



République Algérienne Démocratique et Populaire



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Abou Baker Belkaid Tlemcen

Faculté des Sciences

Département de Physique

MEMOIRE

Pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

En Physique Energétique

*Etude des performances d'une cellule solaire de type
 $Cu(In,Ga)Se_2$ (CIGS)*

Présenté par

Beghdadi souaad

Devant le Jury Composé par

Président: Benyoucef . B Professeur Université de Tlemcen

Encadreur: Fardeheb. A M.conférences Université de Tlemcen

Examineur: Khedim. S M.conférences Université de Tlemcen

Examineur: Merad.L M.conférences Université de Tlemcen

Année universitaire : 2015/2016



Remerciements



*Avant tout, nous remercions Allah le tout puissant
qui nous a donné la force pour réaliser ce travail
que nous souhaitons qu'il atteindra nos aspirations,
si Dieu le veut.*

*Je tiens à exprimer mes remerciements les plus sincères
à mon encadreur Madame Fardeheb Mammeri Amina d'avoir bien
voulus m'encadrer.*

*Je remercie tous ceux qui de près ou de loin mon ont
aidés à la réalisation de ce travail.*





Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Mes chers parents

Mon marié : Bouhnnia Hakim

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

A Tous mes amies et a tous la promotion :2016



Résumé :

Dans le contexte global de la diversification de l'utilisation des ressources naturelles, le recours aux énergies renouvelables et en particulier le solaire photovoltaïque se fait de plus en plus. A ce titre, le développement d'une nouvelle génération de cellules photovoltaïques à base de Cu(In,Ga)Se_2 semble prometteur. En effet, le rendement de ces cellules a dépassé les 20% ces dernières années.

Dans ce travail de modélisation et de simulation, nous utilisons le logiciel Scaps 1D, pour étudier les performances des cellules solaires à base de Cu(In,Ga)Se_2 (CIGS). Nous évaluons dans un premier temps, le courant de court circuit I_{cc} , la tension en circuit ouvert V_{co} , la puissance maximale PM, le facteur de forme FF et le rendement électrique η pour une structure typique de ZnO/CdS/CIGS. Par la suite nous nous intéressons au dopage et à l'épaisseur des trois couches (ZnO, CdS et CIGS) pour étudier l'influence de celles-ci sur le rendement électrique de la structure.

Mots Clés: Cellule solaire, photovoltaïque, couches minces, Cu(In,Ga)Se_2 , simulation, Scaps .

Sommaire

Introduction Générale	1
------------------------------------	---

Chapitre I : Energie photovoltaïque

I.1.Introduction	5
I.2. Energie photovoltaïque	6
I.2.1. Le potentiel : énergie solaire disponible	6
I.3. Principe de la conversion photovoltaïque	7
I.3.1. Le rayonnement solaire	7
I.3.2. Conversion du rayonnement	10
I.3.3. Applications	11
I.3.4. Principe	13
I.4.Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	16
I.5. Conclusion	

Chapitre II. Les Cellules Photovoltaïques à base de Couches Minces

II-1.Introduction	26
II.2.Les couches minces.	26
II.2.1.Définition d'une couche mince	26
II.2.2. Caractéristiques des couches minces	27
II.3.Les différents filières photovoltaïques	28
II.3.1. La filière à base de Silicium Cristallin	28
II.3.2 Les cellules multi-jonctions à haut rendement	30
II.3.3.Les cellules organiques	31

II.3.4. Technologie couches mince	33
II.3.5. Silicium couche mince	34
II.3.6. Les filières non silicium	36
II.3.7. Les multi-jonctions en couche mince	39
II.4. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque	41
II.5. Les applications de l'énergie photovoltaïque	42

II.6. Conclusion

Chapitre III : Cellules solaires à base de Cu (In,Ga)Se₂(CIGS)

III.1.Introduction	44
III.2.Structure d'une cellule CIGS	44
III.2.1. Le substrat	45
III.2.3. Le contact métallique arrière	45
III.2.4. L'absorbeur	45
III.2.5. La couche tampon	45
III.2.6. La couche fenêtre	46
III.3. Propriétés du CIGS	47
III.3.1. Structure cristallin	47
III.3.2. Propriétés électroniques	48
➤ Structure de bande.	48
➤ Dopage.	50
➤ Zones de recombinaisons.	51
III.3.3. Propriétés optiques et génération de courant	53

Chapitre IV. Modélisation et Simulation de Cellules Solaires à base de CIGS

IV.1 Introduction	55
IV.2- Présentation du logiciel de simulation SCAPS	56
IV.2.2- Principe de la simulation numérique	56
IV.3- Simulation en 1D du sous SCAPS	56
IV.3.1- présentation de la cellule étudiée	58
IV.3.2- Les paramètre du dispositif étudié	58
IV.4- Résultats de la simulation	59
IV.4.1- Introduction	59
IV.4.2-Effet des couches CdS, CIGS et ZnO	59
a) Effet de la couche tampon CdS	59
➤ Influence du dopage de la couche tampon CdS	59
➤ Influence de l'épaisseur de la couche tampon CdS (X_{CdS})	63
b) Effet de la couche d'absorbeur CIGS	66
➤ Influence du dopage de l'absorbeur CIGS ($N_{A/CIGS}$)	66
➤ Influence de l'épaisseur de l'absorbeur CIGS (X_{CIGS})	68
c) Effet de la couche fenêtre ZnO	70
➤ Influence du dopage de la couche ZnO ($N_{D/ZnO}$)	70
➤ Influence de l'épaisseur de la couche ZnO (X_{ZnO})	72
IV.4.3 - Résultats de référence.	75
IV-5 Conclusion	77
Conclusion Générale.	79
Références Bibliographiques	81

Liste des Symboles et Abréviations

Symboles	Signification	Unité
J	La densité de courant	mA/cm ²
V	Le voltage	volt
QE	Le rendement quantique	%
λ	la longueur d'onde de la lumière absorbée par la pile solaire	μm
J_{cc}	La densité de courant de court circuit	mA/cm ²
V_{co}	La tension de circuit ouvert	volt
FF	Le facteur de remplissage	%
E	Energie	J ou eV
h	Constante de Planck (6.62×10^{-34} J.s)	J.s
ν	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
m_e^*	Masse effective des électrons	Kg
m_t^*	Masse effective des trous	Kg

τ	Durée de vie des porteurs libres	S
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}
P_{max}	la puissance maximale fournie par la cellule	$Watt/cm^2$
J_m	La densité de courant correspond à la puissance maximale fournie	mA/cm^2
V_m	Tension correspondant à la puissance maximale fournie	V
L	Longueur de diffusion	Cm
E_{ph}	Energie des photons	eV
α	Coefficient d'absorption	cm^{-1}
t	Le temps	S
$\epsilon_r \epsilon_0$	La permittivité du semi-conducteur	$F cm^{-1}$
ψ	Le potentiel électrique	V
ρ	La densité de charge d'espace	$C cm^{-3}$
J_n et J_p	Les densités de courants des électrons et des trous	$A cm^{-2}$

G	Le taux de génération optique	$\text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}$
U_n e U_p	les taux nets de recombinaison des électrons et des trous respectivement.	$\text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}$
$\frac{\partial n}{\partial t}$ et $\frac{\partial p}{\partial t}$	Les taux de variation des densités des électrons et des trous libres avec le temps	$\text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}$
μ_n et μ_p	La mobilité des électrons et des trous respectivement	$\text{Cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
D_p et D_n	La densité des défauts de la couche p, n respectivement	cm^{-3}
$N_{AD}(x)$	La densité du dopage le long de la cellule	cm^{-3}

$I(x)$	Intensité du flux au point x	mA
I_0	I_0 Intensité du flux incident sur une surface	mA
x	La profondeur	Cm
$\phi(x)$	La densité de flux à la profondeur x	photons/c $\text{m}^2 \text{s}$
X_0	La surface	μm
R_{srh}	Le taux de recombinaison Shockley –Read –Hall	$\text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}$
n_i	Concentration intrinsèque de porteurs libres	cm^{-3}
R_s	Le taux net de la recombinaison Surface	$\text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}$
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	-
AM 1.5	Spectre de la lumière solaire	-
Mo	Molybdénium	-
Al	Aluminium	-
AMPS-AD	Logiciel de simulation [Analysis of Microelectronic and Photonic Structures-One Dimensional (analyse unidimensionnelle des structures micro-électroniques et photoniques)]	-
AM	La masse d'air	-

Introduction Générale

L'énergie est l'un des moteurs de développement des sociétés, il est aussi, le pilier de l'économie moderne. Elle est l'étincelle qui permet l'accomplissement de toute activité humaine. Ses sources se sont diversifiées au cours du temps afin de satisfaire les besoins toujours accrus de l'industrie et des consommateurs.

