

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA
جامعة محمد بوضياف _ المسيلة

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE
N° :2018/INST10/87



DOMAINE : SCIENCES ET
TECHNOLOGIE
FILIERE : ELECTRONIQUE
OPTION : Instrumentation

**Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique**

Par :

BOUAFIA Halima
MESSAOUDI Chahira

Intitulé

**Etude et simulation d'une cellule
photovoltaïque à base des chalcopyrites**

Soutenu devant le jury composé de:

ZOUACHE Tarek	Université de M'sila	président
BENNACER Hamza	Université de M'sila	Encadreur
KAHLOUCHE Ahmed	Université de M'sila	examineur

Année universitaire : 2017 /2018

Dédicace

nous dédions ce modeste travail à :

*nos chers parents pour leur sacrifice, et qui n'ont jamais
cessé de nous encourager que dieu nous les garde.*

nos chers frères et nos chères sœurs

*Tous qui donnent une contribution de réalisation de
ce mémoire*

Tous nos amis et tous la promotion d'électronique 2018

BOUAFIA Halima

MESSAOUDI Chahira

Remerciement

Avant tout, nous remercions Allah le tout puissant qui nous a données l'espoir et la force pour réaliser cet travail que nous souhaitons qu'il atteindra nos aspirations, si Dieu le veut.

Nous remercions notre encadreur Dr BENNACER Hamza enseignant à l'université de Mohamed BOUBIAF M'sila, pour nos avoir proposé ce thème , pour nos avoir encadre, pour nos avoir guide et encouragé dans ce travail, pour tous les connaissances scientifiques et les conseils qu'il nous a apport, grâce à lui nous avons beaucoup appris

Nous exprimons nos remerciements à tous nos enseignants durant les années des études

Nous exprimons toute notre Gratitude à nos parents pour leur encouragement , la confiance et le soutien morale dont ils ont fait preuve tout ou long de ces années de études.

Nous remercions tous ceux qui de près ou de loin nos ont aidés à la réalisation de ce travail.

Résumé

Récemment, Les chalcopyrites sont des matériaux intéressants dans des plusieurs domaines technologiques comme l'électronique, l'optoélectronique et le photonique à cause de leurs excellentes propriétés électroniques, optique linéaire et non linéaire. Parmi ces matériaux semi-conducteurs on a les deux familles I-III-VI₂ et II-IV-V₂ qui sont largement utilisées ces dernières années dans la recherche et le développement des nouvelles cellules solaires en multijonctions ou en couches minces. Le but de ce travail est d'étudier et de simuler quelques structures photovoltaïques à base de chalcopyrites en couches minces ou bien multijonctions sous l'environnement AMPS-1D. L'étudiant pourra bénéficier d'un stage de quelques jours dans un établissement industriel ou bien scientifique suivant la disponibilité.

Mots clés : Chalcopyrite, cellule Photovoltaïque, AMPS-1D.

ملخص

مؤخرا , تعتبر الكالكوبيريت مواد هامة في عدة مجالات تكنولوجية مثل الالكترونك والالكترونيات الضوئية بسبب خصائصها الالكترونية و الضوئية, الخطية والغير خطية الممتازة. ومن بين هذه المواد شبه الناقله , يوجد صنفان من اشباه النواقل: I-III-VI₂ و II-IV-V₂ مستعملة بكثرة خلال السنوات الأخيرة في الابحاث وتطوير خلايا شمسية جديدة ذات طبقات رقيقة او متعددة الطبقات .

الهدف من هذه العمل هو دراسة و محاكاة بعض بنيات الكالكوبيريت للطبقات الرقيقة و متعددة الطبقات ,

باستعمال برنامج المحاكاة AMPS-1D

الكلمات المفتاحية: كالكوبيريت , الخلايا الشمسية , AMPS-1D

Abstract

Recently, chalcopyrites are interesting materials in serveral technological fields sush as electronics, optoelectronique and photonics because of their excellent properties (electronics, optics, linear and no linear). Among these semiconductor materials are the two families I-III-VI₂ and II-IV-V₂ , which are widely used in recent years in the recharging and development of the new cells solves multijunction or thin film.

The objective of this work is to study and simulate some photovoltaic structures based on chalcopyrite in thin-layer or multijunction with using AMPS-1D software .

Keywords : chalcopyrites, photovoltaics_cells, AMPS-1D.

Sommaire

Dédicace.....	II
Remerciements.....	III
Résumé.....	IV
Sommaire.....	V
Liste des figures.....	VIII
Liste des tableaux.....	X
Liste des Symboles et Abréviations.....	XI
Introduction générale	2

Chapitre I : Généralités sur les matériaux Chalcopyrites

I.1. Introduction.....	5
I.2. Les matériaux chalcopyrites.....	6
I.2.1 Les chalcopyrites de type I-III-VI ₂ et II-IV-V ₂	7
I.2.2 Structure chalcopyrite I-III-VI ₂	8
I.2.3 Structure des composés Cu-III-VI ₂	10
I.3. Propriétés générales des composés chalcopyrites.....	14
I.3.1. Les propriétés électriques.....	14
I.3.2. Les propriétés optiques.....	15
a. Influence de la température.....	17
b. Influence de la composition	18
c. Influence de l'épaisseur.....	19
I.4. Conclusion.....	20

Chapitre II : Généralités sur les cellules photovoltaïques

II.1.Introduction.....	26
II.2. La cellule solaire.....	26
II .2.1. Définition.....	26
II.2.2. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	27
II.2.3.Caractéristique courant-tension d'une cellule PV.....	28

II.2. 3.1. Courant de court-circuit.....	29
II.2.3.2. Tension de circuit ouvert.....	29
II.2.3.3. Facteur de forme.....	30
II.2.3.4. Rendement de conversion énergétique.....	30
II.2.3.5. Réponse spectrale.....	31
II.2.4. Schéma électrique équivalent	34
II.2.4.1. Cas d'une cellule idéale.....	34
II.2.4.2. Cas d'une cellule réelle.....	35
A. Influence de la résistance série R_s	36
B. Influence de la résistance parallèle (ou shunt).....	37
II.3. Critères du choix des matériaux PVs.....	38
II.4. Architecture de la cellule photovoltaïque.....	39
II.4.1. Texturation de la surface.....	39
II.4.2. Les contacts face avant et face arrière.....	40
II.4.3. La couche antireflet.....	40
II.4.4. La passivation.....	40
II.4.5. Champ électrique dans la zone arrière (BSF).....	40
II.5. Générations et filières des cellules solaires.....	41
II.5.1. Première génération.....	41
II.5.1.1 Le silicium monocristallin.....	41
II.5.1.2 Le silicium multicristallin (polycristallin).....	41
II.5.2. Deuxième génération.....	42
II.5.2.1 Les couches minces.....	43
a) La filière du silicium amorphe (a-Si).....	43
b) La filière tellure de cadmium/sulfure de cadmium (CdTe/CdS).....	43
c) La filière chalcopyrite basée sur le $CuIIVI_2$	44
II.5.3. Troisième génération.....	44
II.5.3.1 Cellules organiques et plastiques.....	44
II.6. Conclusion.....	47

Chapitre III : Résultats de la simulation et discussions

III.1. Introduction.....	52
III.2. Logiciel de simulation AMPS-1D.....	52

III.2.1. Aperçu.....	52
III.2.2. Les caractéristiques d'AMPS-1D.....	53
III.3. La structure de la cellule étudiée	55
III.3.1. La couche absorbante	56
III.3.2. La couche tampon.....	56
III.3.3. La couche fenêtre	57
III.4. Optimisations des paramètres de la cellule photovoltaïque.....	58
III.4.1.Effet de l'épaisseur de chaque couche sur les paramètres de la cellule photovoltaïque.....	58
III.4.1.1.Effet de l'épaisseur de la couche en ZnO.....	58
III.4.1.2.Effet de l'épaisseur de la couche CdS.....	60
III.4.1.3.Effet de l'épaisseur de la couche en CIGS.....	62
III.4.2. Effet du dopage de chaque couche sur les paramètres de la cellule photovoltaïque.....	64
III.4.2.1. Effet du dopage de la couche en ZnO.....	64
III.4.2.2. Effet du dopage de la couche en CdS.....	66
III.4.2.3. Effet du dopage de la couche en CIGS.....	68
III.5. L'effet de la température sur les paramètres de la cellule PV.....	71
III.6. Les résultats de la simulation de la cellule hétérojonction (ZnO/CdS/CIGS).....	73
III.7. Conclusion.....	75
Conclusion générale	79

Liste des figures

N° de figure	Titre	N° de page
I.1	La structure zinc blende, et la structure chalcopyrite	8
I.2	Le paramètre de maille a et l'énergie de gap E_g de certains composés I-III-VI ₂	9
I.3	Le diagramme de substitution Cationique	10
I.4	Mise en évidence de la distorsion de l'anion VI dans l'unité de base de la structure chalcopyrite	11
I.5	Coefficient d'absorption de quelques matériaux utilisés pour la fabrication des cellules solaires en couches minces	16
I.6	Variation de l'énergie de gap en fonction de la température	17
I.7	Variation de l'énergie de gap en fonction de la composition	18
I.8	Variation de l'énergie de gap en fonction de l'épaisseur d'après Guillén et al	19
II.1	Un champ photovoltaïque	27
II.2	Schéma explicatif du fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	28
II.3	Caractéristique courant-tension d'une cellule PV	29
II.4	Caractéristique réponse spectrale pour différentes cellules solaires	32
II.5	Exemple de Rendement Quantique Externe et Interne d'une cellule solaire	33
II.6	Schéma équivalent d'une cellule idéale	34
II.7	Schéma électrique équivalent du modèle à une diode	35
II.8	Influence de la résistance série R_s	37
II.9	Influence la résistance parallèle R_{sh}	37
II.10	La variation du rendement de conversion idéal pour une cellule en fonction de la largeur de bande interdite du matériau et les variations spectrales de la sensibilité d'une cellule solaire au (Si) oua (GaAs). R_{QI} : le rendement quantique inter	38
II.11	Composition d'un cellule photovoltaïque	39
II.12	a)Trajectoire d'un rayon lumineux arrivant sur une surface texturée, b) plaque de silicium après texturation	42
II.13	Photos de cellule monocristalline (a) et multicristalline (b)	42
II.14	Évolution des meilleurs rendements mondiaux de cellules photovoltaïques obtenus en laboratoire de 1976 à 2017 classés par filière : multijonctions, GaAs simple jonction, silicium cristallin, couches minces et technologies émergentes	47
III.1	L'icône de logiciel AMPS sur PC	52
III.2	Page d'accueil de l'interface d'AMPS-1D	53
III.3	L'interface des conditions environnementale	54
III.4	L'interface des propriétés du matériau de chaque couche	55
III.5	Schéma représentatif d'une cellule solaire typique à base de CIGS	56

III.6	Variation de rendement en fonction de l'épaisseur de la couche en ZnO	59
III.7	Variation de facteur de forme en fonction de l'épaisseur de la couche en ZnO	59
III.8	Variation du rendement en fonction de l'épaisseur de la couche CdS	61
III.9	Variation du facteur de forme en fonction de l'épaisseur de la couche CdS	61
III.10	Variation du facteur de forme en fonction de l'épaisseur de la couche en CIGS	63
III.11	Variation du rendement en fonction de l'épaisseur de la couche en CIGS	63
III.12	Variation du rendement en fonction de dopage de la couche en ZnO	65
III.13	Variation du facteur de forme en fonction de dopage de la couche en ZnO	66
III.14	Variation du factor de forme en fonction de dopage de la couche en CdS	67
III.15	Variation du rendement en fonction de dopage de la couche en CdS	68
III.16	Variation du factor de forme en fonction de dopage de la couche en CIGS	69
III.17	Variation du rendement en fonction de dopage de la couche en CIGS	70
III.18	Variation du rendement en fonction de la température	72
III.19	Variation du facteur de forme en fonction de la température	72
III.20	L'interface des résultats pour les caractéristiques $J-V$ sous l'éclairement AM1.5	74
III.21	Les caractéristiques $J-V$ sous l'obscurité et sous l'éclairement AM1.5	75

Liste des tableaux

N° de Tableau	Titre	N° de page
I.1	Les caractéristiques structurales, optiques de chaque couche mince	6
I.2	La formule chimique des composés ternaires de type I-III-VI ₂ et II-IV-V ₂ et leurs analogues binaires	7
I.3	Les distances de liaisons et les angles entre les atomes dans une maille chalcopyrite	12
I.4	Les valeurs des paramètres de réseau pour quelques chalcopyrites	12
I.5	Les paramètres cristallins a, c, u et le point de fusion et le gap d'énergie E _g pour quelques ternaires chalcopyrites de type Cu-III-VI ₂ qui existent dans les littératures	13
I.6	Les valeurs des paramètres électriques obtenues pour des composés chalcopyrites	15
II.1	Grandeurs photovoltaïques des cellules solaires à base de GaAs	31
II.2	Les différents génération de la cellules PV avec rendement	46
III.1	L'effet de l'épaisseur de la couche ZnO sur les performances de la cellule photovoltaïque	58
III.2	L'effet de l'épaisseur de la couche CdS sur les performances de la cellule photovoltaïque	60
III.3	L'effet de l'épaisseur de la couche CdS sur les performances de la cellule photovoltaïque	62
III.4	Les valeurs optimales d'épaisseur de chaque couche	64
III.5	Les performances de la cellule pour les valeurs optimales d'épaisseur de chaque couche	64
III.6	L'effet de dopage de la couche ZnO sur les performances de la cellule photovoltaïque	65
III.7	L'effet de dopage de la couche CdS sur les performances de la cellule photovoltaïque	67
III.8	Les variations des performances de la cellule solaire pour des différents dopages de la couche CIGS	69
III.9	Les valeurs des dopages optimales de chaque couche	70
III.10	Les performances de la cellule pour les valeurs optimales	70
III.11	Les variations des performances de la cellule solaire pour des différentes valeurs de la température	71
III.12	Les paramètres électriques des matériaux des couches ZnO, CdS et CIGS	73

Liste des Symboles et Abréviations

Symboles	Signification	Unité
J	La densité de courant	mA/cm ²
V	Le voltage	V
QE	Le rendement quantique	%
λ	la longueur d'onde de la lumière absorbée par la pile solaire	μm
J_{cc} (J_{SC})	La densité de courant de court circuit (short circuit)	mA/cm ²
V_{co}	La tension de circuit ouvert	volt
FF	Le facteur de forme	%
h	Constante de Planck (6.62×10^{-34} J.s)	J.s
v	La fréquence du rayonnement incident	s ⁻¹
c	La vitesse de la lumière dans le vide (3×10^8 m/s)	m /s
η	Le rendement de conversion photovoltaïque	%
I_{ph}	Le photo-courant	mA
E_F	L'énergie de Fermi	eV
K	Constante de Boltzmann (1.38×10^{-23} J.K ⁻¹)	J.K ⁻¹
T	Température absolue	K
E_c	Energie du bas de la bande de conduction	J ou eV
E_v	Energie du haut de la bande de valence	J ou eV
R_{sh}	La résistance parallèle (shunt)	Ω
R_s	La résistance série	Ω
n	Les densités d'électrons libres	cm ⁻³
p	Les densités de trous libres	cm ⁻³
q	La charge élémentaire (1.6×10^{-19} C)	C

J_0	La densité de courant de saturation	mA/cm^2
N_c	La densité d'états équivalente dans la BC, ramenée en E_c	cm^{-3}
N_v	La densité d'états équivalente dans la BV, ramenée en E_v	cm^{-3}
E_{ph}	Energie des photons	eV
μ_n et μ_p	La mobilité des électrons et des trous respectivement	$\text{cm}^2.\text{V}^{-1}.\text{s}^{-1}$
N_a	Concentration en impuretés ionisées de type accepteur	cm^{-3}
E_g	L'énergie de bande interdite	eV
N_a	Dopage de la couche tampon CdS.	cm^{-3}
N_d	Dopage de l'absorbeur CIGS	cm^{-3}
ZnO	Oxyde de Zinc	-
CdS	Sulfure de Cadmium	-
$CIGS$	Di-sélénium de galium d'indium de cuivre (Cu (In, Ga)Se ₂)	-
$CdTe$	Tellure de Cadmium	-
S	Soufre	-
$AM1.5$	Spectre de la lumière solaire	-
$I_{AM1.5}$	L'intensité de rayonnement $AM1.5$	mA
MO	Molybdène	-
$AMPS-1D$	Logiciel de simulation [A nalysis of M icroelectronic and P hotonic S tructures- O ne D imensional (analyse unidimensionnelle des structures micro-électroniques et photoniques)]	-
AM	La masse d'air	-

Introduction générale

Introduction générale

Pendant les dernières décennies, une croissance de la consommation mondiale de l'énergie a été observée, en proportion du développement de l'industrie, du transport et des moyens de communication. Cependant, la plupart de l'énergie est produite par les combustibles fossiles et notamment le carbone, le pétrole et le gaz naturel dont le délai d'épuisement est estimé à quelques décennies. De plus, ce type de production d'énergie est très polluant. Donc nous devons développer et utiliser les sources d'énergies renouvelables et non polluantes [1].

Parmi les sources d'énergies renouvelables, on trouve, la filière photovoltaïque qui s'avère l'une des plus prometteuses, mais la principale limitation du développement de cette filière est son prix relativement élevé comparé aux sources conventionnelles [2].

Récemment, les recherches dans le domaine photovoltaïque se portent principalement sur deux axes. Le premier, concerne le développement de cellules photovoltaïques à très haut rendement de conversion. Le second axe de recherche a pour objectif le développement de procédés et matériaux nouveaux en vue de la fabrication de cellules photovoltaïques à bas coût [3].

Le marché photovoltaïque est dominé par les technologies à base de silicium cristallin. En 2012, elles représentent 90 % de la part de marché [4]. On distingue deux grandes familles de cellules selon la nature de la plaquette de silicium, monocristalline ou poly-cristalline, pour lesquels les rendements record sont égaux à 25 et 20.4 %, respectivement [5]. Les modules classiques ont un rendement de conversion moyen de l'ordre de 15 %. Ces technologies éprouvées ont un coût de fabrication en constante diminution. Certains matériaux semi-conducteurs peuvent se substituer au silicium, et ne nécessitent que quelques microns d'épaisseur (contre 200 μm environ pour le silicium) pour absorber tous les photons de la lumière incidente [6]. Des techniques de synthèse moins énergivores peuvent également être utilisées, ce qui permet une diminution substantielle des coûts de production comparé au silicium cristallin. Ces technologies en couches minces ont pris ces dernières années une part croissante du marché photovoltaïque, avec une augmentation de 39 % de leur production entre 2010 et 2011 [7].

Les cellules solaires à base de couches minces au diséléniure de cuivre, d'indium et de gallium $\text{Cu(InGa)(SSe}_2\text{)}$ (CIGS) présentent une excellente stabilité et une grande résistance aux rayonnements [8,9]. Ils ont un intérêt considérable pour des applications spatiales et légères. Des tests d'irradiation de protons et d'électrons sur des cellules solaires en CIGS et

CdTe ont montré que leur stabilité contre l'irradiation de particules est supérieure à celles de cellules solaires en Si ou bien en semi-conducteurs III-V [10]. Le CIGS est un semi-conducteur ayant un gap d'énergie optimal et un coefficient d'absorption optique élevé dans le domaine visible du spectre solaire. Le coefficient d'absorption de films en CIGS est 100 fois plus grand que celui du Si dans le domaine visible du spectre solaire [11]. Le rendement maximal de la meilleure cellule solaire en CIGS fabriquée sur des substrats en acier inoxydable est de 17.5 % sous l'illumination AM1.5G [12]. La cellule solaire en CIGS de fraction molaire $x=0.3$ correspond à une énergie du gap de 1.1-1.2 eV et fabriquée sur des substrats en verre a un rendement de 20 % sous AM1.5G [13], comme rapporté par l'équipe de recherche de NREL (National Renewable Energy Laboratory). Dans ces dernières années, des progrès ont abouti à de meilleures cellules dont la couche en CIGS d'épaisseur entre 2.5 et 3 μm , et un gap d'énergie dans la gamme entre 1.2 et 1.3 eV dépassant le rendement 20 % et ayant atteint un nouveau record mondial de 20.3 % [14]. L'amélioration du rendement de la cellule solaire en CIGS est principalement par l'utilisation des cellules solaires double (tandem), triple ou multi-jonctions qui sont composées par des couches ayant des énergies du gap différentes afin d'exploiter les différentes régions des énergies du spectre solaire[11].

La modélisation d'une cellule solaire est l'outil performant qui nous permettra de lier les caractéristiques de cette cellule avec les propriétés du matériau afin d'améliorer les performances de la cellule.

L'objectif de ce travail présenté dans ce mémoire est de faire une simulation d'une cellule solaire en couche mince de structure P-N à base de $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ en vue d'optimiser par simulation les caractéristiques physiques et géométriques des différentes couches de la cellule. Dans ce travail, Nous avons utilisé le logiciel de simulation AMPS-1D, afin d'étude les performances d'une cellule solaire en CIGS.

Notre travail consiste à trois chapitres : Le premier chapitre représente une description générale sur la structure chalcopyrite généralement et la structure Cu-III-IV_2 et leur propriété électrique et optique. Dans le deuxième chapitre nous rappelons les cellules photovoltaïques et particulièrement cellule PV à base de couche mince et dans dernière chapitre, nous présentons le logiciel de simulation AMPS 1D et les résultats de la simulation, leurs interprétations et la discussion.

Enfin Nous terminons ce manuscrit par une conclusion générale.

Chapitre I

*Généralités sur les matériaux
chalcopyrites*

I.1. Introduction

Depuis des dizaines d'années, beaucoup d'efforts de recherche ont été réalisés sur un grand nombre de matériaux, afin d'arriver à des cellules solaire photovoltaïques en couches minces qui possèdent un bon rendement de conversion avec un faible coût [1]. Deux matériaux ont été particulièrement étudiés et ont fait l'objet d'une industrialisation : le silicium amorphe hydrogéné a-Si:H et le tellure de cadmium CdTe. Le silicium amorphe hydrogéné souffre d'un effet de vieillissement lié à l'instabilité de l'hydrogène dans sa structure et la présence du cadmium, un métal lourd de toxicité comparable à celle de mercure, rend le CdTe relativement inapproprié à une application à grande surface [1].

Ces dernières années des avancées remarquables ont été obtenues sur un autre type de matériaux de structure chalcopyrite, il est considéré comme les matériaux les plus utilisés comme des couches absorbantes dans la fabrication des cellules solaires. Les cellules solaires à base de ces matériaux atteignent des rendements très élevés, elles sont très stables et leur durée de vie est très élevée. Ils sont considérés comme une classe importante des matériaux et cela grâce à l'ajustement de leur paramètre du réseau, le gap énergétique, l'indice de réfraction, les constantes optique et d'autre paramètre physique[2].

Parmi les avantages des chalcopyrites on cite [3]:

1-Ils sont fabriqués en couches minces, soit de type p soit de type n, ce qui permet une production à faible coût d'une variété de composants en homo, et hétérojonction.

2-Ce sont des semi-conducteurs à gap direct, et ils ont une énergie de gap située dans l'intervalle optimal pour la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. On peut dire que l'importance de ces matériaux réside dans leurs applications optoélectroniques, en particulier dans le visible, et l'infrarouge par l'intermédiaire des cellules solaires, les diodes électroluminescentes, ou les détecteurs infrarouges.

L'émergence des cellules solaires, basées sur les matériaux à structures chalcopyrites, a fait suite à la réalisation de détecteurs photovoltaïques CuInSe₂/CdS par *S. Wagner et Coll.* de Bell Téléphone en 1974-1975 [4]. *S. Wagner et coll.* Avaient rapporté la préparation d'hétérojonctions p-n CuInSe₂/CdS à partir d'un monocristal CuInSe₂, dont la conductivité est de type p, sur lequel une couche mince de CdS de 5-10 μm d'épaisseur avait été déposée. La réponse photovoltaïque de ces détecteurs pour une lumière incidente à travers la couche fenêtre CdS donnait lieu à de très hauts rendements quantiques (>70%) uniformes entre 0,55 et 1,25 μm. Ces hétérojonctions avaient des rendements solaires de l'ordre de 5%. Les

composés ternaires chalcopyrites qui peuvent jouer le rôle d'absorbeur sont principalement : CuGaSe_2 , CuInS_2 , Cu(In,Al)Se_2 et Cu(In,Ga)Se_2 . Du fait de leurs grands coefficients d'absorption optique, une épaisseur de 1,5 à 2 μm est suffisante pour absorber la partie utile du spectre solaire [5].

Tableau. I.1. les caractéristiques structurales, optiques de chaque couche mince [5].

matériau	A(nm)	C(nm)	Eg(ev)
CuGaSe_2	0.560	1.099	1.67
CuInS_2	0.551	1.106	1.53
Cu(InAl)Se_2	0.575	1.145	1.16
CuInSe_2	0.577	1.155	1.02
Cu(InG)Se_2	0.572	1.143	1.12

Les deux principales méthodes de préparation de la couche absorbante de modules à hauts rendements sont la co-évaporation et le dépôt séquentiel des différents constituants ou des métaux précurseurs suivi d'un recuit. Cependant, d'autres techniques sont aussi utilisées telle que la méthode de dépôt par voie électrochimique, procédé de faible coût, qui permet le dépôt des différents composants de la cellule solaire avec des rendements prometteurs. Le matériau le plus prometteur semble être le cuivre d'indium sélénium CIS. Cependant, sa faible bande interdite (1,02 eV) limite la tension de circuit ouvert et donc le rendement de la cellule. Aussi, les travaux sur les cellules solaires à base de CIS portent aujourd'hui sur des alliages quaternaires Cu(InGa)Se_2 (CIGS). On introduit le Ga, qui se substitue partiellement à In, de façon à élargir sensiblement la bande interdite [6].

