous l'effet de la température et la grandeur du vecteur d'onde associé à une faible énergie des transitions [33. 38. 34].

#### II.4.3. Dopage d'un semi-conducteur

On peut contrôler le nombre des électrons et des trous dans leurs bandes respectives (c'est-à-dire la conductivité du semi-conducteur) par introduction d'impuretés spécifiques (ou additifs) appelées donneurs ou accepteurs [1,7]. Ces additifs ont la propriété de se placer en position de substitution dans le cristal : dans le silicium dopé au phosphore, par exemple, chaque atome de phosphore prend la place d'un atome de silicium [7]. Si on prend le cas du silicium dopé par un élément pentavalent comme le phosphore, l'atome de phosphore qui possède cinq électrons de valence en met quatre en liaison covalentes avec ses quatre voisins tétravalents (silicium). Il reste donc un électron excédentaire qui est nécessairement peu lié à l'atome de phosphore. Il suffit, à cet atome excédentaire, un surplus d'énergie très faible pour rompre sa liaison et devenir un électron libre situé, énergétiquement, dans le bas de la bande de conduction ou peu au dessus. Les énergies d'ionisation des atomes pentavalents ont été mesurées : elles valent environ 0.01 eV pour un cristal de germanium et 0.05 eV environ pour un cristal de silicium [7]. Dans ce cas, l'atome pentavalent est dit donneur d'électrons et le silicium dopé est de type N. Si, par contre, le silicium est dopé par un élément trivalent (le bore, par exemple), chaque atome trivalent met ses trois électrons de valence en liaison avec trois de ses quatre voisins, et capture un électron d'un quatrième atome pour devenir un ion négatif et créer un ion positif  $Si^+$ , ce qui fait apparaître un trou. Dans ce cas, l'atome

trivalent est dit accepteur d'électrons. Ce type de dopage aboutit à un silicium de type P. Toutes les impuretés introduisent des états électroniques dans la structure à bandes (souvent dans la bande interdite entre  $E_C$  et  $E_V$  comme c'est illustré dans la **figure II.6**) [1,2,7]. Si l'état d'énergie  $E_D$  introduit par un atome est suffisamment proche de la limite de la bande de conduction (avec quelques  $kT$ ), il y aura une énergie thermique suffisante

pour permettre l'extraction d'électrons pour occuper un état dans la bande de conduction. L'état donneur sera donc chargé positivement. D'une façon similaire, l'atome accepteur introduira, dans l'état d'énergie  $E_A$ , une charge négative. Dans un semi-conducteur, l'introduction contrôlée des donneurs et des accepteurs permet la création de deux types du semi-conducteur, l'un de type n (les électrons sont la source primaire de la conduction électrique) et l'autre de type p (les trous sont la source primaire de la conduction électrique). Ces deux types constituent la base de la fabrication de tous les dispositifs des semi-conducteurs y compris les cellules solaires [1,2].

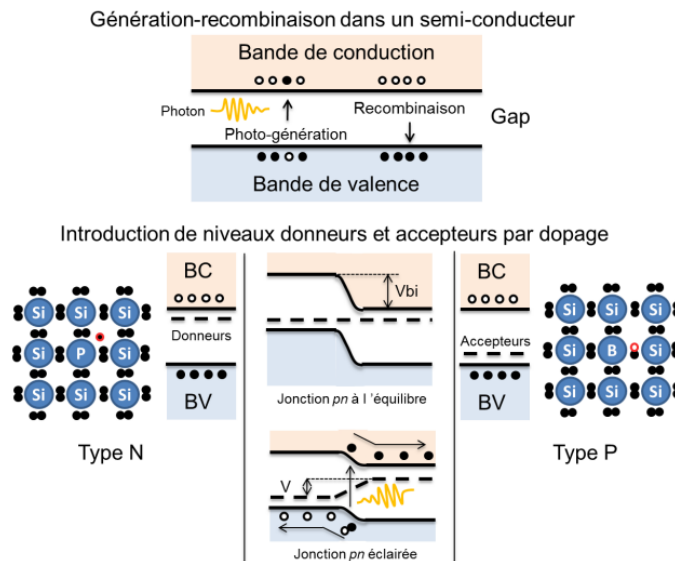


**Figure I.6 :** Niveau Donneur et accepteur dans un semi-conducteur.

La distribution spatiale non uniforme de ces états renforce le concept qu'ils sont des états localisés (source primaire de la conduction électrique). Ces deux types constituent la base de la fabrication de tous les dispositifs des semi-conducteurs y compris les cellules solaires [1,2].

### I.5. L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est la transformation directe de la lumière en électricité. Lorsqu'un photon d'énergie supérieure ou égale à l'énergie de gap est absorbé par le matériau semi-conducteur, il passe une partie de son énergie par collision à un électron. L'électron passe de la bande de valence à la bande de conduction et laisse un trou derrière lui, d'où l'apparition d'une paire électron-trou, c'est la génération des charges libres [5].



**Figure I.7:** Structure en bande d'un semi-conducteur en génération-recombinaison. Bas : illustration du dopage du silicium par le phosphore et le bore et formation d'une jonction pn. Sous éclairage, les charges photo-générées sont séparées par la jonction pn.

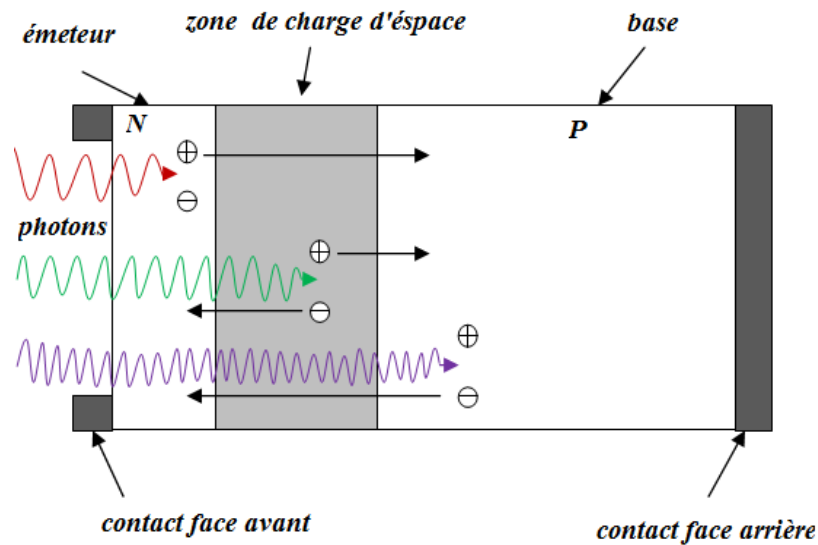
## I.6. La cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque, qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé et d'autres paramètres.

Une cellule PV est réalisée généralement à partir de deux couches, une dopée P et l'autre dopée N, créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Cette jonction peut être d'un même matériau (homo jonction P-N) ou entre deux matériaux (hétérojonction). Cette transformation photovoltaïque est basée sur les trois mécanismes suivants :

- absorption des photons d'énergie  $h\nu < E_g$  par le matériau constituant le dispositif.
- conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires électron-trou dans le matériau semi-conducteur.
- collecte des particules générées dans les régions neutres N et P sous l'effet d'un champ électrique interne.

La (I.8) montre le principe de fonctionnement d'une cellule PV.



**Figure I.8:** Structure et principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.

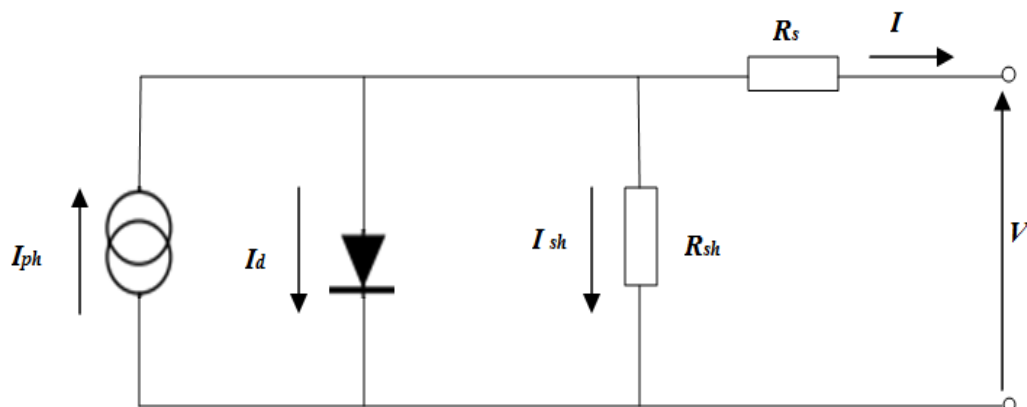
Dans la ZCE (zone de charge d'espace), les paires électron-trou créées par les photons incidents sont dissociées par le champ électrique. Les électrons vont aller vers la région N et les trous vers la région P.

Dans la zone N, les trous qui atteignent la ZCE sont envoyés par le champ électrique dans la zone P, par contre dans la zone P c'est l'inverse. Ces deux procédures sont à l'origine du photo courant  $I_{ph}$ . C'est un courant de porteurs minoritaires.

La collection des porteurs de charges va créer une tension interne ; on l'appelle la tension du circuit ouvert  $V_{co}$ [6].

### I.7. Le circuit électrique équivalent

Le circuit électrique équivalent d'une cellule PV est le suivant :



**Figure I.9:** Schéma équivalent d'une cellule PV sous éclairage [7].

La cellule PV se comporte comme un générateur mixte qui donne un courant et une tension. Le circuit équivalent contient quatre composantes; un générateur de courant monté en parallèle sur une diode qui a un facteur d'idéalité  $n$  qui varie de 1 jusqu'à 2, et deux résistances de fuite, une montée en série et l'autre en parallèle.

La résistance série  $R_s$  est liée à l'impédance des électrodes et du matériau ; il en résulte que la tension  $V$  aux bornes de la cellule est différente de la tension aux borne de la jonction PN.

La résistance shunt  $R_{sh}$  correspond à la fuite de courant entre les deux zones N et P de la jonction ; il en résulte qu'une partie du courant  $I_{ph}$  sera dérivée par cette résistance et ne pourra être délivrée à la charge.

Le facteur d'idéalité de la cellule dépend des mécanismes de recombinaison dans la ZCE. Dans le cas idéal, on prend  $n=1$  .

## 1.8. Les grandeurs caractéristiques d'une cellule PV

Les grandeurs caractéristiques principales des cellules solaires sont :

- Le courant de court-circuit  $I_{cc}$
- La tension en circuit ouvert  $V_{co}$
- Le facteur de forme  $FF$
- Le rendement de conversion d'énergie  $\eta$ .

### 1.8.1. Le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ )

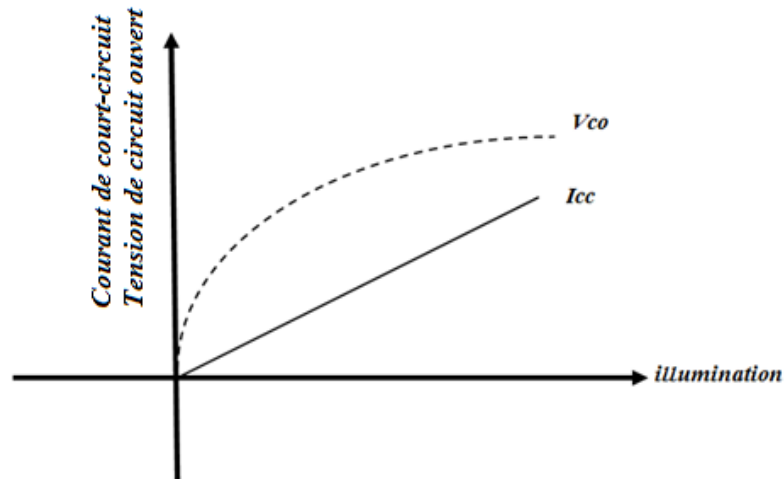
C'est le courant dans le circuit quand la charge est nulle. Il peut être réalisé en reliant les bornes positives et négatives par le fil de cuivre. En pratique ( $I_{cc}=I_{ph}$ ) Il varie linéairement en fonction de l'éclairement (figure 1.10) [8].

### 1.8.2. Tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ )

C'est la tension qu'il faudrait appliquer à la diode dans le sens passant pour générer un courant égal au photo courant. Elle est obtenue en plaçant ( $I=0$ ) dans l'expression du courant (1.2).

$$V_{co} = \frac{nkt}{q} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1\right) \quad (I.3)$$

Donc la variation de  $V_{co}$  est logarithmique en fonction de l'éclairement (figure 1.10) [8].



**Figure I.10:** Densité de courant de court-circuit et tension de circuit ouvert en fonction de l'illumination.

### 1.8.3. Facteur de forme (FF)

Le facteur de forme FF indique le degré d'idéalité de la caractéristique courant-tension, donc c'est le rapport entre la puissance de sortie maximale  $P_m = V_m I_m$  et la puissance idéale.

$$FF = \frac{P_m}{V_{co} I_{cc}} = \frac{V_m I_m}{V_{co} I_{cc}} \quad (I.4)$$

### 1.8.4: Le rendement de la conversion PV

Le rendement de la conversion est la propriété la plus importante d'une cellule PV. Il est défini comme rapport entre la puissance générée par la cellule et la puissance radiative incidente sur la surface de cette dernière [8].

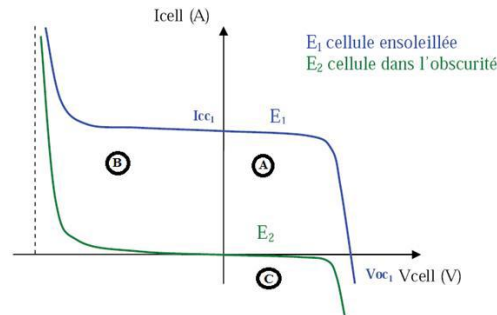
$$\eta = \frac{P_m}{P_i} = \frac{FF \cdot V_{co} I_{cc}}{P_i} \quad (I.5)$$

$P_i$  est la puissance radiative incidente.

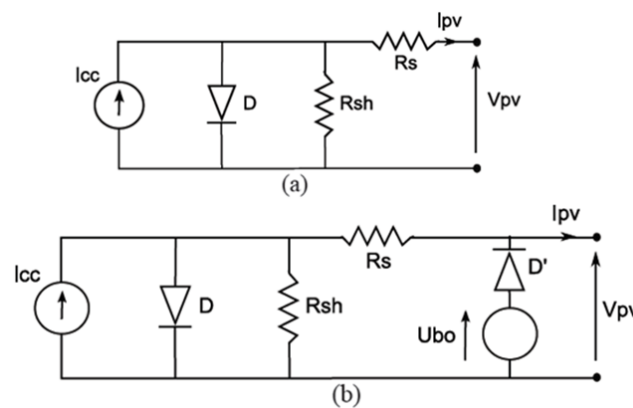
## I.9. Modélisation de la cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque possède une caractéristique  $I(V)$  non linéaire (Figure I-11a). La Caractéristique d'une cellule photovoltaïque balaie 3 quadrants sur les 4 existants [9]. Une Cellule PV est un récepteur dans le quadrant B et dans le quadrant C. Le fonctionnement dans ces deux quadrants est à proscrire car un risque de destruction par phénomène d'échauffement local est possible. Le fonctionnement dans le quadrant A est le fonctionnement normal, en effet dans ce cas, la cellule est un générateur, elle produit donc de l'énergie.

Une cellule photovoltaïque peut être modélisée par les schémas présentés sur la Figure I-11b.



**Figure I.11.** Caractéristiques I(V) d'une cellule photovoltaïque soumise à différents éclairagements



**Figure I.12.** Circuit équivalent complet d'une cellule photovoltaïque [10].

La Figure( I-12)a modélise la cellule PV dans les quadrants A et C. Pour simuler la caractéristique de la cellule dans le quadrant B une quatrième branche est rajoutée en parallèle (Figure I-12b). Cette branche est constituée d'un générateur de tension  $U_{bo}$  ( $U_{bo}$  tension d'avalanche) [11] et d'une diode mise en série. Celle-ci modélise le fonctionnement de la cellule PV lorsqu'elle est polarisée inverse. Dans le cas où la cellule PV fonctionne en générateur (quadrant A), elle produit un courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) proportionnel à l'éclairement.

L'équation du courant de sortie en statique dans la zone A (fonctionnement en générateur) est Donnée par :

$$I_{pv} = I_{cc} - I_0 \left[ e^{\frac{q(V_{pv} + I_{pv} R_s)}{KT}} - 1 \right] - \frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{R_{sh}} \tag{I.6}$$

Cette expression est directement liée au circuit équivalent de la cellule dans le quadrant A.

Avec :  $\alpha = \frac{k.t}{e}$  où  $K$  est la constante de Boltzmann ( $1,381 \times 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$ ),  $T$  la température de la cellule PV et  $e$  ( $1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$ ) la charge de l'électron.