Le saut démographique mondial (7 milliards d'habitants en juin 2011, plus de 9 milliards à l'horizon 2050), couplé au fort développement des pays en voie de développement va se traduire par une augmentation de la consommation d'énergie mondiale estimée au double de la demande actuelle si les politiques en matière d'économies d'énergies et d'efficacité énergétique ne sont pas plus volontaristes.

Aujourd'hui, plus de 85% d'énergie utilisée dans le monde provient de gisement de combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz) ou d'uranium, constitués au fil des âges et de l'évolution géologique. Ces énergies sont considérées comme des énergies de stock. En d'autres termes, elles sont épuisables. Actuellement d'utilisations largement majoritaires, les ressources fossiles posent plusieurs problèmes : épuisement des réserves naturelles pour des applications généralement non recyclables (combustibles et souvent mauvais rendements) au dépens d'applications plus intéressantes, tensions géopolitiques qu'elles génèrent, impacts économiques et environnementaux tout comme la participation au réchauffement climatique avec des émissions de gaz à effet de serre (40 milliards de tonnes par an toujours en croissance pour le seul CO₂).

En outre, la limitation de la quantité de ces réserves, la crise successive du pétrole en 1973 et l'accroissement de la demande d'énergie dans tous les pays du monde ont conduit les pays industrialisés à chercher et à développer de nouvelles sources d'approvisionnement. Par conséquent, la filière nucléaire est apparue comme une formidable alternative aux énergies fossiles. Mais son choix à grande échelle peut amener des conséquences graves, voire désastreuses surtout à l'environnement. Elle est productrice de déchets radioactifs qui posent problème, en effet, nous ne savons pas les recycler, et aussi les risques d'accidents nucléaires.

Introduction Générale

Les accidents majeurs de Tchernobyl et celui de Fukushima sont venus entacher l'image de cette ressource d'énergie. De plus, comme les énergies fossiles, le nucléaire est une énergie de stock, avec des gisements limités. Donc un développement de la filière du nucléaire ne pourra pas reposer sur le modèle actuel.

Il devra répondre aux exigences fortes de sécurité, de compétitivité énergétique, de meilleur rendement et d'un développement durable passant par une meilleure gestion des déchets radioactifs et des réserves naturelles.

Face à la demande sans cesse croissante d'énergie, il faudrait désormais réduire la part des énergies conventionnelles au profit de l'efficacité énergétique, des nouvelles technologies énergétiques, plus propres, moins dangereuses et surtout durables.

Une des solutions les plus prometteuses pour le futur énergétique de l'humanité, est le développement d'une autre forme d'énergie dite « énergie renouvelable ». Ces énergies renouvelables ont toutes l'immense avantage d'être d'origines naturelles, inépuisables et non polluantes puisqu'elles n'émettent pas de gaz favorisant l'effet de serre.

Dans le contexte global de la diversification de l'utilisation des ressources naturelles, le recours aux énergies renouvelables et en particulier le solaire photovoltaïque se fait de plus en plus fort. Plusieurs technologies sont actuellement développées pour la réalisation de cellules photovoltaïques. Les degrés de maturité, de performance et de durée de vie sont très différents d'une technologie à l'autre. Les efforts de recherche et développement actuels entraînent des progrès rapides, faisant de la filière photovoltaïque une filière en constante évolution.

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

Introduction Générale

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

A ce titre, le développement de cellules photovoltaïques de deuxième génération à base de couches minces Cu(In,Ga)Se_2 ou CIGS semble prometteur. En effet, le rendement de ces cellules a dépassé les 20% ces dernières années. Récemment, beaucoup de laboratoires de recherche à travers le monde travaillent sur les semi-conductrices chalcopyrites pour comprendre les propriétés électroniques, structurales, élastiques, mécaniques et optiques de ces matériaux. Cet engouement à ces matériaux est dû à leurs propriétés optiques et électroniques intéressantes et à leurs diverses applications pratiques dans les cellules solaires, les détecteurs photovoltaïques et l'électronique. Ils servent de base surtout pour la cellule solaire ainsi que les modules et capteurs photovoltaïques. La recherche dans ce domaine a toujours comme but majeur d'améliorer le rendement électrique et quantique de ces cellules photovoltaïques à base de couches minces.

Notre but principal dans ce travail est l'identification des verrous technologiques qui se posent actuellement à la fabrication de cellules photovoltaïques en couches minces à base de matériaux chalcopyrites CIGS en se focalisant surtout sur l'amélioration du rendement de conversion de ces dispositifs. Pour cela, une étude de simulation et de conception d'une structure spécifique de cellule solaire à base de CIGS a été menée dans le but d'obtenir un rendement de conversion électrique optimal. Dans ce travail de modélisation et de simulation, nous utilisons le logiciel Scaps-1D, pour étudier les performances des cellules solaires à base de Cu(In,Ga)Se_2 (CIGS).

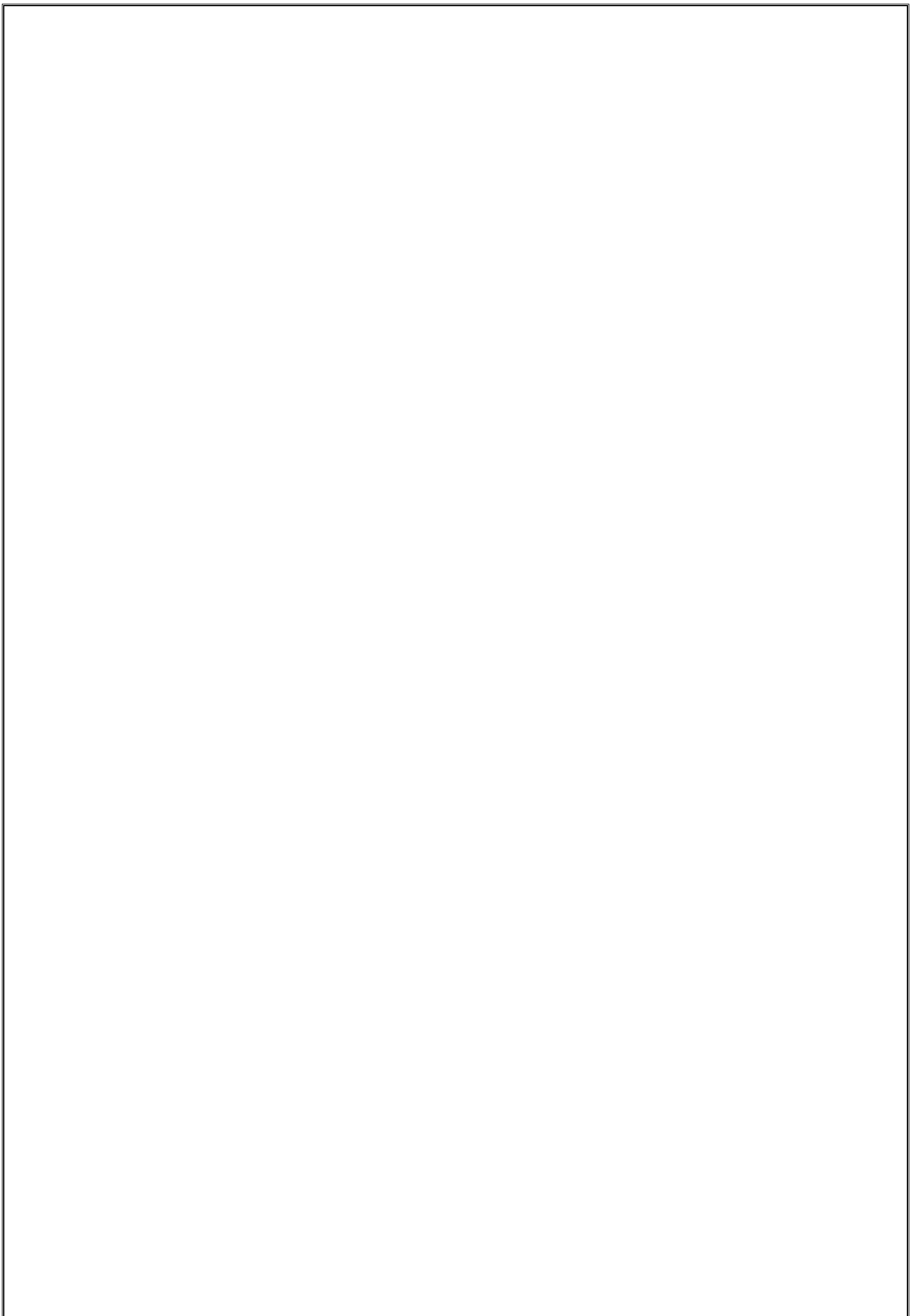
Introduction Générale

Notre mémoire comporte trois chapitres. Nous avons commencé dans le premier chapitre par présenter succinctement l'énergie photovoltaïque et le principe de la conversion photovoltaïque. Nous avons aussi présenté les différentes filières photovoltaïques. Le deuxième chapitre nous avons parlé de structure et propriétés de cellules solaires à base de Cu (In,Ga)Se₂ (CIGS).