I.2. les matériaux chalcopyrites

Les semi conducteurs ternaires de type Chalcopyrite (I-III-VI₂) se cristallisent dans le système cristallin tétragonal, à groupe d'espace ($I\bar{4}2d$) Ils sont constitués de trois éléments : un métal de transition (le cuivre, gallium ...) et un élément de la troisième colonne (l'indium ou le gallium...) et d'un chalcogène, sélénium ou soufre...etc. Généralement les chalcopyrites ABX_2 sont composées d'un mélange entre deux structures Zinc-Blende introduit un changement de groupe de symétrie du (F-43m) au ($I\bar{4}2d$) caractérisant ainsi une structure quadratique chalcopyrite pour ces types de cristaux. En doublant son cube unité le long de l'axe z qui devient l'axe c de la structure chalcopyrite. Dans les cristaux chalcopyrites les plus

réels, le rapport c/a est approximativement égal à 2. Pour une structure idéale chalcopyrite $c=2a$ [7,8].

I.2.1. Les chalcopyrites de type I-III-VI₂ et II-IV-V₂

Tout récemment, une grande attention a été accordée à l'étude des propriétés optiques des composés ternaires de la formule chimique : $A^{N-I}B^{N+I}C_2^{8-N}$ (N=3, 2). Théoriquement, l'étude des propriétés électroniques et optiques de ces composés est une extension logique à l'étude de leurs plus proches analogues les semi-conducteurs Zinc blende de type $B^N C^{8-N}$ (N=3,2) (tableau I.2). Les composés $A^{N-I}B^{N+I}C_2^{8-N}$ ont de nombreuses propriétés physiques intéressantes qui promettent d'être utile pour les applications de la technologie des semi-conducteurs [7,9].

Tableau. I.2. La formule chimique des composés ternaires de type I-III-VI₂ et II-IV-V₂ et leurs analogues binaires [7].

	Le composé $A^{N-I}B^{N+I}C_2^{8-N}$	L'analogue binaire $B^N C^{8-N}$
N=2	$A^I B^{III} C_2^{VI}$ (I-III-VI ₂)	$B^{II} C^{VI}$ (II-VI)
N=3	$A^{II} B^{IV} C_2^V$ (II-IV-V ₂)	$B^{III} C^V$ (III-V)

Les composés chalcopyrites ABC_2 de la structure (I-III-VI₂ avec des anions de type *chalcogenide*) et font toujours l'objet de nombreux travaux. Ils constituent une extension naturelle des composés de structure Zinc blende (II-VI) dont ils découlent cristallographiquement. Ils ont presque le même arrangement des atomes anions mais diffèrent dans l'ordre de distribution des atomes cations (A et B) qui font que la cellule unité tétragonale a un *axe-c* avoisinant le double de l'*axe-a* de la cellule unité zinc blende. On peut définir un analogue binaire à chaque composé ternaire ABC_2 en prenant le cation de la colonne située entre les atomes A et B dans le tableau périodique [10,11]. C'est le cas du ZnS qui est l'analogue binaire de $CuGaS_2$ (Figure.I.1).

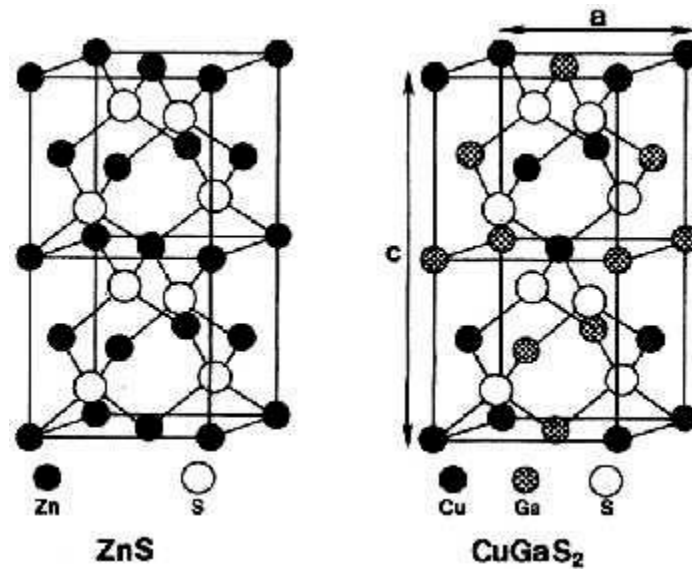


Figure.I.1. La structure zinc blende (à gauche), et la structure chalcopyrite (à droite)[12,13].

Donc, ces matériaux de structure à empilement tétraédrique peuvent être considérés comme des dérivés poly cationiques d'un composé monoatomique de la quatrième colonne du tableau périodique de *Mendeleïev*. La substitution cationique des composés (*II-VI*) donne lieu à des familles de composés qui possèdent à nouveau une même structure tétraédrique : la structure chalcopyrite[8].

I.2.2 Structure chalcopyrite I-III-VI₂

Les matériaux semi-conducteurs sont des corps composés formés à partir d'un élément de la colonne I, un élément de la colonne III et élément de la Colonne VI de la classification périodique de Mendeleïev. Les semi-conducteurs I-III-VI₂ se cristallisent dans la structure chalcopyrite tétragonale ou le réseau de Bravais est tétragonale centré, par rapport à celui de la structure zinc blende qui est cubique à faces centrées [3].

D'après les littératures, les chalcopyrites les plus intéressants pour les applications photovoltaïques sont: CuInSe₂, CuInS₂ et CuGaSe₂, avec des énergies de gap 1,04, 1,5 et 2,7 eV, respectivement [3]. Ces matériaux composés offrent un coefficient d'absorption très grand, et différentes constantes de maille "a" et énergie de gap E_g. On peut obtenir des gaps intermédiaires en combinant de deux composés en alliage, par exemple, en dopant le CuInSe₂ par la gallium(Ga) on obtient le composé Cu (In,Ga)Se₂ et donc le gap change de 1,04 à 1,15 [3]. La figure(II-2) récapitule le paramètre de maille a et l'énergie du gap E_g de ces composés:

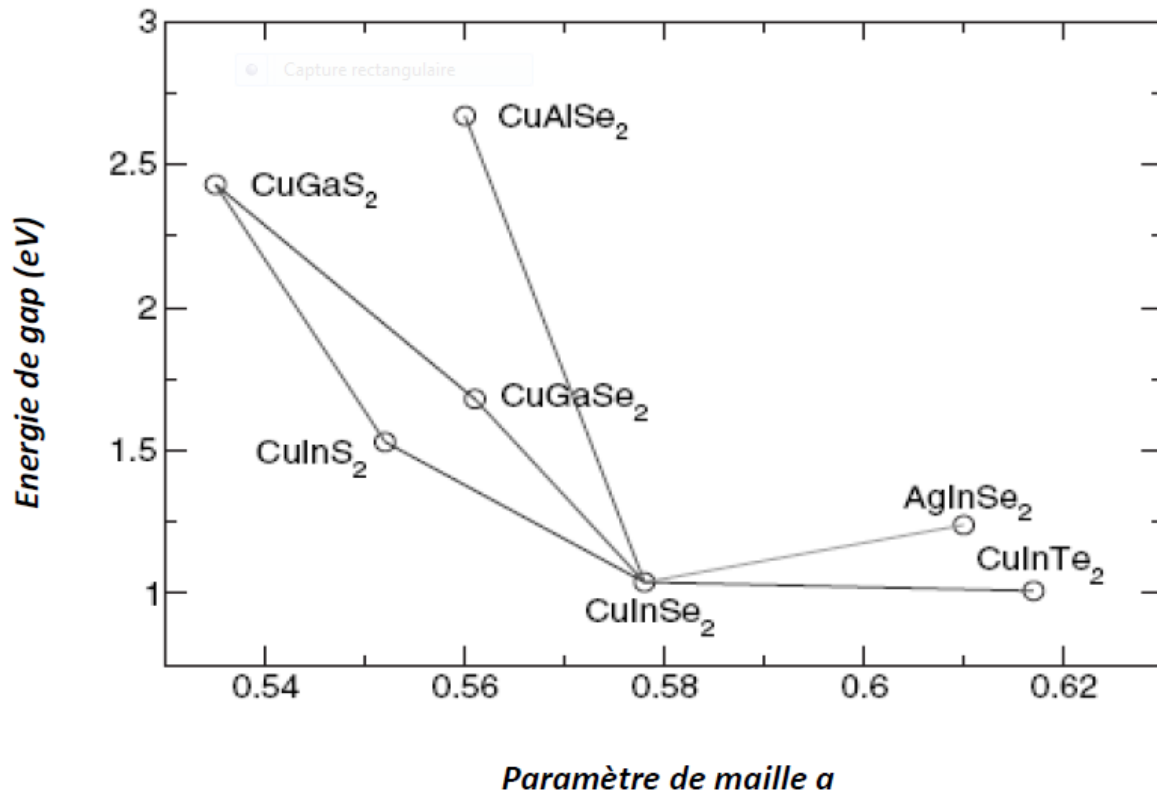


Figure.I.2. Le paramètre de maille a et l'énergie de gap E_g de certains composés I-III VI₂[3].

Dans des certaines conditions expérimentales, de nombreux auteurs ont synthétisés ces matériaux dans la structure sphalérite (zinc blende). Ces composés étant homologues aux éléments de la colonne VI, cristallisant dans la structure diamant, cette relation peut être représentée par le digramme ci-dessous [14]

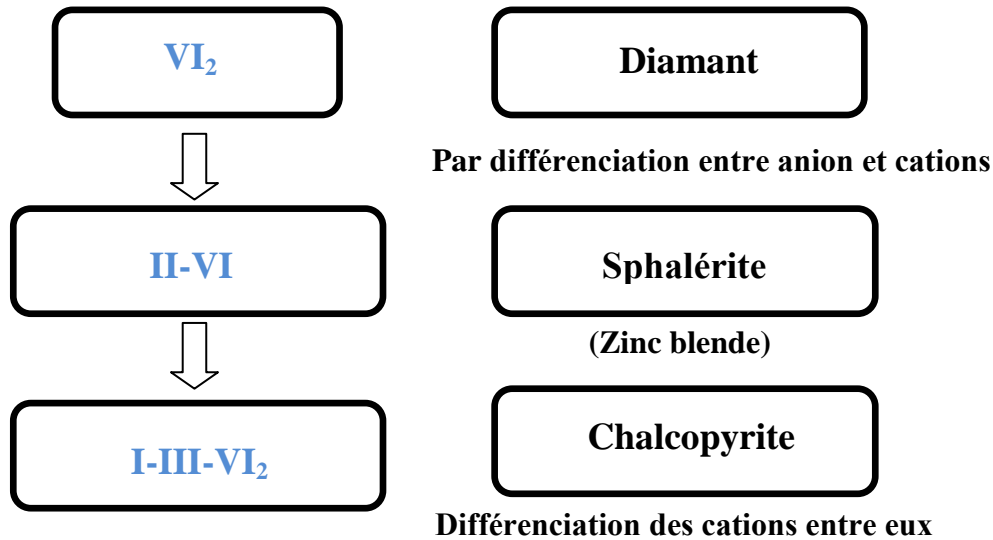


Figure I.3. Le diagramme de substitution Cationique [14].

La structure tétraédrique de la chalcopyrite peut être considérée comme un super réseau de la structure sphalérite ou de la structure zinc blende. Leurs symétries sont réduites du fait de ces deux types de cations différents (Cu) et qui conduit à une maille élémentaire de huit atomes (dans la structure chalcopyrite) par rapport à une maille élémentaire de deux atomes dans la structure zinc blende [15].

II.2.3 Structure des composés $Cu-III-VI_2$

Les composés étudiés dans ce travail font partie de la famille des composés $I-III-VI_2$ qui peuvent être considérés comme dérivés d'un élément monoatomique de la colonne IV du tableau périodique. L'élément IV de structure diamant possède des liaisons tétraédriques, à partir de cette structure on dérive les binaires ($II-VI$) et ($III-V$) qui ont la structure zinc blende. La substitution successive des cations de la blende, en conservant le nombre de valence, nous permet d'atteindre les structures appropriées aux composés ternaires. Avec le mélange des atomes des deux colonnes I et III sur les positions des cations, il se produit un changement de groupe d'espace de $F-43m$ caractérisant les composés à structure blende au groupe qui caractérise la structure quadratique. La structure sphalérite, appartenant au système cubique, est caractérisée par une séquence d'empilement des cations et des anions. Les cations I et III se répartissent aléatoirement sur les sites d'un réseau cubique à faces centrées (cfc) et les anions de valence VI occupent les centres des tétraèdres qui forment à leur tour un réseau (cfc). Quand à la structure chalcopyrite, de forme plus ordonnée que celle de la sphalérite, son réseau est décrit par une maille ayant la forme d'un parallélépipède rectangle de cotés a , a et

c. La maille est constituée de deux réseaux cubiques à faces centrées interpénétrés. Un réseau est composé de l'anion VI et l'autre constitue une rangée ordonnée de cuivre et d'un autre cation, il en découle alors que chaque atome de Se du composé $Cu-III-VI$ de deux atomes des autres espèces. L'alternance des cations dans la structure quadratique introduit deux modifications structurales importantes: une compression quadratique et un déplacement anionique[16].

Les angles entre les liaisons dans le tétraèdre de la figure (I-4) sont différents entre eux résultant d'un déplacement des sites tétraédriques de l'anion par rapport à leurs positions idéales $(\frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4})$ de la structure zinc blende.

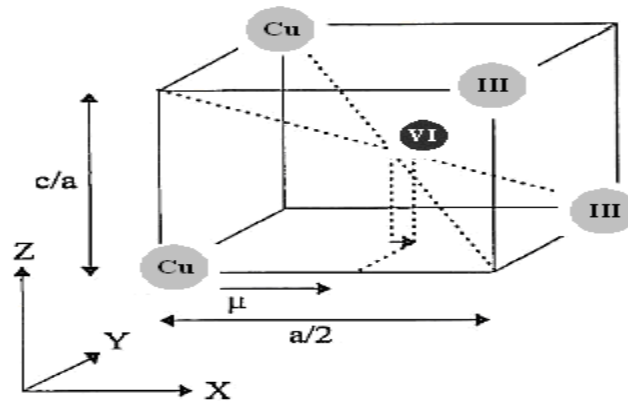


Figure I.4. Mise en évidence de la distorsion de l'anion VI dans l'unité de base de la structure chalcopyrite[16].

Ce déplacement est dû à l'effet d'électronégativité de l'anion [17], il est caractérisé par le paramètre μ donné sous la forme (I.1):

$$\mu = \frac{1}{4} + \frac{(R^2_{AC} - R^2_{BC})}{a^2} \quad \text{Eq.I.1}$$

R_{AC} et R_{BC} sont les distances entre deux proches voisins dans la maille chalcopyrite et sont données alors par les relations (I.2) [18]:

$$R_{AC} = a \left[\mu^2 + \left(1 + \frac{\eta^2}{16}\right) \right]^{1/2} \quad \text{Eq.I.2}$$

$$R_{BC} = a \left[\left(\mu - \frac{1}{2}\right)^2 + \left(1 + \frac{\eta^2}{16}\right) \right]^{1/2} \quad \text{Eq.I.3}$$

Le tableau (I.3) résume les différentes valeurs des angles et des distances de liaisons des deux proches voisins dans quelques matériaux chalcopyrites.

Tableau I.3. Les distances de liaisons et les angles entre les atomes dans une maille chalcopyrite [16].

	Distance de liaison		Angles		Réf
CuInSe ₂	Cu-Se	2.4337	Se-Cu-Se	110.95	[19]
	In-Se	2.5893	Se-In-Se	111.61	
			Cu-Se-Cu	114.8	
			In-Se-In	104.76	
			Cu-Se-In	109.46	
CuInTe ₂	Cu-Te	2.5881	Te-Cu-Te	106.308	[19]
	In-Te	2.7878	Te-In-Te	112.344	
			Cu-Te-Cu	115.8	
			In-Te-In	1.371	
			Cu-Te-In	109.249	
CuGaTe ₂	Ga-Te	2.578	Te-Ga-Te	109.59	[20]
	Te-Te	4.213	Te-Cu-Te	110.61	
	Cu-Te	2.624			
	Cu-Cu	4.24			
	Cu-Ga	4.24			
	Ga-Ga	4.24			

Les valeurs des paramètres cristallins, obtenues par différents chercheurs sur des composés à structure chalcopyrite suivant les techniques de croissance utilisées, sont regroupées dans le tableau (I-4).

Tableau I.4. Les valeurs des paramètres de réseau pour quelques chalcopyrites[16].

Matériau	Réf.	a (nm)	c (nm)
CuInSe ₂	[21]	0.5787	1.1550
	[22]	0.5789	1.1763
CuInTe ₂	[23]	0.6197	1.2453
CuGaTe ₂	[24]	0.6021	1.1937

Tableau. I.5. Les paramètres cristallines a , c , u et le point de fusion et le gap d'énergie E_g pour quelques ternaires chalcopyrites de type $Cu-III-VI_2$ [8].

Chalcopyrites Type Cu-III-VI ₂						
Le composé	a (Å°)	c (Å°)	c/a	μ	Point de fusion (K)	E _g (ev)
CuBSe ₂	5,539	10,734	-	-	-	-
CuAlS ₂	5,322	10,44	1,96	-	-	3,35
	5,31	10,42	1,961	0,27	-	3,49
CuAlSe ₂	5,617	10,92	1,94	-	1270	2,50
	5,606	10,90	1,945	0,26	-	2,67
CuAlTe ₂	5,976	11,80	1,97	-	1160	2,06
	5,964	11,78	1,975	0,25	-	2,06
CuGaS ₂	5,359	10,49	1,96	-	1513	2,43
	5,368	10,601	1,975	0,251	-	1,41
	5,349	10,47	1,958	0,25	-	2,43
CuGaSe ₂	5,596	11,004	1,96	-	1310	1,71
	5,665	11,232	1,983	0,247	-	0,82
	5,607	10,99	1,96	0,25	-	1,68
CuGaTe ₂	6,006	11,93	1,99	-	-	1,24
	5,994	11,91	1,987	0,25	-	1,23
CuInS ₂	5,528	11,08	2	-	1300	1,54
	5,576	11,251	2,018	0,223	-	0,54
	5,517	11,06	2,005	0,20	-	1,53
CuInSe ₂	5,782	11,62	2,01	-	1259	0,95
	5,862	11,792	2,012	0,22	-	0,31
	5,773	11,55	2,001	0,22	-	1,04
CuInTe ₂	6,161	12,360	2	-	970	0,96
	6,167	12,34	2	0,225	-	1,06
CuTlS ₂	5,591	11,19	2	-	-	-

	5,580	11,17	2,001	0,19	-	-
CuTlSe ₂	5,844	11,65	1,99	-	682	1,07
	5,832	11,63	1,995	0,23	-	-
CuTlTe ₂	6,299	-	2,068	0,233	650	0,9
CuFeS ₂	5,25	10,32	1,91	0,27	1150	0,53
CuFeSe ₂	-	-	-	-	850	0,16
CuFeTe ₂	-	-	-	-	1010	-
CuLaS ₂	5,25	10,86	1,93	-	-	-

I.3. Propriétés générales des composés chalcopyrites

I.3.1. Les propriétés électriques

Les propriétés électriques sont des caractéristiques importantes pour les matériaux utilisés comme absorbeurs afin d'obtenir des rendements élevés. Les études effectuées sur les caractérisations électriques des couches minces chalcopyrites ont montré qu'elles dépendent fortement de la composition et sont gouvernées par la présence des défauts dans la structure [16].

Ces derniers contrôlent principalement la conductivité électrique de ces matériaux, c'est pourquoi la mise en évidence et la caractérisation de ces défauts sont utiles pour déterminer leurs propriétés.

Dans les composés chalcopyrites les déviations de la composition stœchiométrique permettent l'augmentation des différents défauts intrinsèques et génèrent des donneurs ou des accepteurs dépendant, soit d'un anion soit d'un cation, qui est en excès.

Les défauts de concentration très élevée sont distribués d'une manière aléatoire dans les couches, les lacunes de l'atome non métallique agissent positivement comme donneurs conduisant au type n, ceux de *I* et *III* agissent négativement comme accepteurs. Le type de conduction peut aussi être corrélé à d'autres défauts intrinsèques tels que le désordre entre des cations interstitiels ou des anti-sites conduisant à des états électriquement actifs [16].

Newman a conclu, à partir d'une étude sur l'influence de la composition sur les propriétés électriques du *CuInSe₂* élaboré par la technique *Bridgman*, que ces propriétés sont cohérentes avec le modèle des défauts ponctuels intrinsèques.

D'autres auteurs présentent également des résultats sur des couches minces de *CISe* préparées par des méthodes différentes. Ils ont étudié le type de conductivité en fonction des

concentrations des constituants et ont constaté que les deux type de conduction n et p peuvent être obtenus avec différentes valeurs de résistivité par un choix approprié de la composition.

Cette variation de la résistivité avec le rapport $\frac{Cu}{In}$, qui est un paramètre clé contrôlant les propriétés électriques, a été toujours observée dans ce matériau [25].

Une conversion de la conductivité a lieu dans les couches minces de $CuInSe_2$ du type p vers le type n et vice-versa en contrôlant la concentration de Se par un recuit sous une atmosphère de Se à haute pression. Cette propriété présente une différence fondamentale entre le $CuInSe_2$ et les autres dérivées chalcopyrites qui ont la difficulté d'être de type n, C'est pourquoi de nombreuses études ont été focalisées sur le dopage de ces matériaux pendant leurs croissances [26, 27].

Les défauts sont utilisés pour doper le cristal semi conducteur; le changement de leurs populations entraîne une localisation des états et la formation d'une bande d'énergie d'impuretés située près des bandes intrinsèques et qui seront responsables de la conduction. Les principaux résultats rapportés sur les paramètres électriques (type de conduction, mobilité...) des couches minces de quelques composés chalcopyrites préparées par différentes méthodes sont regroupés dans le tableau I.6.

Tableau I.6. Les valeurs des paramètres électriques obtenues pour des composés chalcopyrites.

Composé	Conductivité ($\Omega\text{ cm}$)-1	type	Mobilité ($\text{cm}^2\text{v}^{-1}\text{s}^{-1}$)	Concentration (cm^{-3})	réf
CuInSe ₂	0,02-0,3	P	10-100	-	[28]
	0,1-5	n	300-800	$5,10^{15}-10^{17}$	[29]
	$2,15.10^{-3}-1,6.10^{-1}$	n	1,74-5,88	$2,28.10^{15}-5,74.10^{17}$	[30]
	0.05	p	1,99	$1,6.10^{17}$	[30]
CuGaTe ₂	23,25	P	5,1-16.7	10^{19}	[31]
	12.56	p	3,7	$2,2.10^{19}$	[31]
CuInTe ₂	195	p	52	$2,3.10^{19}$	[32]

I.3.2. Les propriétés optiques

Les semi-conducteurs susceptibles d'être utilisés comme absorbeurs dans les cellules solaires doivent avoir des meilleures qualités optiques pour des rendements de conversion convenables. Il faut de préférence utiliser des semi-conducteurs ayant une bande électronique

interdite directe et de valeur adaptée au spectre solaire de l'ordre de 1,5 eV. Ces propriétés optiques sont généralement dominées par les conditions de dépôt.

Les matériaux chalcopyrites ont d'excellentes propriétés optiques. Il a été montré dans de nombreuses études optiques que les composés $Cu-III-IV_2$ se distinguent par des coefficients d'absorption élevés de l'ordre de 10^4 cm^{-1} [33] dans l'infra rouge et le visible et des largeurs des bandes interdites comprises entre 0,96 eV – 1,7 eV [34,35].

Diverses valeurs de la bande interdite obtenues selon les conditions de préparation sont varient largement dans le domaine de 0,88 - 1,04 eV pour $CuInSe_2$ et de 0,92 - 1,06 eV pour le $CuInTe_2$.

Cet intervalle d'énergie est attribué à la présence des phases secondaires et des états localisés dans la bande interdite qui seront évidemment ignorés grâce à une recristallisation des grains lors d'un traitement de recuit.

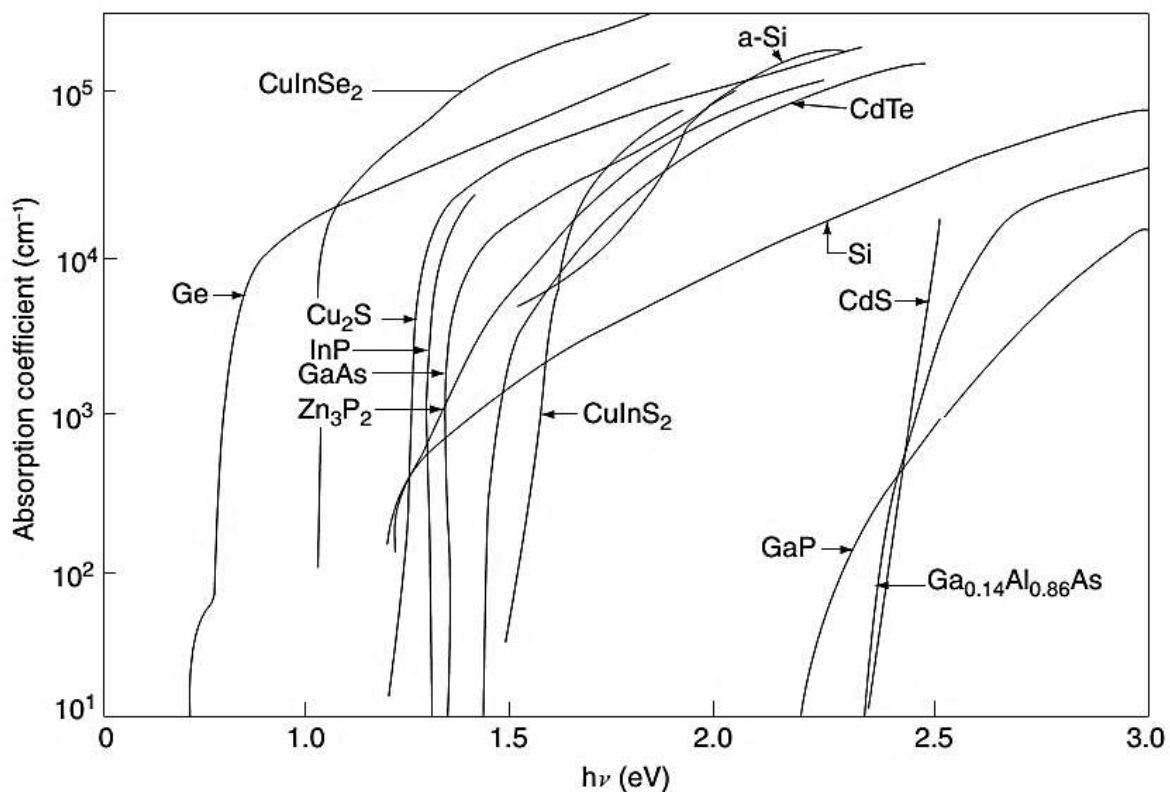


Figure I.5. Coefficient d'absorption de quelques matériaux utilisés pour la fabrication des cellules solaires en couches minces [36,2].