Dans l'expression ci-dessus (Eq.1-6) :  $I_{pv}$  représente le courant fourni par la cellule dans le Quadrant A,  $V_{pv}$  est la tension aux bornes de la cellule PV,  $I_0$  est le courant de saturation et  $I_{cc}$  représente le courant de court-circuit de la cellule PV.

La résistance série  $R_s$  modélise les différentes pertes de connectiques et de contacts et la Résistance shunt  $R_{sh}$  caractérise les courants de fuite de la cellule [12].

Cette modélisation statique d'une cellule PV polarisée est très simple et peut être facilement mise en œuvre dans les outils de simulation. Les limites de ce modèle sont l'absence de modélisation de la dynamique de la cellule et des phénomènes d'échauffement au sein de la cellule. Néanmoins ce modèle permet de reproduire les principaux comportements d'une cellule PV dans les conditions réelles de fonctionnement et ses interactions avec les autres éléments du système. Un modèle dynamique est développé par Katsutoshi [13].

## 1.10. Les modules photovoltaïques

Le module PV est par définition un ensemble de cellules assemblées pour générer une puissance électrique exploitable lors de son exposition à la lumière. La cellule photovoltaïque élémentaire constitue un générateur électrique de très faible puissance (quelques watts). Les cellules sont généralement mises en séries pour générer une tension utilisable. Afin d'obtenir des puissances de quelques KW sous une tension convenable, il faut associer les modules en panneaux.

Pour un module au silicium cristallin utilisé pour une application en 12 V, il faut assembler en série 36 cellules (en 4 rangés de 9), valeur extrêmement courante concernant les panneaux commercialisés [15].

### 1.10.1. Association en série

La caractéristique courant-tension d'une cellule reste valable pour un groupement de cellules. Le courant généré par  $N_s$  générateurs en série étant le même dans toute la branche, on prendra soin de ne connecter en série que des cellules identiques ayant même densité de courant. La Figure (1.13) présente la courbe I(V) du groupement ainsi réalisé. La caractéristique résultante est obtenue en multipliant point par point et pour un même courant la tension individuelle  $V_i$  par  $N_s$  [14].

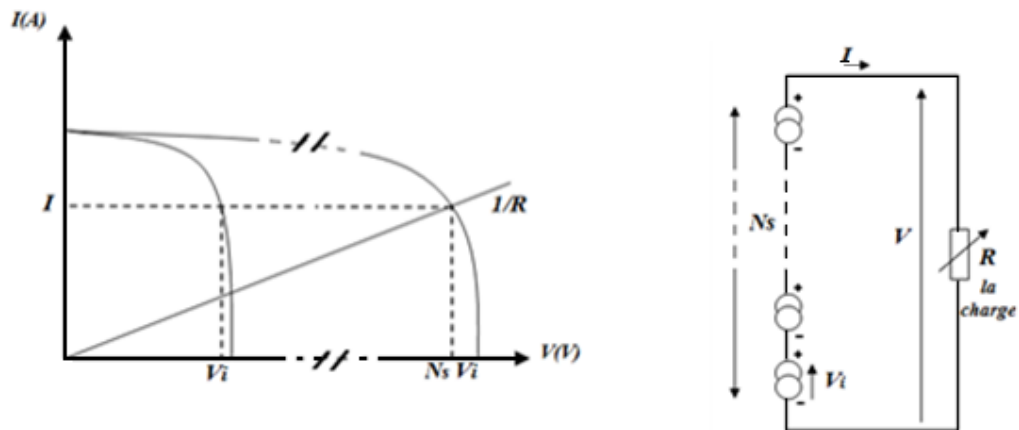


Figure 1.13: Groupement de cellules en série.

### 1.10.2. Association en parallèle

Pour augmenter le courant fourni à une charge on connecte les cellules en parallèle. La figure (1.14) présente la courbe  $I(V)$  d'un groupement de  $N_p$  cellules en parallèle. On ne monte que des cellules ayons la même tension de fonctionnement, les courants s'ajoutent, la nouvelle courbe est obtenue en multipliant point par point et pour chaque valeur de tension, le courant  $I_i$  de la cellule élémentaire par  $N_p$ [15].

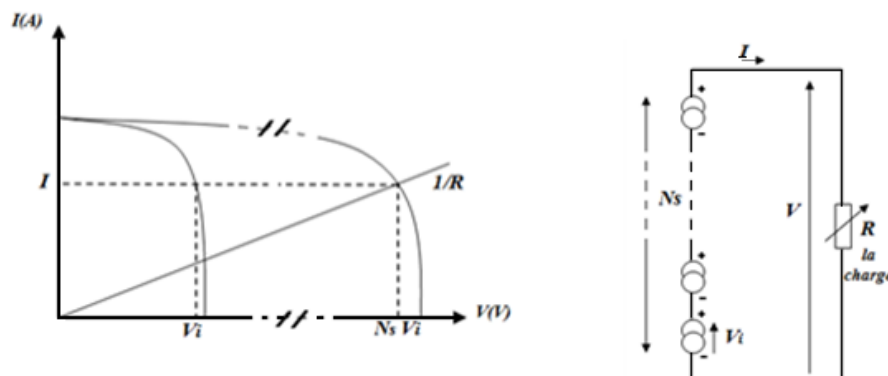


Figure 1.14: Groupement de cellules en parallèle.

### 1.10.3. Association en série parallèle

Pour élever la tension, les cellules sont associées généralement en séries sous forme de modules, ces modules sont ensuite associés en réseau série-parallèle de façon à obtenir la tension et le courant désirés. Cette association doit être réalisée en respectant des critères précis, en raison des déséquilibres apparaissant dans un réseau de modules en fonctionnement. La figure (1.15) présente un tel groupement de  $N_{ms}$  modules en série dans une branche, et  $N_{bp}$  branches en parallèle. Si  $P_m$  est la puissance crête disponible sur un module,

La caractéristique électrique globale courant-tension du panneau PV sera  $N_{ms} \cdot N_{bp}$  dans le cas idéal, où tous les modules ont des caractéristiques électriques identiques. L'influence de l'éclairement et de la température sur le courant de court-circuit et la tension de circuit ouvert reste la même que pour la cellule élémentaire [14 ,15].

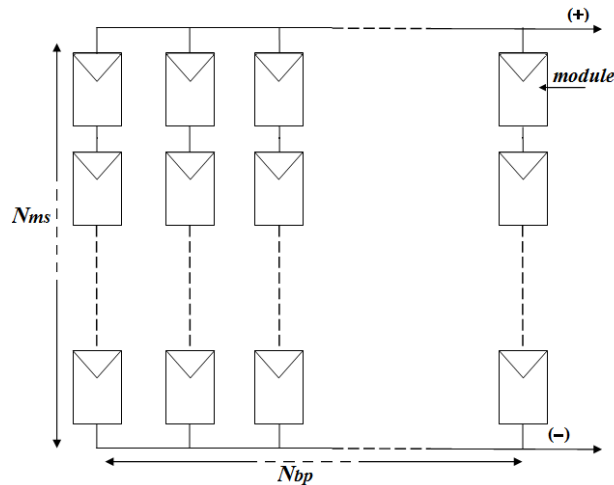


Figure 1.15: Groupement de modules en série- parallèle.

#### 1.10.4. Déséquilibres dans les groupements de modules

En pratique, sous l'effet d'ombrage, les modules dans un panneau PV sont soumis à des éclairements et à des températures différentes, ceci engendre des caractéristiques électriques des modules qui ne sont pas identiques. Ce qui implique un déséquilibre dans le groupement des modules.

La Figure (1.16) montre la caractéristique complète d'une cellule sous illumination. Le quadrant 1 ( $I > 0, V > 0$ ) correspond au fonctionnement en générateur. Si la tension aux bornes de la cellule est en raison du circuit extérieur, amenée à dépasser  $V_{co}$  (quadrant 2), la cellule travaille alors en récepteur de très faible impédance, comme une diode polarisée en direct. Si c'est le courant qui traverse la cellule qui, en raison du circuit extérieur, est amené à dépasser la valeur du courant de court-circuit, la cellule va à nouveau travailler en récepteur, mais cette fois de très forte impédance, comme une diode polarisée en inverse. On notera dans ce cas, qu'en raison de la résistance série  $R_s$ , la jonction n'est polarisée en inverse qu'à partir du point A pour lequel  $V = - R_s I$ .

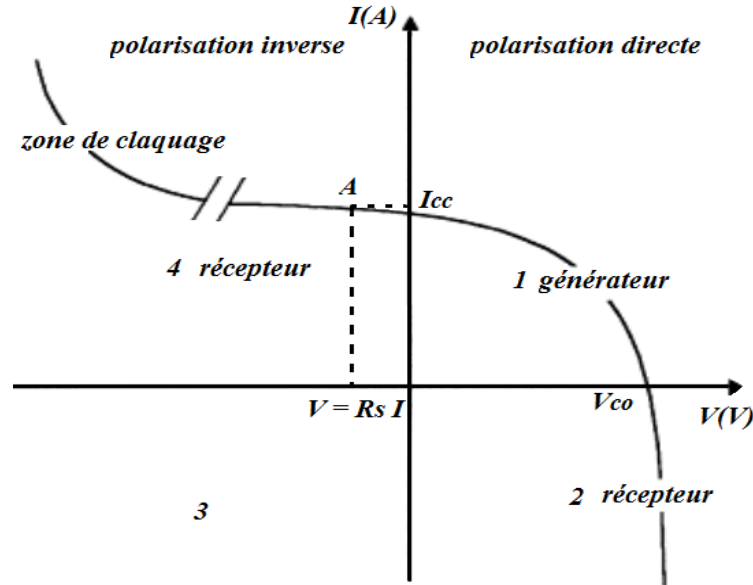


Figure 1.16: La caractéristique  $I(V)$  d'une cellule PV éclairée et polarisée par une source extérieure.

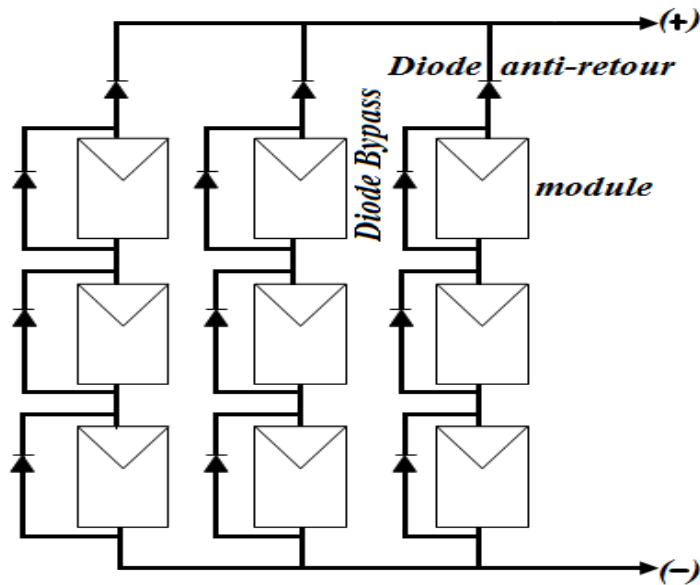
### 1.10.5. Protection par diode

Une cellule occultée dans une branche de  $N_s$  cellules en série est polarisée en inverse dans le cas de circuit ouvert, par une tension  $V = V_s V_i$  ( $V_i$ : la tension d'une seule cellule) qui peut dépasser la tension de claquage.

Si l'on monte une diode en parallèle tête-bêche (Figure 1.17), sur un module, la cellule occultée ne peut alors être polarisée que par un nombre bien défini de cellules. En cas de déséquilibre, il faut bien sûr que la diode puisse laisser passer le courant des modules qui se trouvent dans la branche. En fonctionnement normal la diode de protection doit pouvoir être polarisée avec une tension inverse égale à la tension de travail du module. Moyennant ces précautions dans le choix de la diode de "by-pass", on peut être assuré que les modules ainsi protégés ne subiront pas de "hot-spot" (point chaud) à cause d'un déséquilibre d'éclairement ou de réseau.

Par contre, dans le cas de  $N_p$  branches en parallèles et pour éviter qu'une branche de cellules connectées en série ne reçoive de l'énergie d'autres branches connectées en parallèle, il faut installer dans chacune des branches des diodes anti-retour de puissance adéquate en sortie de chaque série de module, comme indiqué dans la Figure (1.16).

En fonctionnement normal, ces diodes séries devront induire une chute de tension dans la branche [14, 15].



**Figure I.17: Protection par diodes séries et parallèles dans un groupement de modules.**

## II.11. FACTEURS DE DEGRADATION DANS LA LITTERATURE

Dans la littérature, on peut rencontrer différents taux de dégradation qui ont été constatés dans différentes conditions du fonctionnement des modules photovoltaïques.

Ces taux diffèrent selon que les modules sont connectés ou non à une charge. En effet, il a été vérifié que des modules, initialement connectés à une charge, ont montré une dégradation moyenne qui est, approximativement, le double qu'en circuit ouvert [25].

En moyenne, pour une période d'environ 10 années d'exposition, le facteur de dégradation de 19 % de la puissance maximale semble loin de la limite reportée par quelques références bibliographiques. En effet, après des investigations sur la dégradation individuelle des modules, des auteurs ont constaté, après cinq ans d'exposition, une réduction de la puissance maximale estimée à 4.8 % de la valeur initiale. D'autres références ont montré qu'après 11 années d'exposition, plusieurs modules ont perdu, en moyenne, 14.1 % de leur puissance maximale [29, 30].

Cependant, des études menées ont fait conclure que ce taux peut augmenter sous l'effet des fortes températures ambiantes, puisque des modules, soumis à des températures de fonctionnement élevées, montrèrent une dégradation plus rapide [26].

Dans le site d'Adrar, la température ambiante atteint des seuils extrêmes, surtout en été où l'on enregistre des valeurs qui dépassent 50°C (hostilité du climat). Par ailleurs, pour différents modules photovoltaïques (à base de silicium cristallin) ayant fonctionné pendant 10 ans environ, l'analyse des courbes de puissance révéla des taux de dégradation situés entre 11 et 22 % de leurs puissances de sortie [27].

Dans une étude récente traitant ce sujet, un module de même type (**UDTS-50**) et testé à Ghardaïa a perdu 35 % de sa puissance nominale après 20 ans d'exposition [28].

Il ne faut pas oublier, également, que les zones de Adrar, Ghardaïa sont des régions sahariennes mais les températures y sont moins élevées. D'un autre côté, il ne faut pas oublier des facteurs comme les erreurs du lissage et les erreurs instrumentales. Tout ceci mène à la conclusion que le taux de dégradation de 19 % peut être tout à fait acceptable.

### **I.12. CONCLUSION**

Dans ce chapitre quelque notions préliminaires sur le rayonnement solaire nécessaire pour la compréhension du photovoltaïque ont été présenté.

Le photovoltaïque connaît aujourd'hui un développement très important dans le monde, notamment en Algérie qui a lancée plusieurs projet d'un capacité totale d'environ 13 575 MW qui devrait être réalisés sur la période 2015-2030 .

# **CHAPITRE II**



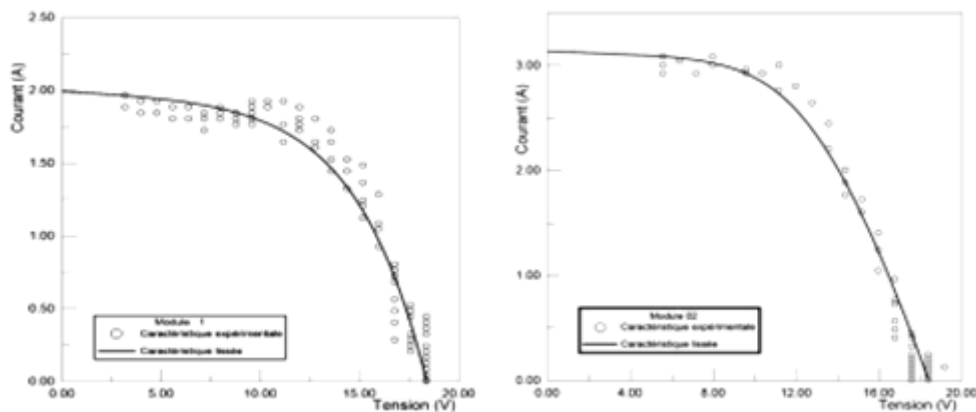
**Performances Et Dégradation  
Des Modules PV**

## II.1. PERFORMANCES ET DEGRADATION DES MODULES PV

### II.1. 1. DETERMINATION DES PARAMETRES DES MODULES

L'analyse des caractéristiques I-V de quelques modules photovoltaïques testés dans les conditions réelles du milieu saharien (région d'Adrar) . Les tests expérimentaux ont touché une trentaine de modules photovoltaïques de type UDTS-50. Les paramètres de l'équation qui gouverne ces caractéristiques ont été déterminés par la méthode du lissage graphique.