Dans le dernier chapitre nous avons présenté la modélisation et la simulation d'une structure à hétérojonction ZnO/CdS/CIGS sous logiciel Scaps. Dans cette partie du travail nous avons utilisé l'ogiciel de simulation numérique des cellules solaires unidimensionnelles Scaps dans le but d'optimiser le rendement électrique d'une conception spécifique d'une structure à hétérojonction ZnO/CdS/CIGS. Nous avons par la même occasion, déterminé l'influence des paramètres physiques et technologiques, tels que le dopage et l'épaisseur, sur les performances du dispositif. Le travail a été terminé par une conclusion générale.

CHAPITRE I :

Energie photovoltaïque



I.1.Introduction

Dans ce chapitre nous présentons l'énergie photovoltaïque, le principe de base de fonctionnement d'une cellule solaire, l'exploitation de la caractéristique courant tension de la cellule pour calculer ses différents paramètres physiques, sa réponse spectrale ainsi que les différentes filières photovoltaïques commercialisées.

La technologie photovoltaïque la plus utilisée depuis la création des premières cellules correspond à la filière silicium de type cristallin qui représente actuellement 90% de la production mondiale pour les applications terrestres. Ceci peut s'expliquer par le fait que l'industrie photovoltaïque profite régulièrement du développement de l'industrie des semi-conducteurs qui est capable de fournir une matière première d'excellente qualité pour les panneaux solaires ainsi que des processus de fabrication totalement maîtrisés. Selon la qualité du silicium, nous rappelons les performances. Nous présentons ensuite le principe de fabrication des cellules multi-jonctions à haut rendement dont le développement a été motivé en priorité par les applications spatiales où les performances de la cellule priment sur les coûts de fabrication. Nous parlons ensuite d'une des nouvelles générations de cellules solaires, qui utilise de nouveaux matériaux de type organique. Ces nouveaux composés, en particulier les polymères, pourraient révolutionner le marché du PV grâce à leur faible coût de fabrication et leur facilité d'utilisation (flexibilité, légèreté). La recherche dans ce domaine est extrêmement active depuis plusieurs années et les avancées sont rapides. Nous abordons enfin le large domaine des cellules PV dites couche mince (« Thin-Film ») qui constitue ce que certains appellent les cellules de seconde génération car elles font historiquement suite aux cellules en silicium cristallin. Leur principal atout vient de la faible quantité de matériaux nécessaire à la fabrication d'une cellule comparativement aux cellules classiques (première génération). Les cellules couche mince les plus développées utilisent comme matériau de base le silicium amorphe, le diSélénure de Cuivre Indium Galium (CIGS), le Tellure de Cadmium CdTe) et on trouve de plus en plus de cellules multi-jonction améliorant d'autant les performances de cette filière.

1.1 Energie photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque désigne l'énergie récupérée par des panneaux solaires pour la transformer en électricité. Les cellules photovoltaïques du panneau solaire produisent du courant continu à partir du rayonnement solaire. Courant qui peut alors être utilisé pour chauffer, éclairer, recharger la batterie d'un appareil... Le principe photovoltaïque des panneaux lumineux est à grande échelle le même que celui utilisé par les calculatrices de poche. A noter que l'effet photovoltaïque a été découvert en 1839 par un français, Antoine Becquerel.

1.1.1 Le potentiel : énergie solaire disponible

La température en surface du Soleil est de 5800K. Le spectre du rayonnement électromagnétique émis par ce dernier est donc à peu près équivalent à celui d'un corps noir à cette même température. L'irradiance de ce rayonnement arrivant sur l'atmosphère terrestre (Total Solar Irradiance, TSI) est de 1366 W/m². En traversant l'atmosphère, une partie du spectre est absorbée par les différents gaz (O₃, H₂O et CO₂ notamment) ou particules présents. Ainsi, l'énergie solaire disponible en surface de la Terre est réduite, et ce en fonction de la distance traversée dans l'atmosphère par le rayonnement. Cette distance, appelée masse d'air, est fonction de l'angle d'incidence θ du rayonnement par rapport au zénith. La masse d'air vaut :

$$AM = \frac{1}{\cos\theta} \quad (1.1)$$

Afin de standardiser les méthodes de mesure, un spectre a été défini comme référence internationale. Il s'agit du spectre AM1.5G (Global), correspondant à une masse d'air de 1.5 et un angle θ de 48.2. Global signifie que le spectre tient compte du rayonnement direct ainsi que du rayonnement diffus. Les spectres extra-terrestres (AM0) et de référence avec masse d'air (AM1.5G) sont comparés dans la figure 1.1.

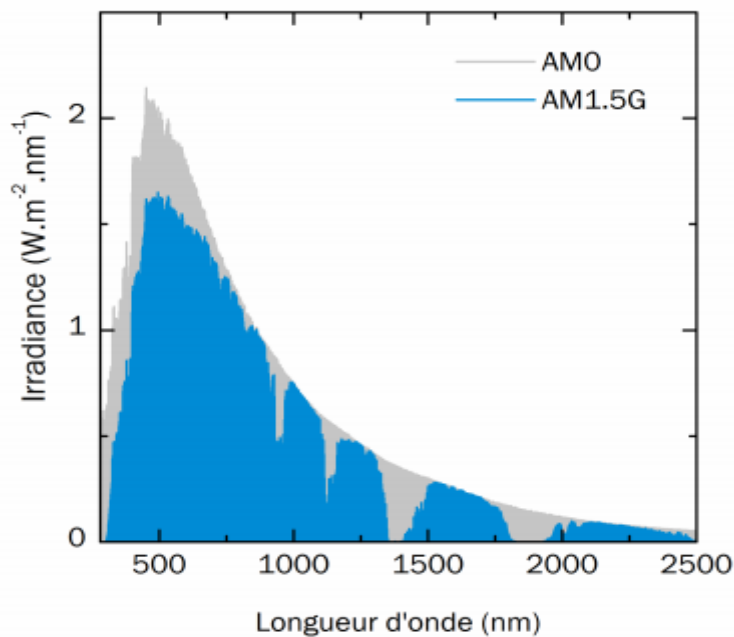


Figure 1.1 : Spectres AM0 (extra-terrestre) et AM1.5G (référence terrestre) du rayonnement solaire. Ainsi, l'irradiance totale exploitable en surface de la Terre est réduite à environ 1000 W/m², sous forme de rayonnements dont la longueur d'onde s'étend de 280 nm à environ 2500 nm. [1]

I.3. Principe de la conversion photovoltaïque:

I.3.2. Le rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire est l'ensemble du rayonnement émis par le soleil. En plus des rayons cosmiques, particules animées d'une vitesse et d'une énergie extrêmement élevées, le soleil émet des ondes électromagnétiques dont le spectre s'étend des ondes radio aux rayons gamma, en passant par la lumière visible.

➤ **Spectre solaire :**

Le spectre solaire est la décomposition du rayonnement solaire en longueurs d'onde ou "couleurs". La lumière solaire est en effet composée de toutes sortes de rayonnement de

couleurs différentes, caractérisées par leur gamme de longueur d'onde. Les photons, grains de lumière qui composent le rayonnement électromagnétique, sont porteurs d'une énergie qui est reliée à leur longueur d'onde par la relation [2]:

$$E = h \nu = \frac{hc}{\lambda} \quad \text{Eq. I.1}$$

Une courbe standard de la répartition spectrale du rayonnement solaire extraterrestre, compilée selon les données recueillies par les satellites. Sa distribution en énergie est répartie comme il est indiqué sur la figure (I.3) [3].