On constate que les couches minces chalcopyrites $Cu-III-VI_2$ ont des meilleures propriétés optiques mais elles sont toujours gouvernées par les conditions de préparation. Les principaux paramètres influents sur la valeur du gap dans les chalcopyrites sont:

1- la température.

2- l'épaisseur de la couche.

3- la composition de la couche $\frac{\text{Cu}}{\text{III}}$.

a. Influence de la température

Plusieurs considérations expérimentales ont été rapportées sur la variation de l'énergie de gap de *Cu-III-VI2* avec la température. Elle est due, d'une part à l'expansion thermique du réseau qui tend à augmenter la valeur du gap (qui a la tendance à diminuer lorsqu'on rapproche les atomes) et d'autre part aux interactions électron-photon qui peuvent plus que compenser le premier effet. Les mesures faites [37] dans différents domaines de température montrent que dans tous les cas le gap diminue linéairement avec l'augmentation de la température (figure I-6).

Cette dépendance de l'énergie de gap des ternaires avec la température est la même que pour leurs analogues binaires; elle peut être alors décrite par la loi de Varshni [38, 39]:

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{aT^2}{b+T} \quad \text{Eq.I.4}$$

Où, $E_g(0)$ est l'énergie du gap à 0 k, T est la température de mesure et a, b sont des constantes dépendant des caractéristiques du matériau et des phases. Des études ont décrit la dépendance de E_g avec la température; *Rincon et al* [40] ont estimé la variation du gap de *CuInSe2* avec la température de 30 à 60 meV entre la valeur à 300 k et celle à 0 k. Pour un monocristal une variation de E_g de 33 m eV est observée lorsque la température varie de 100 à 300 k.

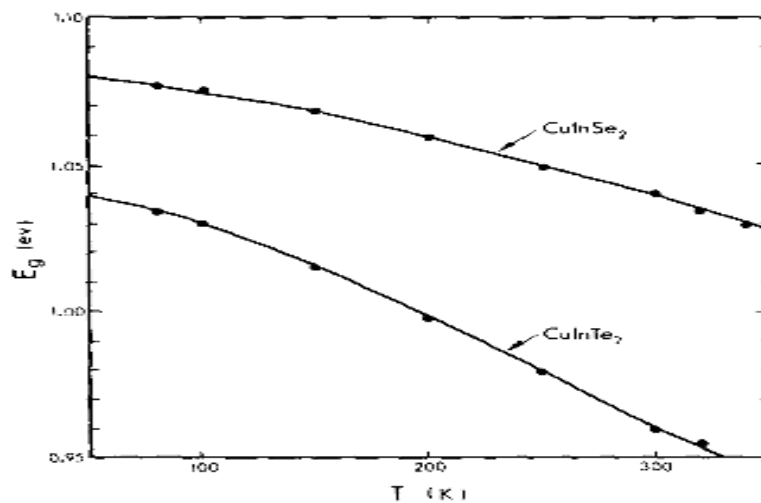


Figure I.6 Variation de l'énergie de gap en fonction de la température [41].

b. Influence de la composition

Il a été montré que toute variation de la composition chimique détermine des variations des propriétés optiques du matériau (figure I-7). Il était alors nécessaire de vérifier l'homogénéité en composition des couches minces étudiées.

Les études faites sur le $CuInSe_2$ par J.R. Tuttle et al [38] révèlent que les échantillons sont des énergies de gap de l'ordre de 0,96 eV pour $\frac{Cu}{In} > 0,5$ et de 1,01 eV pour $\frac{Cu}{In} < 0,45$.

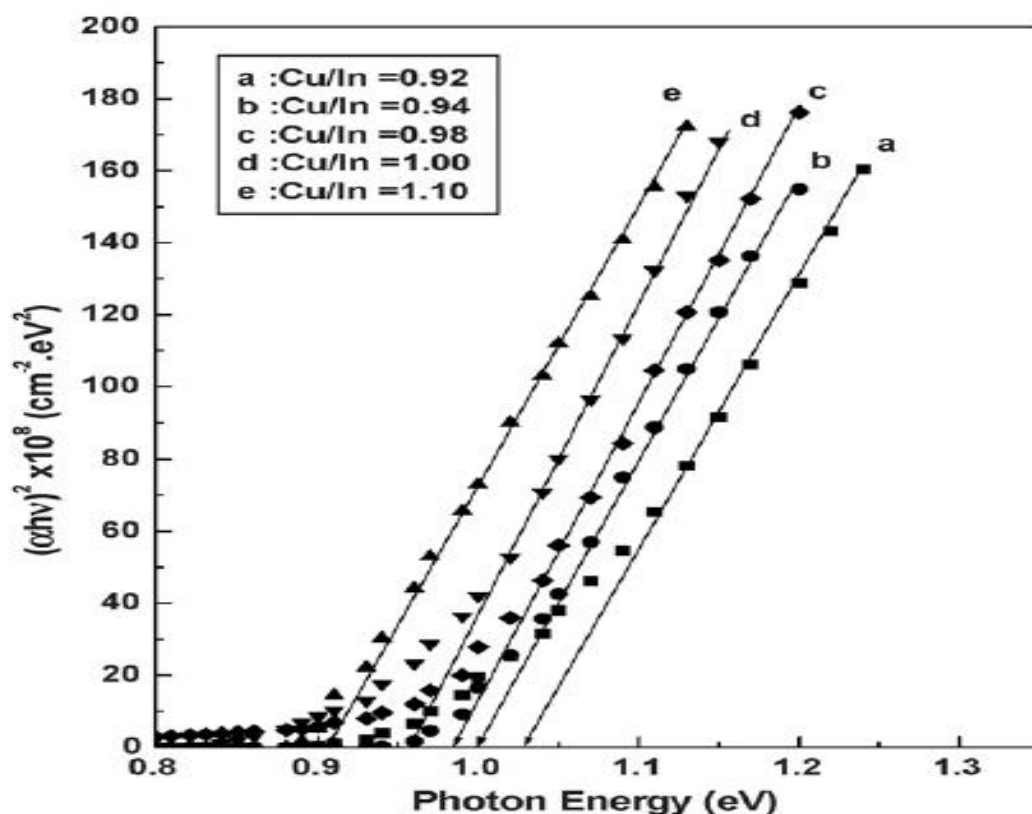


Figure I.7. Variation de l'énergie de gap en fonction de la composition [16].

Dans la même référence, les auteurs ont constaté également que l'augmentation de la concentration des défauts due à la variation de la composition chimique produit une diminution du gap optique. Ce résultat est confirmé par les valeurs du gap trouvées par G.Gordillo et al [42] qui sont de 1,01 eV, 1,07 eV et 1,19 eV pour des valeurs de rapport $\frac{Cu}{In}$ de 1; 0,48 et 0,21.

c. Influence de l'épaisseur

Des travaux publiés sur les caractéristiques optiques font état d'une variation du gap optique en fonction de l'épaisseur des couches minces de $CuInSe_2$ [43]. Les mesures de l'énergie du gap montrent sa diminution lorsque l'épaisseur augmente. Guillén et al [44] présentent des résultats (figure I-8) qui montrent des valeurs élevées de l'énergie de gap pour des films très minces préparés par électrodéposition. Cette observation est probablement due à l'inhomogénéité et à la déviation par rapport à la stœchiométrie durant la formation des couches : quand l'épaisseur augmente, on observe des états de queue de bande, et la valeur du gap sera diminuée.

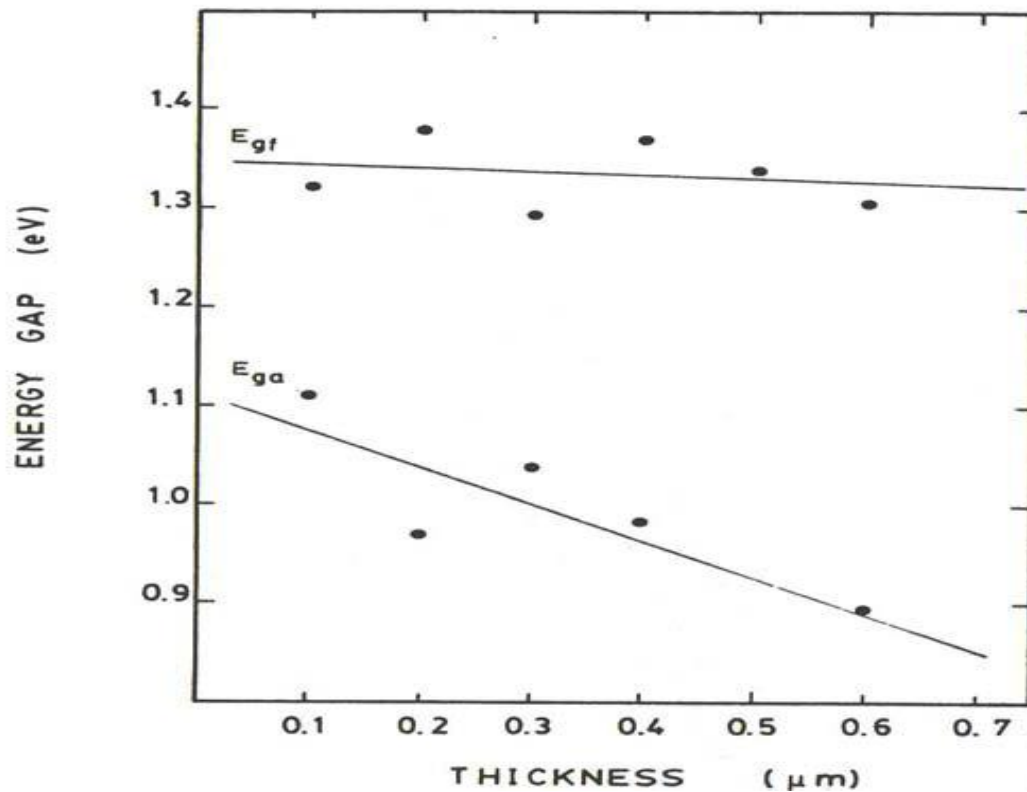


Figure I.8. Variation de l'énergie de gap en fonction de l'épaisseur d'après Guillén et al[16].

I.4. Conclusion

Dans ce chapitre on a étudié Les semi-conducteur chalcopyrites, qu'ils ont des applications dans le domaine photovoltaïque et les dispositifs optoélectroniques grâce à leurs propriétés électriques et optiques, et leurs rendements élevés. Pour les cellules solaires ces matériaux servent d'absorbeur et sont les meilleurs par rapport autres semi-conducteur ont un coefficient d'absorption élevés. Le chapitre suivent, on donne rappelle des généralités sur les cellules photovoltaïques et les couches minces.

Références bibliographiques

- [1] AMAR Hichem, « Propriétés électriques de cellule solaire à base de diSélénure de Cuivre Indium Galium $\text{CuIn}_{(1-x)}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ (CIGS) », Mémoire de Magister en : Electronique, Université Mohamed Khider – Biskra, (Algérie)
- [2] DECHOUCHA Djamel, « Etude des propriétés électronique et optique linéaire pour le chalcopyrite CuAlTe_2 », Mémoire de Master en Electronique, Université Mohamed Boudiaf - M'sila, 2015
- [3] REGUIEG Soumia, « Etude et modélisation du composé CuInS_2 pour son utilisation comme Couche absorbante dans la cellule solaire », Mémoire de Magister en physique, Université Abou-Bekr belkaid-Tlemcen, (Algérie), (2012).
- [4] S. Wagner, J.L. Shay, P. Migliorato, H.M. Kasper, $\text{CuInSe}_2/\text{CdS}$ heterojunction photovoltaic detectors, Appl. Phys. Lett. 25 (1974) 434.
- [5] BOUAFIA Mounir, DEBLAOUI Laid, « Modélisation et simulation d'une cellule solaire en couche mince à base de diSélénure de Cuivre, d'Indium et de Gallium « CIGS », Mémoire de Master en Electronique Industriel, Université Kasdi Merbah Ouargla, (Algérie), 2012
- [6] A. Luque, "Practical Handbook of Photovoltaics" (Second Edition)-2012.
- [7] David L. Jones, "The Leaching of Chalcopyrite", Thèse de doctorat, University of British Columbia, Vancouver 8, Canada, (1974).
- [8] DAKHOUCHE Oussama, BERRABAH Mohamed lamine, « Etude des propriétés optoélectronique du ternaire semi-conducteur (CuGaTe_2) », Mémoire de Master en Electronique, Université Mohamed Boudiaf - M'sila, (Algérie), 2017
- [9] Carmen Varea De Alvarez, "Electronic structure of Diamond, Zincblende and chalcopyrite semiconductors", Thèse, Inorganic Materials Research Division, Lawrence Berkeley Laboratory and department of physics, University of California.
- [10] Ouahrani Tarik, "Calcul des propriétés structurales, thermiques et optiques des composés chalcopyrites par la méthode FP-(L)APW", Thèse de doctorat en physique, Université de Tlemcen, 2011.

- [11] Chahed Abbes, “Etude Ab-initio des propriétés structurales, électroniques et optiques des semi-conducteurs chalcopyrites $AgXY_2$ ($X=Al, Ga, In$ et $Y=S, Se, Te$), thèse de doctorat d'état en physique, université de Sidi Bel Abbes,2006.
- [12] Wanxiang Feng, Jun Ding, Di Xiao, and Yugui Yao, Phys. Rev. Lett. 106, 016402 – 2011
- [13] J. E. Jaffe and Alex Zunger, Physical Review B, Vol 30, N° 2 – p741, (1984).
- [14] Kerroum Djamel Eddine,«Etude des propriété structurales, électroniques, élastiques Et Optiques des chalcopyrites $CuInX_2$ ($X= S, Se,Te$)»,Mémoire de Magister en Physique Université des Sciences et de la Technologie Mohamed Boudiaf- Oran,(Algérie),(2013).
- [15] Omar Meglali,«Etude de l'influence des conditions de dépôt sur les propriétés physico-Chimiques des couches minces $CuXY_2$ ($X: Al,In, Y: Se,Te$)»,Thèse de doctorat En Physique,Université de Constantine 1,(Algérie),(2014).
- [16] Ouahida Aissaoui, « Etude des propriétés physiques des couches minces de structure chalcopyrite », thèse de doctorat, université badji mokhtar-Annaba, (Algérie),2011.
- [17] E. I. Rogacheva, Cryst. Res. Technol.31 S, (1996), 1.
- [18] J. E. Jaff and A. Zung, Physical Review B.29, 4, (1984), 1882.
- [19] K. S. Knight, Mat. Res. BuU. 27, (1992), 161.
- [20] M. Leon, J. M. Merino and J. L. Martin De Vidales, Journal of Materials Science. 27, (1992), 4495.
- [21] G. W. El Haj Moussa, M. Ajaka, M. El Tahchi, E. Eid and C. Llinares, Physic State. Solids (a). 202, (2005), 469.
- [22] R. R. Philip and B. Pradeep, Thin Solid Films. 472, (2004), 136.
- [23] G. Marin, S.M. Wasim, G. Sanchez Pérez, B. Bocaranda and E. Mora, Journal of Electronic Materials. 27, (1998), 1351.
- [24] B. Grzeta-Plenkovic and B. Santic, Journal of Applied Cryst. 16, (1983), 576.

- [25] V. V. Lisnyak, N. V. Stus and R. T. Mariychuk, *Solar Energy Materials and Solar Cells*.76, (2003), 553.
- [26] T. Weiss, M. Birkkolz, M. Saad, S. Bleyhl, M. Kunst, A. Jager-Waldau and M. Ch. Lux-Steiner, *Journal of Crystal Growth*.198-199, (1999), 1190.
- [27] J. H. Schon, Ch. Kloc, E. Arushanov, G. A. Thomas and E. Bucher, *Journal of Phys. Condens.Matter*. 12, (2000), 4603.
- [28] S. M. Wasim and G. Sanchez Porras, *Phys. Stat. Sol. (a)* 79, (1983), 65.
- [29] C. Guillén and J. Herrero, *J. Appl. Phys.* 71, (1992), 5479.
- [30] J. M. Firoz Hasan, M. A. Subhan and Kh. M. Mannan, *Optical Materials*.14, (2000), 329.
- [31] M. Léon, R. Diaz, F. Rueda and M. Berggal, *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 26, (1992), 295.
- [32] B. Kuhn, W. Kaefer, K. Fess, K. Friemelt, Ch. Turner, M. Wendl, and E. Bucher, *Phys Stat sol (a)*. 162, (1997), 661.
- [34] M. V. Yakushev, A. V. Mudryi, E. Gremenok, E. P. Zaretskaya, V. B. Zalesski, Y. Feofanov and R. W. Martin, *Thin Solid Films*. 451-452, (2004), 133.
- [35] J. R. Tuttle, D. Albin, R. J. Matson and R. Noufi, 20th IEEE, (1988).
- [36] A. E. Becquerel, *Compt. Rend. Acad. Sci.*9, (1839), 561.
- [37] A. A. Akl and H.H. Afify, *Materials Research Bulletin*. 43, (2008), 1539.
- [38] H. Neumann, *Solar Cells*. 16, (1986), 317.
- [39] R. Echverria, M.Nieves and G. Marcano, *Phys. Stat. Sol. (b)* 220, (2000), 285.
- [40] C. A. D. Rincon, E. Hernandez, M. I. Alonso, M. Garriga, S. M. Wasim, C. Rincon and M. Leon, *Material. Chem and Phys*. 70, (2001), 300.
- [41] L. L. Kazmerski and C. C. Shieh, *Thin Solid Films*. 41, (1977), 35.
- [42] G. Gordillo, C. Caldéron, W. Bolanos and E. Romero, *Superficies y Vucio*.16 (2),

(2003).

[43] H. Sakata and H. Ogawa, Solar. Energy. Mater and Solar. Cells. 63, (2000), 259.

[44] C. Guillén and J. Herrero, Solar. Energy. Materials and Solar. Cells. 23, (1991), 31.

Chapitre II

Généralités sur les cellules photovoltaïques

II.1.Introduction

Le terme « photovoltaïque » souvent abrégé par le sigle « PV », à été formé à partir des mots « photo » un mot grec signifiant lumière et « Volta » le nom du physicien italien Alessandro Volta qui a inventé la pile électrochimique en 1800. L'effet photovoltaïque est la conversion directe de l'énergie solaire en électricité [1]. L'énergie photovoltaïque est obtenue directement à partir du rayonnement du soleil. Les modules photovoltaïques composés des cellules photovoltaïques à base des matériaux semi-conducteurs ont la capacité de transformer les photons en électrons. La conversion photovoltaïque se produit dans des matériaux semi-conducteurs. L'énergie sous forme de courant continu est ainsi directement utilisable [1].

Dans notre époque, utilisation d'énergie photovoltaïque nombreuse pour des différentes domaines : Domaine spatial, Télécommunications (téléphonie rurale, radiotéléphonie,...), Sites isolés (Parcs nationaux, régions isolées, pompage de l'eau,...), Acquisition de données: pour les stations isolées d'acquisition de données, vu la haute fiabilité de fonctionnement, l'autonomie, la moindre sensibilité à la foudre, la résistance extrême aux conditions naturelles, la maintenance légère et la longévité des équipements (25 ans) ; et la domaine du transport : Lampadaires, panneaux à messages variables, éclairage de panneaux, signalisation lumineuse routière et ferroviaire [2]. L'énergie photovoltaïque joue un rôle très important, grâce à leurs avantages. Parmi ces avantages on a : la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique, car le produit final est non polluant, silencieux, peu de déchet, pas de ligne électrique supplémentaire et pas de nuisance sonore olfactive ; la cellule solaire ne comporte pas de pièces mobiles, qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux ; et la haute fiabilité : les modules sont garantis pendant 25 ans par la plupart des constructeurs. Mais d'autre coté, L'énergie photovoltaïque a des inconvénients comme: La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé ; Le rendement réel de conversion d'un module est faible; Enfin, lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru [3].

II.2. La cellule solaire

II .2.1. Définition

Les cellules solaires sont des dispositifs à semi-conducteur qui transfèrent la lumière en énergie électrique utilisable [4]. Pour produire plus de puissance, les cellules solaires sont assemblées pour former un module. Les connections en série de n_s cellules augmentent la tension

pour un même courant, tandis que la mise en parallèle de n_p cellules accroît le courant en conservant la tension [1].

Le panneau photovoltaïque se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec une orientation et un angle d'inclinaison spécifique. Le champ photovoltaïque est l'ensemble des panneaux montés en série et en parallèle pour atteindre une tension et un courant plus grands [1].

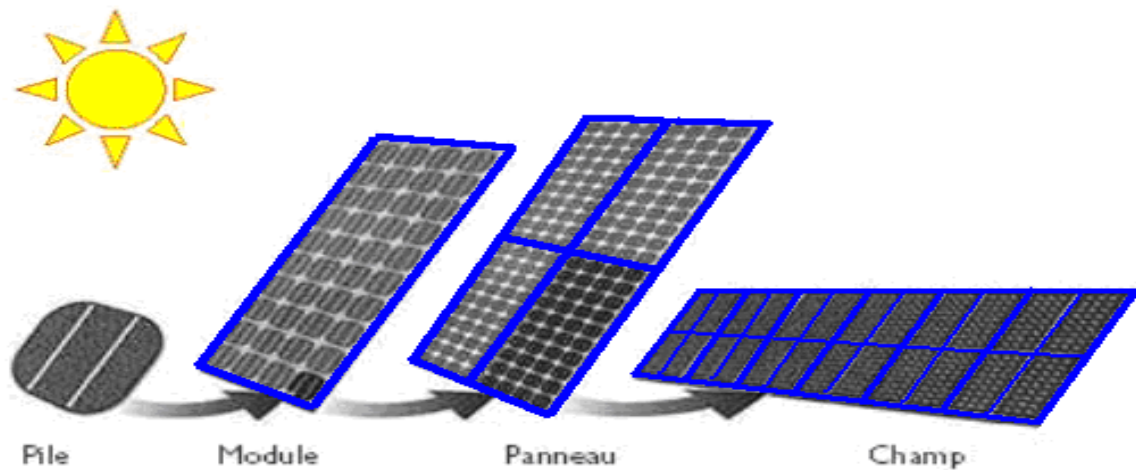


Figure II.1. Un champ photovoltaïque [1].

II.2.2. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

La cellule est l'élément de base d'un panneau photovoltaïque. C'est elle qui convertit l'énergie lumineuse des photons en énergie électrique par effet photoélectrique.

L'effet photovoltaïque s'appuie principalement sur trois grands principes dont l'action combinée engendre la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique [4]:

- L'absorption de photons.
- La conversion de l'énergie absorbée en charges électriques libres.
- La collecte de ces particules dans un circuit électrique extérieur.

Le principe général du fonctionnement d'une cellule photovoltaïque est décrit par le schéma de la figure (II.2) Les dispositifs classiques sont généralement constitués d'un matériau semi-conducteur, comme le silicium, qui absorbe les photons de la lumière incidente (absorbeur ou base). Un semi-conducteur est constitué d'une bande de valence et d'une bande de conduction, dans lesquelles circulent les porteurs de charges, respectivement positives (les trous) et négatives (les électrons). On définit alors la bande interdite E_G (ou gap) par la différence d'énergie entre le haut de la bande de valence E_V et le bas de la bande de conduction E_C . Lorsque l'énergie des

photons incidents $h\nu$ est supérieure à la bande interdite E_G du semiconducteur, un électron de la bande de valence est excité dans la bande de conduction, ce qui crée un trou : on dit qu'il y a photogénération de paires électron-trou. En conséquence, la concentration de porteurs dans les bandes d'énergie augmente. L'énergie absorbée en excès par rapport à E_G est perdue sous forme de chaleur par désexcitation des porteurs : c'est le processus de *thermalisation*. Ces porteurs photogénérés doivent ensuite se déplacer vers les contacts et être collectés, afin de générer un courant dans le circuit électrique connecté ; vu de l'extérieur de la cellule, les électrons proviennent du pôle négatif (n) et les trous du pôle positif (p). Pour réaliser cette séparation des porteurs, il est nécessaire que la structure du matériau soit dissymétrique.