Les caractéristiques théoriques, ainsi obtenues, ont été translatées pour les conditions de tests standards. Ces caractéristiques STC nous ont permis d'effectuer une estimation des performances des modules testés pour les mêmes conditions de références. Les analyses des caractéristiques de ces modules ainsi que des valeurs de leurs facteurs de dégradation ont montré une nette réduction de leurs performances, notamment, les puissances maximales et les facteurs de forme. En moyenne, ces modules ont montré une dégradation estimée à 19 % environ et cela par rapport à un module de référence de même type. En revenant aux seuils des taux de dégradation cités dans certains travaux et en considérant quelques facteurs (températures élevées, erreurs du lissage, erreurs instrumentales,...), nous pouvons considérer que le taux moyen estimé pour la dégradation des modules est acceptable.



**Figure (II .1) Lissage de la caractéristique I-V expérimentalement**

Au moment des tests, les valeurs de l'éclairement solaire et de la température ambiante sont mesurées respectivement par un pyranomètre Kipp & Zonen type CM11 et un thermomètre digital [16]. Les tests de caractérisation ont été effectués à Adrar au sud algérien. Cette localité possède une importance particulière tant pour les chercheurs que pour les

utilisateurs car elle est souvent exposée à des niveaux très élevés de l'éclairement solaire. En effet, la moyenne annuelle de l'irradiation globale journalière mesurée sur plan incliné dépasse la valeur de 7 kWh/m<sup>2</sup> [17].

En pratique, les relevés de la courbe I-V des modules se font pour des conditions réelles de fonctionnement qui peuvent varier fortement. Ceci a conduit au concept des conditions de test standards sous lesquelles, les mesures des performances des modules photovoltaïques doivent être effectuées ou corrigées. Trois paramètres fixent les conditions de test standards, à savoir la température, l'irradiation totale et la distribution spectrale. En effet, la température cellule doit être fixée à 25 °C et l'irradiation globale doit être égale à 1000 W/m<sup>2</sup> à un spectre AM1.5. L'utilisation des conditions de test standards (par abréviation STC) permet de faire des comparaisons entre les performances des modules. En général, les constructeurs des modules fournissent les valeurs des points représentatifs de la caractéristique courant-tension du module (court-circuit, circuit ouvert et point de puissance maximale) pour les conditions STC [18,19]. Les valeurs du courant et de la tension sont calculées en utilisant les équations suivantes [20, 22]:

$$I_{STC} = I_{mcs} \times \left[ \frac{H_{STC}}{H_{mcs}} \right] + \alpha (T_{c.mod} - T_{STC}) \quad (\text{II.1})$$

$$V_{STC} = V_{mcs} - \beta (T_{STC} - T_c) - R_s (I_{mcs} - I_{STC}) + V_t \times \ln \left( \frac{H_{STC}}{H_{mcs}} \right) \quad (\text{II.2})$$

avec:

$I_{STC}$  : Courant du module aux conditions standards (A);

$V_{STC}$  : Tension du module aux conditions standards (V);

$I_{mes}$  : Courant mesuré du module (A);

$V_{mes}$  : Tension mesurée du module (V);

$H_{STC}$  : Eclairement de référence (1000W/m<sup>2</sup>);

$H_{mes}$  : Eclairement incident mesuré (W/m<sup>2</sup>);

$T_{STC}$  : Température de référence du module (25°C);

$T_{c.mod}$  : Température de fonctionnement du module (°C);

$\alpha$  : Coefficient de température pour le courant (A/°C);

$\beta$  : Coefficient de température pour la tension (V/°C);

$R_s$  : Résistance série du module;

$V_t$  : Tension thermique du module.

## II.1. 2. PROBLEME DE DEGRADATION

Les valeurs présentées au Tableau 1 montrent une nette réduction des performances des modules PV par rapport à celles d'un module UDTS-50 testé en laboratoire. Le rendement a diminué en dessous de 10 %. Ceci laisse à penser que ces modules ont, fort probablement, subi un phénomène de dégradation [17].

Module	$P_{max,STC}$ (W)	$FF_{STC}$ (%)	$\eta$ (%)
02	40.98	56.77	9.55
04	38.99	56.29	9.09
08	40.45	55.05	9.43
09	39.80	54.88	9.28
12	40.31	54.61	9.40
16	38.86	53.98	9.06
24	40.10	57.74	9.35
27	34.49	47.05	8.04
30	38.21	52.80	8.91
31	31.76	46.39	7.40

Tab (II .1) : Performance de quelque module PV

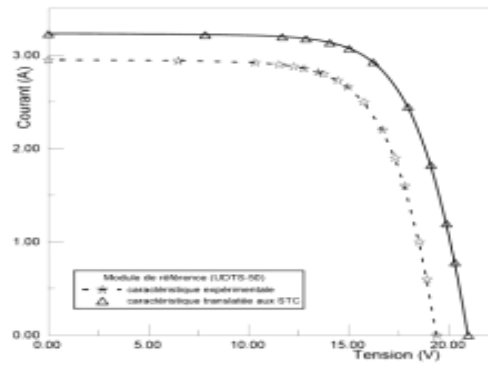
## II.2. DEGRADATION DES MODULES PV

La durée de vie d'un module photovoltaïque est considérée comme l'un de ses principaux avantages souhaitables. Elle est un des quatre facteurs qui définissent le coût de l'électricité solaire (la sécurité, le coût économique, la fiabilité et l'esthétique) [23, 24]. C'est pour cette raison que la durée de vie est devenue un paramètre clé qui définit les garanties offertes par les constructeurs des modules photovoltaïques [25]. Durant les périodes d'exposition, un module photovoltaïque peut subir une dégradation qui se manifeste par un changement des valeurs de ses paramètres et ses performances. L'étude de l'évolution des performances des modules photovoltaïques nécessite la connaissance préalable de leurs caractéristiques expérimentales initiales ainsi que celles fournies par le fabricant [18].

A défaut des caractéristiques initiales des modules testés, on a proposé d'utiliser comme référence un autre module de même type (UDTS-50). Ce dernier n'a pas subi de dégradation notable [16].

Les points I-V de la caractéristique expérimentale de ce module ont été utilisés pour l'extraction de ses paramètres. L'erreur du lissage a été estimée, alors, à 0,38% [17]. La caractéristique I-V, translatée aux conditions standards, est représentée par

**la figure II .2.**



**Figure (II .2):** Caractéristique expérimentale et translatée du module de référence.

### II.2. 1. FACTEUR DE DEGRADATION

Les analyses des valeurs des taux de dégradation ont montré des variations importantes des résistances série et parallèle conduisant à une dégradation des facteurs de forme. Par ailleurs, on a constaté des déplacements des points de puissance maximale loin du coude de la caractéristique du module de référence. En moyenne, les calculs ont révélé que le rendement et le facteur de forme ont perdu, respectivement, 19% et 25% de leurs valeurs initiales. Il faut noter que l'augmentation de la résistance série et la diminution de la résistance parallèle ont contribué, de façon principale, à une telle dégradation des performances des modules. [17].

### II.2. 2. CAUSES PROBABLES DE LA DEGRADATION

Evidemment, les modules photovoltaïques ne maintiennent pas, obligatoirement, leurs performances initiales. Ils peuvent se dégrader ou devenir même défectueux quand ils fonctionnent sur site réel durant des périodes prolongées [17]. Plusieurs facteurs peuvent être à l'origine de telles dégradations et chutes des performances des modules photovoltaïques.

Une analyse et un suivi parfaits du phénomène de la dégradation des modules Photovoltaïques nécessitent une série complète de techniques spéciales [17]. La plaque signalétique du fournisseur n'inclut aucune information sur la dégradation à long-terme [18]. Cependant, les nombreux systèmes photovoltaïques qui ont fonctionné pendant plus de 20 ans ont permis d'acquérir des informations sur les mécanismes de dégradation.

Les modules sur site réel sont sujets de:

- ✓ *charges mécaniques statiques et dynamiques,*
- ✓ *cycles thermiques,*
- ✓ *exposition à la radiation,*

- ✓ *l'humidité,*
- ✓ *impact de grêle (grains de sable),*
- ✓ *accumulation de la poussière,*
- ✓ *occultation partielle,...*
- ✓ *Souvent, les facteurs de dégradation sont reliés à l'action des agents atmosphériques*

Avec, éventuellement, les défauts de fabrication [18].

Pour les cas des modules testés, la dégradation peut être due à la décoloration de l'EVA (**Fig. II .3**), l'absorption des rayons ultra-violet, la formation des points chauds, le décollement de l'EVA aux interfaces cellules-EVA,... [17].



**Figure (II .3):** Décoloration de l'EVA

## **II.3. DEGRADATION EN PHYSIQUE DE MATERIAUX**

### **II.3.1. fonctionnement d'une cellule solaire**

Une cellule solaire n'est autre qu'une diode dans laquelle l'absorption des photons incidents entraîne la création des paires électron-trou. La séparation des électrons et des trous est accomplie par un champ électrique interne. Les conditions de base pour obtenir une cellule solaire efficace sont récapitulées comme suit [17] :

- i. Une absorption efficace de l'éclairement solaire pour créer des paires électron-trou,
- ii. La séparation de la paire électron-trou. Les électrons doivent être collectés par la région de type n et les trous par la région de type p,
- iii. Le potentiel développé doit être suffisamment élevé car il détermine la tension maximale de sortie aux bornes de la cellule,
- iv. La chute de tension ohmique causée par les résistances parasites doit être suffisamment petite,

v. La grille métallique couvrant la surface de la cellule doit être petite puisque les couches métalliques épaisses occultent la lumière.

### **II.3. 1.1. L'absorption**

La génération des porteurs de charges via l'absorption de la lumière du soleil est fondamentale pour le fonctionnement des cellules solaires. Essentiellement, elle consiste en deux étapes. D'abord, l'excitation, par des photons lumineux, d'un électron directement de la bande de valence entraîne sa transition vers la bande de conduction laissant derrière lui un trou dans la bande de valence. Cette forme d'excitation est appelée absorption fondamentale. C'est l'étape de génération des porteurs de charges (électron et trou) par absorption de lumière. La deuxième étape, consiste en la séparation des paires électron-trou par une structure appropriée pour être collectées par les contacts électriques de la cellule solaire [17].

Dans un semi-conducteur cristallin, on définit un moment qui peut être associé à un électron libre. Quand un électron accomplit une transition de la bande de valence vers la bande de conduction, l'énergie et le moment doivent être tous les deux conservés. Un photon possède une énergie considérable mais un moment très petit.

Le courant produit par une cellule solaire est généré par les transitions optiques à travers la bande interdite. On distingue deux types de transitions : transitions directes où le moment de la paire électron-trou est presque nul et les transitions indirectes où le moment est fini [39,40]. Ainsi, il y a deux types de semi-conducteurs : semi-conducteur à gap direct et semi-conducteur à gap indirect.

### **II.3. 1.2. Semi-conducteur à gap indirect**

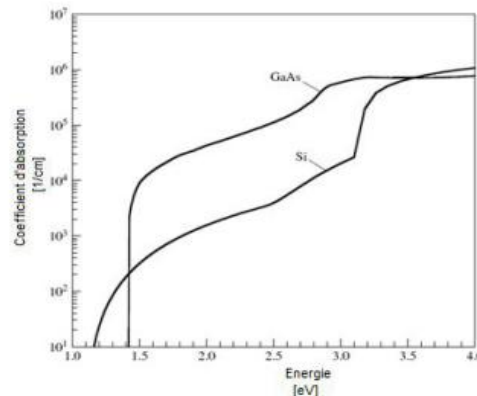
Dans les semi-conducteurs à gaps indirects (comme le silicium et le germanium) où le niveau maximum de la bande de valence intervient à un moment du cristal différent que celui de la bande de conduction, la conservation du moment de l'électron nécessite que l'absorption du photon implique une particule supplémentaire: le phonon. Ce dernier est une particule énergétique qui représente les vibrations des atomes dans le réseau d'un semi-conducteur. Le phonon convient à ce procédé car contrairement au photon, c'est une particule à faible énergie mais possède un moment élevé. En outre, il peut interagir avec l'électron et le photon incident de telle manière que, dans un matériau à gap indirect, l'énergie et le moment du cristal sont conservés.

Ainsi, l'absorption de la lumière est facilitée par l'absorption ou l'émission d'un phonon pour satisfaire la conservation de l'énergie et du moment du cristal [45].

### II.3. 1.3. Semi-conducteur à gap direct

Dans le cas des semi-conducteurs à gaps directs, tels que GaAs, GaInP, CdTe et Cu(InGa)Se<sub>2</sub>, on assiste à une conservation de l'énergie et du moment pendant la transition.

À chaque état initial d'un électron de la bande de valence (avec une énergie  $E_v$ ), est associé un état final dans la bande de conduction (avec une énergie  $E_c$ ). La conservation d'énergie nécessite que l'énergie du photon absorbé doive correspondre à la différence  $h\nu = E_c - E_v$ . La détermination expérimentale du seuil d'absorption optique constitue un moyen simple pour mesurer avec précision la largeur  $E_g$  de la bande interdite [8].



**Figure (II .4)** Coefficient d'absorption optique pour le silicium (gap indirect)

Puisqu'on a besoin du phonon et de l'électron ensemble pour rendre possible l'absorption à gap indirect, le coefficient d'absorption ne dépend pas seulement des densités d'états initiaux remplis d'électron et d'états finaux vides d'électron mais aussi de la disponibilité des phonons (émis et absorbés) avec le moment demandé. Par conséquent, la probabilité d'absorption est plus faible avec les transitions indirectes.

Il en résulte que la lumière pénètre plus profondément dans le cas des semi-conducteurs à gaps indirects que dans le cas des semi-conducteurs à gaps directs. Ainsi, le coefficient d'absorption optique est, considérablement, plus faible dans un semi-conducteur à gap indirect que dans le cas d'un semi-conducteur à gap direct (figure 1.4) [45].

Dans les deux types de matériaux semi-conducteurs (à gaps direct et indirects), d'autres procédés peuvent contribuer à l'absorption des photons bien que les mécanismes

décrits ci-dessus sont les plus dominants. On peut citer, par exemple, l'absorption en présence d'un champ électrique (effet Franz-Keldysh), l'absorption favorisée par les états localisés dans la bande interdite et l'absorption dans le cas des fortes injections (effet Burstein-Moss). Par conséquent, le coefficient d'absorption global résulte de tous les coefficients d'absorption dus aux différents procédés d'absorption [39].

Le coefficient d'absorption dépend fortement du type du matériau semi-conducteur: qu'il est cristallin ou amorphe .

La génération des porteurs par absorption peut se faire par deux mécanismes qui sont les plus importants [40]:

- ✓ Transition bande à bande :
- ✓ Absorption des porteurs libres: dans les régions à fortes concentration en porteurs. L'absorption de photon peut aussi se produire par des transitions des électrons avec des états initiaux et finaux à l'intérieur de la même bande. Ce type d'absorption ne génère pas des paires électron-trou et rivalise avec les transitions bande à bande qui produisent le courant généré. L'absorption des porteurs libres pourrait être significative dans le cas où les énergies des photons s'approchent du gap.

Dans le cas des cellules solaires à une seule jonction, elle n'affecte pas la création des paires électron-trou et ne doit donc pas être incluse dans le coefficient d'absorption [39,44].

### **II.3. 3.4. Jonction p-n à l'équilibre thermique**

Quand la jonction est à une température uniforme et n'est soumise à aucune perturbation extérieure (électrique, lumineuse ou autres), elle est dite en équilibre thermique. Dans un cas pareil, aucun courant ne circule dans la jonction [39,45].

Cependant, la diffusion des porteurs majoritaires aboutit à deux types de courants positifs  $J_{pP}$  et  $J_{nN}$ . La résultante de ces courants donne le courant de diffusion. Ce dernier est limité par la hauteur de la barrière de diffusion, appelée aussi tension de diffusion. La région N forme une source quasi infinie d'électrons, mais seulement ceux qui ont l'énergie suffisante sont capables de diffuser au-delà de la barrière de potentiel.

Le champ électrique existant dans la zone de charge d'espace attire les électrons de la région P vers la région N et les trous de la région N vers la région P. Un tel déplacement des porteurs minoritaires, donne naissance à deux types de courants négatifs (électrons et trous). La résultante de ces deux courants aboutit au courant de drift (ou de conduction) de sens contraire au courant de diffusion. À l'équilibre, les quatre composantes des

Courants de diffusion et de drift s'annulent deux à deux pour garder nul le courant total de la jonction [45].

### II.3. 3.5. Jonction p-n hors équilibre

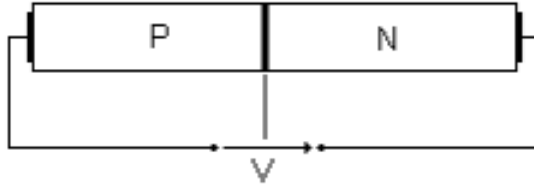
Si on applique, aux deux extrémités d'une jonction P-N, une source de tension externe, la jonction est hors équilibre (polarisée) (**figure 1.7**). Par convention, le courant de jonction est positif quand il circule dans le semi-conducteur de P vers N. La tension de polarisation  $V$  est positive quand sa borne positive est reliée à la partie P.