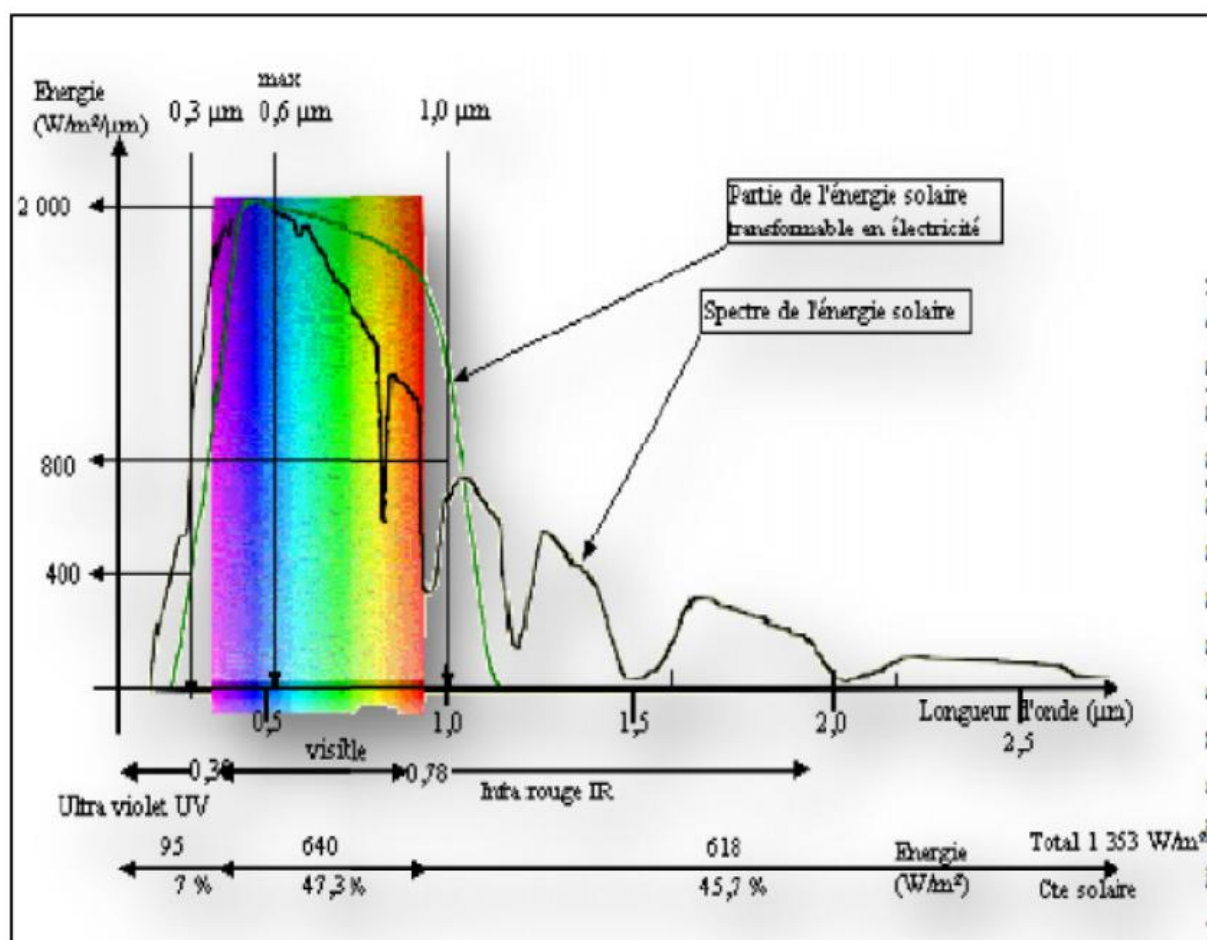


Figure I.2: Spectre solaire [3].

➤ Absorption du rayonnement solaire :

L'optimisation de l'efficacité de la conversion photovoltaïque se base sur le spectre solaire. En traversant les différentes couches de notre atmosphère, certaines longueurs d'onde sont atténuées, voire absorbées par certains composants tels que l'ozone (absorption des UV) ou les vapeurs d'eau (absorption des rayons infrarouges). La répartition du rayonnement solaire est représentée sur la figure (I.4).

Le spectre solaire diffère entre l'espace et la surface du globe terrestre, il diffère également à la surface de la terre en fonction du lieu et de l'heure. On le caractérise d'une façon globale par un coefficient Air Mass, AM ($1/\sin h$) où h correspond à l'angle entre l'horizontale et le rayonnement solaire. [4]

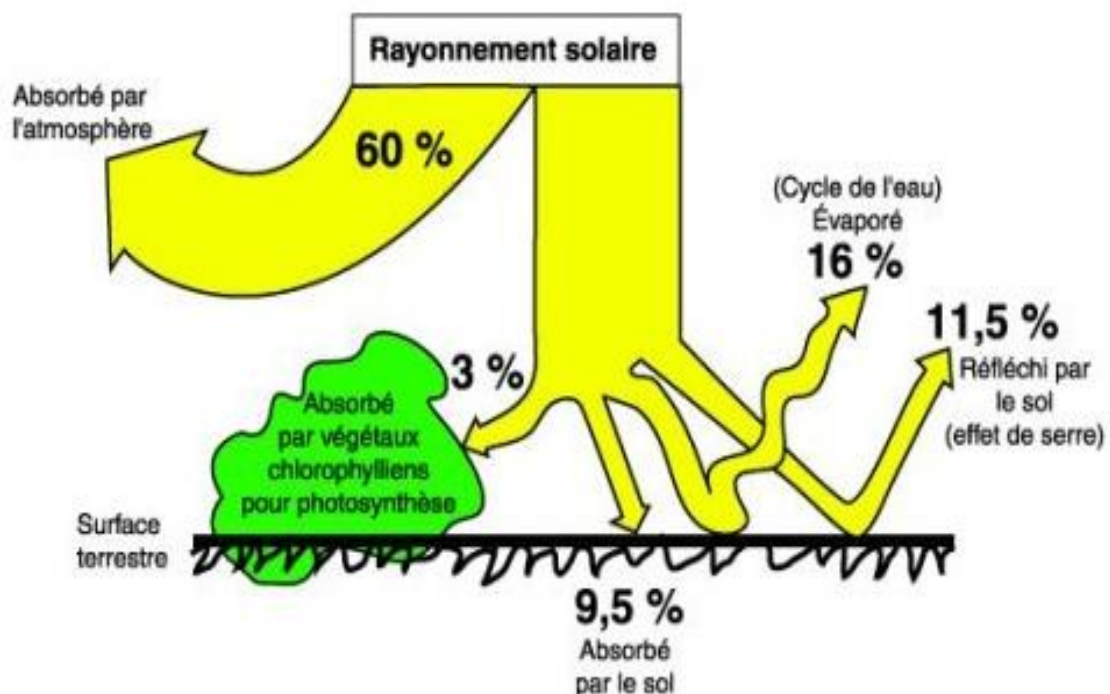


Figure I.3:Présentation de l'absorption du rayonnement solaire depuis son émission jusqu'à son arrivée à la surface de la terre. [4]

I.3.3. Conversion du rayonnement :

L'effet photovoltaïque provient de la conversion du rayonnement du soleil en énergie électrique. Cette conversion est effectuée par l'intermédiaire des composants électroniques à base des matériaux semi-conducteurs: dit des cellules solaires ou des cellules photovoltaïques. Le groupement d'un ensemble des cellules solaires constitue le panneau solaire ou le panneau photovoltaïque.

A chaque photon du spectre solaire, on associe une énergie E : $E=h\nu$ avec ν la fréquence associée à la longueur d'onde du photon, et h la constante de Planck.

Une cellule solaire à semi-conducteurs est un dispositif constitué de deux semi-conducteurs de conceptions différentes, type P (les trous sont les porteurs majoritaires) et type n (les électrons sont les porteurs majoritaires), il permet de débiter un courant électrique dans une charge externe lorsque celui-ci est exposé à la lumière. Les semi-conducteurs candidats pour qu'ils soient les bases des cellules solaires doivent présenter une stabilité physique pour assurer la fiabilité des photopiles au cours du temps et ayant des gaps adaptés pour l'absorption du spectre solaire avec un coefficient d'absorption plus élevé.

Le fonctionnement d'une cellule solaire peut se résumer en deux étapes:

a-Un photon d'énergie $E=h\nu$ pénétrant dans la cellule solaire est absorbé par le matériau semiconducteur.

b-Si l'énergie du photon incident est suffisamment élevée, le photon va pouvoir faire passer un électron de la bande de valence à la bande de conduction du matériau semiconducteur et créer ainsi un pair électron - trou. Ces électrons et trous sont séparés par un champ électrique interne (jonction) et collectés entre une grille (face avant) et un contact ohmique réalisé (face arrière) puis débités dans la charge.

Ci - dessous est présenté le schéma simplifié d'une cellule solaire (figure I.7).