Il faut faire en sorte que les électrons (respectivement les trous) souhaitant circuler vers le côté p (respectivement le côté n) rencontrent une barrière. Concrètement, c'est un champ électrique au sein du matériau ou des interfaces, orienté de la zone n vers la zone p qui permet d'orienter le mouvement des porteurs. Par exemple, on peut créer un tel champ électrique en réalisant une jonction p/n par dopage de la surface du semi-conducteur, ou en réalisant une hétérojonction en associant deux matériaux de natures et de types différents [5].

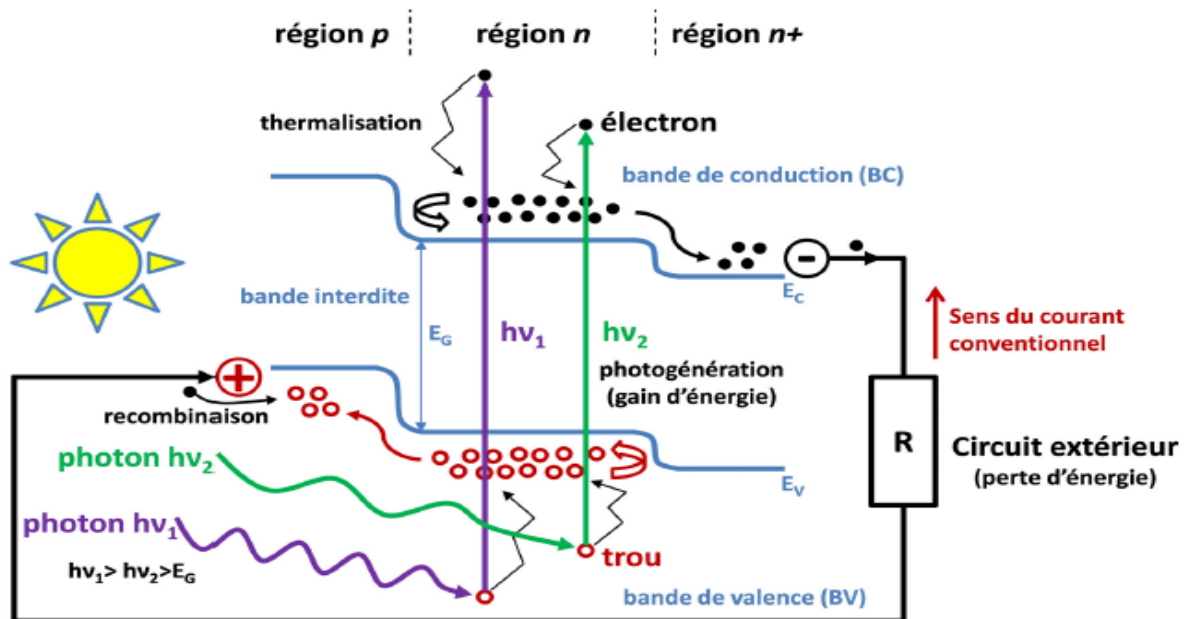


Figure II.2. Schéma explicatif du fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [5].

II.2.3. Caractéristique courant-tension d'une cellule PV

La cellule photovoltaïque possède une caractéristique non linéaire [6]. La caractéristique courant-tension ($J-V$) d'une cellule solaire est la superposition de celle de la diode sous obscurité et de photogénéré [7]. La mesure de la caractéristique courant – tension ($J-V$) à l'obscurité est

également utile pour analyser le fonctionnement d'une cellule solaire, cette caractéristique à l'obscurité est identique à celle d'une diode [4]. La caractéristique (J - V) d'une cellule solaire sous éclairage ou à l'obscurité est présentée dans la figure II.3:

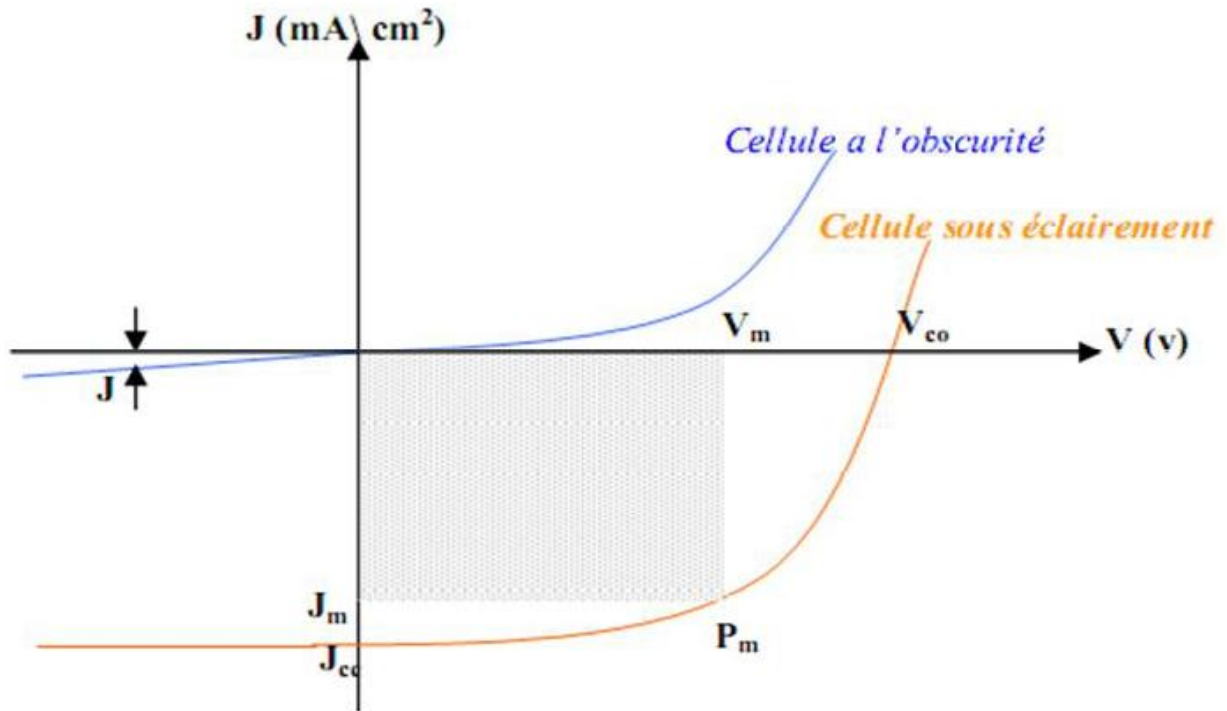


Figure II.3. Caractéristique courant-tension d'une cellule PV [7].

II.2. 3.1. Courant de court-circuit

Le courant de court-circuit (short circuit) I_{sc} est le courant qui circule à travers la jonction sous illumination sans application de tension. Il s'accroît avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température [4].

II.2.3.2. Tension de circuit ouvert

La tension de circuit ouvert (open circuit) V_{oc} est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend de la barrière d'énergie, et décroît avec la température et change peu avec l'intensité lumineuse. La tension en circuit ouvert peut être calculée à partir de :

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \quad \text{Eq.II.1}$$

II.2.3.3. Facteur de forme

Le facteur de forme (FF) représente l'efficacité de la cellule et peut également nous renseigner sur le vieillissement de la cellule. C'est le rapport entre la puissance maximale débitée ($V_{max} \cdot I_{max}$) et la puissance idéale ($V_{oc} \cdot I_{sc}$) [4] :

$$FF = \frac{V_{max} I_{max}}{V_{oc} I_{sc}} \quad \text{Eq.II.2}$$

II.2.3.4. Rendement de conversion énergétique

Le rendement de conversion énergétique est le rapport entre la puissance générée et la puissance du rayonnement solaire incident P_0 . On appelle rendement maximal, le rapport entre la puissance maximale et la puissance P_0 [4]:

$$\eta = \frac{V_m I_m}{P_0} = FF \frac{V_{oc} I_{sc}}{P_0} \quad \text{Eq.II.3}$$

L'énergie du rayonnement solaire n'est pas totalement transformée en électricité. Une bonne partie du rayonnement est simplement réfléchi sur la surface de la cellule. Une autre partie de l'énergie apportée par la lumière pénètre parfaitement, mais ne sert qu'à augmenter l'agitation thermique (l'échauffement) et donc la température de la cellule.

Les grilles et les barreaux métalliques déposés sur la surface supérieure de la cellule constituent une perte dans le rendement, car elles diminuent la surface de la cellule exposée à la lumière solaire.

La fraction qui compte est celle qui contribue à la création des paires électron-trou dans la jonction ; dans les meilleures conditions du laboratoire, cette fraction est de 23%, c'est donc à peine le quart de la lumière qui est converti en électricité.

Le tableau II-1 représente les grandeurs photovoltaïques mesurées pour certaines cellules solaires de laboratoire à base de GaAs.

Tableau II.1: Grandeurs photovoltaïques des cellules solaires à base de GaAs [4]

Structure	Aire (cm ²)	V _{oc} (V)	I _{sc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)	Centre de test
Hétérojonction –PPN GaAs(AlGaAs)	1	1.021	27.8	83.7	23.7	-
	3.91	1.022	28.2	87.1	25.1	NREL ^(a)
GaAs-Couche mince	4	1.011	27.6	83.8	23.3	NREL
PN-GaAs(AlGaAs)	1	1.036	27.5	85.1	24.2	ISE ^(b)
PN-GaAs(AlGaAs)	8	1.038	26.9	83.5	23.4	ISE
PIN-GaAs(AlGaAs) GaAs(AlGaAs)	8	1.038	27.1	82.9	23.3	ISE
	4	1.022	28.2	87.1	25.1	ISE

(a) National Renewable Energy Laboratory (USA).

(b) Fraunhofer Institute for Solar Energy System (Allemagne).

II.2.3.5. Réponse spectrale

La réponse spectrale (RS) permet d'évaluer le rendement quantique d'une cellule solaire en fonction de la longueur d'onde de la lumière incidente. Cette mesure consiste à illuminer la cellule solaire avec un spot monochromatique que l'on fait varier dans la plage d'absorption du matériau (entre 350 et 1150 nm pour le silicium cristallin). La mesure du courant débité par la cellule en fonction de la longueur d'onde permet alors de connaître la réponse spectrale de la cellule à l'aide de la relation suivante [4]

$$RS(\lambda) = \frac{I(\lambda)}{P_{inc}(\lambda)} = \frac{I(\lambda)}{\phi(\lambda).S} \quad Eq.II.4$$

Où

$I(\lambda)$: l'intensité générée.

$P_{inc}(\lambda)$: la puissance incidente.

$\phi(\lambda)$: le flux lumineux incident ($W.m^{-2}$).

S : la surface de la cellule (m^2).

La vitesse de recombinaison a un grand effet sur la réponse spectrale, surtout aux courtes longueurs d'onde. Généralement, pour augmenter la réponse spectrale, on doit augmenter la longueur de diffusion des électrons et trous L_n et L_p respectivement, et diminuer la vitesse de recombinaison en surface des électrons et trous S_n et S_p respectivement.

Les cellules solaires absorbent différentes longueurs d'onde selon leurs compositions. Sur la figure (II.4), on a représenté la caractéristique réponse spectrale pour différentes cellules solaires ; cette caractéristique indique la gamme du spectre solaire qu'une cellule peut absorber, identifiant de ce fait ses propriétés. Les cellules constituées d'un semi-conducteur composé, à savoir le GaAs, CdTe et CIS absorbent des longueurs d'onde dans la gamme (500 nm - 900 nm) et sont connues en tant que cellules solaires à rendement élevé.

Les cellules solaires au a-Si :H et au c-Si montrent d'excellente absorption aux longueurs d'onde courtes et longues, respectivement. Les cellules solaires composées de combinaison de ces derniers sont capables de réaliser un rendement plus élevé [4].

La mesure de la réponse spectrale est très sensible aux conditions d'analyse et le résultat est fonction du point de mesure. La comparaison de deux courbes nécessite de cibler exactement la même zone [4].

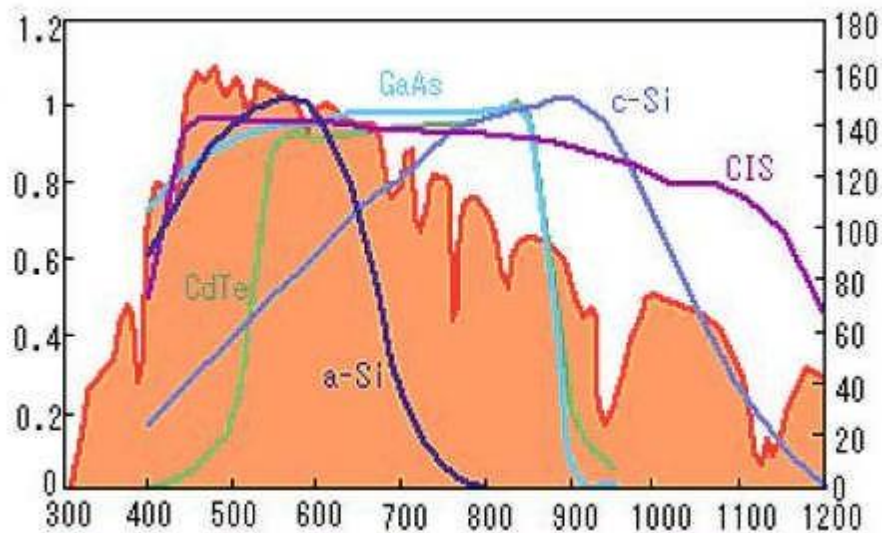


Figure.II.4. Caractéristique réponse spectrale pour différentes cellules solaires [4].

Selon la longueur d'onde du rayonnement incident, le courant mesuré sera plus ou moins élevé en fonction du Rendement Quantique Externe (*RQE*) de la cellule. Pour connaître celui-ci, il faut multiplier *RS* par un facteur:

$$RQE(\lambda) = RS(\lambda) \frac{hc}{q\lambda} \quad \text{Eq.II.5}$$

Avec :

RQE(λ): Rendement Quantique Externe (%)

RS(λ): Réponse spectrale ($A \cdot W^{-1}$)

h: Constante de Planck ($kg \cdot m^2 \cdot S^{-1}$)

c : Vitesse de la lumière dans le vide ($m.s^{-1}$)

q : Charge élémentaire (C)

λ : Longueur d'onde (m)

Pour étudier les mécanismes internes de la cellule, il est nécessaire de prendre en considération uniquement les photons absorbés dans le dispositif. On sépare alors du calcul de rendement quantique les photons réfléchis ou transmis, ainsi que ceux absorbés dans les couches non actives comme la couche anti-reflet. Le Rendement Quantique Interne (RQI) donne ainsi le pourcentage d'électrons participant du photocourant par rapport au nombre de photons qui ont été réellement absorbés dans la cellule :

$$RQI(\lambda) = \frac{RQE(\lambda)}{1 - R(\lambda) - A(\lambda) - T(\lambda)} \quad \text{Eq.II.6}$$

Avec :

$RQI(\lambda)$: Rendement Quantique Interne (%)

$RQE(\lambda)$: Rendement Quantique Externe (%)

$R(\lambda)$: Réflectivité de la cellule (%)

$A(\lambda)$: Absorption dans les couches non actives (%)

$T(\lambda)$: fraction du rayonnement transmis à travers la cellule (%)

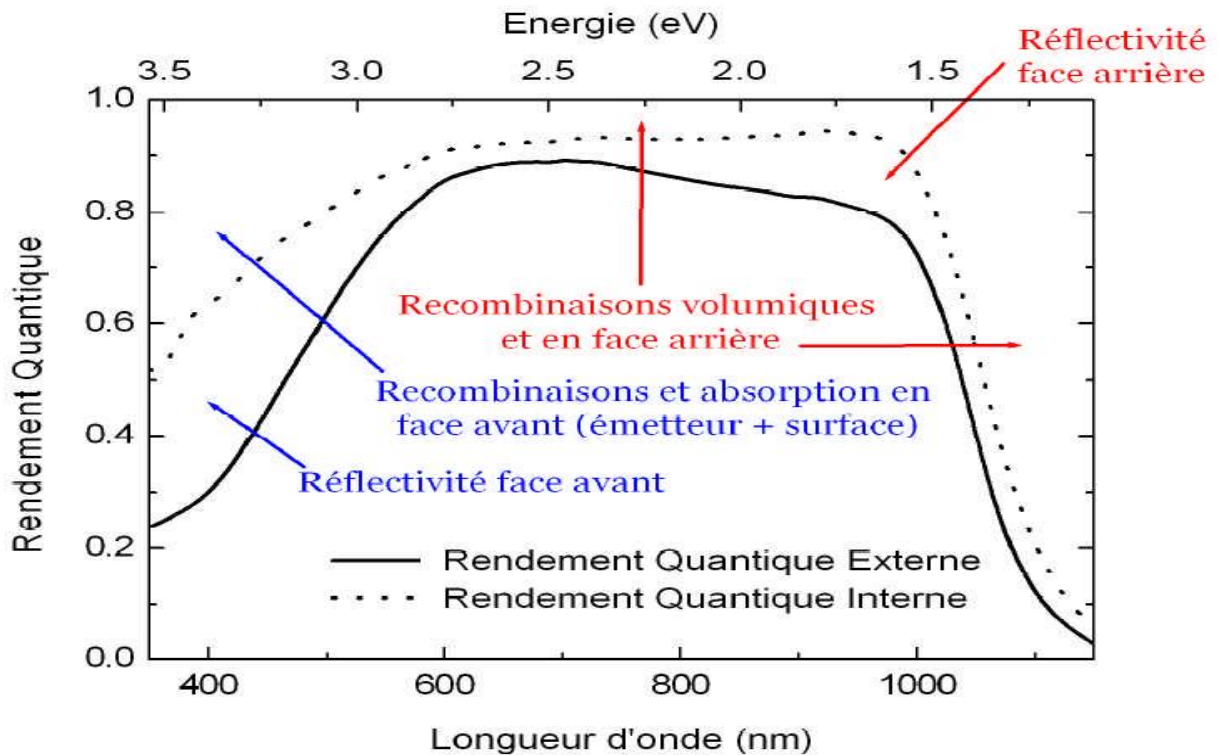


Figure II.5. Exemple de Rendement Quantique Externe et Interne d'une cellule solaire [4].

On considère généralement que les courtes longueurs d'ondes (Ultra-violet) sont absorbées majoritairement dans les premiers μm de la cellule, alors que les grandes longueurs d'ondes (Infrarouge) peuvent être absorbées au niveau de la face arrière. L'étude du *RQI* aux courtes longueurs d'ondes donne donc des indications sur la qualité de la face avant, tandis que celle aux grandes longueurs d'ondes concerne plus la face arrière (voir la figure II.5) [4].

II.2.4. Schéma électrique équivalent

II.2.4.1. Cas d'une cellule idéale

Dans le cas idéal, la cellule d'une jonction PN soumise à l'éclairement photovoltaïque connectée à une charge peut être schématisée par un générateur de courant I_{ph} en parallèle avec une diode délivrant un courant selon la figure (II.6), qui représente le circuit équivalent d'une cellule solaire idéale [2].

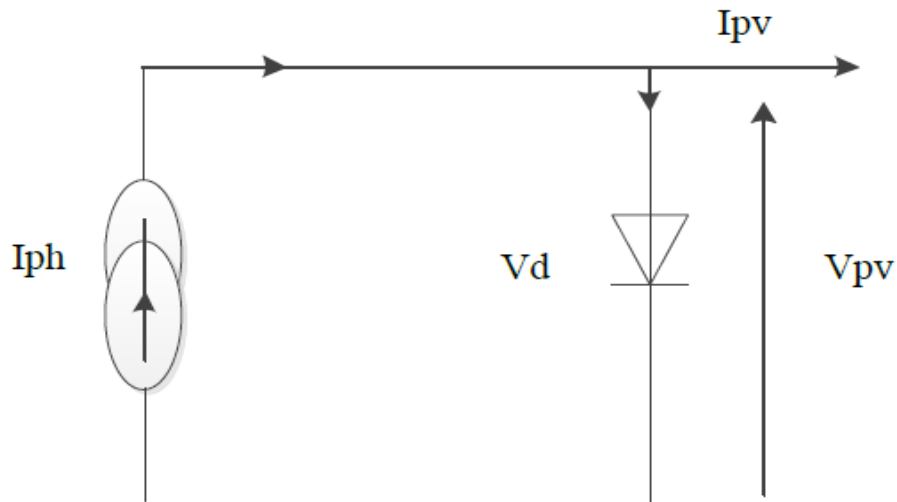


Figure.II.6. Schéma équivalent d'une cellule idéale [2].

Les équations retenues de ce modèle sont:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \quad \text{Eq.II.7}$$

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

$$I_{ph} = I_{sc} = \frac{E}{E_{réf}} \quad \text{Eq.II.8}$$

E : L'éclairement absorbé par la cellule ;

$E_{réf}$: L'éclairement de référence (1000 w/m^2) ;

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{V_d}{V_t}} - 1 \right) \quad \text{Eq.II.9}$$

I_0 : Courant de saturation inverse de la diode ;

$$V_t = \frac{NKT}{q} \quad \text{Eq.II.10}$$

V_t : Tension thermique ;

N : Facteur d'idéalité de la photopile ;

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

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

II.2.4.2. Cas d'une cellule réelle

Le module photovoltaïque est caractérisé par son schéma électrique équivalent (Figure I.7) qui se compose d'une source de courant qui modélise la conversion du flux lumineux en énergie électrique, une résistance shunt R_{sh} est une conséquence de l'état de la longueur de la périphérie de la surface de la cellule, une résistance série R_s représentant les diverses résistances de contact et de connexion, une diode en parallèle qui modélise jonction PN [1].

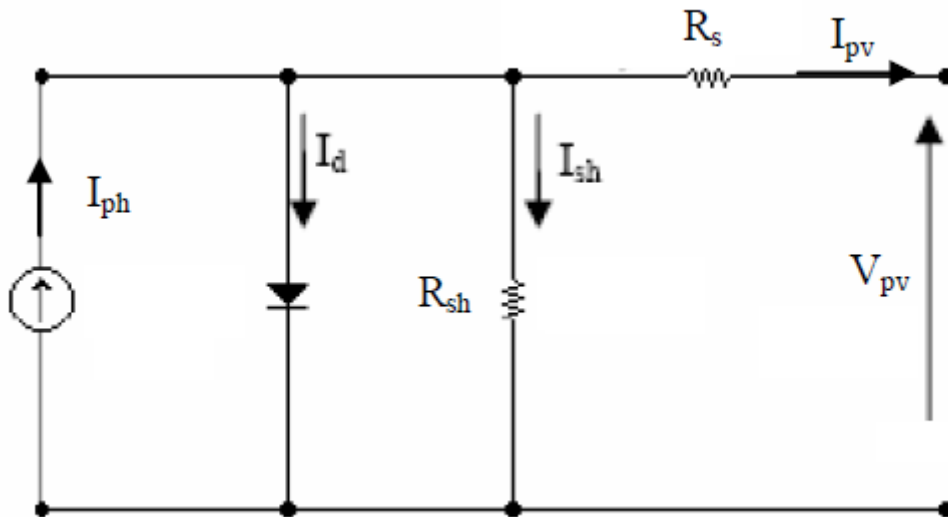


Figure II.7. Schéma électrique équivalent du modèle à une diode [1].

Le courant généré par le module est donné par la loi de Kirchhoff :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - IR_{sh} \quad \text{Eq.II.11}$$

Avec:

$$I_{ph} = P_1 G \cdot [1 + P_2(G - G_{ref}) + P_3(T_j - T_{jref})] \quad \text{Eq.II.12}$$

$$I_d = I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V_{pv} + I_{pv}R_s)}{A \cdot n_s k T_j}\right) - 1 \right] \quad \text{Eq.II.13}$$

$$IR_{sh} = \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_{sh}} \quad \text{Eq.II.14}$$

La température du module peut être calculée à partir de la température ambiante et celle d'irradiation comme suit :

$$T_j = T + G \left(\frac{Noct - 20}{800} \right) \quad \text{Eq.II.15}$$

Avec :

G_{ref} , T_{jref} : l'éclairement et la température de jonction sous conditions STC.

G , T_j : l'éclairement et la température de jonction dans les conditions de fonctionnement.

P_1 , P_2 , P_3 : paramètres constants.

NOCT: température nominale de fonctionnement du module, donnée par le constructeur.

A : Facteur d'idéalité de la jonction.

n_s : nombre de cellule en série dans un module.

K : Constant de Boltzmann.

I_0 : le courant de saturation il est fortement dépendant de la température; il est donné par :

$$I_0 = P_4 T_j^3 \exp\left(\frac{-E_g}{K T_j}\right) \quad \text{Eq.II.16}$$

Avec :

E_g : Energie de gap pour le silicium cristalline 1.12 ev.

A. Influence de la résistance série R_s

La résistance série caractérise les pertes par effets joule de la résistance propre du semi-conducteur et les pertes à travers les grilles de collectes et les mauvais contacts ohmiques de la cellule, les contacts semi-conducteur électrodes à résistance élevée abaissent appréciablement la tension et le courant de sortie ce qui va limiter le rendement de conversion [8].