Quand la tension n'est pas polarisée ( $V=0$ ), la jonction est en équilibre et la tension de jonction est égale à la tension de diffusion  $V_d$ . Si par contre, la tension  $V$  est différente de zéro, la jonction est polarisée. Si le pôle positif de la source de tension est connecté à la partie P du semi-conducteur, on dit que la jonction est polarisée en direct. Inversement, s'il est relié à la partie N, on dit que la jonction est polarisée en inverse.

Dans le cas d'une jonction polarisée, la tension de diffusion sera remplacée par la tension de jonction  $V_j$  [45] :

$$V_j = V_d - V \quad (\text{II.5})$$

Avec  $V_d$  : tension de diffusion et  $V$  tension de polarisation



**Figure (II .5)** Polarisation d'une jonction p-n par une source extérieure

La tension de jonction  $V_j$  est égale à  $V_d$  quand  $V=0$ . Elle diminue et devient inférieure à  $V_d$  quand la tension  $V$  est positive mais ne peut jamais s'annuler. Quand  $V$  est négative (polarisation en inverse), la tension de jonction augmente. Sa valeur maximale peut atteindre plusieurs centaines de volts: tension d'avalanche [45].

La polarisation en direct d'une jonction se manifeste par une diminution de la tension de diffusion, donc plus de facilité octroyée aux porteurs majoritaires pour passer d'une région à l'autre. Par conséquent, les concentrations des électrons dans la région P et des trous dans la région N augmentent plus que dans le cas où la tension  $V$  est nulle. Inversement, si la tension de polarisation est négative ( $V<0$ ), la tension de jonction  $V_j$  devient supérieure à  $V_d$  et cette barrière va, donc, s'opposer vite à tout déplacement des porteurs majoritaires. Nous voyons ainsi que si  $V<0$ , les densités de courant des porteurs

Majoritaires tendent vers zéro tandis que si  $V > 0$ , ces composantes croissent rapidement (typiquement de façon exponentielle avec  $V$ ) [40,45].

En ce qui concerne le comportement des composantes dues aux courants des porteurs minoritaires, il est tout à fait différent. En effet, ces porteurs n'ont à surmonter aucune barrière de potentiel pour passer d'une région à une autre, et ce quelque soit la valeur de la tension  $V$ . Il en résulte comme première approximation que ces composantes des courants minoritaires sont indépendantes de la tension de polarisation [45].

#### II.4. Cas de la cellule solaire au silicium

Une cellule solaire au silicium utilise une jonction p-n peu profonde pour convertir la radiation solaire en puissance électrique [39,45]. La cellule solaire est conçue en formant, par exemple, la jonction de telle sorte que la lumière solaire incidente pénètre dans la région de type N, c'est-à-dire en plaçant une fine couche fortement dopée d'un matériau semi-conducteur de type N sur une couche d'un semi-conducteur de type P.

À l'obscurité et en l'absence de source de tension externe, aucun courant ne traverse la jonction comme il a été précisé dans la section précédente. Cependant, quand la cellule solaire absorbe des photons dont les énergies sont plus élevées que le gap du semi-conducteur N, cela aboutit à la production d'un nombre élevé d'électrons libres dans la bande de conduction et aussi un nombre égal de trous dans la bande de valence. Puisqu'à l'obscurité, il y a moins de trous dans la bande de valence dans le côté N que d'électrons dans la bande de conduction, une augmentation remarquable du nombre de trous dans la bande de valence prend, alors, place sans que le nombre d'électrons dans la bande de conduction soit considérablement modifié. Les électrons et trous, en excès dans les régions quasi neutres et suffisamment proches de la Jonction, sont capables de diffuser au-delà sans recombinaison. Les équations de transport de la jonction lient la concentration des porteurs majoritaires dans un côté de la jonction avec la concentration des celle des porteurs minoritaires dans l'autre côté [45].

En supposant valable le principe de superposition, la résolution des équations de courant et de continuité aboutit, moyennant quelques manipulations algébriques, à deux types de courant de signes opposés correspondant au fonctionnement de la cellule [45] :

- Courant à l'obscurité : quand la cellule n'est pas illuminée mais avec une tension aux bornes.
- Courant photo-généré où la cellule est illuminée mais à une tension nulle.

Le courant total est exprimé par :

$$I = I_e + I_d(V) \quad (\text{II.6})$$

Les indices e et d dans l'équation 1.5 se réfèrent respectivement aux modes de fonctionnement de la cellule; sous éclairage et à l'obscurité.

Le courant  $I_d(V)$  pour les deux régions quasi-neutres est exprimé par l'équation 1.6:

$$I_d = -I_{01} \left( e^{(qV/KT)} \right) - 1 \quad (\text{II.7})$$

Où  $I_0$  : est le courant de saturation inverse de la diode (A),

$V$  : tension de polarisation (V),

$K$  : constante de Boltzman (J/K),

$T$  : température de la jonction (K),

$q$  : charge de l'électron.

L'équation II.7 n'est autre que la caractéristique courant-tension d'une diode. Le courant  $I_0$  qui est dû au processus de recombinaison dans les régions quasi-neutres représente le courant de saturation. Divers facteurs font diminuer le courant de saturation: l'augmentation des longueurs de diffusion, la diminution des vitesses de recombinaison des porteurs minoritaires en surface et l'augmentation des concentrations des additifs (donneurs et accepteurs). Toutefois, cette dernière condition est sujette à un inconvénient. En effet, la concentration des donneurs ou accepteurs, atteignant des niveaux de dopage très élevés, fait augmenter la concentration intrinsèque des porteurs et la longueur de diffusion dans la région considérée. Par conséquent, les densités de dopage doivent être choisies convenablement afin d'obtenir un meilleur compromis aboutissant à un faible courant à l'obscurité [39,40]. Pour la description du fonctionnement de la cellule, il est essentiel de diviser le matériau formé par la jonction en trois régions: l'émetteur, la zone de jonction et la base. L'émetteur et la base qui restent, en grande partie, neutres durant le fonctionnement de la cellule, absorbent la majeure partie de la lumière incidente et transportent le courant photo-généré des porteurs minoritaires à la jonction. La jonction p-n, qui contient un fort champ électrique et une charge d'espace fixe, sépare les porteurs minoritaires collectés de l'émetteur et de la base [44]. La région dopée la plus éclairée est appelée la base (région p). Elle est souvent nommée région absorbante puisque l'autre région (émetteur) est généralement très fine et la plupart de la lumière absorbée a lieu dans la base. Ainsi, le courant photo-généré par la cellule est obtenu en additionnant les contributions de l'émetteur, de la base et même de la zone de charge d'espace [45]. Sous

l'effet de l'action du champ électrique dans cette zone, presque tous les porteurs générés sont collectés par séparation. Toutefois, le courant généré est, lui-même,

influencé par la tension aux bornes car les limites de la zone de charge d'espace sont fonction de cette tension. Cependant, dans le cas d'une cellule solaire au silicium monocristallin, le courant photo-généré dans cette zone est faible [39,40]. La caractéristique d'une jonction éclairée est identique à celle de la même jonction dans l'obscurité (diode) à l'exception qu'un

courant généré sous éclairage vient s'ajouter au courant d'obscurité mais avec les caractéristiques suivantes [45]:

- il circule en sens inverse du courant de diode,
- il est proportionnel à l'intensité de l'éclairage,
- il est indépendant de la tension appliquée de l'extérieur.

Le courant généré par une cellule solaire, sous éclairage, s'exprime, alors, par [45]:

$$I = I_{ph} - I_{01} \left( e^{\left(\frac{qv}{kT}\right)} - 1 \right) \quad (\text{II.8})$$

Où  $I_{ph}$  est le courant photo-généré (A).

Pour une tension nulle, le courant  $I_{ph}$  correspond au courant de court-circuit de la cellule.

## II.5. Caractéristique I-V d'une cellule solaire

La représentation graphique de l'équation 1.7 permet d'obtenir la caractéristique I-V (courant-tension) d'une cellule solaire (figure II.9).

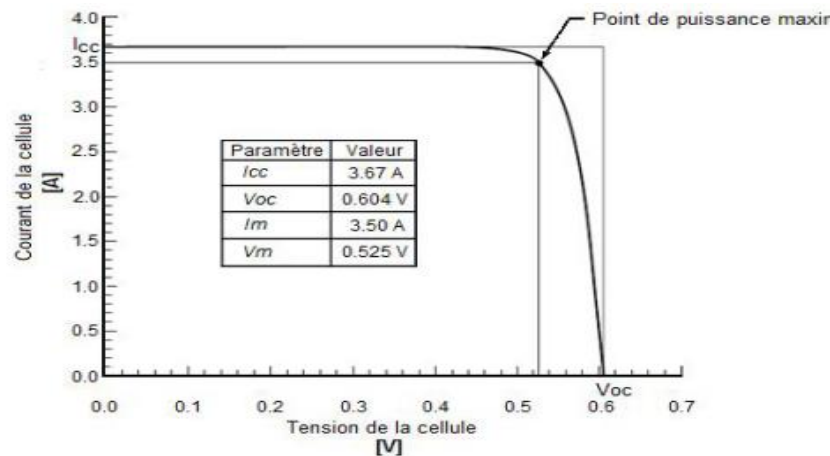


Figure (II.6) Exemple d'une caractéristique I-V d'une cellule solaire

La caractéristique I-V permet d'illustrer plusieurs paramètres externes d'une grande importance pour la caractérisation d'une cellule solaire: le courant de court-circuit  $I_{sc}$ , la tension en circuit ouvert  $V_{oc}$ , le point de puissance maximale  $P_m$  et le facteur de forme FF [45]. Pour les faibles valeurs de la tension appliquée, le courant de

diode devient négligeable. Quand la tension s'annule, le courant correspond exactement au courant de court-circuit. De l'autre côté, lorsque la tension est suffisamment élevée

de sorte que le courant de diode (recombinaison) devient important, le courant de la cellule chute rapidement [39].

Aux conditions de la cellule en circuit ouvert, le courant  $I$  est nul. Tout le courant photo-généré passe par la diode. La tension de circuit ouvert peut, alors, être exprimée par:

$$V_{OC} = \frac{KT}{q} \ln \frac{I_{SC} + I_{01}}{I_{01}} \approx \frac{KT}{q} \ln \frac{I_{SC}}{I_{01}} \quad (\text{II.9})$$

### II.5. 1.Paramètres caractérisant une cellule solaire

Quand la puissance délivrée par la cellule est maximale, on dit qu'il s'agit du point de puissance maximale  $P_m$ . Il correspond à un courant maximum  $I_m$  et une tension  $V_m$ . Le facteur de forme est le rapport des deux rectangles définis par la caractéristique I-V de la figure 1.8. Il mesure, en quelque sorte, la forme carrée, de la caractéristique I-V de la cellule. Il est exprimé par:

$$FF = \frac{P_m}{V_{OC} \cdot I_{SC}} \quad (\text{II.10})$$

L'expression empirique suivante permet de calculer le facteur de forme [1,2,6]:

$$FF = \frac{V_{OC} - \frac{KT}{q} \ln(qV_{OC}/KT + 0.72)}{V_{OC} + KT/q} \quad (\text{II.11})$$

Souvent, ce paramètre est exprimé en pourcentage en multipliant l'équation 1.9 par 100 [1].

En supposant que les valeurs des résistances  $R_{sh}$  et  $R_s$  sont respectivement infinie et nulle, la tension du circuit ouvert peut être exprimée par: [8]

$$V_{OC} = \frac{nKT}{q} \ln \left( \frac{I_{ph}}{I_0} \right) \quad (\text{II.12})$$

D'après l'équation II.12, on remarque que la tension du circuit ouvert varie d'une manière logarithmique avec l'éclairement incident [1,2]. Un autre paramètre qui est, probablement, le plus important d'une cellule solaire est son rendement,  $\eta$ . Il est calculé par l'expression ci-dessous :

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{FF \cdot V_{OC} \cdot I_{SC}}{P_{in}} \quad (\text{II.13})$$

Où  $P_{in}$  est la puissance incidente déterminée par le spectre de la lumière incidente sur la surface de la cellule solaire.

Pour une cellule solaire au silicium, le rendement théorique maximal est égal à 23% environ [45]. Outre les paramètres externes décrits ci-dessus, il existe quelques grandeurs internes qui décrivent les performances d'une cellule solaire. En général, ces grandeurs sont le

rendement quantique et la réponse spectrale [39]. Le rendement quantique  $\eta_q$  est défini comme étant le rapport entre le nombre de porteurs collectés et celui des photons qui

Pénètrent dans la cellule. On définit, alors, deux sortes de rendements quantiques: externe et interne (notés, respectivement,  $\eta_q^{ext}$  et  $\eta_q^{int}$ ). Ils diffèrent dans le traitement des photons Réfléchis à partir de la cellule. Tous les photons arrivant à la surface de la cellule sont pris en ligne de compte dans la valeur du rendement quantique,  $\eta_q^{ext}$ , mais seuls les photons n'ayant pas subis de réflexion sont considérés dans le rendement quantique interne,  $\eta_q^{int}$ . Connaissant ce dernier, on peut exprimer le courant total photo-généré par:

$$I_{ph} = q \int \phi(\lambda)(1 - R(\lambda))\eta_q^{int}(\lambda)d\lambda \quad (\text{II.14})$$

$\Phi(\lambda)$  est le flux de photons incidents sur la surface de la cellule à une longueur d'onde  $\lambda$  donnée,

$R(\lambda)$  est le coefficient de réflexion de la surface avant de la cellule.

L'intégration se fait sur toutes les longueurs d'onde de la lumière absorbée par la cellule solaire. La réponse spectrale (notée SR et exprimée en A/W) est définie comme étant le rapport entre le courant de court-circuit photo-généré par une cellule solaire et la valeur de la puissance de la lumière incidente en fonction de la longueur d'onde [45]. Elle est liée au rendement quantique par la relation [40,45]:

$$SR(\lambda) = 0.808 \cdot \lambda \cdot QE(\lambda) \quad (\text{II.15})$$

La réponse spectrale SR peut, elle aussi, être externe ou interne selon la valeur utilisée pour le rendement quantique [6]. La densité du courant de court-circuit s'exprime, alors, par :

$$J_{sc} = \int SR(\lambda) \cdot P(\lambda) \cdot d\lambda \quad (\text{II.16})$$

Avec  $P(\lambda)$ : densité de la puissance de la lumière incidente en fonction de la longueur d'onde par unité de surface. Les deux quantités sont fonction de la longueur d'onde. Le rendement quantique fournit un aperçu physique sur le comportement de la cellule. Pour une cellule solaire, la réponse spectrale exprime sa performance convertie en unités et qui peut être mesurée [40].

## II.5. 2.La caractéristique d'une cellule solaire réelle

En réalité, la caractéristique d'une cellule solaire réelle diffère de sa caractéristique idéale. En effet, d'autres facteurs qui incluent des termes additionnels au courant à l'obscurité sont pris en compte par le modèle de la cellule [45]. Ainsi, on ajoute au courant de la diode, un courant de fuite qui dépend de la tension et d'un autre paramètre

appelé conductance de fuite. Ce courant est dû à l'effet conjugué des résistances parasites. Le second terme considère la recombinaison dans la zone de charge d'espace et en surface. Par conséquent, le circuit équivalent d'une cellule solaire réelle contient une résistance série  $R_s$ , une résistance parallèle (ou résistance shunt)  $R_{sh}$  et deux diodes. Le courant délivré par la cellule est, alors, exprimé, par la forme suivante [45]:

$$I = I_{ph} - I_{01} \left( e^{q(V+I.R_s)/KT} - 1 \right) - I_{02} \left( e^{q(V+I.R_s)/2KT} - 1 \right) - \frac{(V+I.R_s)}{R_{sh}} \quad (\text{II.17})$$

Avec

**$I_{ph}$**  : est le courant maximum qui devrait être généré par la cellule si tous les photons ayant des énergies supérieures à l'énergie du gap créant des paires électron-trou sont collectés par la cellule [39]. En d'autres termes,  $I_{ph}$  est le courant de court-circuit où il n'existe pas de résistances parasites [39].

**$R_s$**  : résistance série, due principalement à la difficulté rencontrée par les porteurs collectés avant d'atteindre les contacts externes. Les différentes sources de la résistance série incluent Principalement la résistance du matériau, celle des contacts métalliques, particulièrement, la Grille métallique, celle de l'émetteur et la circulation transversale dans la cellule [45].

**$R_{sh}$**  : résistance shunt ou parallèle. C'est une conséquence de l'état de surface le long de la Périphérie de la cellule solaire [43].

Souvent, on remplace l'équation à deux diodes par une équation empirique à une seule diode en introduisant un facteur d'idéalité  $A$  compris entre 1 et 2. Le courant total de la cellule solaire s'écrit, alors, par [45]:

$$I = I_{ph} - I_0 \left( e^{q(V+I.R_s)/AKT} - 1 \right) - \frac{(V+I.R_s)}{R_{sh}} \quad (\text{II.18})$$

$A$  est le facteur d'idéalité (qualité). Typiquement, les valeurs de  $A$  sont comprises entre 1 et 2.  $A \approx 1$  pour une diode dominée par la recombinaison dans les régions quasi-neutres, et  $A$  tend vers 2 quand c'est la recombinaison dans la zone de charge d'espace qui domine. Dans le cas des cellules solaires où les recombinaisons dans chaque régions sont comparables,  $A$  se situe entre 1 et 2 [39].