Notons que la cellule photovoltaïque n'est sensible que dans un domaine d'onde particulier et seul les matériaux semiconducteurs disposent de la structure nécessaire à la génération des porteurs de charge: les paires électrons - trou. [4]

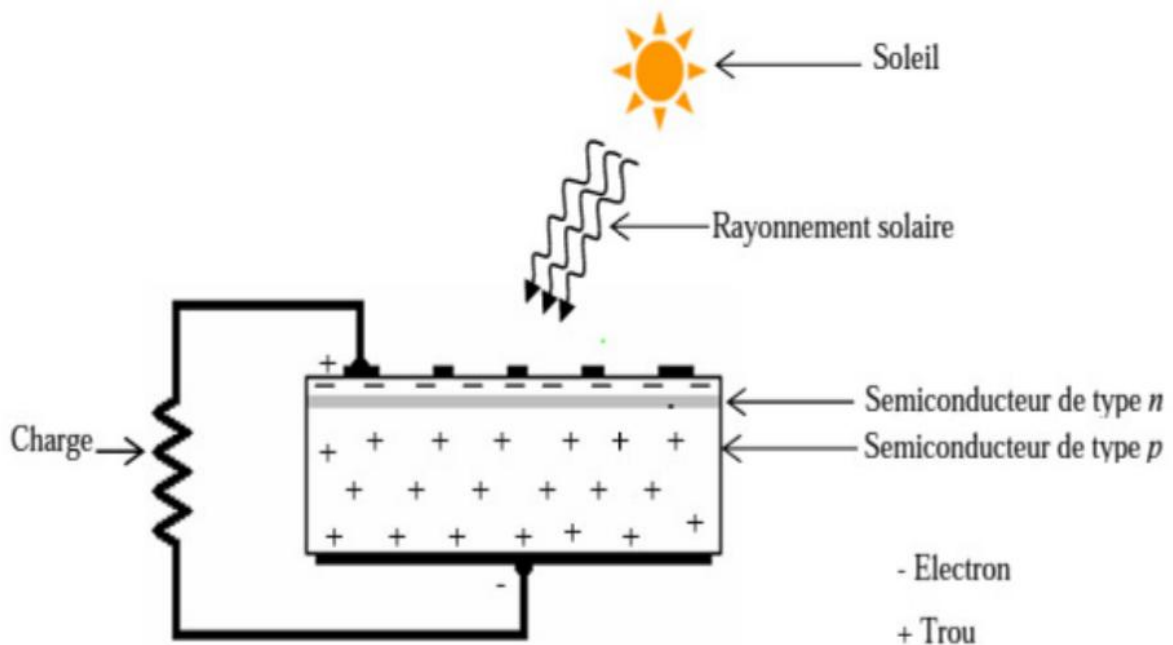


Figure I.7 : Schéma simplifié d'une cellule solaire sous éclairage. [4]

Dans un semiconducteur, la structure des bandes de conduction et de valence définissent un gap plus faible que dans le cas des isolants: 0.3 à 2 ou 3 eV. Si le minimum de la bande de conduction coïncide avec le maximum de celle de valence, le gap est direct, les transitions sont donc directes et radiatives [4].

1.1.2 Applications

En plus de son caractère renouvelable et écologique, l'énergie solaire photovoltaïque (PV) a pour intérêt d'être extrêmement modulable. En effet, il est possible de concevoir des centrales électriques PV de plusieurs centaines de MWc (méga-watts crête), tout comme des alimentations pour dispositifs autonomes en énergie, dont la surface peut descendre jusqu'à quelques cm^2 . Quelques exemples sont présentés dans la figure 1.2.



FIGURE 1.2 : Exemples d'applications du PV, des grandes aux petites dimensions.

- a) Ferme solaire du plateau des Mées en France. Capacité de production : 31MWc.
- b) Exemple d'intégration au bâtiment (BIPV) avec des panneaux Suntech.
- c) Avion 100% solaire du projet Solar Impulse. d) Chargeur solaire flexible d'appareils électroniques nomades.

Dans le cas des dispositifs nomades, le photovoltaïque est très prometteur car l'énergie solaire est disponible en tout point du globe. De plus, comparé à d'autres formes de production d'énergie (éolien, nucléaire, solaire thermique, biomasse...), le photovoltaïque nécessite relativement peu de matière et de volume. Aucun élément mécanique mobile n'est indispensable, ce qui exclut les problèmes d'usure. Ainsi, les applications du PV en tant que source d'énergie autonome sont aujourd'hui fortement diversifiées. Cela inclut des

objets de petite dimension ayant une faible consommation, tels que les chargeurs d'appareils électroniques nomades, les alarmes et autres capteurs, ou encore l'éclairage [5].

Mais le PV est aussi de plus en plus utilisé comme source d'énergie pour des objets plus grands, tels que les véhicules. Initialement utilisé comme énergie complémentaire pour les équipements électriques d'automobiles, de bateaux ou d'avions, son utilisation comme source principale a aussi été démontrée sur ces mêmes types d'appareils équipés de moteurs électriques. L'exemple le plus remarquable est le projet suisse Solar Impulse, au sein duquel un prototype d'avion solaire a pu voler durant un cycle complet jour/nuit sans autre source d'énergie.

Le PV a aussi pour avantage de pouvoir être intégré directement aux bâtiments (Building Integrated PhotoVoltaics, BIPV) afin de générer l'électricité directement sur place. Ainsi, il ne nécessite pas de surface supplémentaire. Enfin, l'utilisation du PV ne se limite pas au domaine terrestre. Son application initiale concernait l'alimentation de satellites et autres équipements du domaine spatial. Le photovoltaïque est particulièrement adapté à ce champ d'applications, grâce à l'encombrement et au poids limité et à la disponibilité de l'énergie solaire en dehors de l'atmosphère terrestre.

1.1.3 Principe

La production d'énergie photovoltaïque est basée sur les propriétés des matériaux semi-conducteurs. En effet, ces derniers sont capables d'absorber des photons dont l'énergie $E_{\text{photon}} = hv$ est supérieure à la largeur de bande interdite $E_g = E_c - E_v$. L'énergie du photon est absorbée par un électron de la bande de valence, qui est transféré dans la bande de conduction. Son absence dans la bande valence est modélisée par un trou, porteur de charge positive. L'absorption du photon génère ainsi une paire électron-trou.

La figure 1.3 montre les différentes interactions entre un photon et un semi-conducteur. Dans le cas où l'énergie du photon est supérieure à celle de la bande interdite du matériau, l'excès d'énergie est libéré par l'électron sous forme de phonons et donc de chaleur (thermalisation). Cependant, un matériau semi-conducteur seul ne permet pas de générer de courant électrique.

En effet, les paires électron-trou ne sont pas collectées et elles se recombinent donc toutes au bout d'un temps caractéristique τ (temps de vie des porteurs).

Afin de générer un courant, une jonction p-n est utilisée à la place d'un simple semi-conducteur. Le champ électrique formé par cette jonction et présent dans la zone de déplétion (ou zone de charge d'espace, ZCE) sépare les électrons et les trous. Celui-ci conduit chaque type de porteur vers la zone où il est le porteur majoritaire (les électrons vers la zone n et les trous vers la zone p). La figure 1.4 présente un schéma d'une jonction p-n, ainsi que la courbe de la probabilité de collecte des porteurs en fonction de la position.

On peut noter que la probabilité de collecte est maximale dans la zone de déplétion car le champ électrique sépare efficacement les paires électron-trou.

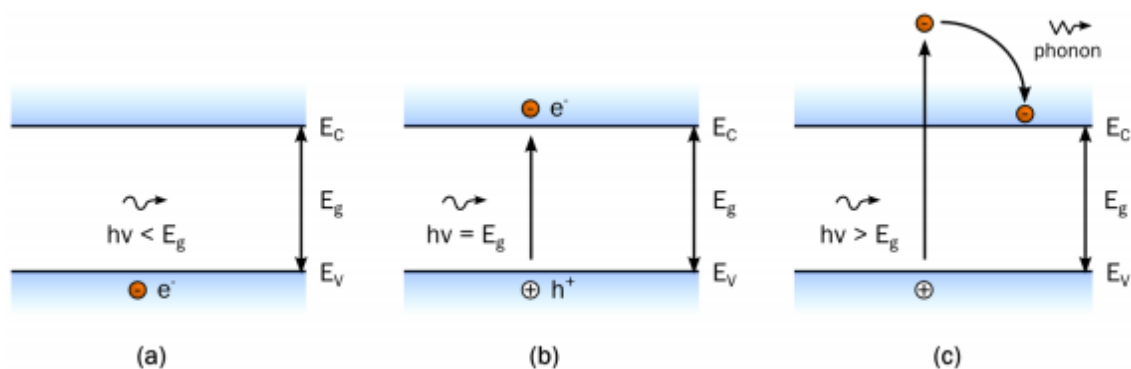


FIGURE 1.3 – a) Transmission d'un photon d'énergie $E_{\text{photon}} < E_g$ dans un matériau semi-conducteur. b) Absorption d'un photon d'énergie $E_{\text{photon}} = E_g$ et formation d'une paire électron-trou. c) Absorption d'un photon d'énergie $E_{\text{photon}} > E_g$, formation d'une paire électron-trou et thermalisation de l'électron par émission de chaleur (phonon).