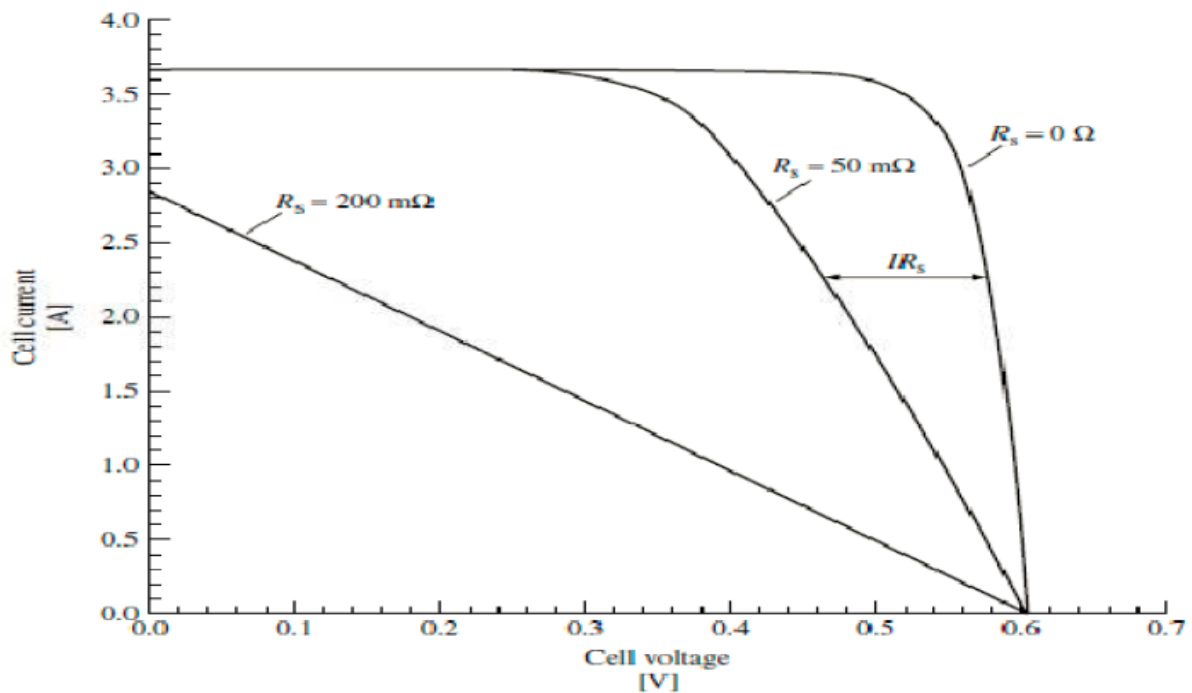


Figure II.8. Influence de la résistance série R_s [8,9].

B. Influence de la résistance parallèle (ou shunt)

Caractérise les pertes par recombinaison des porteurs dues aux défauts structuraux du matériau épaisseurs des régions N et P et de la zone de charge et d'espace.

L'existence de fissures et de défaut de structures complexes devient le siège de phénomène physique assimilable aussi à une résistance parallèle R_{sh} . L'ordre de grandeur de la résistance parallèle pour une cellule au si : $R_{sh} 10^2$ à $10^4 \Omega$ R_{sh} augmente avec le groupement série de cellules solaires et diminue avec une connexion parallèle [8,9].

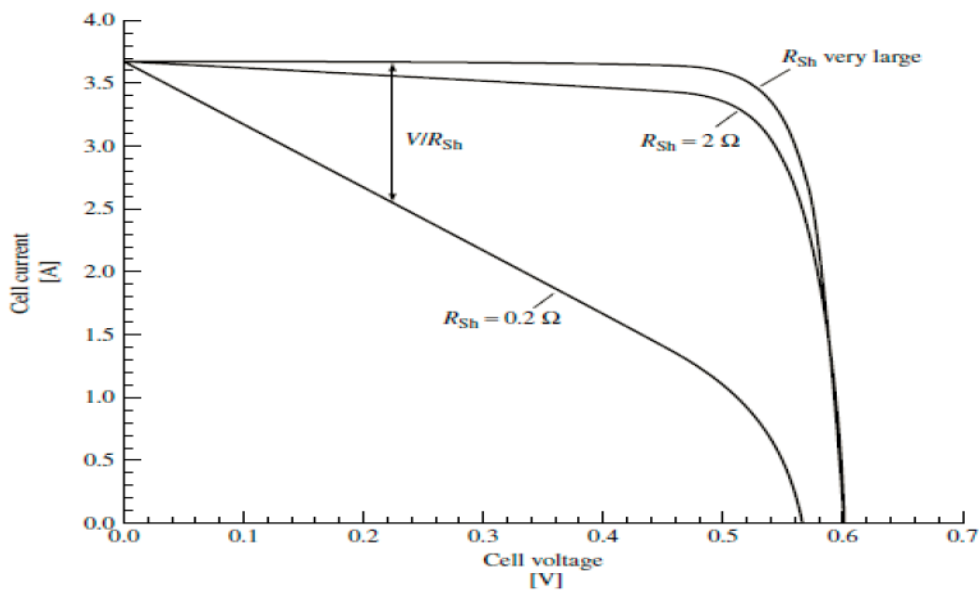


Figure II.9. influence de la résistance parallèle R_{sh} [8].

II.3. Critères du choix des matériaux photovoltaïques

Un bref aperçu des propriétés des matériaux (généralement les semi-conducteurs) concernant le fonctionnement des cellules solaires est donné sous ce titre. Un certain nombre de propriétés sont requises pour les matériaux PV_s et la structure de la cellule solaire, les plus essentielles, concernant les conditions photoniques (optoélectroniques et électriques)[10] :

1. Du en raison de la condition quantique $h\nu > E_g$. Le choix des matériaux dépend surtout de la largeur de la bande interdite E_g . Plus E_g est faible, plus grand sera le nombre de photons utilisables, mais aussi plus faible sera la photo-tension. Les calculs montrent que les meilleurs rendements de conversion η seront obtenus si E_g est compris entre 1 et 1,7 eV, comme le montre la figure (II.10) [11, 12, 13].

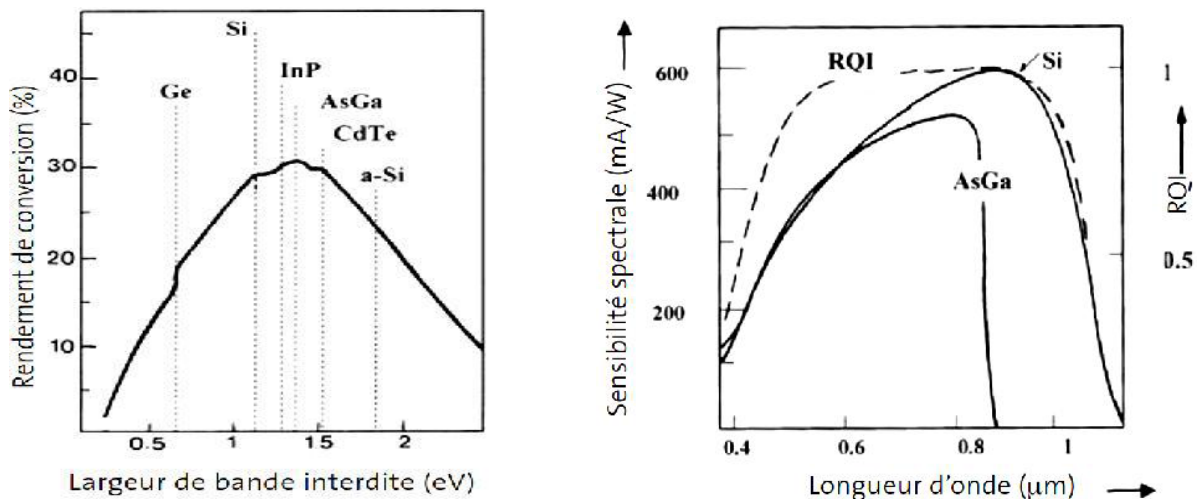


Figure.II.10. La variation du rendement de conversion idéal pour une cellule en fonction de la largeur de bande interdite du matériau (à gauche) et les variations spectrales de la sensibilité d'une cellule solaire au (Si) ou a (GaAs) (à droite). *RQI* : le rendement quantique interne [13].

2. Une forte absorption lumineuse sur une large gamme spectrale, surtout la gamme visible du spectre solaire. Cette propriété implique un gap d'énergie optimal (accordable et souhaitable). Généralement le pic d'absorption doit être de [1.4 -1.5] eV pour une efficacité optimale [12, 14,15].
3. Une faible réflectance [16].
4. Afin de produire des cellules solaires efficaces, les matériaux utilisés doivent avoir de très bonnes propriétés de collecte pour porteurs minoritaires et majoritaires [11-12, 17-15].
5. Une faible perte de recombinaison des porteurs (*carrier*) [12, 17-15].

6. Doit être abondant et disponible avec des quantités nécessaires pour assurer la production a grande échelle [12].
7. Peu couteux et non-toxique et respectueux de l'environnement [11, 12].
8. La stabilité en fonction du temps et des conditions de l'environnement (la résistance a la corrosion par exemple) [11, 12].

II.4. Architecture de la cellule photovoltaïque

Les premières cellules étaient constituées seulement d'une jonction diffusée (émetteur) et d'un contact ohmique, mais leur architecture a ensuite évolué. En effet, trois grandes avancées technologiques ont permis l'augmentation de leur rendement. Il s'agit de la texturation de surface, l'usage d'une couche anti-reflet et le champ de contact arrière [9].

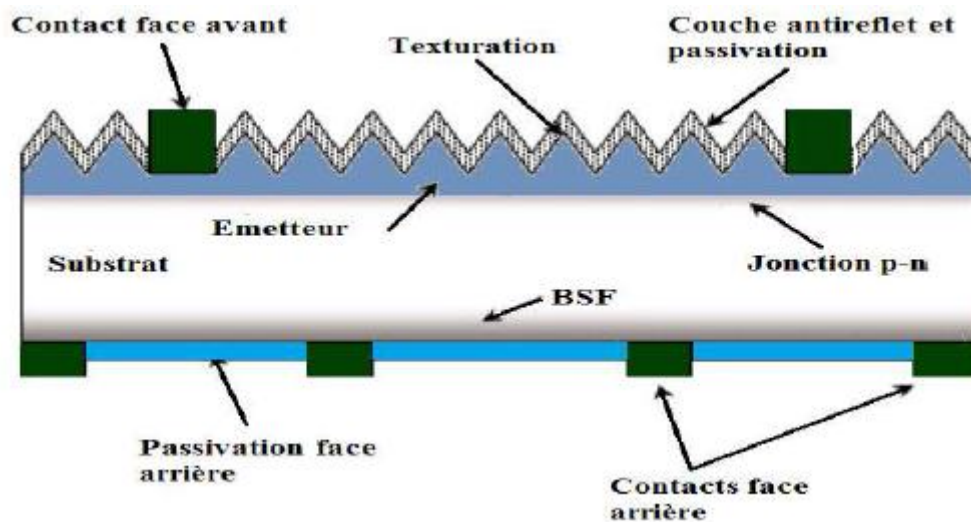


Figure II.11. composition d'une cellule photovoltaïque [9].

II.4.1. texturation de la surface

La réflexion est à l'origine de pertes importantes pour la cellule. La texturisation est utilisée pour diminuer la réflectivité de la surface de la cellule cette opération vise à développer en surface un relief micrométrique, généralement de forme pyramidale. Ces méthodes peuvent faire passer la réflectivité effective de 40% à moins de 10% [18.9].

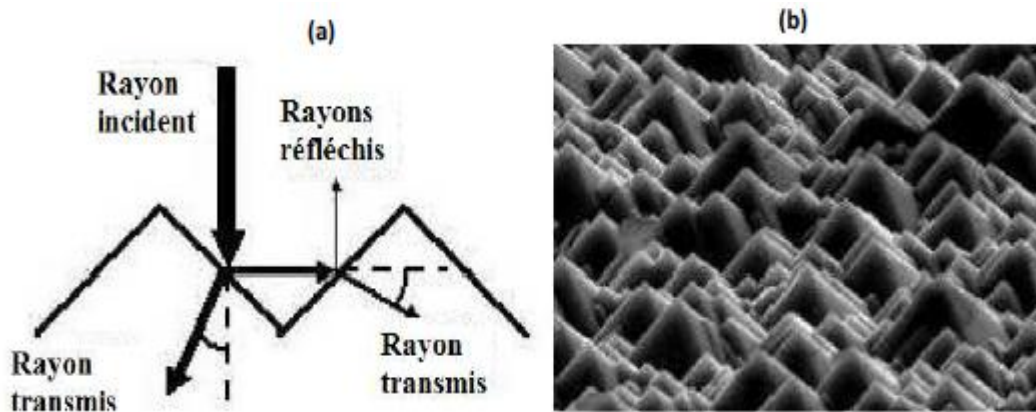


Figure II.12. (a)Trajectoire d'un rayon lumineux arrivant sur une surface texturée, (b) plaque de silicium après texturation

II.4.2. Les contacts face avant et face arrière

Les contacts constituent la structure de collecte qui récupère et envoie les porteurs photogénérés vers le circuit externe. Pour assurer efficacement ce rôle, les contacts doivent être ohmiques. De mauvais contacts, c'est-à-dire entraînant une forte résistance série, auront essentiellement une répercussion sur le facteur de forme de la cellule et sur le courant récupéré [9].

II.4.3. La couche antireflet

La texturation de la cellule permet de limiter les réflexions face avant, pour réduire encore plus la réflexion, une couche antireflet (CAR) est ajoutée. L'indice et l'épaisseur de cette couche sont ajustés pour obtenir une lame quarte d'onde, l'objectif étant de minimiser le coefficient de réflexion de la cellule en créant des interférences destructives [9].

II.4.4. La passivation

La surface des cellules est une source de recombinaison importante à cause des nombreux défauts cristallins présents liés à la discontinuité du cristal. La passivation consiste à améliorer la qualité électronique en surface et en volume du substrat, en neutralisant les sites actifs. Des matériaux tels que les SiN, le SiO et le SiN_xO_y permettent de passiver une grande partie de ces défauts puisqu'il combine deux effets de passivation : passivation par neutralisation des défauts d'interface et passivation par effet de champ dont [9].

II.4.5. Champ électrique dans la zone arrière (BSF)

Afin de collecter les paires électron-trou créés par les radiations de grandes longueurs d'ondes du spectre solaire, on réalise un champ électrique par transition abrupte de dopage, sur la face arrière de la cellule solaire, dans la zone même du contact ohmique. Ce champ

électrique arrière s'appelle BSF (Back Surface Field). Les porteurs excédentaires ainsi créés au voisinage de cette zone, au lieu de s'y recombinaient, sont repoussés vers la région de charge d'espace de la jonction. Ils participent au photocourant dans la mesure où la longueur de diffusion de ces porteurs de charge est plus importante que l'épaisseur totale de la couche de base de la cellule [19,9]

II.5. Générations et filières des cellules solaires :

Les cellules solaires sont classées en trois générations à base de l'ordre de leur importance. Des recherches sont menées sur l'ensemble des trois générations en même temps pour améliorer leur efficacité, tandis que les cellules solaires de première génération constituent la plus grande part de la production commerciale à propos de 89.7% en 2007 [9].

II.5.1. Première génération

Elles sont à grande surface, à haute qualité et des dispositifs formés des cellules solaires simple jonction de la première génération la réduction des coûts de production de cette technologie est annulée en raison des coûts de main-d'œuvre élevée, et les coûts des matériaux surtout pour le silicium cette tendance se poursuit tant que l'industrie photovoltaïque est en expansion bien qu'il dispose d'une large partie d'absorption spectrale [20]. Le matériau essentiel qui utilise pour fabriquer les cellules de cette génération est le silicium qui est stable et non toxique, ce dernier est divisé en plusieurs technologies distinctes de part la nature du silicium employé et/ou sa méthode de fabrication. Cette filière comporte deux technologies : le silicium monocristallin et le silicium multi cristallin [21,6]

II.5.1.1 Le silicium monocristallin

Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme, intense de brillant. Elles sont utilisées, mais ne sont pas majoritaires sur le marché de l'énergie photovoltaïque.

Le rendement du silicium monocristallin est plus élevé, il est compris entre 12 et 20% pour les cellules industrielles. Son coût élevé est aujourd'hui un handicap et le silicium monocristallin perd du terrain devant le silicium multi cristallin [6].

II.5.1.2 Le silicium multicristallin (polycristallin)

Le silicium multicristallin (polycristallin) est devenu aujourd'hui la technologie la plus utilisée. A elle seule elle représente près de 50% du marché. Ces cellules sont obtenues par

coulage de cristaux de silicium, ce qui rend sa structure hétérogène. Son rendement est légèrement inférieur au silicium monocristallin il est compris entre 10 et 14% selon les fabricants. En revanche sa fabrication est beaucoup plus simple, les coûts de production sont donc plus faibles. [6]

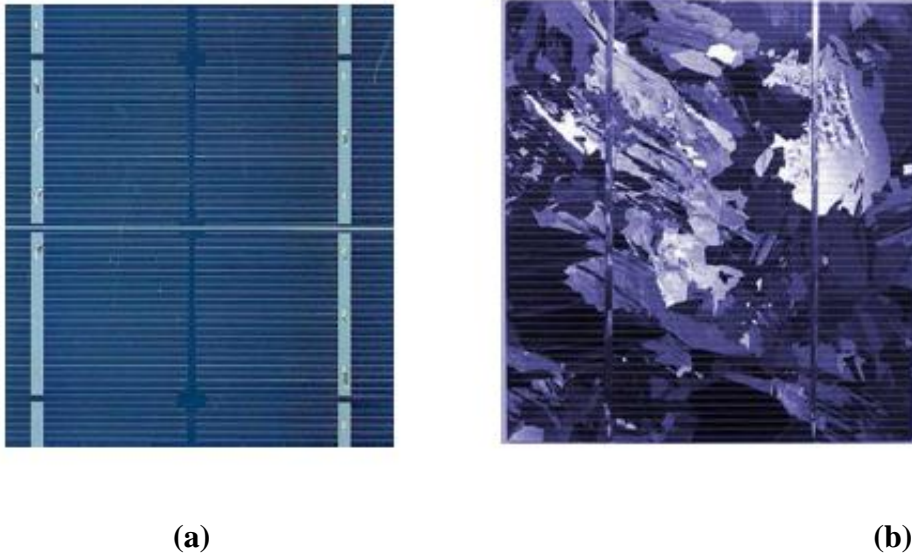


Figure. II.13. photos de cellule monocristalline (a) et multicristalline (b) [6]

La production de cellules solaires à haut rendement avec une efficacité énergétique de conversion élevée sont ainsi favorisées à condition de ne pas augmenter la complexité de la cellule solaire la limite théorique de l'efficacité des cellules solaires à simple jonction de silicium est de 33% [9].

II.5.2. Deuxième génération

Pour résoudre ces problèmes de besoins énergétiques et les coûts de production des cellules solaires, apparaît une deuxième génération. La technologie des piles en couche mince a été imminente. Une réduction importante des coûts des matériaux est possible dans cette technologie. Ils ont aussi l'augmenter la taille de l'unité [9].

Au fil du temps, les cellules de première génération sont attendues pour combler le fossé entre eux et les cellules de première génération par rapport au rendement de conversion énergétique. Avec l'augmentation de la dominance cette technologie, le coût des matériaux constitutifs augmente également pour le couvercle supérieur et d'autres encapsulations pour lui donner une plus longue durée de vie[9]. Les matériaux généralement utilisés dans technologie en couche mince sont principalement le silicium amorphe (a-Si), le tellure de cadmium/sulfure de cadmium (CdTe/CdS) et La filière chalcopyrite basée sur le $CuIIVI_2$

II.5.2.1 Les couches minces

Plusieurs types des cellules photovoltaïques visant à diminuer la quantité de matière nécessaire à leur fabrication sont aujourd'hui développés et commencent à être industrialisés. Ces technologies appelées couches minces font appel à des procédés de fabrication (dépôt sur ruban) visant la diminution de l'épaisseur des cellules [6].

Par principe, une couche mince est une fine couche d'un matériau déposé sur un autre matériau, appelé "substrat " dont l'une des dimensions qu'on appelle l'épaisseur a été fortement réduite de telle sorte qu'elle varie de quelques "nm" quelques " μm ". Cette faible distance entre les deux surfaces limites entraîne une perturbation de la majorité des propriétés physiques, très souvent un tel petit nombre de couches atomiques possède des propriétés très différentes [7]. On distingue trois types des filières des couches minces :

a) La filière du silicium amorphe (a-Si)

Ces cellules sont composées d'un support en verre ou en matière sur lequel est déposée une fine couche de silicium [22,23], processus ne nécessitant que très peu d'énergie. Bien que le rendement de telles cellules soit plus bas que celui des cellules cristallines, ce qui est dû à la faible mobilité des porteurs de charge au sein de ces matériaux. Des cellules amorphes avec des rendements excédant les 8% ont été réalisés [24,23]. ce type de cellules trouve ses applications principales dans de petits appareils tels les calculettes. Les montres, etc [23].

b) La filière tellurure de cadmium/sulfure de cadmium (CdTe/CdS)

Du fait de ses propriétés optiques optimales. C'est-à-dire une bande interdite directe de l'ordre de 1.5 eV et une grande absorption dans tout le spectre solaire. Cette filière a été l'une des premières étudiées (1960) [25,23], en couches minces, les premières hétérojonctions CdTe/CdS/SnO₂/verre sont apparues en 1964 et le premier module CdS/CdTe en 1972, malgré des rendements excédant les 15 % des problèmes à savoir :

- la difficulté de réaliser des contacts électriques ohmiques stables ;
- les meilleurs rendements ont été obtenus sur des cellules utilisant comme substrat le silicate de bore. Substrat fort coûteux ;
- la diffusion du sodium de verre ne semble pas profiter au CdTe, et il a un effet négatif sur la durée de vie des porteurs minoritaires dans les cellules de CdTe ;
- la sensibilité de cette cellule à la vapeur d'eau ;

- l'agressivité pour l'environnement, du fait de la présence du cadmium qui est toxique et polluant [23].

c) La filière chalcopyrite basée sur le CuIIIIV_2

L'émergence des cellules solaires, basées sur les matériaux à structures chalcopyrites, a fait suite à la réalisation de détecteurs photovoltaïques $\text{CuInSe}_2/\text{CdS}$ par S. Wagner et coll de Bell Telephone en 1974-1975 [25]. Wagner et collavaient rapporté la préparation d'hétérojonctions p-n $\text{CuInSe}_2/\text{CdS}$ à partir d'un monocristal CuInSe_2 , dont la conductivité est de type p, sur lequel une couche mince de CdS de 5-10nm d'épaisseur avait été déposée. La réponse photovoltaïque de ces détecteurs pour une lumière incidente à travers la fenêtre CdS donnait lieu à de très hauts rendements quantiques (70%) uniformes entre 0.55 et 1.25 μm . Ces hétérojonctions avaient des rendements solaires de l'ordre de 5% les composées ternaires chalcopyrites qui peuvent jouer le rôle d'absorbeur sont principalement le CuGaSe_2 , le CuAlSe_2 et le CuInSe_2 . Du fait de leurs grands coefficients d'absorption optique, une épaisseur de 1.5-2 μm est suffisante pour absorber la partie utile du spectre solaire.

Le matériau le plus prometteur semble être le CuInSe_2 . Une efficacité de 18.8% est obtenue par les cellules solaires à base de ce matériau [26,23]. Cependant sa faible bande interdite (1.04 eV) limite la tension du circuit ouvert et donc le rendement de la photopile. Et afin de dépasser ce problème. Des travaux portent aujourd'hui sur l'introduction des atomes de Ga qui se substituent partiellement à l'In. De façon à élargir sensiblement la bande interdite.

Ces matériaux. Non seulement ils réduisent les coûts mais également promettent une très haute efficacité de conversion d'énergie. Ce profil fait une tendance vers le changement de la première génération vers la deuxième génération. Mais la commercialisation de cette technologie s'est avérée être difficile [9].

II.5.3. Troisième génération

La recherche pour améliorer les performances des cellules solaires en améliorant son efficacité a conduit à l'élaboration de la troisième génération des cellules solaires [27,9]. La piètre performance électrique de la technologie, les technologies de non semi-conducteurs (y compris les cellules à base de polymères) [9].

II.5.3.1 Cellules organiques et plastiques

Observé depuis 30 ans dans les matériaux semi-conducteurs organiques, l'effet photovoltaïque a connu cette dernière décennie un grand essor.

Initialement donnant des valeurs très faibles de rendement de conversion, cette application particulière des semi-conducteurs organiques commence à attirer l'attention en 1986 lorsque l'équipe de Tang [28,6] montre que les rendements proches du pourcent sont atteignables, conformément aux prédictions de Merritt en 1978. La cellule, composée alors d'une bicouche de molécules évaporées sous vide, atteint 0.95% de rendement de conversion [29,6]. ces cellules comprennent deux voies : la voie des cellules « humides » et les voies des cellules polymères organiques dites aussi cellules « plastiques ». les progrès de ces technologies sont très rapides, des records de rendement sont très fréquemment battus (actuellement près de 6%). Le principal frein à ces technologies est actuellement la stabilité de leurs performances ainsi que leur durée de vie (actuellement environ 1000 heures) [28,6].

L'intérêt de ces cellules vient aussi du fait que, contrairement aux cellules à base de matériaux inorganiques, elles offrent l'avantage de pouvoir être déposées en grande surface, à grande vitesse, par des techniques d'impression classique. Elles ouvrent également la voie aux applications légères, nomades et souples. Enfin, grâce à des coûts de fabrication et de matériaux plus faibles, ces cellules devraient dans l'ensemble revenir beaucoup moins chères que leurs concurrentes [21,6].

Le progrès constant de l'évolution de l'industrie photovoltaïque est le résultat de l'augmentation de l'automatisation de la production de cellules solaires à couches minces avec une plus grande efficacité et des coûts réduits. La nécessité des découvertes révolutionnaires dans l'industrie photovoltaïque est parfois interrompue par des progrès dans les matériaux photovoltaïques et les technologies de fabrication pour l'amélioration de la compétitivité des coûts et de l'expansion du marché du photovoltaïque. En brisant les anciennes limites de l'efficacité et du coût en apportant les innovations par l'exploitation de nouvelles compréhensions de la physique et de la science des matériaux deviendront une révolution [30,9]. Le tableau ci-dessous donne le comparatif des rendements des différents types de cellules.

Tableau II.2 : les différentes générations de la cellule PV avec les rendements [29].