## II.6. Influence des paramètres environnementaux sur la caractéristique I-V d'une cellule solaire

### II.6. 1. Influence de la température

L'énergie du gap diminue peu avec la température. Cette diminution a été modélisée par une expression suggérée, initialement, par Varshni [39,44]:

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha_g T^2}{T + \beta_g} \quad (\text{II.19})$$

Où les paramètres  $\alpha_g$  et  $\beta_g$  sont des constantes spécifiques à chaque semi-conducteur. Les valeurs de ces paramètres, pour quelques semi-conducteurs, sont données au tableau (II.2) [6].

	$E_{g(T=0K)} (eV)$	$\alpha \times 10^4, (eV/K^2)$	$\beta (K)$
Si	1.17	4.730	636
GaAs	1.52	5.405	204
InP	1.42	4.906	327

Tableau II.2. Paramètres de variation du gap  $E_g(0)$

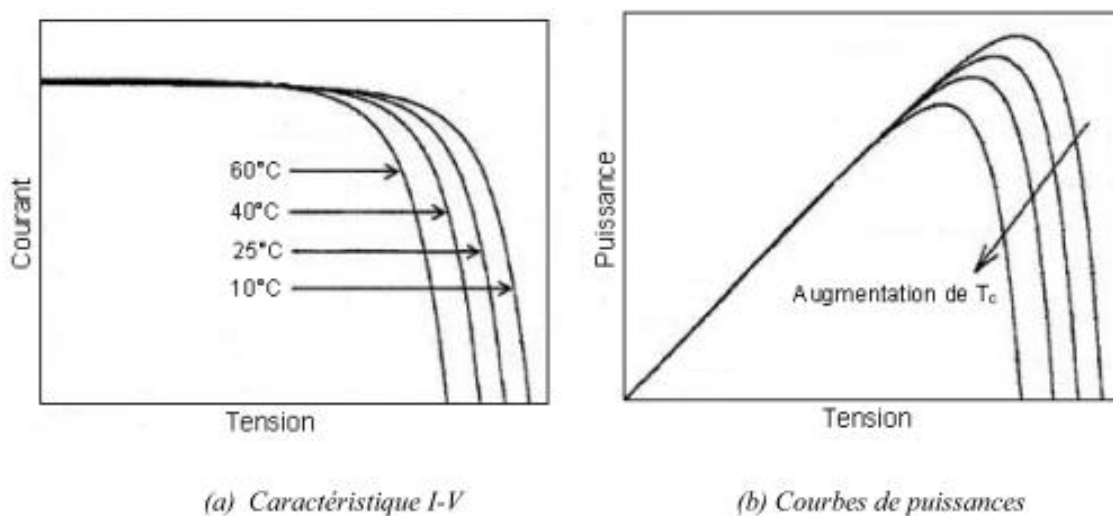
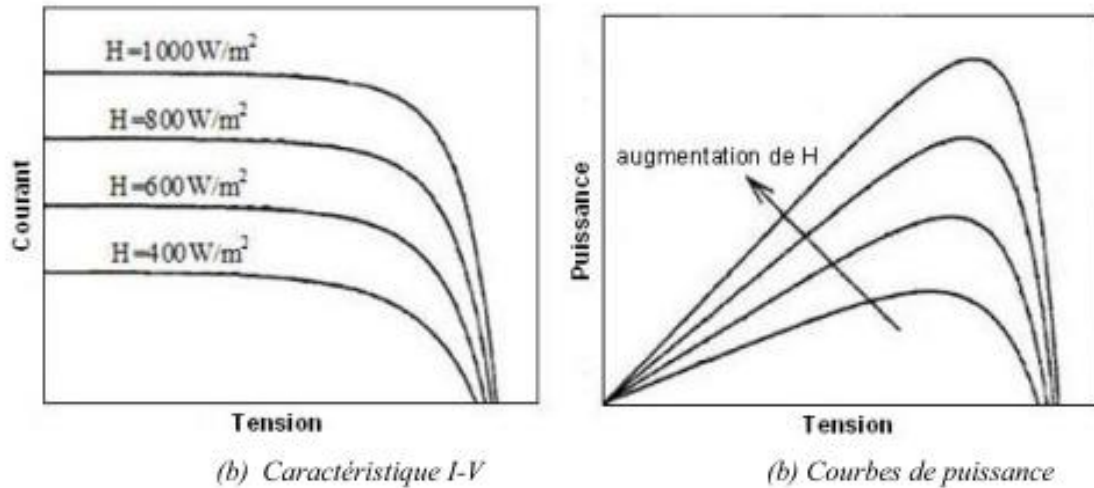


Figure (II .7) Influence de la température sur la caractéristique d'une cellule solaire ([43])

## II.6. 2. Influence de l'éclairement

Le courant de court-circuit augmente proportionnellement avec le niveau d'éclairement incident alors que la tension du circuit ouvert augmente de façon logarithmique avec l'éclairement. Par conséquent, il est constaté une forte influence de l'éclairement sur le courant délivré par la cellule solaire. Une telle influence se traduit par une augmentation de la puissance délivrée quand l'éclairement augmente, donc une augmentation de la puissance maximale de la cellule (figure 1.12) [45].



**Figure (II .8)** . Influence de l'éclairement sur la caractéristique d'une cellule solaire (référence [5])

### II.6. 3. Efficacité d'une cellule solaire

Dans la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire, le rendement possède une grande importance. Les recherches ont été menées depuis longtemps pour aboutir à des méthodes de prévision du rendement. Le rendement d'une cellule solaire est fortement lié aux paires électron-trou générés par la lumière et à leur recombinaison avant d'être délivrées au circuit externe. Le rendement  $\eta$  est défini comme étant le rapport de la puissance maximale  $P_m$  et la puissance de la lumière incidente. Plusieurs facteurs limitent la valeur du rendement d'une cellule solaire [45]:

1. Pertes dues aux grandes longueurs d'onde: ces pertes traitent du fait que les photons dont l'énergie est plus petite que le gap  $E_g$  (semi-conducteurs à gap direct) ou à  $E_g - E_{\text{phonon}}$  (semi-conducteurs à gap indirect) ne peuvent pas contribuer à la création des paires électron-trou.

Ces fortes longueurs d'onde causent uniquement un échauffement de la cellule solaire.

2. Chaque photon peut produire une seule paire électron-trou. Ainsi, même aux faibles longueurs d'onde, plusieurs photons ne produisent pas de paires électron-trou, et causent, par conséquent, une augmentation de la température de la cellule.

3. Rendement de collection.

4. Le rapport surface effective/surface totale de la cellule.

5. Les valeurs élevées de la résistance série.

Suite à cela et en faisant référence aux paramètres les plus importants dans son fonctionnement, on peut déduire les meilleures propriétés d'une cellule solaire.

D'après l'équation 1.12 exprimant le rendement, une cellule solaire efficace doit avoir une tension en circuit ouvert et un courant de court-circuit élevés et un facteur de forme qui s'approche le plus possible de l'unité.

Le courant généré par la cellule est directement proportionnel au rendement de collection interne qui dépend entièrement de la recombinaison. Il s'approche de 1 pour une durée de vie infinie et une vitesse de recombinaison nulle. Pour maximiser le courant photo-généré, la cellule solaire doit être conçue avec une grille métallique la moins dense possible et un coefficient de réflexion minimal et doit avoir une épaisseur optique suffisante pour permettre l'absorption de tous les photons dont les énergies sont au dessus du gap [39,40].

## **II.7. CONCLUSION**

Dans ce chapitre, on a abordé les principes physiques de base qui décrivent le fonctionnement d'une cellule solaire. Pour cela, on a passé en revue les propriétés fondamentales des matériaux semi-conducteurs qui permettent de convertir l'énergie de la lumière en électricité. Ces propriétés incluent la capacité des semi-conducteurs d'absorber les photons en procurant leurs énergies aux porteurs de charge donnant naissance à un courant électrique. Le fonctionnement de base de la cellule solaire est analogue à celui d'une diode (jonction p-n). Pour le cas d'une cellule solaire au silicium. On a donné l'expression du courant généré déduit à partir des équations simplifiées décrivant les mécanismes de transport des trous et électrons dans le semi-conducteur. La caractéristique I-V de la cellule a permis d'illustrer certains paramètres importants : le courant de court circuit, la tension en circuit ouvert, la puissance maximale et le facteur de forme. Le schéma équivalent d'une cellule solaire réelle introduit d'autres termes additionnels pour tenir compte de l'effet des résistances parasites et de la recombinaison. A la fin du chapitre, on a montré l'effet des conditions ambiantes sur les performances de la cellule solaire ainsi que les paramètres qui influent sur son efficacité.

# **CHAPITRE III**



***Résultats de simulations***

### III.1 Introduction

Dans le premier parti de ce chapitre, nous présentons une description relativement détaillée sur AMPS – 1D, notre étude est réalisée par l'application du logiciel de simulation numérique sophistiqué AMPS –1D. Le logiciel AMPS comprend une gamme large d'étude intégrale dans l'élaboration et la caractérisation des cellules solaires. Nous, nous allons appliquer la partie AMPS –1D pour générer les résultats des caractéristiques électriques de la cellule solaire étudiée.

Le deuxième parti pour but d'étudier la dégradation énergétique d'une structure d'hétérojonction ZnO/CdS/CIGS, nous devons analyser et interpréter les résultats pour déterminer l'influence de l'épaisseur sur la dégradation énergétique du dispositif comme premier étape et l'influence de la température sur le rendement.

Dans le travail qui suit nous allons étudier l'effet des deux couches ZnO et CdS sur les paramètres de sortie de la cellule. Pour cela, dans notre simulation, nous avons fait varier l'épaisseur et les autres couches sont restées constantes. Les résultats obtenus dans cette opération sont présentés dans la section qui suit. Dans toutes nos simulations nous avons pris une surface d'attaque de  $1\text{cm}^2$  avec un rayonnement d'intensité  $1000\text{W/m}^2$ . Par ailleurs les dimensions de notre cellule de [51] sont celles qui ont été données dans le **tableau III.1**.

### III.2 Logiciels de simulation des cellules solaires photovoltaïques

Plusieurs logiciels ont été écrits avec un but précis de modélisation des cellules solaires. Ils ont différentes possibilités et limitations, mais les principes de base sont les mêmes. En principe, tout programme numérique capable de résoudre les équations de base des semiconducteurs peut être employé pour modéliser les piles solaires à couches minces.

Un certain nombre de ces logiciels de simulation ont été développées dans des universités ou des instituts de recherche, et ceux-ci sont généralement disponibles sans frais et sans soutien. Ce groupe de programmes comprend AMPS-1D, SCAPS-1D, SimWindows, PC-1D, ADEPT-F, ASA, ASPIN ou AFORS-HET. Tous ces éléments sont unidimensionnels et peuvent être utilisés pour évaluer directement ou indirectement les performances des cellules solaires.

L'extension en deux ou trois dimensions, ce qui permet de simuler les fluctuations latérales dans les cellules solaires polycristallin en couches minces (par exemple, les limites de grains), est plus difficile à atteindre et reste dans le domaine des logiciels commerciaux, tels que APSYS, ATLAS 2D, DESSIS ou Medici. [47]

Dans ce présent travail, le premier logiciel a été utilisé. Il permet en fait, de prendre en compte de façon précise les principaux phénomènes physiques régissant le fonctionnement de nos dispositifs : transport du courant, recombinaison des porteurs de charge, comportement optique, etc.

### III.3 AMPS-1D

Le logiciel de simulation numérique des cellules solaire **Analysis of Microelectronic and Photonic Structures** ou **AMPS-1D** a une réputation internationale dans la recherche photovoltaïque. Il a été développé par le groupe des Fonash professeur de l'université de Pennsylvanie [50]. Il a été conçu pour être un outil informatique très général et polyvalent de simulation pour l'analyse de microélectroniques et structures photoniques. Il s'agit d'une seule dimension qui est applicable à tout dispositif à deux bornes. Il peut être pour la diode, le capteur photodiode et l'analyse des dispositifs photovoltaïques. Son principe de base est de résoudre l'équation de poisson et les équations de continuité soumis à des conditions aux limites associées des électrons libres et des trous à l'aide de Newton-Raphson.

L'utilisation de ce logiciel est très pratique car il permet de simuler n'importe qu'elle structure photovoltaïque, il permet d'aller jusqu'à 30 couches. En plus, le AMPS permet l'analyse un large éventail de structures de dispositifs sous illumination/sous tension ou les deux, selon les matériaux disponibles en fichiers data, en agissant sur les paramètres variables (largeur, surface, dopage, etc.). Une description détaillée des techniques de solution peut être trouvée dans le manuel d'AMPS [48].

#### III.3.1 Utilisation de l'AMPS

Le logiciel AMPS-1D se divise en quatre parties. Les trois premières sont pour la programmation où il faut introduire les paramètres du dispositif, des régions et de l'excitation. La quatrième partie concerne les résultats de la simulation où le logiciel calcule, les bandes interdites, les caractéristiques J-V, les courant de recombinaison, la génération...

L'interface d'AMPS (Figure III.1) est constituée de trois boîtes de dialogue. Chacune donne les paramètres nécessaires avant le lancement de la simulation par **AMPS**. Les trois boîtes de dialogues donnent:

- Les paramètres qui s'appliquent au dispositif entier.
- Les paramètres qui s'appliquent a une région particulière du dispositif.
- Les paramètres qui définissent le spectre d'illumination.

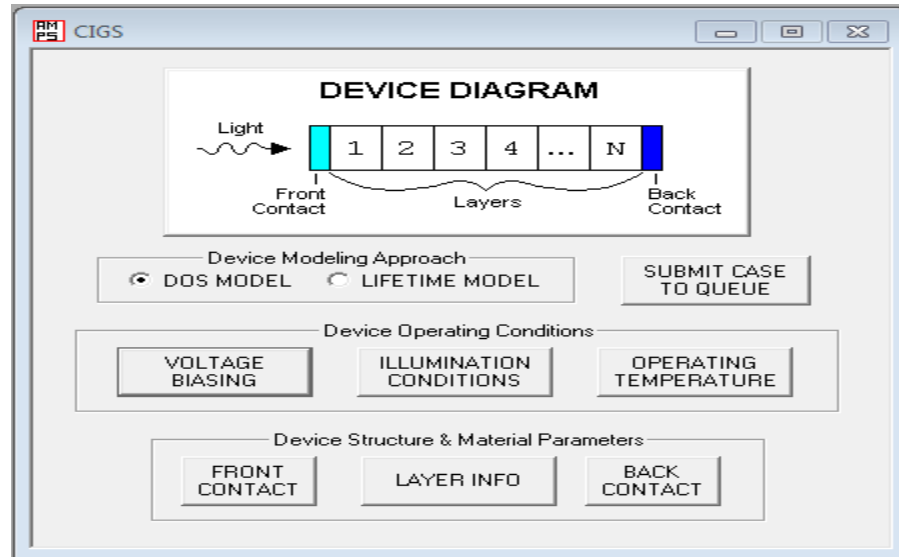


Figure III.1: Ensemble de sous - fenêtre pour introduire les différentes paramètres

### III.3.2 Propriétés générales du dispositif et du matériau

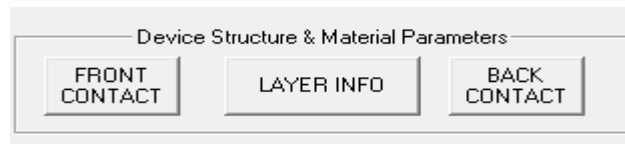


Figure III.2 : Fenêtre des Propriétés générales du dispositif et du matériau

**III.3.2.1 Les propriétés du matériau :** pour une simulation réussie, les paramètres d'entrée comprennent : l'épaisseur du matériau, la constante diélectrique, la bande interdite, l'affinité électronique, la mobilité et la densité des états effective, la concentration des porteurs, le coefficient d'absorption, les états de défauts, la densité de défauts, la distribution de défauts, la section de capture efficace et enfin, les états de queues de bande.