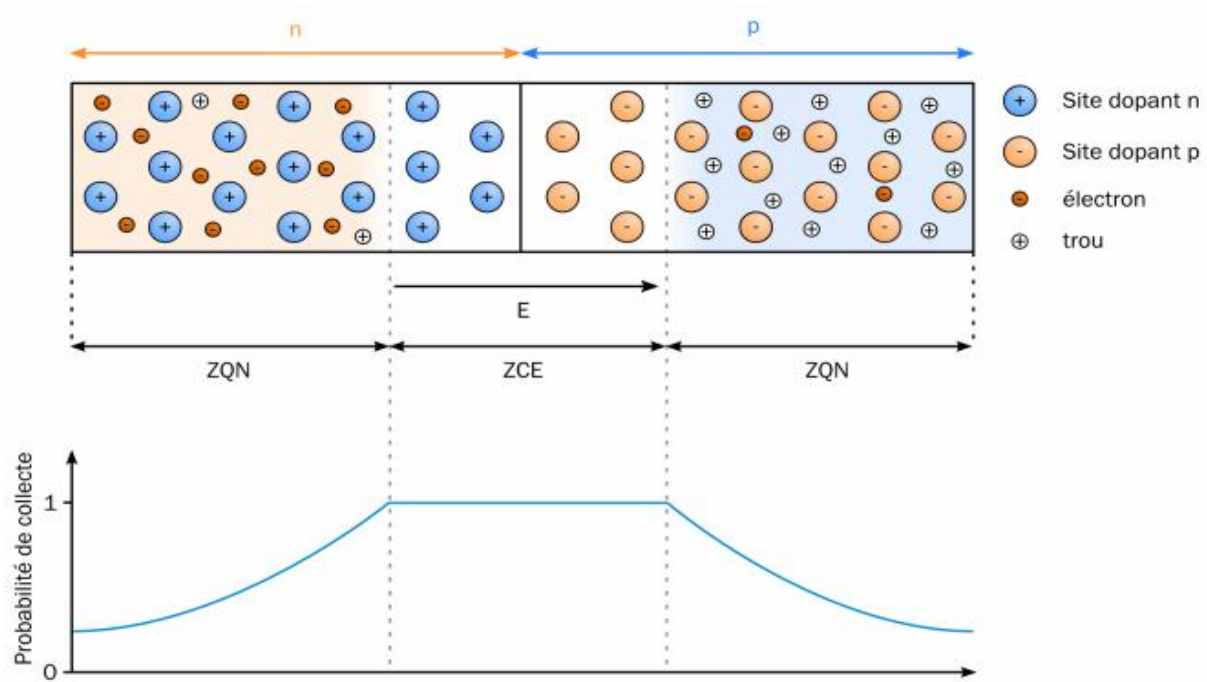


FIGURE 1.4 – Schéma d’une jonction p-n représentant : la zone de charge d’espace (ZCE), les zones quasi-neutres (ZQN), les différents porteurs de charge, les sites dopants et le champ électrique E. La courbe inférieure montre la probabilité de collecte des porteurs photogénérés en fonction de la position.

Dans les zones quasi-neutres, c’est la diffusion qui permet aux porteurs de se déplacer. Ainsi, dans ces zones seuls les porteurs générés à une distance par rapport à la zone de charge d’espace qui est inférieure à leur longueur de diffusion pourront être collectés. Généralement, dans une cellule solaire seul l’un des deux composants de la jonction (p ou n) est utilisé comme matériau absorbeur de lumière. Les cellules photovoltaïques sont donc conçues avec une couche absorbeur beaucoup plus épaisse que l’autre couche formant la jonction. La structure de base d’une cellule solaire photovoltaïque est représentée dans la figure 1.5.

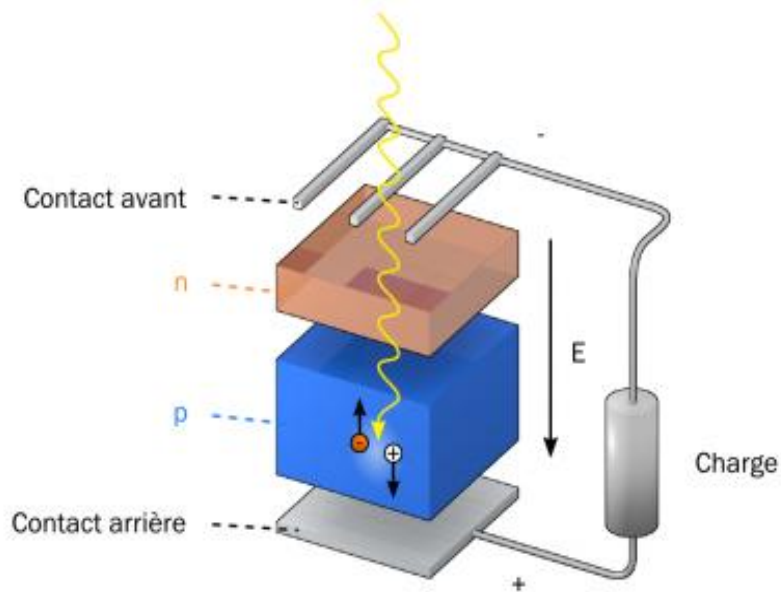


FIGURE 1.5 : Structure de base d'une cellule solaire PV avec un absorbeur de type p, reliée à une charge

Afin de récolter les charges efficacement en minimisant le masquage, le contact avant est réalisé avec une grille métallique. Le contact arrière, quant à lui, occupe la totalité de la face arrière de la cellule. Selon les technologies employées, d'autres couches sont ajoutées à cette structure de base.

I.4.Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque:

I. 3. 4. Définition

Les cellules solaires photovoltaïques sont des dispositifs de conversion directe de l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique [7].



Fig. I. 6. Cellule solaire photovoltaïque

I.3.5. Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Les cellules solaires inorganiques sont basées sur la technologie des semiconducteurs et la jonction p-n. Un semiconducteur (SC) est un matériau présentant une bande interdite (E_g) de quelques eV entre la bande de valence et la bande de conduction, avec le niveau de Fermi dans la bande interdite². La position du niveau de Fermi est fonction de la concentration des porteurs de charges. Le semiconducteur est de type n lorsque les électrons sont les porteurs de charge majoritaires, dans ce cas, le niveau de Fermi se situe près de la bande de conduction. Il est de type p lorsque ce sont les trous, dans ce cas le niveau de Fermi est proche de la bande de valence. La figure (I.8) présente la position du niveau de Fermi E_f pour les deux types de semiconducteurs [8].

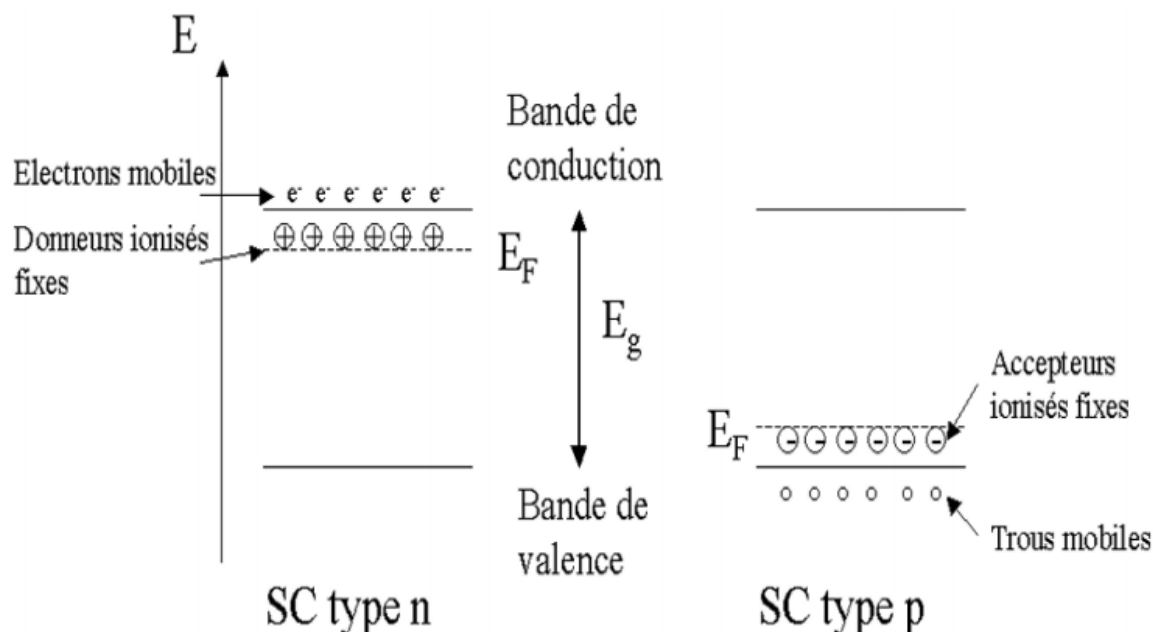


Figure I.8. Semiconducteurs de type p et n et position du niveau de Fermi E_f . Les charges associées aux donneurs (type n) et aux accepteurs (type p) sont représentées sur la figure [8].