Type	Cellule (labo)	Module (labo)	Module (commercial)	Niveau développement
1ère génération				
Silicium monocristalin	24.70%	22.70	12-20%	Production industriel
Silicium polycristallin	20.30%	16.20%	11-15%	Production industriel
2^e génération				
Silicium amorphe	13.40%	10.40%	5-9%	Production industriel
Silicium cristallin en couche minces		9.40%	7%	Production industriel
CIS	19.30%	13.50%	9-11%	Production industriel
CdTe	16.70%		6-9%	Prêt pour la production
3^e génération				
Cellule organique	5.70%			Au stade de la recherche
Cellule de gratzel	11%	8.40%		Au stade de la recherche
Cellule multi-jonction	39%	25-30%		Au stade de la recherche production exclusivement applications spatiales

Toutes les filières continuent de progresser de façon remarquablement continue depuis quarante ans. Il n'y a pas eu de grandes ruptures dans cette progression et les nouvelles filières suivent sensiblement la même pente que les anciennes (figure II.14). On a pu montrer que la limite théorique du rendement de la conversion énergétique se situe au-delà de 80% et n'est pas, a priori, hors d'atteinte. Les records en laboratoire le rappellent régulièrement [28].

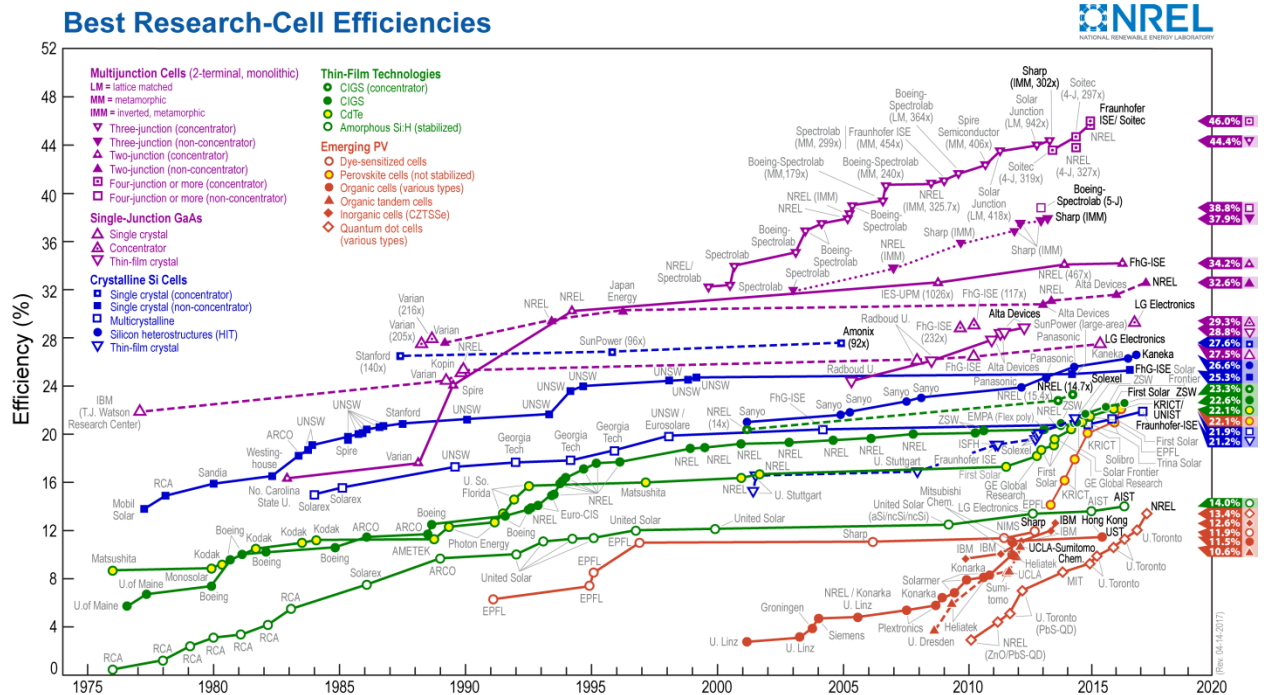


Figure II.14. Évolution des meilleurs rendements mondiaux de cellules photovoltaïques obtenus en laboratoire de 1976 à 2017 classés par filière : multijonctions, GaAs simple jonction, silicium cristallin, couches minces et technologies émergentes[31].

II.6. Conclusion

Dans ce chapitre, on a été consacré à la description des généralités sur les cellules solaires à savoir le principe de la conversion photovoltaïque, la présentation des différents générations des cellules solaires, les filières technologiques généralement et la filière de couche mince en particulière. Pour le chapitre suivant on donne une description sur le logiciel utilisé et les résultats obtenir par la simulation numérique avec leurs interprétations.

Références bibliographiques

- [1] Dr.BELAID LALOUNI Sofia, Cours Energie Solaire Photovoltaïque, Université A.MIRA de BEJAIA, Faculté de Technologie, 2015.
- [2] M. SLAMA Fateh , « *Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique* », Mémoire de Magister , UNIVERSITE FERHAT ABBAS - SETIF-UFAS (ALGERIE), Faculté de Technologie 2011.
- [3] Djemai Mounira, « Effet de la température sur les caractéristiques électriques d'une cellule solaire à base de Cu(In,Ga)Se₂ (CIGS) », Mémoire de fin d'étude en Master, Université Med Khider Biskra, 2014.
- [4] BALI AMINA, Etude comparative entre les cellules solaire de type p+-AlGaAs/ p-GaAs /n-GaAs et une autre de type n+-AlGaAs/n-GaAs/p-GaAs, Mémoire de Magister, Université Mohamed Kheider-Biskra,
- [5] Raphaël LACHAUME, Contribution à la caractérisation électrique et à la simulation numérique des cellules photovoltaïques silicium à hétérojonction, THÈSE de Doctorat, l'université de Grenoble, 2014.
- [6] HELALI Kamelia, « Modélisation d'une cellule Photovoltaïque : Etude comparative », Mémoire de magistère, Université MOULOUD MAMMERI Tizi ouzou ,2012.
- [7] OUSSIDHOUM Samira, « Etude comparative des performances des cellules solaire à jonctions simple et multiple », Mémoire de magistère, Université MOULOUD MAMMERI Tizi ouzou ,2015.
- [8] R. Maouedj, « Application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et de Bouzareah », mémoire de magister décembre 2005.
- [9] LASLADJ Meriem, "Simulation numérique des cellules solaires de troisième génération pour des applications spatiales", Mémoire de Magister en Electronique, Université FERHAT Abbas de Setif-1, (Algérie), 2014.
- [10] Dr. Hamza BENNACER, « Support de cours : matériaux photovoltaïques », département d'électronique, Université Mohamed – Boudiaf de M'sila.
- [11] Gavin Conibeer et Arthur Willoughby, "Solar Cell Materials-Developing Technologies", (Livre), John Wiley & Sons, Ltd, (2014).
- [12] Richard H. Bube, "Photovoltaic Materials", (Livre), Imperial College Press, (1998).

- [13] Bernard Equer, Charles de Novion et Michele Leduc, "Dossier photovoltaïque", Reflets de la physique, (2007).
- [14] Hamza BENNACER, "Contribution au développement des nouvelles cellules solaires à base des semiconducteurs composés", thèse de doctorat, UDL-sidi bel abesse, 2015.
- [15] Rohatgi, Weber, and Kimerling, Journal of Electronic Materials, Vol. 22, No. 1, 1993.
- [16] Hamza BENNACER et al, Springer International Publishing Switzerland 2015.
DOI: 10.1007/978-3-319-14532-7_19.
- [17] Joseph J. Loferski, J. Appl. Phys. 27, 777 (1956); doi: 10.1063/1.1722483.
- [18] N. Ott, Nerding, G. Muller, R. Brendel, and H. P. Strunk, "Evolution of the microstructure during annealing of porous silicon multilayers", Journal of Applied Physics, vol 95, 2004, p.497.
- [19] R. G. Lemus, F. B. Hander, C. H. Rodriguez, J.M. Martinez, "Optical and compositional characterisation of stain-etched porous silicon subjected to anodic oxidation and thermal treatments", Mater. Sci. Eng. B, vol 101, 2003, p. 249.
- [20] G. Gourdin, "Solar cell technology (current state of the art)", 2007.
- [21] Loic Bailly, « Cellules photovoltaïques organiques souples à grande surface ». Thèse de doctorat, Université Bordeaux I, 2010.
- [22] P. Pernet, Thèse de Doctorat, Ecole Polytechniques Fédérale de Lausanne (2000).
- [23] .BOURAIYOU Assia, « Elaboration et Caractérisation des couches minces CuInSe₂ par Electrodeposition », Thèse de doctorat en physique énergétique, université de MENTOURI-Constantine, 2009.
- [24] B.V. Roedern, Proc. Of the NCPV and Solar Program Review Meeting (2003)
- [25] Science Université de Nantes. [En ligne]. [Consulté le 15 Mai 2009]. Disponible sur :
<http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/recherche/lamp/fr/photop/part3.pdf>
- [26] M. A. Contreras, B. Egaas, 353 (1991) 737.
- [27] M. A Green, "3rd generation PV solar cells for 2020 and beyond", vol14, 2010.
- [28] Vighetti Stéphane « Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau : Choix et dimensionnement des étages de conversion ». Thèse de doctorat, Université Grenoble, Institut polytechnique de Grenoble, 2010.

[29] José Miguel Navarro « Cellules Photovoltaïques Organiques Transparentes Dans Le Visible ». Thèse de doctorat. Université Toulouse III-Paul Sabatier, 2008.

[30] T. Key, “Solar photovoltaics: Expanding electric generation options”, 2008.

[31] Xiaodong Wang et Zhiming M. Wang, ‘ ‘ High-Efficiency Solar Cells-Physics, Materials, and Devices ‘ ‘, Springer International Publishing Switzerland, (2014).

Chapitre III

Résultats de simulation et discussions

III.1. Introduction

Dans ce chapitre nous avons étudié l'effet des différents paramètres de chaque couche sur les performances de la cellule photovoltaïque examinée et on a optimisé les valeurs optimales pour atteindre un rendement de conversion maximal, en utilisant l'environnement de simulation AMPS-1D (Analysis of Microelectronic and Photonic Structures-One Dimensional). Donc, on va présenter dans ce chapitre les différents résultats obtenus par la simulation et leurs discussions.

III.2. Logiciel de simulation AMPS-1D

III.2.1 Aperçu

Le terme **AMPS-1D** est une abréviation de la phrase anglaise: Analysis of Microelectronic and Photonic Structures-One Dimensional (analyse unidimensionnelle des structures micro-électroniques et photoniques) [1.2]. Ce logiciel a été développé en 1997 par Professeur *Stephen Fonashet al*(l'université de Pennsylvania - USA).Ce logiciel a été développé sous plusieurs versions en UNIX ou bien sous Windows. Pour nous, on a choisi d'utiliser la dernière version (2012) sous Windows 7 [3.4]. Le logiciel AMPS 1-D est un outil de simulation unidimensionnel utilisé pour simuler la physique du transport dans les dispositifs à l'état solide d'une manière très simple et très souple. Il est élaboré pour analyser et optimiser des structures destinées pour des applications technologiques en microélectronique ou optoélectronique et notamment en photovoltaïques [5.6]. Récemment, il est largement utilisé pour l'analyse et la modélisation des cellules photovoltaïques à couches minces [3].

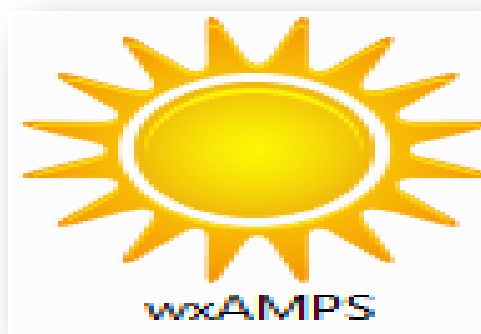


Figure III.1. L'icône exécutable du logiciel AMPS sur PC .

III.2.2. Les caractéristiques d'AMPS-1D

Ce logiciel de simulation utilise les propriétés électronique et optique du matériau (gap d'énergie, l'affinité électronique, le dopage, les mobilités,... etc.) à la conception du dispositif structure contrôlant l'ensemble de la physique du dispositif et sa réponse à la lumière, à la tension appliquée et à la température [3].

L'utilisation d'AMPS permet d'obtenir la réponse du dispositif à une situation donnée, par exemple à la polarisation par la lumière, par la tension électrique ou le changement de la température. Et l'exploration des changements que subissent les paramètres internes du dispositif tels que le diagramme de bande, la composante du courant, le taux de recombinaison et le champ électrique en fonction de la position, de l'intensité lumineuse, de la tension électrique et de la température [3].

Les caractéristiques électriques qu'il peut générer sont :

- Les caractéristiques ($J-V$) sous illumination et sans éclairage.
- Le rendement quantique (Quantum efficiency (QE)) pour des cellules solaires et des photodiodes sous tension de polarisation et lumière.

L'interface d'AMPS (Figure III.2) est constituée de trois boîtes de dialogue. Chacune donne les paramètres nécessaires avant le lancement de la simulation par l'AMPS. Les trois boîtes de dialogues donnent [3] :

- Les conditions environnementales.
- Les propriétés du matériau de chaque couche.
- Les paramètres de modélisation: le type du modèle, l'espacement de la grille pour les calculs numériques, les tensions de polarisation pour lesquelles la sortie ($J-V$) et (QE) doit être générée [3.4].

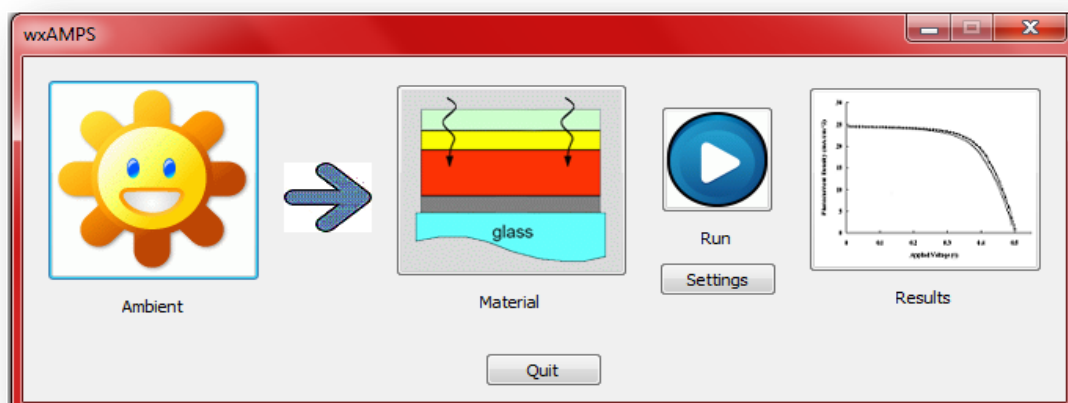


Figure III.2. Page d'accueil de l'interface d'AMPS-1D.

L'interface des conditions environnementales dans le logiciel d'AMPS-1D est représentée dans la figure (III.3). Donc pour étudier l'effet de la température et/ou l'éclairage sur les performances de la cellule solaire on peut les varier à partir de cette interface.

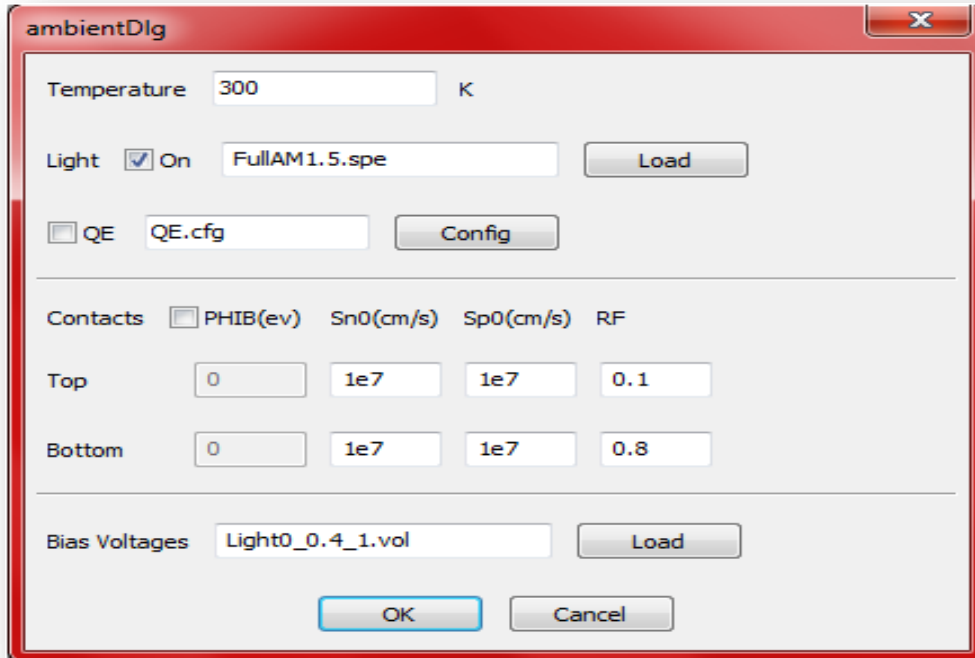


Figure III.3: L'interface des conditions environnementales

Dans la figure (III.4) on a représenté l'interface des propriétés du matériau de chaque couche comme les propriétés électriques (l'énergie de gap, la mobilité, l'affinité, dopage ...), les propriétés optiques et les défauts. Donc, après choisir le modèle de la cellule solaire qu'on veut la simuler, on peut étudier l'effet de l'épaisseur et le dopage de chaque couche sur les paramètres de la cellule solaire pour obtenir un rendement maximale à partir de les varier dans cette interface.

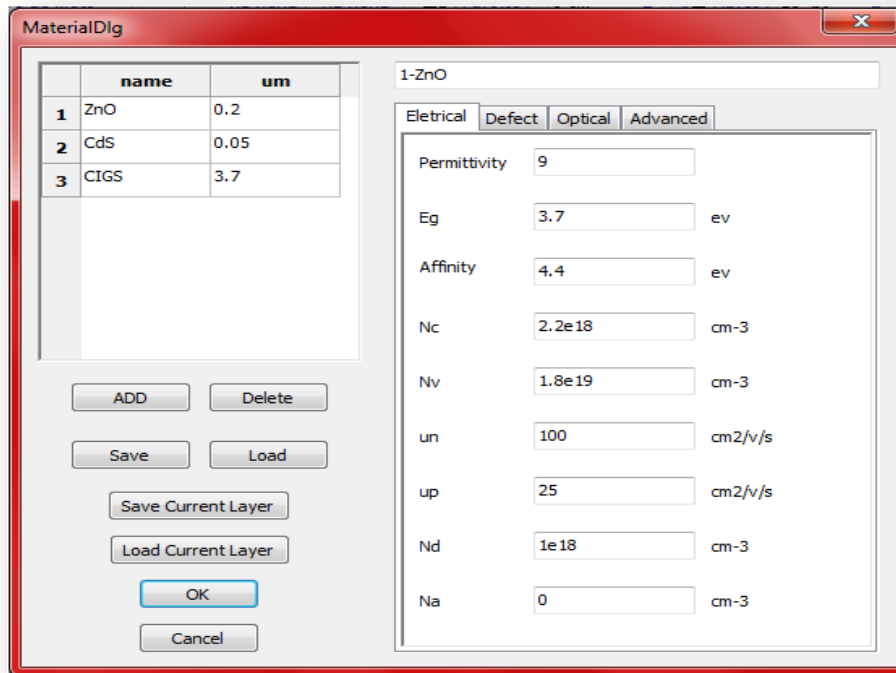


Figure III.4. L'interface des propriétés du matériau de chaque couche.

III.3. La structure de la cellule étudiée

La structure de la cellule solaire à hétérojonction (n-ZnO/n-CdS/p-CIGS) étudiée dans ce travail est illustrée dans la figure(III.5). qui présenté les différent couche constituantes de la cellules, sont le substrat, le contact inferieure, la couche absorbante (p-CIGS), la couche tampon (n-CdS), la couche fenêtre (n-ZnO), et le contact arrière.

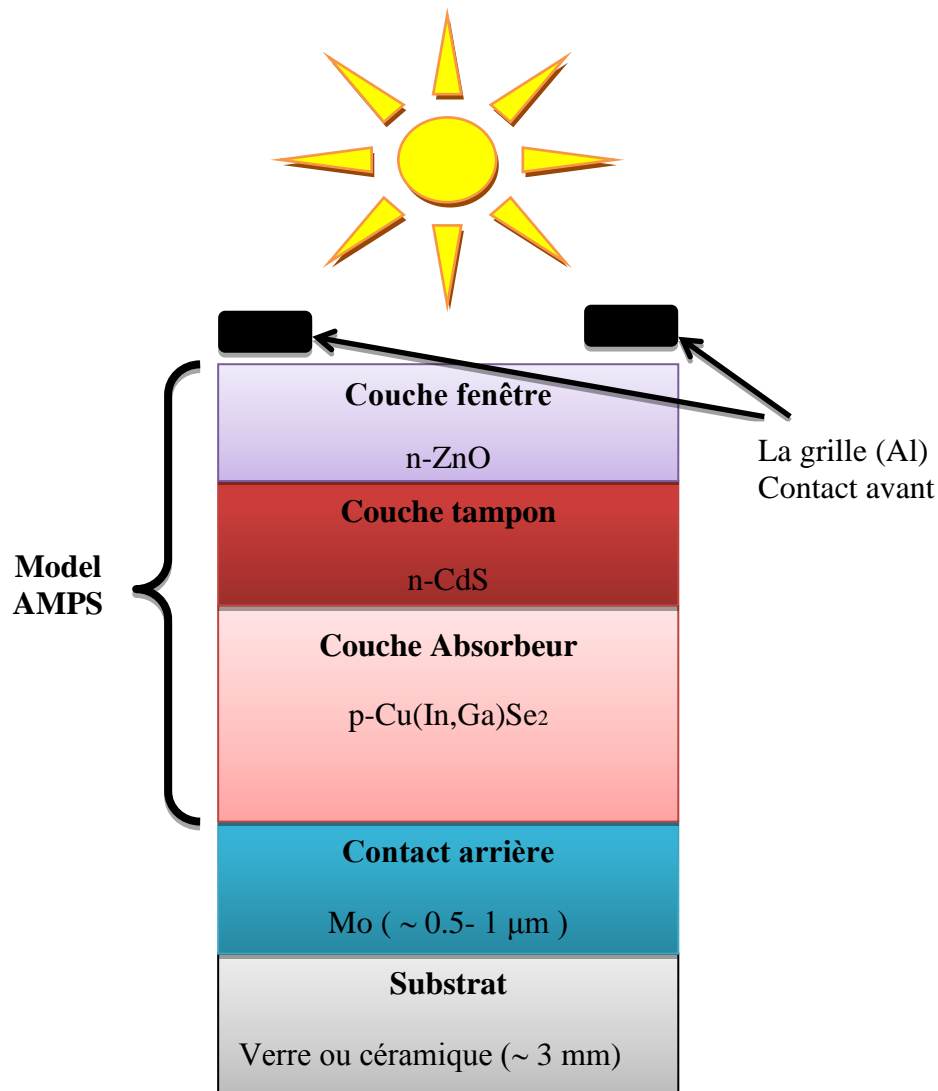


Figure III.5 : Schéma représentatif d'une cellule solaire typique à base de CIGS

III.3.1. La couche absorbante

Une couche absorbante doit être constituée d'un matériau à grand coefficient d'absorption dans le domaine du visible, il est donc préférable que celui-ci ait une bande interdite directe, dont la valeur soit de l'ordre de 1.1-1.7 eV. Sa conductivité doit être de type p, et de l'ordre de $1-10^{-2}$ ($\Omega\text{-cm}^{-1}$) [5].

III.3.2. La couche tampon

La couche tampon est une couche située entre la couche absorbante et la couche fenêtrée. Si un contact entre couche absorbante et couche fenêtrée est directement réalisé, une jonction photovoltaïque peut exister, mais son rendement sera limité par :

- L'inadaptation des bandes interdites ;

- Les courants de fuite dus à la présence de zones désordonnées aux joints de grains.
- De ce fait, il est préférable d'introduire une fine couche, dite couche tampon, entre ces deux composés afin d'optimiser les performances de la cellule. Cette couche doit avoir les propriétés suivantes :
- Une bande interdite intermédiaire permettant une transition souple entre celle du semiconducteur et celle de la couche fenêtre, soit une valeur comprise entre 2.4 et 3.2 eV ;
- Une conductivité de type n pour former la jonction avec la couche absorbante qui elle est de type p; de plus, afin d'éviter les effets de fuites de courant, sa conductivité doit être plus faible que celle de la couche absorbante, soit de l'ordre de 10^{-3} ($\Omega \text{ cm}^{-1}$) ;
- Morphologiquement elle doit être très homogène pour éviter tout effet de court circuit au niveau des joints de grains [5].

III.3.3. La couche fenêtre

La couche fenêtre doit être à la fois conductrice et transparente, de façon à collecter les électrons tout en laissant passer la lumière[10.2], la transmission des couches doit être supérieure à 80 %, La conductivité de ces mêmes couches doit être supérieure à 10^3 ($\Omega \text{ cm}^{-1}$)[5]. Cette couche est constituée d'oxyde transparent conducteur (TCO), sur lequel une fine grille métallique (Ni-Al) est déposée, de façon à réduire la résistance série de la couche fenêtre. Le TCO généralement usité est l'oxyde de zinc (ZnO), mais l'oxyde d'indium dopé à l'étain (ITO) peut également être rencontré [10.2].