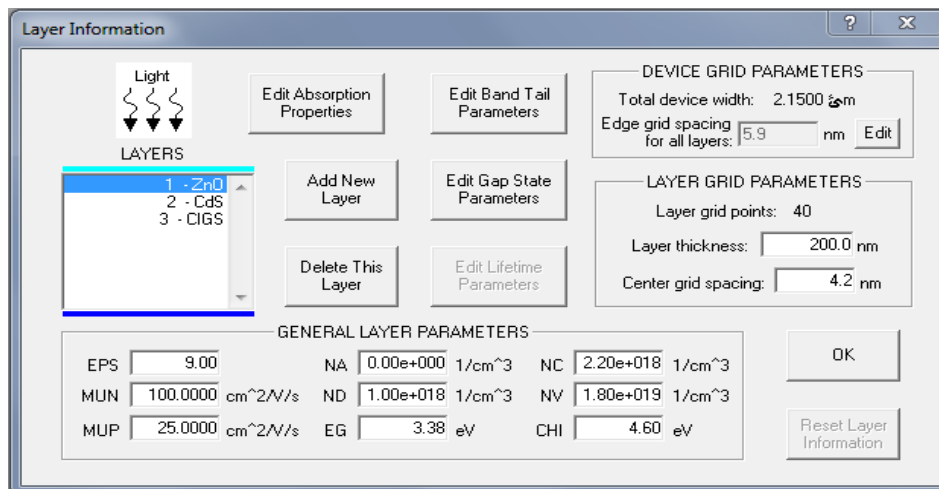
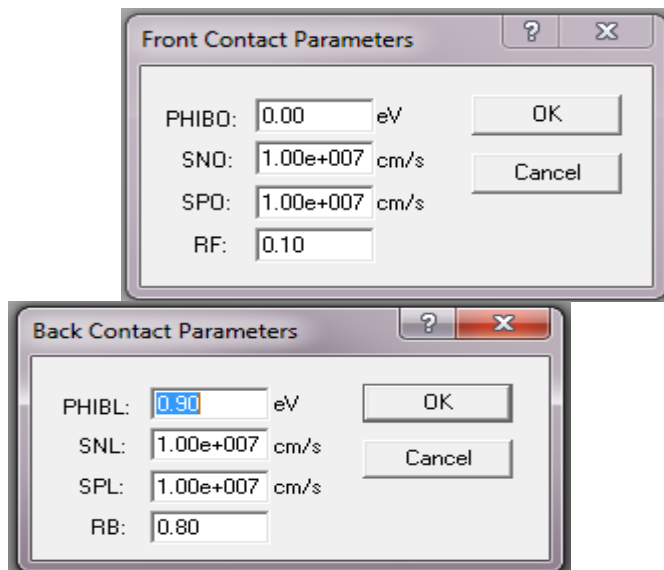


Figure III.3 : Fenêtre d'informations des couches

### III.3.2.2 Propriétés générales du dispositif : elles englobent :

#### a) Contacts avant et arrière

Les contacts avant et arrière sont définis par leur fonction de travail et par la réflectivité de l'interface du contact/semi-conducteurs. Le  $\sqrt{b_0}$  et le  $\sqrt{b_L}$  qui représentent la différence entre la bande de conduction ( $E_c$ ) et le niveau de Fermi ( $E_F$ ), respectivement à la surface avant ( $x = 0$ ) et arrière ( $x = L$ ) doivent être choisis de façon à obtenir un contact ohmique à la surface avant et une négligeable barrière de Schottky à la surface arrière.



**Figure III.4 :** Fenêtre d'informations du dispositif

#### b) Recombinaisons aux surfaces

Les interfaces entre les couches polycristallines de la cellule sont riches en défauts, générés par le désaccord de maille et les impuretés, ce qui cause la recombinaison des porteurs. Le paramètre utilisé pour décrire cette recombinaison est donnée en fonction de la vitesse de recombinaison de surface [49]. Tout calcul numérique pour ce travail a utilisé une vitesse de recombinaison de surface de  $10^7$  cm/s, ce qui correspond approximativement à la vitesse thermique des électrons.

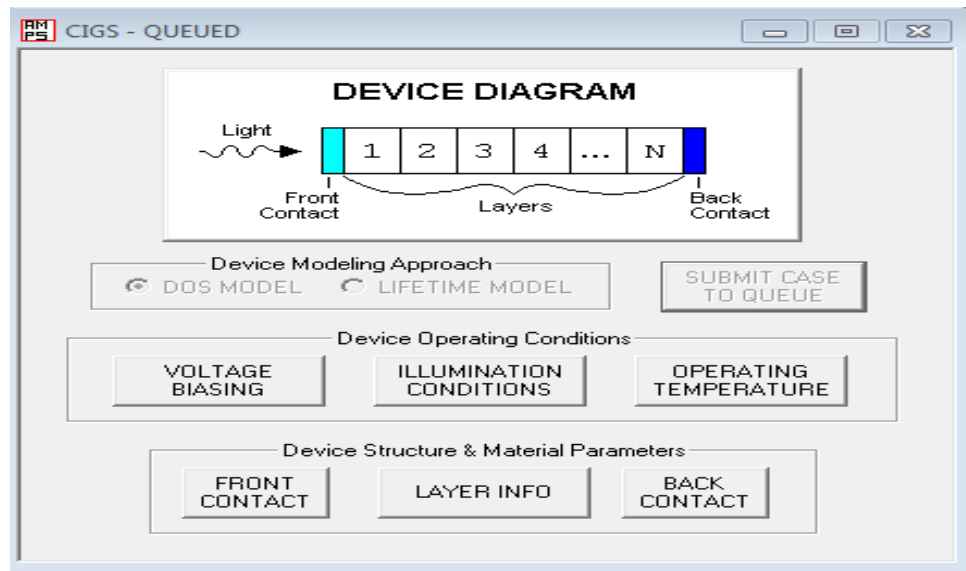
#### c) Réflectivité à la surface avant et arrière

La réflectivité de la surface avant limite le rendement quantique de la cellule et donc la densité du courant de court-circuit. Ce paramètre est réglé à 10%. La réflexion arrière a une influence négligeable sur la performance donc, on a considéré que 95% des photons atteignent la surface arrière seront réfléchis.

### III.3.1.2 Paramètres de modélisation

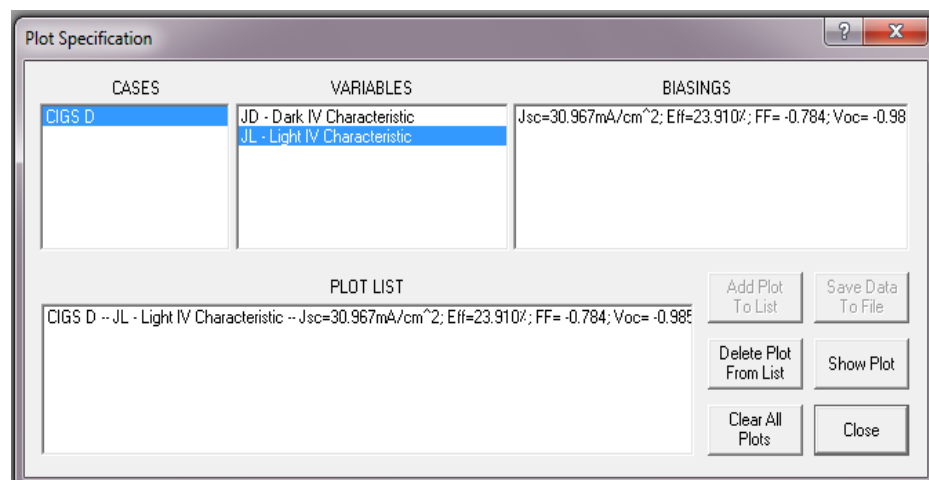
Les paramètres de modélisation sont : le type de mode de fonctionnement, le maillage (grid spacing) pour les calculs numériques, la tension de polarisation pour laquelle JV et QE devraient être générés.

Pour la simulation, nous cochons la case « **SUBMIT CASE TO QUEUE** » et ainsi le logiciel commence l'exécution (figure III-5).



**Figure III.5:** L'interface de l'exécution.

Pendant le processus de simulation, une boîte de dialogue de progression s'affiche, qui permet aux utilisateurs de savoir que le calcul s'effectue normalement. Une fois le calcul est terminé, les résultats sont stockés et présentés par des courbes comme il est illustré sur la figure III.6.



**Figure III.6 :** Interface des résultats

Les résultats sont les caractéristiques ( $J$ - $V$ ) à l'obscurité et sous éclairage, les valeurs de la densité de courant de saturation ( $J_0$ ), du facteur d'idéalité, de la résistance parallèle (shunt)  $R_{sh}$ , de la résistance série  $R_s$ , de la densité de courant de court circuit ( $J_{CC}$ ), de la tension de circuit ouvert ( $V_{CO}$ ), du facteur de remplissage ( $FF$ ), du rendement de conversion photovoltaïque ( $E_{FF}$ ), du rendement quantique externe ( $QE$ ) ainsi que les grandeurs internes comme le diagramme du gap d'énergie, les densités des porteurs libres ou piégés, le champ et potentiel électrique, le taux de recombinaison, les composantes du courant des électrons et des trous, les durées de vie...etc.

Les résultats des simulations peuvent être exportés vers des fichiers data, qui sont facilement lus par des logiciels graphiques comme EXCEL et ORIGIN.

Le logiciel de l'AMPS peut fonctionner en deux modes distincts: le mode de la densité d'état ou DOS (Density Of States) ou le mode de la durée de vie (Life time). Une description des deux modes peut être trouvée dans le manuel d'AMPS [48].

- Le mode de la durée de vie: ce mode accepte les entrées sous forme de durée de vie des porteurs, qui sont supposés constants, indépendants de la lumière et de la tension de polarisation, et le processus de recombinaison sera modélisé par un modèle linéaire donné par la relation :

$$\text{Type p: } R_n = \frac{\Delta_n}{\tau_n}$$

$$\text{Type n: } R_p = \frac{\Delta_p}{\tau_p}$$

$\Delta_n$  ( $\Delta_p$ ) : Le changement de la population des électrons (trous) dans la bande de conduction (valence) par rapport à la concentration à l'équilibre thermique  $n_0$  ( $p_0$ ).

$\tau_n$  et  $\tau_p$  les durées de vie des électrons et des trous, respectivement.

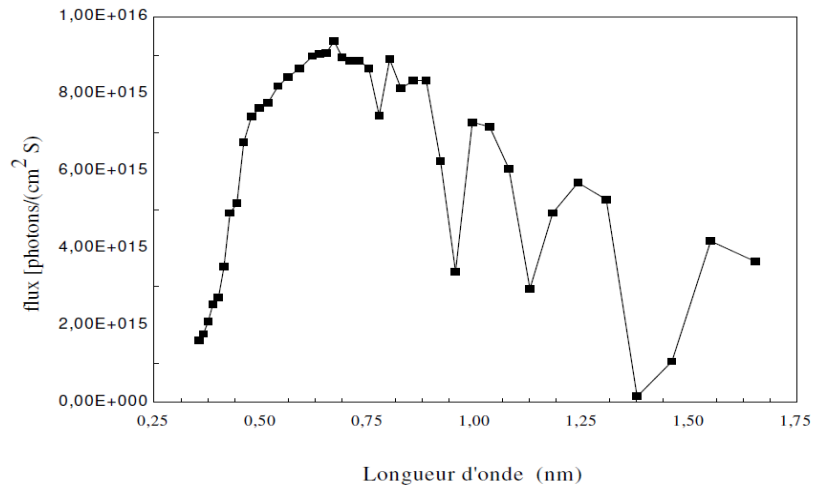
- Le mode DOS (Density Of States): ce mode permet de définir multiples états de défauts, en utilisant les densités, les distributions d'énergie, et les sections de capture. En se basant sur ces informations la recombinaison et les défauts sont calculés en utilisant le formalisme de Shockley-Read-Hall. Si le matériau utilisé a une densité de défauts importants tels que les matériaux amorphes ou polycristalins, l'utilisation du modèle DOS devient indispensable. Dans ce travail le mode DOS a été utilisé.

Le maillage a été choisi pour être plus dense dans les couches minces où des changements plus rapides se produisent dans la structure de la bande afin d'obtenir une bonne résolution.

[53]

### III.3.1.3 Conditions environnementales

L'illumination est définie discrètement sur la figure (III.7). Le nombre de photons incidents par ( $\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ ) est en fonction de longueurs d'onde entre  $0,38 \mu\text{m}$  et  $1,24 \mu\text{m}$ , avec une taille de pas de  $0,02$  et  $0,03 \mu\text{m}$ .



**Figure III.7:** Le spectre solaire AM1.5 utilisé dans ce travail par l'AMPS-1D. [53]

### III.3.3 Avantages et inconvénients de l' AMPS

Les majeurs inconvénients de ce logiciel sont : l'absence du traitement d'interfaces et l'obligation de l'utilisation manuelle où toutes les informations doivent être entrées à la main (spectre solaire, coefficient d'absorption...). Cependant, il est très stable en général bien que les dispositifs complexes peuvent introduire des instabilités. Il possède également, une bonne interface utilisateur, notamment un programme de traçage flexible. [53 ]

### III.4 Principe de la simulation numérique :

L'étude de la plus part des dispositifs à semi-conducteurs est basée sur la resolution simultanée de l'équation de Poisson et de l'équation de continuité. Il calcule à chaque instant et en tout point de l'espace en une suite d'éléments finis, la concentration des électrons et des trous et la valeur du potentiel électrostatique.

L'équation de Poisson définit la relation entre le potentiel et la densité des porteurs :

$$\Delta V = \frac{-q}{\epsilon} (Nd - Na + p - n)$$

Où  $\epsilon$  : est la constante diélectrique,

$V$  : le potentiel,

$q$  : est la charge élémentaire d'électrons,

$Nd$  et  $Na$  : sont les concentrations des dopants donneurs et accepteurs ionisées,

$n$  et  $p$  : sont les densités des porteurs.

L'évolution temporelle des densités de porteurs obéit aux équations de continuité et pour respectivement les électrons et les trous :

$$\frac{\partial n}{\partial t} = G - U_n + \frac{1}{e} \operatorname{div} \vec{J}_n$$

$$-\frac{\partial p}{\partial t} = G - U_p + \frac{1}{e} \operatorname{div} \vec{J}_p$$

Où :  $G$  et  $U$  sont respectivement les taux de génération et de recombinaison des porteurs,  $J_n$  et  $J_p$  sont respectivement les densités de courant des électrons et des trous. Les dérivations basées sur la théorie de transport de Boltzmann ont prouvé que la densité des courants dans les équations de continuité peut être définie par le modèle d'entraînement-diffusion.

Les densités de courants sont exprimées en deux termes. Le premier correspond à l'entraînement des charges par le champ électrique et le second correspond à la diffusion des porteurs.

$$\vec{J}_n = q n \mu_n \vec{E} + q D_n \overrightarrow{\operatorname{grad} n}$$

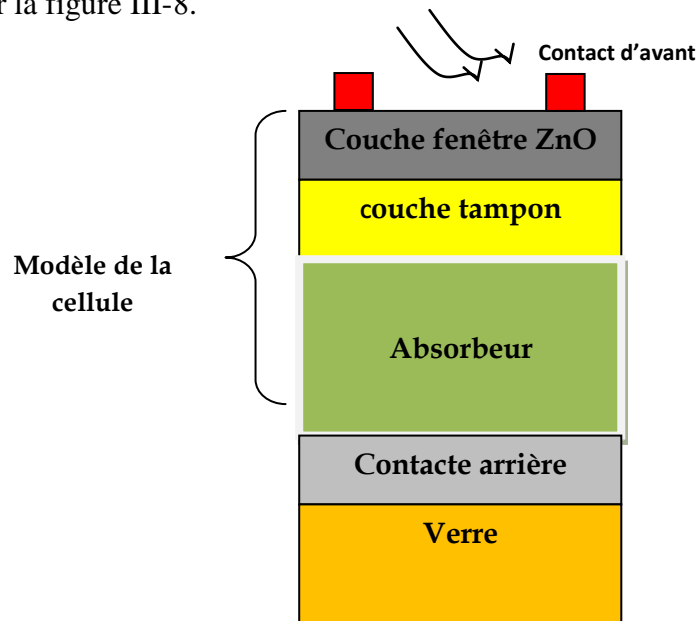
$$\vec{J}_p = q p \mu_p \vec{E} + q D_p \overrightarrow{\operatorname{grad} p}$$

Où :  $D_n$  et  $D_p$  sont les coefficients de diffusion.

### III.5 présentation de la cellule étudiée

Notre travail consiste à modéliser une cellule solaire à base de CIGS et à simuler ces paramètres électriques, optiques et géométriques afin de concevoir une cellule ayant le rendement électrique optimal.

Dans notre étude, nous utilisons une cellule solaire composée des hétérojonctions suivantes : grille/ZnO /CdS /CZTS/ Mo/verre. Le schéma simplifié de l'hétérostructure est représenté sur la figure III-8.



**Figure III.8 :** Schéma simplifié d'une cellule solaire.

Les couches semi-conductrices CdS (tampon) et ZnO (fenêtre), ont fait l'objet de notre étude dans les modèles numériques pour voir l'influence de celles-ci sur les performances électriques de la cellule solaire.