L'assemblage de deux semi-conducteurs de types différents forme la jonction p-n. Il existe deux types de jonctions : lorsque les deux semi-conducteurs sont issus de deux matériaux différents, on parle d'hétérojonction, lorsque la jonction p-n est formée d'un seul matériau comportant des zones avec des dopages différents p et n, on parle alors d'homojonction (ex : homojonction Si). Lors du contact entre zones p et n, les porteurs majoritaires de chacune diffusent à travers la surface de contact, il se crée une zone chargée positivement du côté du semi-conducteur n et une zone chargée négativement du côté du semi-conducteur de type p. Cette zone de transition est appelée zone de charge d'espace (ZCE). Le gradient de concentration des porteurs majoritaires induit la présence d'un champ électrique permanent dans cette ZCE à l'équilibre. Les niveaux de Fermi des deux zones s'égalisent, ce qui provoque une courbure du diagramme de bande, introduisant une barrière de potentiel V_e à l'interface. Le principe de la jonction p-n est présenté en figure I.9 [8].

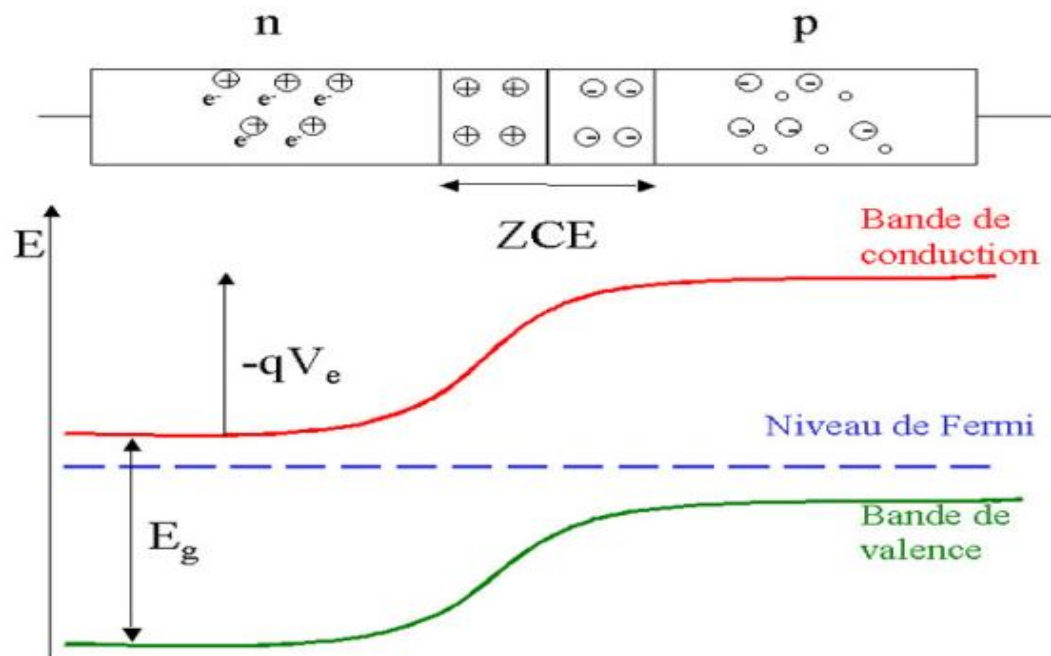


Figure I.9. Schéma de principe et diagramme de bande d'une jonction p-n à l'équilibre [8].

La caractéristique courant-tension (I-V) d'une jonction p-n à l'obscurité est donc celle d'une diode (figure I.10) [8].

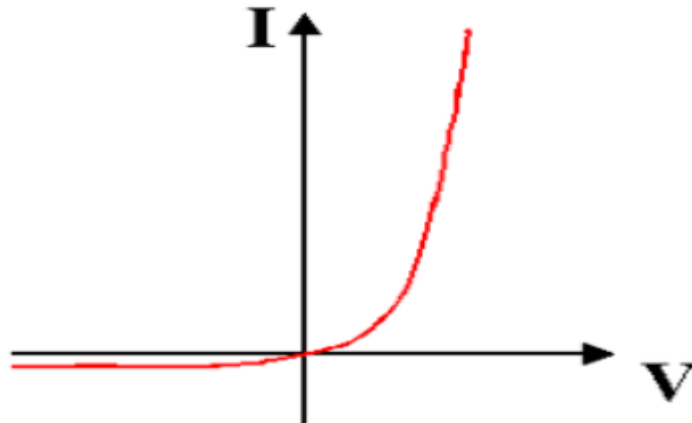


Figure I.10. Caractéristique I-V d'une jonction p-n à l'obscurité [33].

Sous illumination, un semiconducteur absorbe les photons incidents lorsque leur énergie est plus grande que celle de la bande interdite (E_g). Il y a formation de paires électrons-trous. Sans jonction p-n, ces électrons-trous se recombinent. La présence du champ électrique E dans la ZCE permet aux charges de se séparer : l'excès d'électrons diffuse vers le côté n, et l'excès de trous diffuse vers le côté p. Un photocourant de porteurs minoritaires apparaît donc, opposé au courant de porteurs majoritaires déjà présent à l'obscurité (Figure I.11). La ZCE est assez fine, de 100 à 300 nm. Cependant, comme l'électron peut se déplacer sur une longueur de diffusion L_n pendant sa durée de vie, les électrons collectés correspondent à ceux qui ont pu diffuser jusqu'à la ZCE. Ainsi les absorbeurs des cellules solaires ont souvent une épaisseur proche ou inférieure à la longueur de diffusion de leurs porteurs [8].

A l'obscurité, la caractéristique courant-tension (I-V) d'une diode idéale est régie par l'équation de Shockley:

$$I = I_0 \left(\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right) \quad \text{Eq.1.4}$$

Où I_0 est le courant de saturation, n le facteur d'idéalité, k est la constante de Boltzman, T la température en degrés Kelvin et q la charge de l'électron. C'est la courbe déjà présentée en figure I.10.

Sous illumination, un photocourant I_{ph} s'opposant au courant d'obscurité est généré ($I_{ph} < 0$)

$$I = I_0 \left(\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right) - I_{ph} \quad \text{Eq.1.5}$$

Le courant I est en général rapporté à une surface J la densité de courant s'exprime en mA.cm^{-2} [8].

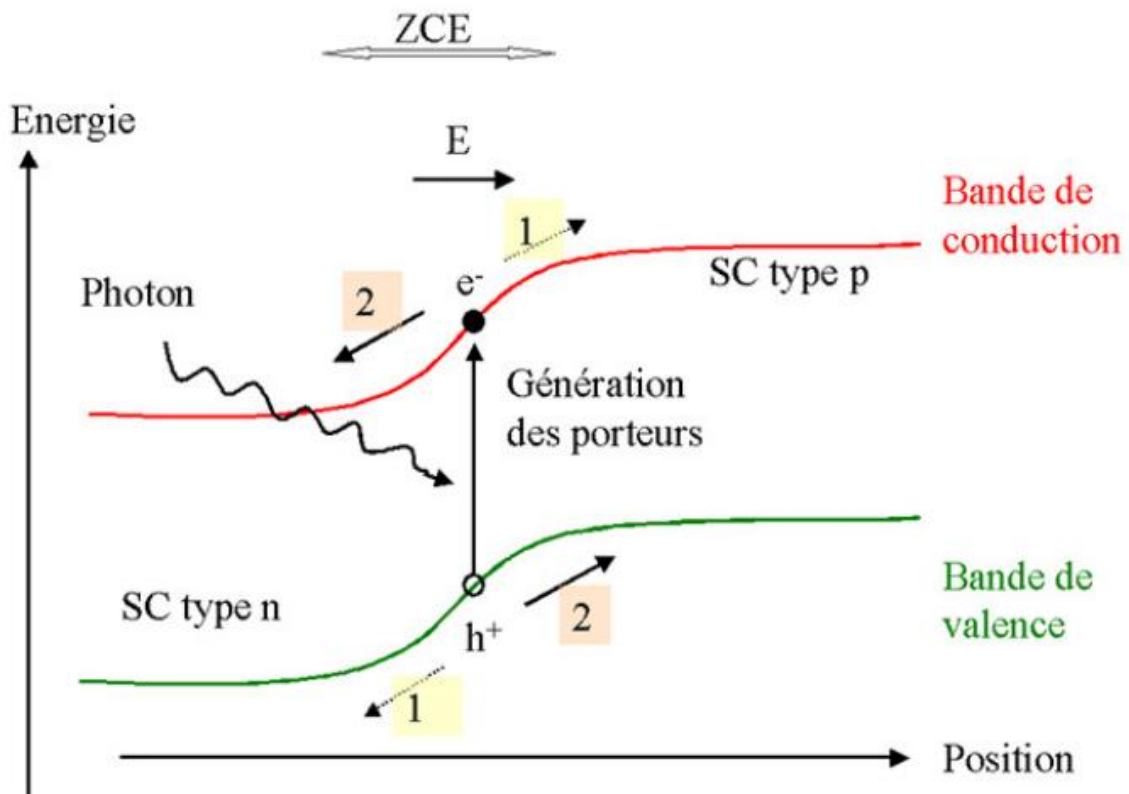


Figure I.11.Principe d'un dispositif photovoltaïque : 1: courant d'obscurité : 2: photo courant [8].