Cette couche fenêtre est constituée de deux couches, l'une fine (50 à 100 nm) et très résistive, l'autre épaisse (100 à 1500 nm) et peu résistive. La première couche est le plus souvent constituée de ZnO intrinsèque, dont la haute résistivité permettrait de réduire les courants de courts-circuits entre les deux électrodes de la cellule (le molybdène et la couche de TCO de faible résistivité) [11.2]. La couche conductrice est fréquemment du ZnO dopé à l'aluminium (ZnO:Al), mais d'autres dopants comme le bore (ZnO:B) [12.2] ou le gallium (ZnO:Ga) existent aussi. L'épaisseur et le dopage de cette couche sont ajustés de façon à combiner transparence et conductivité [2].

III.4. Optimisations des paramètres de la cellule photovoltaïque

III.4.1. Effet de l'épaisseur de chaque couche sur les paramètres de la cellule photovoltaïque

III.4.1.1. Effet de l'épaisseur de la couche en ZnO

Tableau III.1. L'effet de l'épaisseur de la couche ZnO sur les performances de la cellule photovoltaïque.

L'épaisseur de la couche ZnO (μm)	Jsc (mA/cm^2)	Vco (V)	η (%)	FF (%)
0.01	25.23	0.8502	17.72	82.58
0.025	25.20	0.8502	17.71	82.63
0.05	25.17	0.8502	17.67	82.56
0.1	25.12	0.8501	17.62	82.57
0.15	25.06	0.8500	17.58	82.57
0.2	25.01	0.8500	17.55	82.57
0.25	24.95	0.8499	17.51	82.58
0.3	24.91	0.8499	17.48	82.58
0.35	24.87	0.8498	17.45	82.58
0.4	24.83	0.8498	17.43	82.58
0.45	24.80	0.8498	17.40	82.58
0.5	24.77	0.8490	17.38	82.59

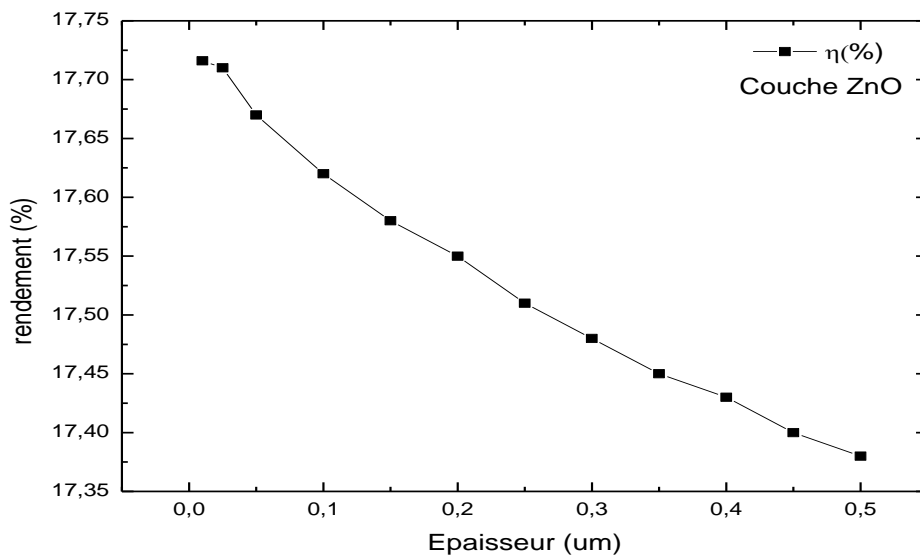


Figure III.6. Variation de rendement de conversion en fonction de l'épaisseur de la couche ZnO.

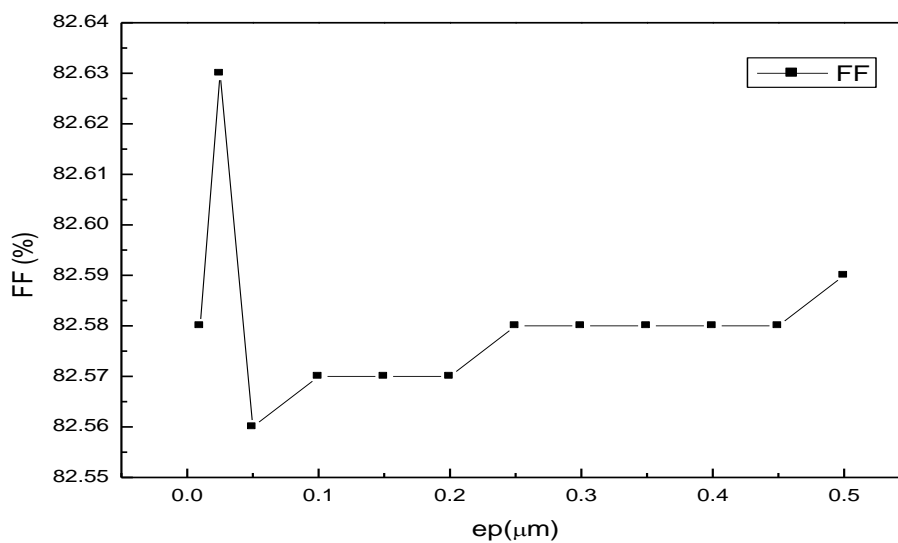


Figure III.7. Variation de facteur de forme en fonction de l'épaisseur de la couche en ZnO.

Dans le tableau III.1, nous représentons les paramètres de la cellule photovoltaïque obtenus par la simulation tel que le courant de court-circuit J_{sc} , la tension de circuit ouvert V_{co} , le rendement et le facteur de forme.

Nous remarquons que la variation de l'épaisseur de la couche en ZnO n'a pas d'une grande influence sur les performances de la cellule solaire, telle que les performances diminuent avec des petites valeurs. Donc on préfère que l'épaisseur de la couche ZnO soit la plus petite possible.

III.4.1.2. Effet de l'épaisseur de la couche CdS

L'épaisseur de la couche CdS est variée de 10 nm à 120 nm tandis que l'épaisseur de la couche en CIGS est maintenue constante (3.7 μ m). L'effet de l'épaisseur de la couche CdS sur la cellule solaire est illustré dans la figure III.8 et la figure III.9

Tableau.III.2 : L'effet de l'épaisseur de la couche CdS sur les performances de la cellule photovoltaïque.

L'épaisseur de la couche CdS (μ m)	Jsc (mA/cm ²)	Vco (V)	η (%)	FF (%)
0.01	26.97	0.852	19.17	83.42
0.02	26.43	0.852	18.02	80.06
0.03	25.98	0.851	17.57	79.58
0.04	25.49	0.851	17.28	79.67
0.05	25.03	0.850	16.95	79.63
0.06	24.64	0.850	16.70	79.77
0.07	24.27	0.848	16.45	79.79
0.08	23.92	0.849	16.21	79.82
0.09	23.62	0.849	16.01	79.91
0.1	23.33	0.848	15.81	79.87
0.11	23.08	0.848	15.63	79.88
0.12	22.84	0.848	15.45	79.81

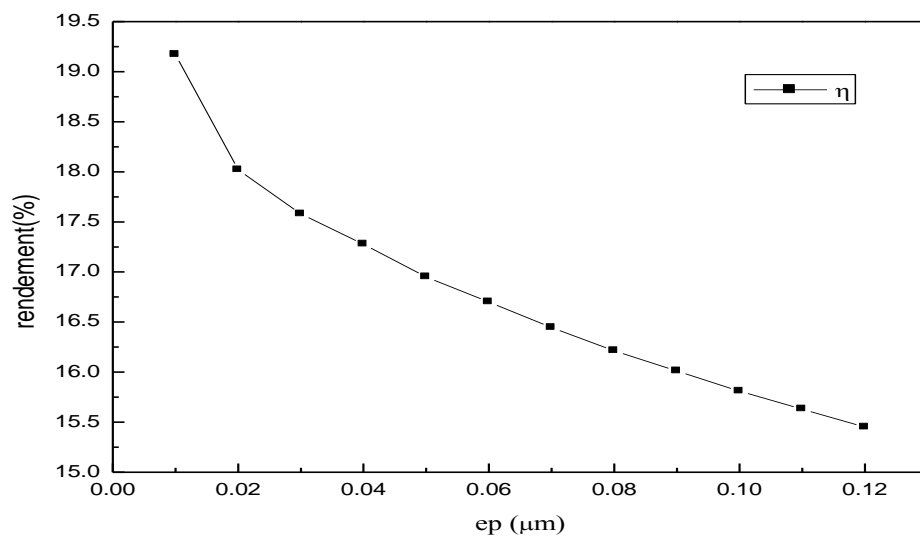


Figure III.8. Variation du rendement en fonction de l'épaisseur de la couche CdS

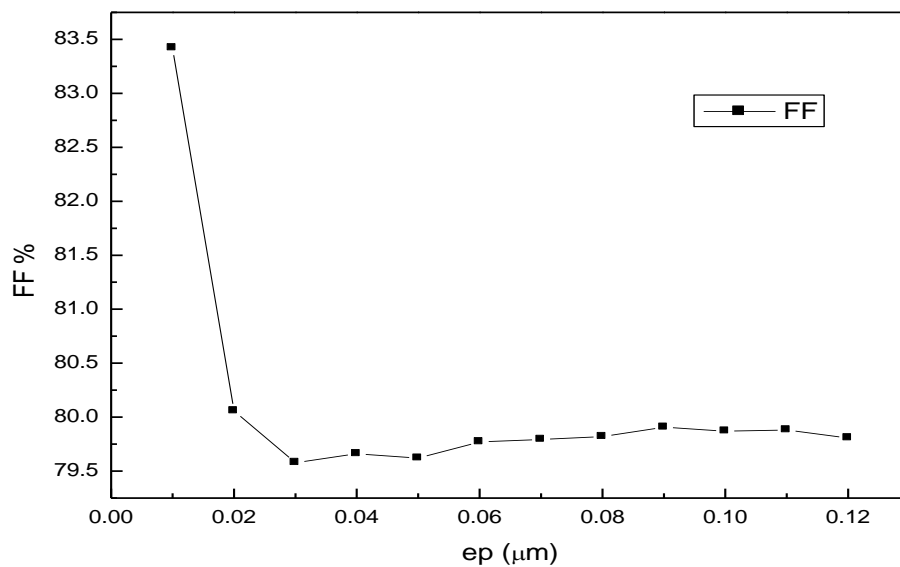


Figure III.9. Variation du facteur de forme en fonction de l'épaisseur de la couche CdS.

Dans le tableau III.2, nous avons représenté l'influence de la variation de l'épaisseur de la couche en CdS sur les différents paramètres de la cellule solaire. Nous observons que la variation de l'épaisseur influe beaucoup plus sur le courant de court-circuit I_{sc} , qui diminue avec l'augmentation de l'épaisseur de CdS, que la tension de circuit ouvert V_{co} qui est presque constante. D'après les figure III.8 et III.9, nous remarquons que le facteur de forme chute de 83.42 à 80.06% puis elle fixe et le rendement de cette cellule solaire diminue avec l'augmentation de l'épaisseur. Donc à partir de ces résultats nous trouvons que le meilleure

pour un rendement plus haut, la couche de CdS est plus mince de 10 nm. Ces résultats correspondent des résultats de simulation[6].

L'effet de l'épaisseur de la couche en CdS peut être expliqué comme suit : pour une couche en CdS plus mince, la plupart des porteurs photogénérés dans cette couche sont collectés. Quand l'épaisseur augmente, les photons de courtes longueurs d'onde sont absorbés à une distance plus loin de la jonction CdS/CIGS par conséquent les porteurs photogénérés se recombinent avant d'atteindre la jonction. Par conséquent, il y'a une chute du courant de court circuit, de la tension en circuit ouvert et le rendement avec l'augmentation de l'épaisseur du CdS. Généralement l'épaisseur de la couche en CdS doit être entre 50 nm et 60 nm [7.6].

III.4.1.3. Effet de l'épaisseur de la couche en CIGS

Nous avons simulé la variation des paramètres photovoltaïques de la cellule solaire en fonction de l'épaisseur de la couche en CIGS comprise entre 2.5 μm et 4.25 μm et la couche de CdS est de 50 nm. Les résultats de simulation sont illustrés dans le tableau (III.3).

Tableau III.3 : L'effet de l'épaisseur de la couche CIGS sur les performances de la cellule photovoltaïque.

L'épaisseur de la couche CGIS (μm)	Jsc (mA/cm^2)	Vco (V)	η (%)	FF (%)
2.5	24.99	0.8499	17.54	82.57
2.75	25.00	0.850	17.55	82.57
3	25.01	0.850	17.55	82.58
3.25	25.01	0.850	17.5511	82.58
3.5	25.01	0.850	17.5512	82.58
3.75	25.01	0.850	17.5513	82.58
4	24.01	0.850	17.5513	82.58
4.25	24.01	0.850	17.5513	82.58
4.5	24.01	0.850	17.5513	82.58

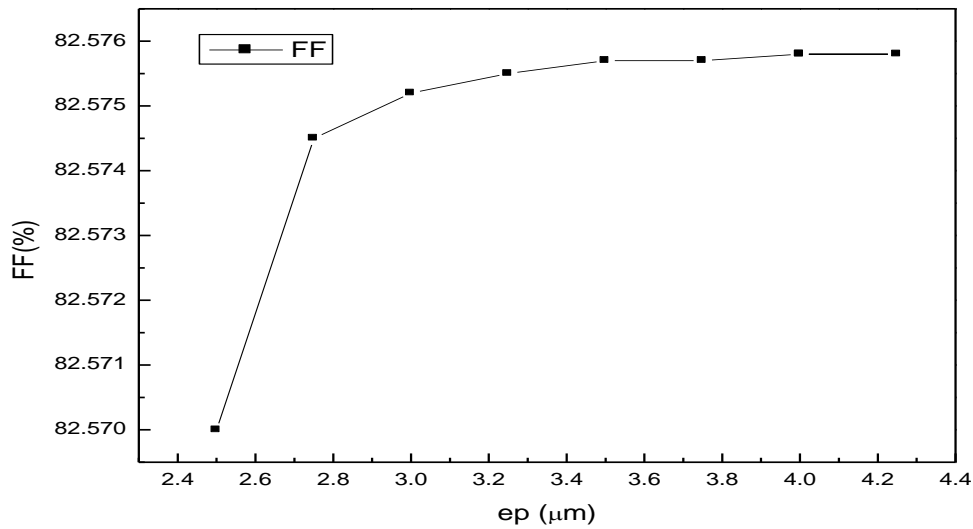


Figure III.10. Variation du facteur de forme en fonction de l'épaisseur de la couche en CIGS.

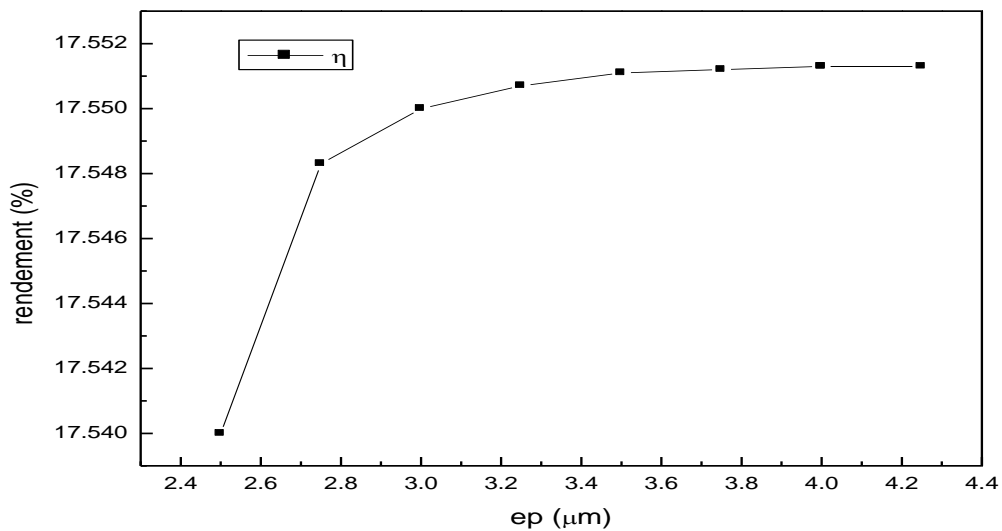


Figure III.11. Variation du rendement en fonction de l'épaisseur de la couche en CIGS.

A partir des résultats trouvés par la simulation que nous les représentons dans le tableau III.3, nous observons que la densité de courant de court-circuit J_{sc} de la cellule photovoltaïque augmente lorsque l'épaisseur de la couche absorbante en CIGS augmente, puis elle décroît de 25.01 à 24.01 pour une épaisseur supérieure à 4 μm. donc la valeur optimale de la couche absorbante en CIGS est **3.75 μm** où le rendement est fixé à une valeur de **17.5513 %**, qu'il est le plus haut rendement.

Aussi nous remarquons que l'augmentation de l'épaisseur de la couche CIGS n'a pas beaucoup d'influence sur la tension de circuit ouvert V_{co} qu'elle est presque constante.

L'augmentation du rendement de conversion est dû principalement à l'accroissement de l'épaisseur de la couche absorbante de type p en CIGS. Plus l'épaisseur de cette couche augmente, plus de photons ayant des longueurs d'onde plus longues peuvent être collectées dans la couche absorbante [8.6]. Une couche absorbante très mince signifie physiquement que le contact en arrière et la région de déplétion sont très proches, ce qui favorise la capture d'électrons par ce contact. Cette forme de processus de recombinaison est préjudiciable aux performances de la cellule car il affecte V_{co} , J_{cc} et le rendement de conversion [6].

Tableau III.4. Les valeurs optimales d'épaisseur de chaque couche.

CIGS (μm)	CdS (nm)	ZnO (nm)
3.75	10	25

Tableau III.5. Les performances de la cellule pour les valeurs optimales d'épaisseur de chaque couche.

J_{sc} ($\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$)	V_{cc} (V)	η (%)	FF (%)
25.01	0.85	17.55	82.58

III.4.2. Effet du dopage de chaque couche sur les paramètres de la cellule photovoltaïque

Pour étudier l'influence de la concentration de dopage de chaque couche sur les paramètres de la cellule solaire, nous fixons l'épaisseur de la couche : ZnO en **25 nm**, CdS en **10 nm** et CIGS en **3.75 μm** .

III.4.2.1. Effet du dopage de la couche en ZnO

Nous varions la concentration de dopage N_d de la couche ZnO de 10^{15} à 10^{20}cm^{-3} avec la concentration de dopage N_d de la couche CdS est 10^{18}cm^{-3} et la concentration de dopage N_a de la couche CIGS est 10^{18}cm^{-3} .

Le tableau III.6. l'effet de dopages de la couche ZnO sur les performances de la cellule photovoltaïque.

Dopage de la couche ZnO (cm^{-3})	Jsc (mA/cm^2)	Vco (V)	η (%)	FF (%)
10^{15}	27.37	0.850	19.03	81.52
10^{16}	27.39	0.850	19.33	82.78
10^{17}	27.41	0.850	19.48	83.37
10^{18}	27.49	0.850	19.54	83.37
10^{19}	27.54	0.850	19.54	83.25
10^{20}	27.55	0.850	19.53	83.17

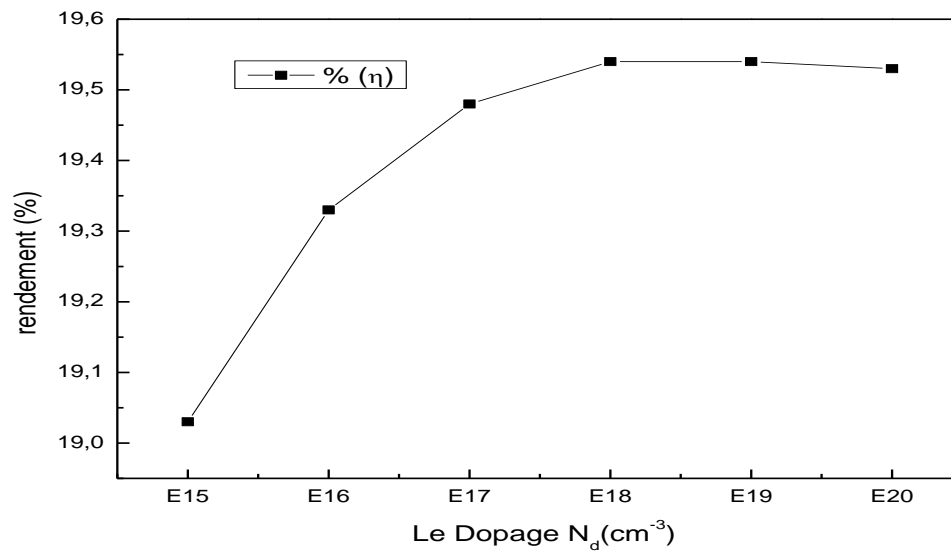


Figure III.12. Variation du rendement en fonction de dopage de la couche en ZnO

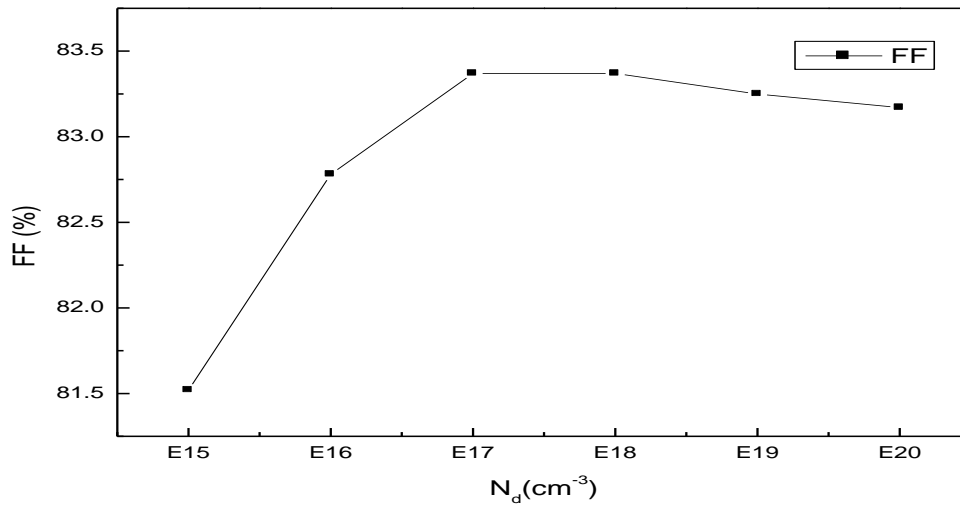


Figure III.13. Variation du facteur de forme en fonction de dopage de la couche en ZnO.

L'effet de la concentration du dopage de la couche ZnO illustré dans le tableau (III.4) et les figures (III.12 et III.13). Nous remarquons que l'augmentation de l'épaisseur de la couche en ZnO influe sur la densité de court-circuit J_{sc} , le rendement et le facteur de forme mais avec des petites variations, où le J_{sc} , le rendement η et le facteur de forme FF augmentent avec l'augmentation de dopage de la couche ZnO.

La tension de circuit ouvert V_{co} reste constante. Généralement l'augmentation de dopage de ZnO n'a pas une grande influence sur les performances de la cellule solaire (ZnO/CdS/CIGS).

III.4.2.2. Effet du dopage de la couche en CdS

Nous avons varié les valeurs de la concentration du dopage N_d de la couche en CdS de $1.1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ à $1.1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ tandis que la concentration du dopage N_d du ZnO est de 10^{18} cm^{-3} et la concentration du dopage Na du CIGS est de $1.1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. Les résultats sont résumés dans le tableau (III.7).

Le tableau III.7. l'effet de dopages de la couche CdS sur les performances de la cellule photovoltaïque.

Dopage de la couche CdS (cm^{-3})	Jsc (mA/cm^2)	Vco (V)	η (%)	FF (%)
1.1×10^{15}	27.25	0.860	13.74	58.58
1.1×10^{16}	27.25	0.860	13.86	59.08
1.1×10^{17}	27.28	0.860	14.95	63.75
1.1×10^{18}	27.50	0.850	19.54	83.37
1.1×10^{19}	27.50	0.850	19.54	83.37
1.1×10^{20}	27.24	0.860	13.72	58.52

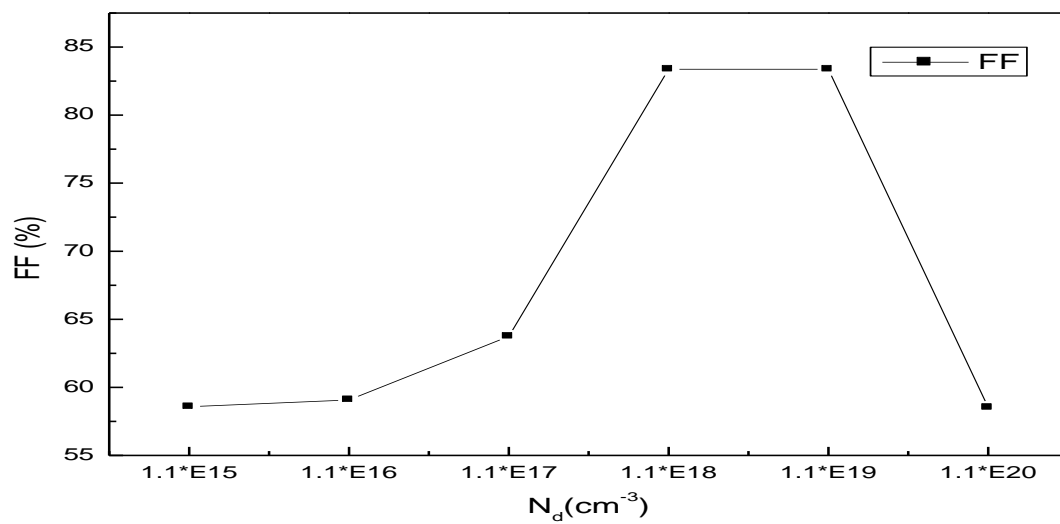


Figure III.14. variation du factor de forme en fonction de dopage de la couche en CdS.