### III.6 Les paramètre du dispositif étudié

Nous avons pris comme référence la structure développée par Gloeckler. Elle a les propriétés et paramètres suivants Un rayonnement solaire AM 1,5 avec une densité de puissance de  $100 \text{ mW/cm}^2$ , comme une source d'éclairage, Le coefficient d'absorption, pour les différentes couches ont été intégrés dans le code AMPS-1D [48]. La simulation pour la structure étudiée à température ambiante sera le premier intérêt Tels que:

### III.6.1 Propriétés générales du substrat

	Surface avant	Surface arrière
$E_c - E_f$	0.0 eV	1.00 eV
Recombinaison de surface des électrons	$10^7$ cm/s	$10^7$ cm/s
Recombinaison de surface des trous	$10^7$ cm/s	$10^7$ cm/s
Réfectivité	0.1	0.9

**Tableau III.1** : propriétés du substrat [51]

### III.6.2 Propriétés des différentes couches

	ZnO	CdS	CZTS	references
Epaisseur (nm)	-	-	3150	[32]
Constante diélectrique	9	10	10	[32]
Mobilité d'électron ( $\text{cm}^2/\text{V.s}$ )	25	25	100	[32]
Mobilité du trou ( $\text{cm}^2/\text{V.s}$ )	100	100	20	[32]
Densité de porteur ( $\text{cm}^{-3}$ )	-	-	$4 \times 10^{16}$	[32]
Bande de gap (eV)	3.35	2.4	1.4	[32]
$N_c$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$2.2 \times 10^{18}$	$2.2 \times 10^{18}$	$2.2 \times 10^{18}$	[32]
$N_v$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$1.8 \times 10^{19}$	$1.8 \times 10^{19}$	$1.8 \times 10^{19}$	[32]
Affinité électronique (eV)	4.35	4.00	4.21	[32]

**Tableau III.2** : propriétés des trois couches ZnO, CdS et CZTS

### III.7. Modèle de simulation

Les modèles que nous avons utilisés dans notre simulation sont décrits dans la documentation d'AMPS et dans la littérature. Nous avons considéré le modèle de recombinaison

Shockley-Read-Hall (SRH) pour les défauts. Le modèle de densité de défauts comprend deux distributions de défauts de formes gaussiennes pour les états donneurs pour ZnO, les états accepteurs correspondants au CdS et les états donneurs pour CIGS.

Nous avons groupé les valeurs des paramètres de la densité de défauts où  $N_{DG, (AG)}$  est la densité des états donneurs (accepteurs) de formes gaussiennes,  $E_A(D)$  est l'énergie du pic de la gaussienne,  $W_G$  la largeur de la distribution et  $\sigma$  la section de capture (tableau III.3).

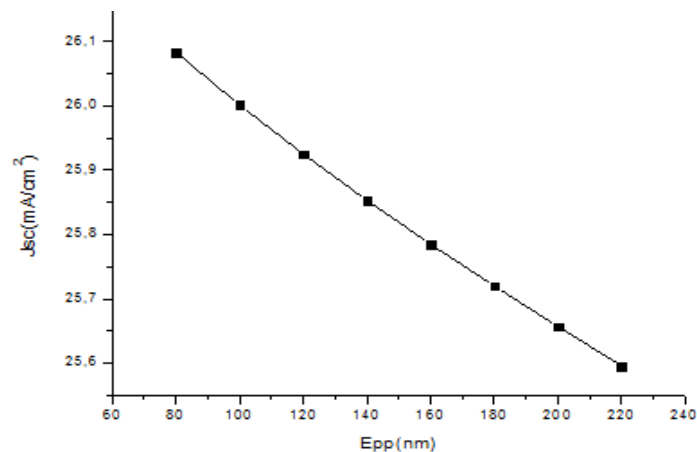
	ZnO	CdS	CZTS
$N_{DG, N_{AG}} (cm^{-3})$	D : $10^{17}$	A : $10^{15}$	D : $10^{15}$
$E_A, E_D (eV)$	Milieu de gap	Milieu de gap	Milieu de gap
$W_G (eV)$	0.1	0.1	0.1
$\sigma_n (cm^2)$	$10^{-12}$	$10^{-17}$	$2 \times 10^{-16}$
$\sigma_p (cm^2)$	$10^{-15}$	$10^{-13}$	$2 \times 10^{-15}$

**Tableau III.3 :** Paramètres de la densité de défauts des matériaux en ZnO, CdS et CIGS [52].

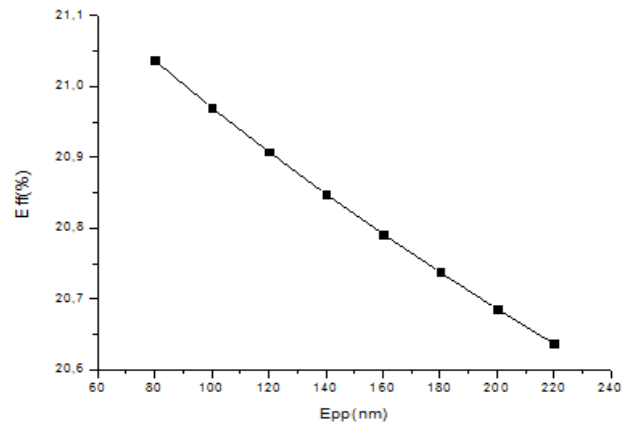
## III.8 Effet de de l'épaisseur

### III.8.1 Effet de la couche fenêtre ZnO

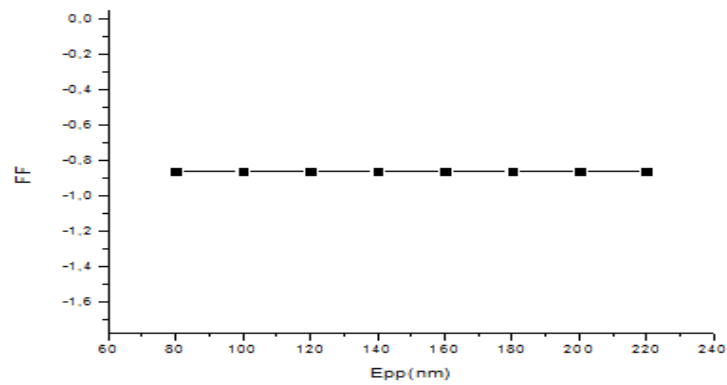
Les figures (III-9), (III-10), (III-11), représentent les caractéristiques de la cellule photovoltaïque pour différentes épaisseurs de la couche fenêtre ZnO entre 80 nm et 180 nm en fonction de l'épaisseur, pour un dopage de  $10^{15} cm^{-3}$ , pour une épaisseur de 60 nm de CdS.



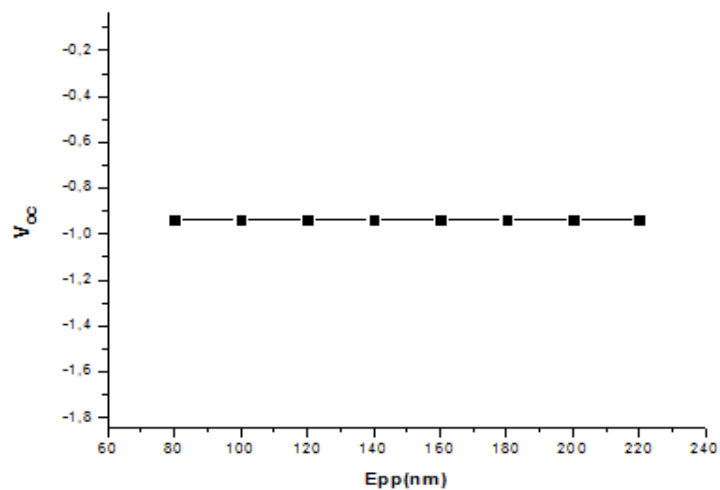
**Figure III.9.** Variation du courant en fonction de l'épaisseur.



**Figure III.10.** Variation de rendement en fonction de l'épaisseur



**Figure III.11.** Variation de facteur de forme en fonction de l'épaisseur



**Figure III.12.** Variation de la tension en fonction de l'épaisseur.

Le tableau III-4 suivant résume les différentes caractéristiques de la structure pour différentes épaisseurs.

l'épaisseur (nm)	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$\eta$ (%)	$FF$ (%)	$V_{oc}$ (V)
80	26.083	21.037	0.860	0.74
100	26.001	20.970	0.860	0.74
120	25.925	20.908	0.860	0.74
140	25.853	20.848	0.860	0.74
160	25.785	20.792	0.860	0.74
180	25.720	20.738	0.860	0.74

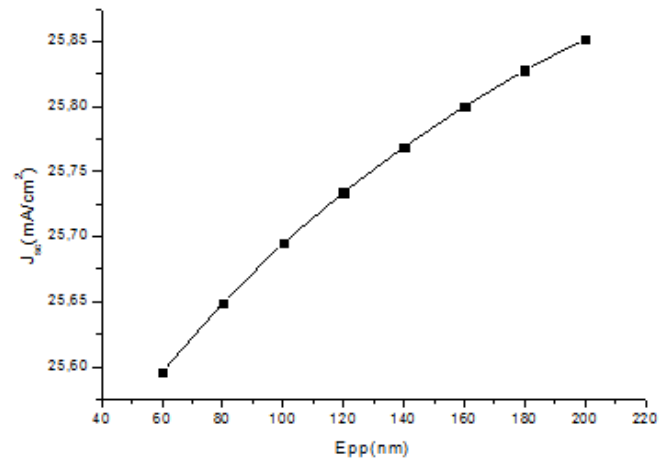
**Tableau III.4 :** Les paramètres de sortie de la cellule avec l'effet de l'épaisseur de la couche fenêtre.

Le premier contact entre les photons et la cellule solaire, est la couche fenêtre ZnO. L'augmentation de celle-ci influe sur la création des paires électron-trou, d'où la diminution du rendement. En outre, quand la couche ZnO est très épaisse, la performance de cellules se dégrade en raison d'une part de l'augmentation de la résistance en série (augmentation des pertes), et d'autre part de l'épaisseur de la couche. Plus l'épaisseur diminue, plus l'absorption augmente (pour les longues longueurs d'onde). Par conséquent une épaisseur optimale de la couche ZnO est nécessaire pour la meilleure performance de la pile solaire.

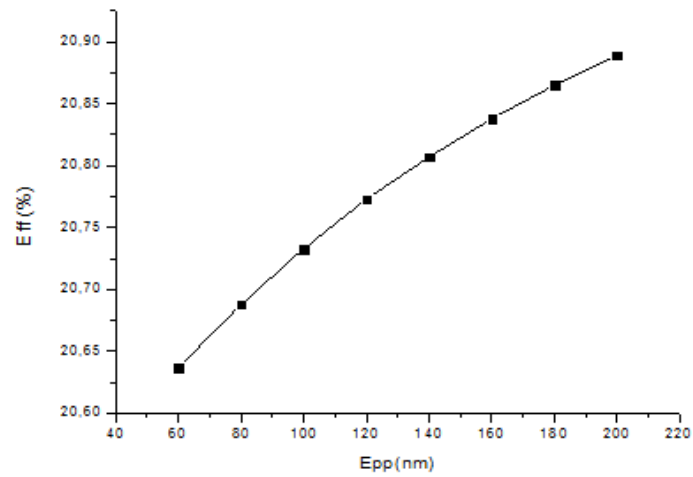
Le rendement électrique de conversion varie avec l'épaisseur de la couche fenêtre ZnO. Le rendement le plus élevé a été réalisé pour une épaisseur de la couche ZnO d'environ 80 nm.

### III.8.2 Effet de l'épaisseur de la couche tampon CdS

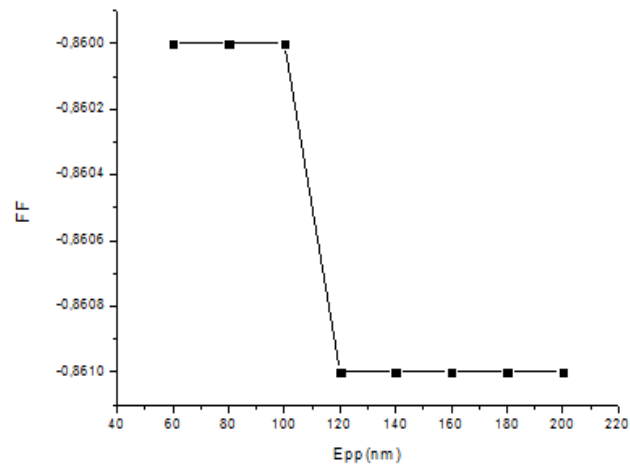
L'effet de la variation de l'épaisseur de la couche tampon  $X_{CdS}$  de 60 à 160 nm sur Les paramètres de sortie de la cellule sont illustré respectivement sur les figures (III-13), (III-14), (III-15) pour un dopage de  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ .



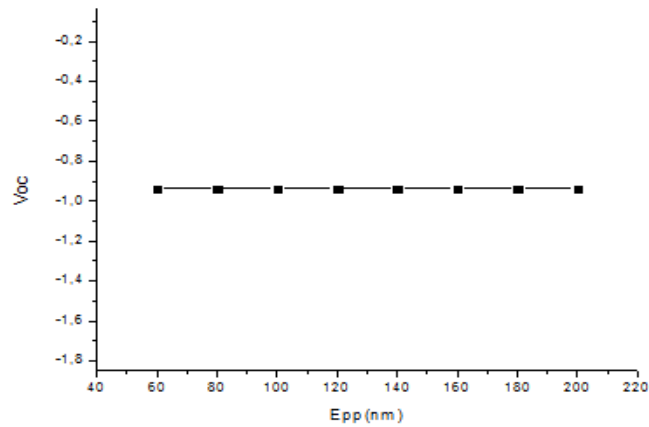
**Figure III.13.** Variation du courant en fonction de l'épaisseur.



**Figure III.14.** Variation du rendement en fonction de l'épaisseur.



**Figure III.15.** Variation du facteur de forme en fonction de l'épaisseur.



**Figure III.16.** Variation de la tension en fonction de l'épaisseur.

Les paramètres de la structure, pour différentes épaisseurs  $X_{CdS}$ , tirés des différentes caractéristiques, sont récapitulés dans le tableau suivant III-17 :

l'épaisseur (nm)	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$\eta$ (%)	FF (%)	$V_{oc}$ (V)
60	25.596	20.637	0.860	0.938
80	25.649	20.688	0.860	0.938
100	25.695	20.733	0.860	0.938
120	25.734	20.773	0.8861	0.938
140	25.769	20.807	0.861	0.938
160	25.800	20.838	0.861	0.938

**Tableau III. 17:** Les paramètres de sortie de la cellule avec l'effet de l'épaisseur de la couche tampon

La figure III.7 présente une cellule solaire des différentes couches et la variation d'épaisseur de la couche tampon du CdS. Dans cette étude, nous allons essayer de faire une optimisation de cette couche entre 60 nm et 160 nm pour obtenir un rendement de cette cellule égale à 20.838% quand l'épaisseur de cette couche est égale à 160 nm, On remarque que les valeurs du  $J_{sc}$  et le rendement et FF de la cellule solaire augmentent avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche tampon. Nous constatons que l'épaisseur de cette couche est optimal égale à 160 nm.

En effet, une couche tampon épaisse se traduira par une plus grande quantité de photons. Lorsque la couche tampon est plus épaisse, une plus grande quantité d'énergie est absorbée par cette couche engendrée par le transport des photons.

Par conséquent, elle conduirait à une augmentation des photons qui ont atteint la couche absorbante. Une augmentation du nombre de photons dans la couche d'absorbant augmenterait le rendement quantique de la cellule solaire comme le montre la figure III.14.

La couche CdS est responsable d'une partie des pertes par absorption dans la cellule, ainsi lorsque son épaisseur augmente le taux des photons d'énergie ( $h\nu > E_g$  CdS) qu'y sont absorbés devient important.

### III.9. Effet de température de la couche tampon CdS

La figure III-18 représente Les paramètres de sortie de notre cellule photovoltaïque pour une gamme de **température** de la couche tampon CdS allant de  $10^{14}$  jusqu'à  $10^{18}$  cm<sup>-3</sup>, pour une épaisseur de 60 nm de CdS , et une épaisseur de 78 nm de ZnO .

Température (c°)	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$\eta$ (%)	FF (%)	$V_{oc}$ (V)
25	26.085	21.26	0.860	0.994
30	26.085	20.35	0.85	0.991
35	26.084	19.89	0.849	0.899
40	26.085	19.665	0.846	0.891
45	26.085	19.203	0.842	0.874
50	26.085	18.741	0.837	0.858

**Tableau III. 18:** Les paramètres de sortie de la cellule avec l'effet de température de la couche tampon

Lorsque la température de la cellule augmente, la barrière de potentiel dans l'hétérojonction CdS/ CZTS diminue, et permet une diminution de la zone de charge d'espace, qui traduit par diminution des porteurs photogénérés et donc une diminution du rendement de conversion.

Suite à ces résultats, nous pouvons dire que pour avoir une amélioration des performances pour une structure à base de CZTS, nous devons utiliser une couche tampon de type n fortement dopée.

On remarque que, avec l'épaisseur optimal obtenu par AMPS ; les paramètres  $J_{sc}$ , FF,  $\eta$  (%) sont diminués, ce qui donne plusieurs prédictions pour la mise en évidence du phénomène de dégradation ; soit au niveau de l'épaisseur ou au niveau de dopage.

### III.10 Conclusion

Dans ce travail nous avons étudié l'impact de la couche Fenetre ZnO, leur epaisseur, et la couche tampon CdS, dans le but de concevoir une structure optimale à hétérojonction ZnO/CdS/ZIGS qui donne le meilleur rendement électrique. Les paramètres optimums de la structure optimal obtenus par notre simulation pour les deux couches minces (ZnO, Cds) sont présentés dans le tableau suivant.

ZnO		CdS		CZTS		$\eta$ (%)	FF(%)	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$V_{co}$ (V)
ND/ZnO C°	XZnO (nm)	ND/CdS C°	XCdS (nm)	NA/ CZTS C°	X CZTS (nm)				
25	80	25	78	25 C°	1400	21.26	0.860	26.085	0.994

A cet effet, nous avons simulé les paramètres de sortie d'une cellule solaire à base de CZTS à hétérojonction en essayant de trouver les paramètres optimaux, qui améliorer les caractéristiques de sortie, et localiser l'effet de température sur la dégradation de rendement de la cellule.



***Conclusion général***

## Conclusion Générale

L'objectif de notre travail était d'étudier l'effet de la température sur la dégradation de rendement électrique d'une cellule photovoltaïque, et la mise en évidence le principal paramètre physique manipule ce phénomène. Ceci dans le but d'optimiser le temps de fonctionnement de ces cellules photovoltaïques à couches minces (CZTS).

Dans ce travail nous avons utilisé la simulation numérique pour l'étude des caractéristiques de ces dispositifs. Nous avons aussi optimisé les paramètres physiques et électriques d'une structure spécifique de cellule solaire à base de CZTS pour obtenir un rendement de conversion électrique maximal.

La modélisation et la simulation ont été faites par le logiciel AMPS -1D, pour étudier les performances des cellules solaires à base de  $\text{Cu(In,Ga)Se}_2$  (CZTS).

Nous avons évalué, dans un premier temps, la densité de courant  $J_{sc}$ , la tension en circuit ouvert  $V_{oc}$ , le facteur de forme FF et le rendement électrique  $\eta$  pour une structure typique de  $\text{ZnO/CdS/CZTS}$ .

Dans la modélisation et la simulation nous avons utilisé les données d'une structure de référence développée par Gloeckler [52]. Le rendement électrique optimal obtenu est de 21.26%.

Par la suite nous avons étudié l'effet de deux couches  $\text{ZnO}$ ,  $\text{CdS}$  sur le rendement électrique. Nous sommes alors intéressés à l'épaisseur des deux couches pour voir l'influence de ces deux paramètres sur le rendement électrique de la structure. Nous avons alors, fait varier le paramètre (épaisseur) de l'une tout en gardant constants les autres couches pour voir l'influence de ce paramètre sur le rendement électrique de la structure.

En prenant une structure qui combine les paramètres optimaux (épaisseur et rendement) de chaque couche, nous avons pu atteindre un rendement de conversion électrique de 21.26% avec un facteur de forme de 0.86.

Cette étude nous a permis d'optimiser le rendement électrique de la structure  $\text{ZnO/CdS/CZTS}$  et de montrer l'impact de chaque couche sur les performances du dispositif en fonction du rôle de chacune d'elle. Nous pouvons dire que les paramètres de la couche tampon  $\text{CdS}$  jouent un rôle très important dans l'amélioration du rendement des cellules solaires à base CZTS.

De même, les paramètres de la couche fenêtre  $\text{ZnO}$  et de l'absorbeur CIGS ont une influence significative sur la performance de la cellule solaire. La couche de  $\text{ZnO}$  établie, avec la  $\text{CdS}$ , la jonction p - n en permettant une meilleure collecte de porteur de photon de courte longueur d'onde et une réduction considérable des pertes électriques associées aux mécanismes de recombinaison à l'interface. Du fait des largeurs de bande interdites élevées, les couches de  $\text{ZnO}$  et la couche tampon  $\text{CdS}$ , laissent passer le rayonnement visible (d'où leur nom de couches fenêtre), qui est ensuite absorbé dans la couche de CIGS.

Le rendement énergétique diminue lorsque le tempurateur augmente, ce la signifié que hors l'influence des conditions climatiques l'épaisseur des couches et le nombre des charges d'espace dans les couches de la cellule photovoltaïque sont comporte comme des paramètres essentiels entrent dans le phénomène de dégradation énergétique



# ***Bibliographie***

## Références bibliographiques

---

- [1] J. Bernard, Energie solaire calcul et optimisation, 1ère édition, ELLIPES, Paris, 2004.
- [2] B. Brousse, Réalisation et caractérisation de cellules photovoltaïques organiques Obtenues par dépôt physique, Thèse de doctorat, faculté de sciences et technique, spécialité :  
Électronique des hautes fréquences et optoélectronique, université de Limoges (France), 2004.
- [3] Le pompage photovoltaïque par Jimmy Royer, Thomas Djako, Eric Schiller, Bocar Sadasy, IEPF/ université d'Ottawa/ EIER/ CREPA.
- [4] R. Bernard ; G. Menguy ; M. Schwartz, Le rayonnement solaire conversion Thermique et applications ; Technique et documentation Lavoisier, 2ème édition 1980.
- [5] A. Labouret, M. Viloz, Energie solaire photovoltaïque, 3ème édition, Dunod Paris, 2006.
- [6] N. Oleksiy, Simulation fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités, Thèse doctorat, Institut national des sciences appliquées de Lyon, 2005.
- [7] W. Kim, W. Choi, A novel parameter extraction method for the one-diode solar cell model, Solar Energy, 2010; 84: 1008–1019.
- [8] G. N. Tiwari, S. Dubey, Fundamentals of Photovoltaic Modules and Their applications, Cambridge, 2010.
- [9] Abete A. et al. "Analysis of photovoltaic modules with protection diodes in presence of Mismatching". 21st IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 1990.
- [10] Kajihara A., Harakawa T. "Model of photovoltaic cell circuits Under partial shading". IndustrialTechnology, ICIT 2005, pp. 866-870, 14-17 Dec., 2005.
- [11] RICAUD A. Photopiles solaires. Presses polytechniques et universitaires romandes, pp313, 1997.
- [12] Campbell R.C. "A Circuit-based Photovoltaic Array Model for Power System Studies". IEEE 2007.
- [13] Katsutoshi U. "Study on Dynamic and Static Characteristics of Photovoltaic Cell". Power Conversion Conference, 2002.
- [14] B. Equer, Energie Solaire Photovoltaïque, Ellipses, Paris, 1993.
- [15] A. Ricaud, Photopiles solaires, 1ère édition, Presse polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, Suisse, 1997.
- [16] 1.M. Sadok and A. Mehdaoui, 'Outdoor Testing of Photovoltaic Arrays in the Saharan Region', Renewable Energy, Vol. 33, N°12, pp. 2516 - 2524, 2008.

## Références bibliographiques

---

- [17] 2M. Sadok, 'Détermination des Paramètres, Performances et Etude de la Détérioration des Modules Photovoltaïques en Milieu Saharien', Thèse de Doctorat en Sciences Physiques, Université de Tlemcen, Algérie, 2011.
- [18] A. Luque and S. Hegedus, 'Handbook Photovoltaic Science and Engineering', Ed. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, England, 2003.
- [19] T. Markvart and L. Castaner, 'Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications', Ed. Elsevier, England, 2003.
- [20] C. Leboeuf and H. Ossenbrink, 'PV Module Power Output: Sensitivity and Uncertainty in Non-STC Measurements', In Proceedings of the 22th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), pp. 614 - 619, Las Vegas, NV, 7 -11 Oct. 1991.
- [21] C. Leboeuf and H. Ossenbrink, 'PV Module Power Output: Sensitivity and Uncertainty in Non-STC Measurements', In Proceedings of the 22th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), pp. 614 - 619, Las Vegas, NV, 7 -11 Oct. 1991.
- [22] W. Knaupp, 'Power Rating of Photovoltaic Modules from Outdoor Measurements', In Proceedings of the 22th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), Vol. 1, pp. 620 - 624, Las Vegas, NV, 7-11 Oct. 1991.
- [23] E.D. Dunlop<sup>1</sup>, 'Lifetime Performance of Crystalline Silicon PV Modules', Proceedings of 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Osaka, Japan, Vol. 3, pp. 2927 - 2930, 2003.
- [24] E.D. Dunlop<sup>2</sup>, D. Halton and H.A. Ossenbrink, '20 Years of Life and More: Where is the End of Life of a PV Module?', Proceedings of the 31th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), Buena Vista, Florida, USA, pp. 1593 - 1596, 2005.
- [25] <http://www.ecosolargy.com/pdf/product%20Warranty.pdf>.
- [26] A.W. Czanderna and F.J. Pern, 'Encapsulation of PV Modules Using Ethylene Vinyl Acetate Copolymer as a Pottant: A Critical Review', Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 43, N°2, pp. 101-118, 1996.
- [27] A. Parretta, G. Graditi, R. Schioppo and M. Bombace, 'Optical Degradation of Long-Term

## Références bibliographiques

---

Field-aged c-Si Photovoltaic Modules', Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 86,

N°3, pp. 349 – 364, 2005.

**[28]** K. Agroui, 'Contribution au Développement des Techniques de Contrôle de Qualité des Modules Photovoltaïques de Diverses Technologies', Thèse de Doctorat, Université de Béchar, Algérie, Octobre, 2010.

**[29]** A.M. Reis, N.T. Coleman, M.W. Marshall, P.A. Lehman and C.E. Chamberlin, 'Comparison of PV Module Performance Before and After 11-Years of Field Exposure', Proceedings of the 29th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), New Orleans, LA, USA, pp. 1432 - 1435, 2002.

**[30]** K. Machida, T. Yamazaki and T. Hirasawa, 'Secular Degradation of Crystalline Photovoltaic Modules', Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 47, N°1-4, pp. 149 – 153, 1997.

**[31]** [http://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/pvmrw2011\\_28\\_csi\\_sample.pdf](http://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/pvmrw2011_28_csi_sample.pdf).

**[32]** Loïc Mabile. Vers la compréhension des mécanismes de dégradation et de vieillissement des assemblages photovoltaïques pour des applications sous haute concentration. Université Paris Sud - Paris XI, 2014. Français. NNT : 2014PA112037. tel-00985464

**[33]** Tahar Tafticht (2006), Analyse et commande d'un système hybride photovoltaïque éolien, Thèse de Doctorat, Université du Québec.

**[34]** Antonio Luque and Steven Hegedus (2003), Photovoltaic Science and Engineering, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, England.

**[35]** T. Markvart & Luis Castaner (2003), Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications, Elsevier Ltd

**[36]** Roger Legros (1974), Les semi-conducteurs, Eyrolles, Paris.

**[37]** A. Ricaud (1997), Photopiles solaires: de la physique de la conversion photovoltaïque aux filières, matériaux et procédés, Presse polytechnique et universitaires romandes, Suisse.

**[38]** Overstraeten R. van and Mertens R.P (1986), Physics, Technology and Use of Photovoltaics, Adam Hilger, Bristol.

## Références bibliographiques

---

**[39]** Martin A. Green, Keith Emery, Yoshihiro Hishikawa, Wilhelm Warta, and Ewan D. Dunlop.

Solar cell efficiency tables (version 42). Progress in Photovoltaics : Research and Applications,

21(5) :827–837, 2013.

**[40]** Natalya V Yastrebova. High-efficiency multi-junction solar cells : Current status and future

potential. Solar Energy, 2007.

**[41]** Hector Cotal, Chris Fetzer, Joseph Boisvert, Geoffrey Kinsey, Richard King, Peter Hebert, HojunYoon, and Nasser Karam. Iii–v multijunction solar cells for concentrating photovoltaics. Energy & Environmental Science, 2(2) :174–192, 2009.

**[42]** S. Pingel, O. Frank, M. Winkler, S. Daryan, T. Geipel, H. Hoehne, and J. Berghold. Potential-induced degradation of solar cells and panels. In Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2010 35th IEEE, pages 002817–002822, 2010.

**[43]** Magpower. Performance in practice cpv versus pv. CPV USA 2011, Novembre 2011.

Michael D Kempe. Control of moisture ingress into photovoltaic modules. In Photovoltaic

**[44]** Specialists Conference, 2005. Conference Record of the Thirty-first IEEE, pages 503–506. IEEE, 2005.

**[45]** Loïc Mabile. Vers la compréhension des mécanismes de dégradation et de vieillissement des assemblages photovoltaïques pour des applications sous haute concentration. HAL Id: tel-00985464 .tel-00985464 Submitted on 29 Apr 2014

**[46]** C.R. Osterwald, T.J. McMahon, and J.A. del Cueto. Electrochemical corrosion of  $\text{SnO}_2$  :f transparent conducting layers in thin-film photovoltaic modules. Solar Energy Materials and Solar Cells, 79(1) :21–33, 2003.

**[47]** M. Burgelman, P. Nollet, S. Degreve, Modelling polycrystalline semiconductor solar cells, Thin Solid. Films, 361 (2000) 527-532.

**[48]** « AMPS -1D Manual for Windows '95/NT», The Electronic Materials and Processing Research Laboratory at the Pennsylvania State University, University Park, PA 16802.

## Références bibliographiques

---

- [49]** M. Burgelman, A. De Vos, and A. Niemegeers, « Device simulation of polycrystalline heterojunction solar cells ». In Proceedings of the 12th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Amsterdam, 1994, pp. 1557.
- [50]** S. J. Fonash, « Analysis of Microelectronic and Photonic Structures (AMPS) software was developed at Pennsylvania State University under the direction of S.J. Fonash with funding from
- [51]** Markus Gloeckler « DEVICE PHYSICS OF Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> THIN-FILM SOLAR CELLS ». Doctor of Philosophy Colorado State University 2005
- [52]** Markus Gloeckler, James R. Sites, Wyatt K. Metzger, "Grain-boundary recombination in Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> solar cells", Journal of applied physics 98, 113704, 2005.
- [53]** Naima toufek « contribution a l'étude d'une cellule solaire en couches minces a base de Culi-xGaxSe<sub>2</sub> ». Doctorat en Sciences en Electronique. Université des Frères Mentouri Constantine .2015 .

## **Résumé :**

Dans le contexte global de la diversification de l'utilisation des ressources naturelles, le recours aux énergies renouvelables et en particulier le solaire photovoltaïque se fait de plus en plus fort. A ce titre, le développement d'une nouvelle génération de cellules photovoltaïques à base de Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> semble prometteur. Dans ce travail de modélisation et de simulation, nous utilisons le logiciel AMPS -1D, pour étudier les performances des cellules solaires à base de Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> (CIGS). Nous évaluons dans un premier temps, le courant de court circuit J<sub>CC</sub>, la tension en circuit ouvert V<sub>CO</sub>, le facteur de forme FF et le rendement électrique η pour une structure typique de ZnO/CdS/ CIGS. Par la suite nous nous intéressons au dopage et à l'épaisseur de la couche ZnO, et la couche CdS pour étudier l'influence de celles-ci sur les paramètres de sortie, surtout le rendement électrique de la structure.

**Mots Clés:** Cellule solaire, photovoltaïque, couches minces, Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>, simulation, AMPS

## **Abstract:**

In the global context of the diversification of the use of the natural resources, the recourse to renewable energies and in particular the solar photovoltaic one is done more and more loud. For this reason, the development of a new generation of photovoltaic cells based on Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> seems promising. In this work of modeling and simulation, we use the software AMPS -1D, to study the performances of the solar cells based on Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> (CIGS). We evaluate initially, the current of short-circuit I<sub>SC</sub>, the tension in open circuit V<sub>OC</sub>, the factor of form FF and the electrical efficiency η for a typical structure of ZnO/CdS/CIGS. There after we are interested by the doping and the thickness of the layer ZnO and CdS to investigate the influence of these on the output parameters, especially the electrical efficiency of the structure

**Keys Words:** Solar cells, photovoltaic, thin films, simulation, Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>, AMPS -1D

## **ملخص:**

في السياق العام للاستخدام المتنوع للموارد الطبيعية، الرجوع إلى الطاقة المتجددة و بشكل خاص الطاقة الشمسية الكهروضوئية أصبح أقوى. و لهذا، فإن تطوير جيل جديد من الخلايا الضوئية القائمة على أساس Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> تبدو واعدة في هذه النمذجة والمحاكاة، نستخدم برنامج AMPS -1D لدراسة أداء الخلايا الشمسية القائمة على أساس Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> نقيم في البداية، تيار الدارة القصيرة J<sub>sc</sub>، و المردود الكهربائي η، عامل الشكل FF، وتوتر الدارة المفتوحة V<sub>co</sub> للهيكल النموذجي ZnO/CdS/CIGS، نهتم بعد ذلك بسمك، وتطعيم الطبقات ZnO و CdS لدراسة تأثيرها على خصائص الخلية الضوئية خاصة المردود.

**كلمات مفتاحية:** الخلايا الشمسية، الكهروضوئية، الأفلام الرقيقة، المحاكاة، Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>، AMPS -1D.