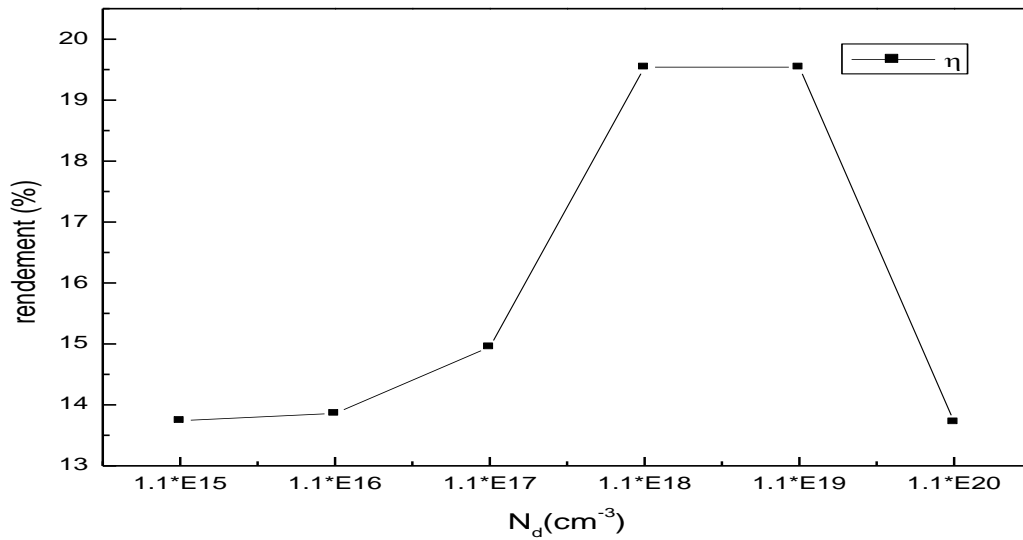


Figure III.15. Variation du rendement en fonction de dopage de la couche en CdS.

Nous remarquons que l'augmentation de la concentration de dopage N_d du couche CdS influe beaucoup plus sur le courant de court-circuit J_{sc} et le facteur de forme FF, où le J_{sc} et le FF croît avec l'augmentation de N_d

D'après les résultats trouvés on peut dire que la valeur optimale de dopage N_d de CdS est $1.1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ pour un rendement plus haut de 19.54 %

III.4.2.3. Effet du dopage de la couche en CIGS

Nous représentons les résultats de la simulation de l'effet du dopage de la couche en CIGS sur les paramètres de la cellule photovoltaïque dans le tableau III.8, pour des valeurs de la concentration du dopage dans la gamme entre 1.1×10^{15} et 10^{18} cm^{-3} , avec des dopages N_d des couches CdS et ZnO sont respectivement 1.1×10^{18} et 10^{18} cm^{-3} .

Tableau III.8. l'effet de dopages de la couche CIGS sur les performances de la cellule photovoltaïque.

Dopage de la couche CIGS (cm^{-3})	Jsc (mA/cm^2)	Vco (V)	η (%)	FF (%)
1.1×10^{15}	30.58	0.68	16.66	79.96
1.1×10^{16}	30.17	0.73	18.00	81.25
1.1×10^{17}	28.87	0.79	18.75	81.89
1.1×10^{18}	27.50	0.85	19.55	83.37
1.1×10^{19}	26.58	0.92	18.19	74.49
1.1×10^{20}	7.93	0.94	0.37	23.78

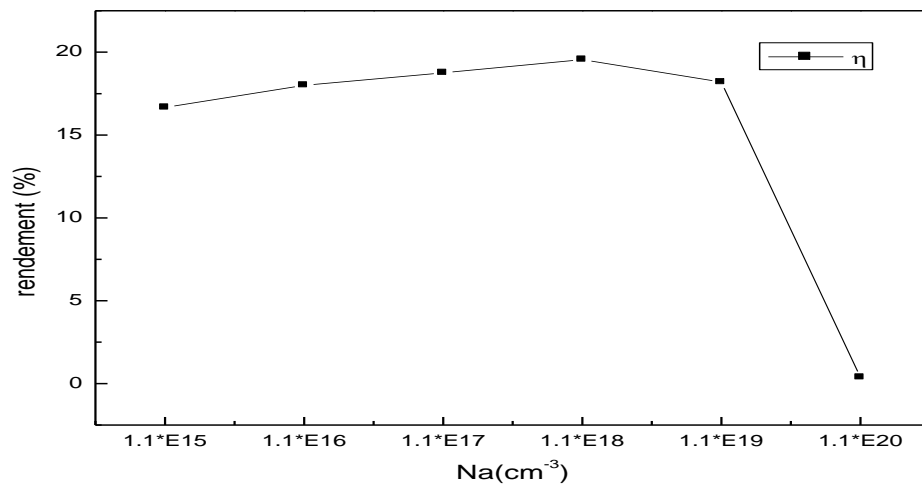


Figure III.16. Variation du factor de forme en fonction de dopage de la couche en CIGS.

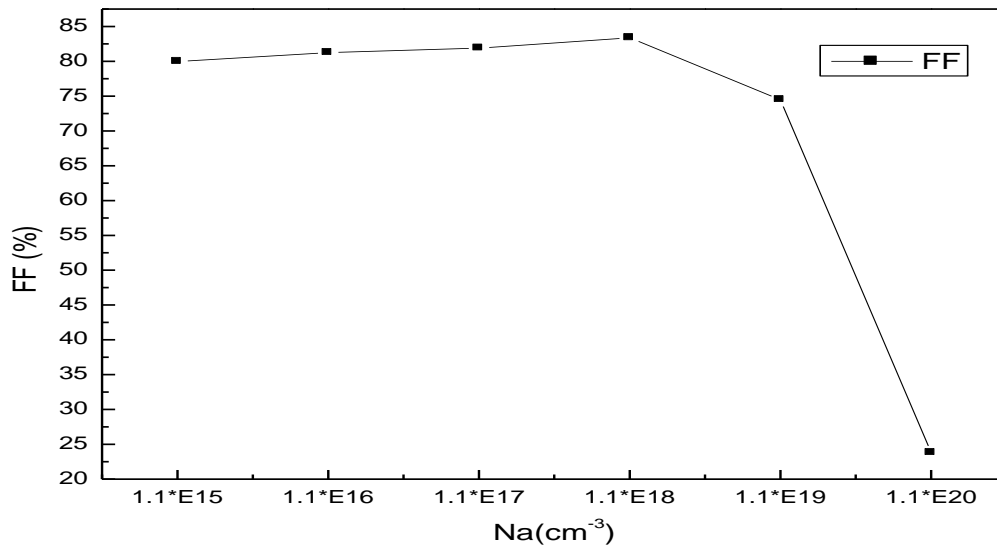


Figure III.17. Variation du rendement en fonction de dopage de la couche en CIGS,

A partir ces résultats nous observons que l'augmentation de rendement due particulièrement avec l'augmentation de la tension de circuit ouvert V_{co} , où le maximum de rendement est 19.55 % correspondant une concentration de dopage N_a de la couche absorbante en CIGS de $1.1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. D'après le tableau III.7, il y'a une chute rapide de la densité du courant de court-circuit J_{sc} avec l'augmentation du dopage de la couche en CIGS. Ceci est dû à l'augmentation du taux de recombinaison dans la couche en CIGS avec le dopage.

Tableau III.9. Valeurs des dopages optimales de chaque couche.

N_a (CIGS) (cm ⁻³)	N_d (CdS) (cm ⁻³)	N_d (ZnO) (cm ⁻³)
1.1×10^8	1.1×10^8	1×10^8

Tableau III.10. Les performances de la cellule pour les valeurs optimales.

J_{sc} (A.cm ⁻²)	V_{cc} (V)	η (%)	FF (%)
27.50	0.85	19.55	83.37

III.5. l'effet de la température sur les paramètres de la cellule photovoltaïque

La conversion photovoltaïque est une application énergétique fortement dépendante de la température. La température est un paramètre très important dans le comportement des cellules solaires puisqu'elles sont exposées au rayonnement solaire.

Nous avons varié la température dans la gamme 260 à 380 °K et nous avons observé l'influence de la variation de température sur les performances de la cellule solaire, que on va les présenter dans le tableau (III.11).

Tableau III.11. Les variations des performances de la cellule solaire pour des différentes valeurs de la température.

La température (°K)	Jsc (mA/cm ²)	Vco (V)	η (%)	FF (%)
260	27.4	0.91	21.28	85.31
270	27.43	0.9	20.85	84.78
275	27.44	0.89	20.63	84.61
280	27.45	0.88	20.40	84.26
290	27.47	0.87	19.95	83.77
300	27.50	0.85	19.54	83.37
310	27.52	0.84	19.11	82.78
320	27.54	0.82	18.64	82.32
330	27.56	0.81	18.22	81.76
340	27.58	0.79	17.76	81.09
350	27.6	0.78	17.35	80.54
360	27.62	0.76	16.92	80.11
370	27.64	0.75	16.48	79.53
380	27.65	0.74	16.03	78.78
390	27.67	0.72	15.61	78.17

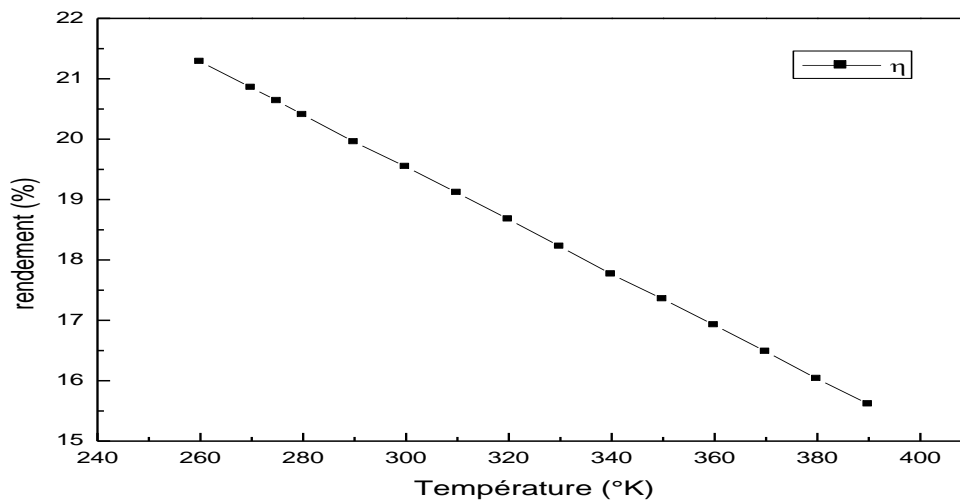


Figure III.18. Variation du rendement en fonction de la température

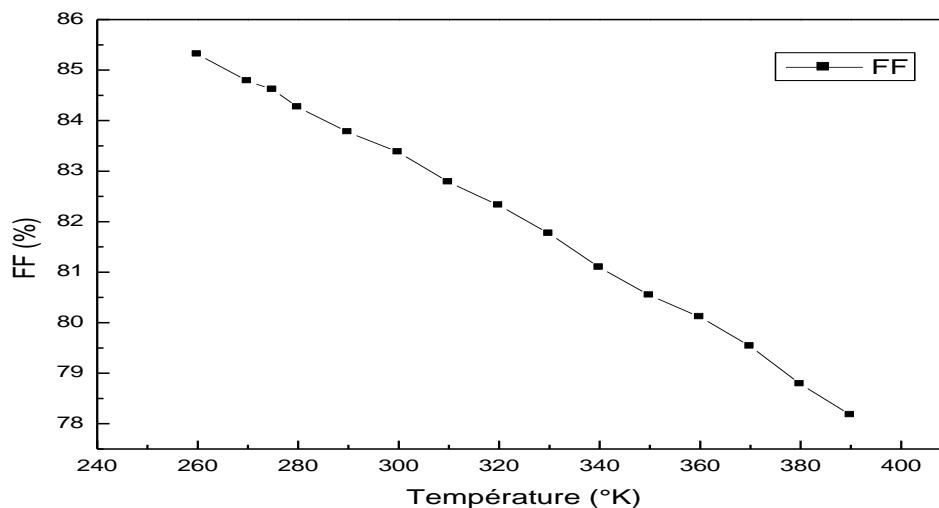


Figure III.19 : Variation du facteur de forme en fonction de la température.

L'évolution avec la température de la densité de courant de court-circuit (I_{cc}), de la tension en circuit ouvert (V_{co}), le rendement de la conversion photovoltaïque (η) et le facteur de forme (FF) est montré dans Le tableau (III.11).

L'effet principal de la température sur les cellules solaires résulte de la variation de trois principaux paramètres, qui sont habituellement employés pour caractériser les performances de la cellule solaire, ceux-ci sont : le courant de court-circuit (I_{cc}), la tension de circuit ouvert (V_{co}) et le facteur de forme (FF); Le FF montre habituellement une dépendance inverse avec la température [9].

On observe que l'augmentation de la température provoque une augmentation de la densité de courant du court-circuit (J_{cc}), en même temps on assiste à une diminution nette de la tension en circuit ouvert (V_{co}).

La Figure III.18 illustre l'allure du rendement de la conversion PV η en fonction de la température, nous constatons que la valeur maximum de η est au-dessous de la température de 260 °K. Dans notre gamme de température 260-390 °K; La variation de FF avec la température pour les cellules solaires au CIGS est illustrée dans la Figure III.19 . le FF diminue avec l'augmentation de la température. la diminution de FF et le rendement η de la conversion PV est presque linéaire avec la température.

III.6. Les résultats de la simulation de la cellule hétérojonction (ZnO/CdS/CIGS)

Les paramètres des couches ZnO, CdS et CIGS sont présentés dans le tableau (III.12)

Tableau III.12. Les paramètres électriques des matériaux des couches ZnO, CdS et CIGS

	n-ZnO	n-CdS	p-CIGS
Permittivité	9	10	13.6
Eg (eV)	3.3	2.4	1.27
Affinité (eV)	4.4	4.2	4.5
N_c (cm ⁻³)	2.2×10^{18}	2.2×10^{18}	2.2×10^{18}
N_v (cm ⁻³)	1.8×10^{19}	1.8×10^{19}	1.8×10^{19}
μ_n (cm ² /V/s)	100	100	100
μ_p (cm ² /V/s)	25	25	25
N_d (cm ⁻³)	10^{18}	1.1×10^{18}	0
N_a (cm ⁻³)	0	0	1.1×10^{18}

Après l'exécution de logiciel AMPS-1D, avec les paramètres optimisés de chaque couche sont : CIGS ($3.75 \mu\text{m}$) a dopage N_a de $1.1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, CdS ($0.01 \mu\text{m}$) a dopage N_d de 1.1×10^{18} et ZnO (25 nm) a dopage N_d de 10^{18} cm^{-3} ; nous avons obtenu les résultats représenté dans la figure III.5, que présente les caractéristique densité de courant-tension ($J-V$) de la cellule solaire hétérojonction (n-ZnO/n-CdS/n-CIGS).

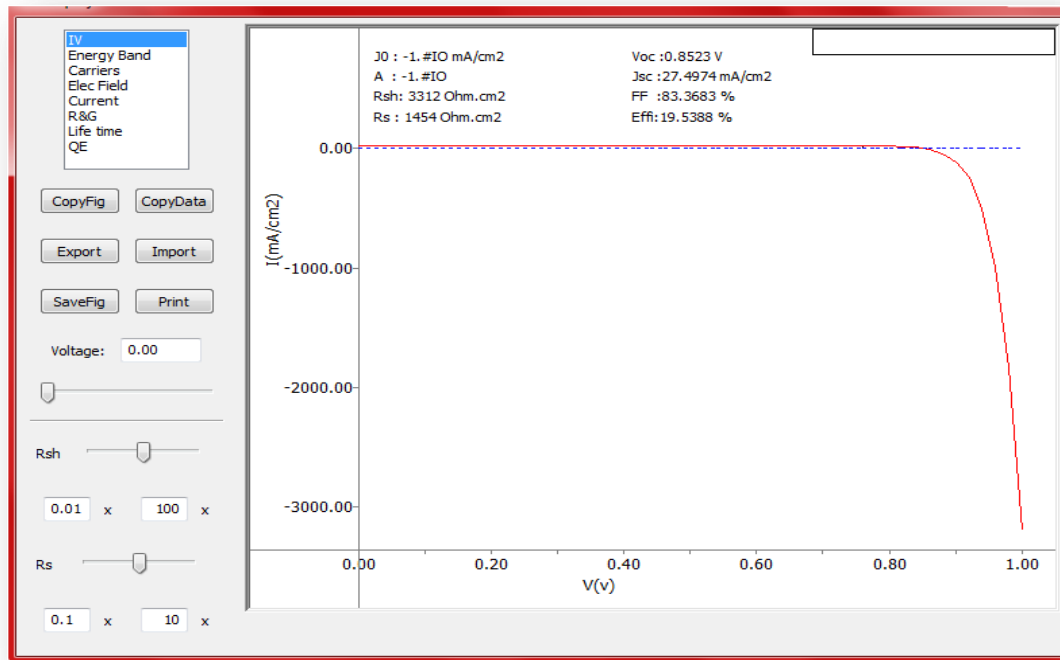


Figure III.20 : L'interface des résultats pour les caractéristiques $J-V$ sous l'éclairement AM1.5.

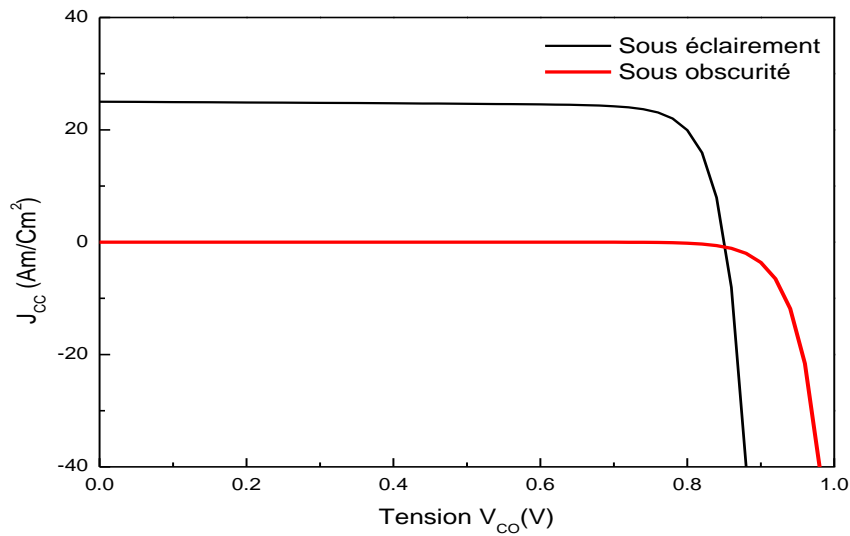


Figure III.21 : les caractéristiques $J-V$ à obscurité et sous l'éclairement AM1.5.

Les résultats concernent les caractéristiques ($J-V$) à l'obscurité et sous éclaircissement AM 1.5, les valeurs de la densité de courant de saturation (J_0), du facteur d'idéalité (A), de résistances parallèle (shunt) R_{sh} de la résistances 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 (η).

III.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'effet des différents paramètres sur les caractéristiques $J(V)$ et le rendement de conversion d'une cellule solaire à base de chalcopyrite CIGS ; puis nous avons optimisé les différents paramètres influant directement sur le rendement de conversion photovoltaïque comme l'épaisseur et le dopage pour chaque couche. Ensuite on a simulé et étudié l'effet de la température sur le rendement. On peut conclure que la simulation reste un outil très important pour l'étude, la modélisation et la conception des composants électroniques et optoélectroniques, de même chose pour l'AMPS-1D qui représente un environnement intéressant à l'étude des cellules photovoltaïques et notamment les cellules en couches minces. Donc, on peut dire que nos résultats obtenus sont accordables au comportement ordinaire des cellules photovoltaïques à base de CIGS.

Références bibliographiques

- [1] S.J. Fonash et al., A manual for AMPS-1D for Windows 95/ NT; A one-dimensional devices simulation program for the analysis of microelectronic and photonic structures, Pennsylvania State University, 1997. See also <http://www.ampsmodeling.org>.
- [2] Djemai Mounira, « Effet de la température sur les caractéristiques électriques d'une cellule solaire à base de Cu(In,Ga)Se₂ (CIGS) », Mémoire de fin d'étude en Master, Université Med Khider Biskra, 2014.
- [3] Yiming Liu , Daniel Heinzl, Angus Rockett : «A REVISED VERSION OF THE AMPS SIMULATION CODE», Bourses d'Etat, Université de Nankai, à Tianjin, Chine et l'Université de l'Illinois, Urbana, Etats-Unis.
- [4] Djeghbala Afaf, «Etude par simulation numérique de l'effet du Dopage et des épaisseurs sur les Caractéristiques électriques d'une Cellule solaire (p/n) en Silicium », Mémoire de fin d'étude en Master, Université Med Khider Biskra, 2013.
- [5] BOURAIYOU Assia, « Elaboration et Caractérisation des couches minces CuInSe₂ par Electrodeposition », Thèse de doctorat en physique énergétique, université de MENTOURI-Constantine, 2009.
- [6] Amar Hichem, « Propriétés électriques de cellule solaire à base de Sélénure de Cuivre Indium Galium CuIn(1-x)Ga_xSe₂ (CIGS) », Mémoire de Magister en : Electronique, Université Mohamed Khider – Biskra.
- [7] Puvaneswaran Chelvanathan, Mohammad Istiaque Hossain, Nowshad Amin, Current Applied Physics 10 (2010) S387–S391.
- [8] Jiyon Song, T. J. Anderson, and Sheng S.Li, Photovoltaic Specialists Conference, 2008. PVSC '08. 33rd IEEE.
- [9] BENSALÉM SALAHEDDINE, « l'effet de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires », mémoire de magister en physique ,université de FERHAT ABBAS 6 Setif,2011.
- [10] T. Nakada, Y. Hirabayashi, T. Tokado, D. Ohmori, and T. Mise, « Novel device structure for Cu(In,Ga)Se₂ thin film solar cells using transparent conducting oxide back and front contacts » Solar Energy, vol. 77, no. 6, pp. 739–747, décembre 2004.

[11] S. Ishizuka, K. Sakurai, A. Yamada, K. Matsubara, P. Fons, K. Iwata, S. Nakamura, Y. Kimura, T. Baba, H. Nakanishi, and others, « Fabrication of wide-gap Cu(In_{1-x}Ga_x)Se₂ thin film solar cells: a study on the correlation of cell performance with highly resistive i-ZnO layer thickness», Solar energy materials and solar cells, vol. 87, no. 1, pp. 541–548, 2005.

[12] S. Ishizuka, K. Sakurai, A. Yamada, K. Matsubara, P. Fons, K. Iwata, S. Nakamura, Y. Kimura, T. Baba, H. Nakanishi, and others, « Fabrication of wide-gap Cu(In_{1-x}Ga_x)Se₂ thin film solar cells: a study on the correlation of cell performance with highly resistive i-ZnO layer thickness», Solar energy materials and solar cells, vol. 87, no. 1, pp. 541–548, 2005.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce mémoire nous avons fait une étude sur une cellule photovoltaïque en couche mince à base de chalcopyrite de type I-III-VI₂ et notamment le CIGS, on utilise l'environnement de simulation numérique AMPS-1D.

On a commencé par une présentation sur les matériaux chalcopyrite, leurs types et leurs différentes propriétés structurales et optoélectroniques. Ensuite nous rappelons une généralité sur les cellules photovoltaïques et les couches minces. Ensuite on a fait la simulation.

La simulation numérique de la cellule solaire nous a permis de calculer les paramètres photovoltaïques qui caractérisent la cellule solaire, qui sont : La densité du courant de court-circuit J_{cc} (mA/cm²), la tension en circuit ouvert V_{co} (V), le facteur de forme FF et le rendement de conversion η . Donc, on va extraire les valeurs optimales des épaisseurs et des dopages de chaque couche, qui correspondent aux bonnes performances pour améliorer l'efficacité de la cellule solaire. Pour cela, nous avons effectué une optimisation des grandeurs (épaisseur, dopage) des couches CIGS de type p, CdS de type n et de la couche fenêtre en ZnO, par la simulation.

On peut résumer les résultats de l'étude de simulation comme suit :

- ✓ L'augmentation de l'épaisseur de la couche en ZnO diminue le rendement de conversion de la cellule η .
- ✓ L'augmentation de l'épaisseur de la couche de type n en CdS diminue aussi le rendement de la cellule solaire.
- ✓ L'augmentation de l'épaisseur de la couche absorbante de type p en CIGS entraîne une augmentation dans le rendement η et le facteur de forme FF avec des petites valeurs, où la tension de circuit ouvert V_{co} est presque constante.
- ✓ L'augmentation du dopage de la couche en ZnO due à l'augmentation du rendement et le facteur de forme FF.
- ✓ L'augmentation du dopage de la couche en CdS de 10^{15} à 10^{19} cm⁻³ due à l'augmentation du rendement et le facteur de forme FF.
- ✓ le rendement η et le facteur de forme FF croissent pour une variation de 10^{15} à 10^{18} de la concentration de dopage de la couche absorbante en CIGS, puis ils décroissent pour un dopage plus 10^{19} cm⁻³.

Ensuite, nous avons étudié l'effet de température sur les paramètres de la cellule photovoltaïque, où on peut résumer l'effet de température comme suit :

. Le facteur de forme FF et le rendement η diminuent avec l'augmentation de la température, tel que la valeur maximum de η est correspondant presque la température ambiante. Dans notre gamme de température, la diminution de FF et le rendement η de la conversion photovoltaïque est presque linéaire avec la température.