L'équation (Eq. I-5) correspond au fonctionnement d'une diode idéale. Dans une cellule solaire, constituée de plusieurs couches, différents termes viennent s'ajouter :

- La résistance série (R_s), qui correspond aux résistances entre chaque couche.
- La résistance parallèle (R_p), qui est liée aux courts-circuits dans la cellule.
- Une ou plusieurs diodes supplémentaires, traduisant les différents mécanismes de recombinaison pouvant se produire dans la cellule (le facteur d'idéalité et la densité de courant de saturation diffère pour chaque diode). Un modèle à deux diodes est souvent utilisé pour les cellules solaires.

Finalement, le circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque est représenté sur la figure I.12 (pour le modèle à une diode). La caractéristique $J(V)$ sous éclairement devient [9] :

$$J = J_0 \left(\exp \left(\frac{q(V - J.R_s)}{n k T} \right) - 1 \right) + \frac{V - J.R_s}{R_p} - J_{ph} \quad \text{Eq.I.6}$$

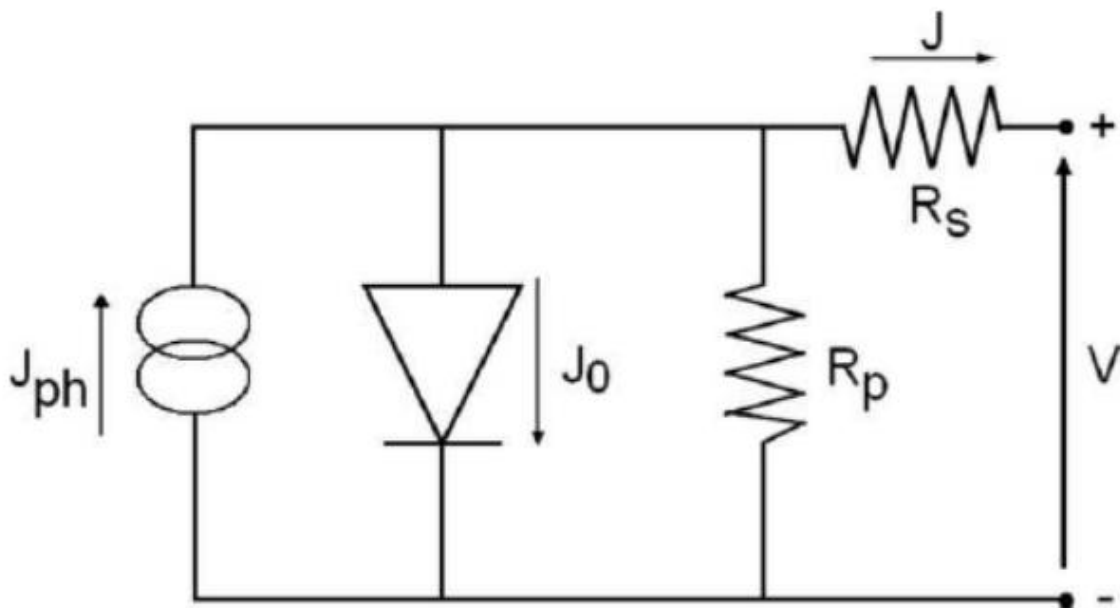


Figure I.12: Schéma équivalent d'une cellule solaire pour le modèle à une diode [9].

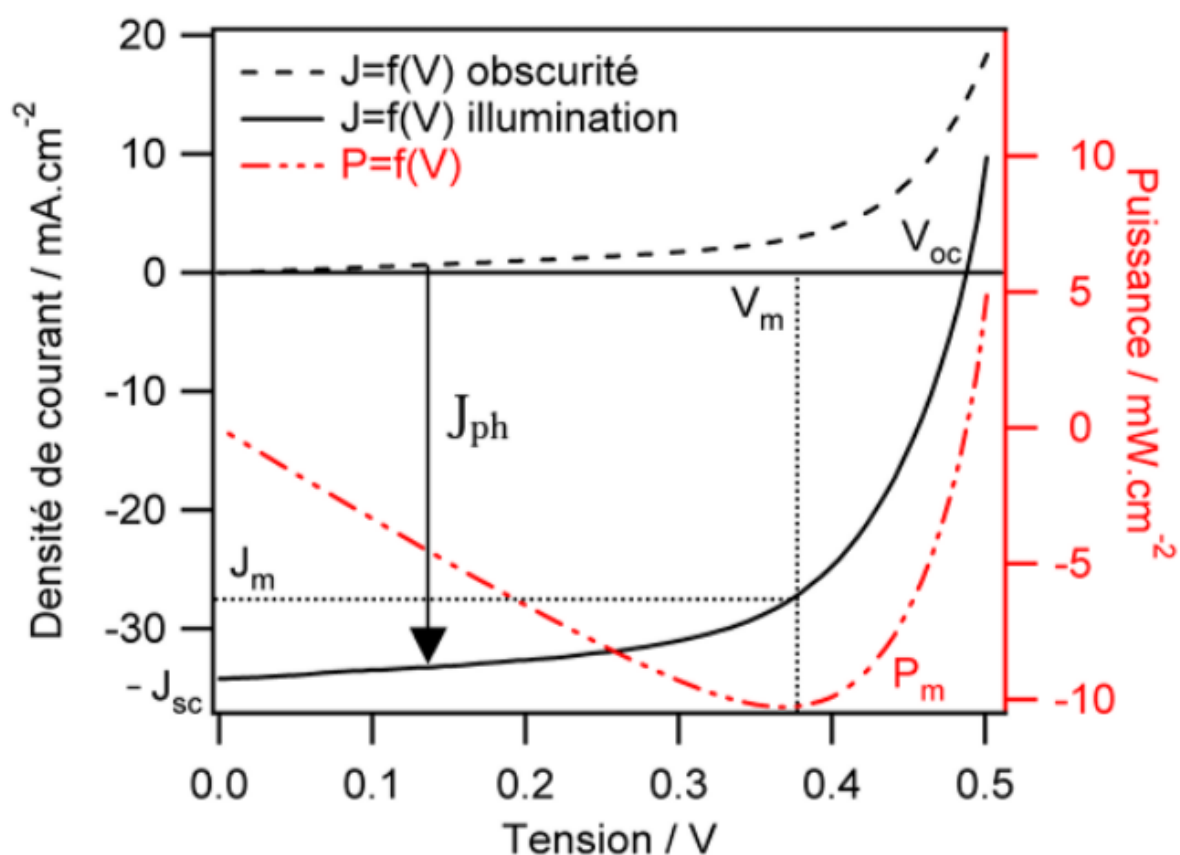


Figure I.13. Caractéristique J-V d'une cellule solaire de surface $S = 0,1 \text{ cm}^2$ à l'obscurité (trait pointillé) et sous illumination (trait plein), et représentation de la puissance (par unité de surface) en fonction de la tension. [8]

Il existe une zone dans laquelle la puissance $P = I \times V$ est négative, ce qui est caractéristique d'un comportement moteur; on parle de cellule solaire. La caractéristique I-V permet de calculer le rendement de conversion η de la cellule solaire, qui est le rapport entre la puissance électrique maximale produite P_m (en valeur absolue) et la puissance incidente reçue par la cellule P_{inc} . [8]

$$\eta = \frac{|P_m|}{P_{inc}} \quad \text{Eq. I.7}$$

On définit I_m et V_m qui sont les courants et tensions au point de puissance maximale. I_{sc} est la valeur absolue du courant de court circuit et V_{oc} la tension de circuit ouvert de la cellule solaire (figure I.13).

A partir de ces valeurs, le facteur de forme FF est défini :[8]

$$FF = \frac{I_m \cdot V_M}{I_{sc} \cdot V_{oc}} \quad \text{Eq .I.8}$$

Pour une diode idéale, la puissance serait $I_{sc} \times V_{oc}$ (courbe « carrée » abrupte). Le FF représente donc le rapport entre la diode réelle et une diode idéale. Alors le rendement de conversion η est exprimé par:[8]

$$\eta = \frac{FF \cdot V_{oc} \cdot I_{sc}}{P_{inc}} \quad \text{Eq .I.9}$$

❖ Réponse spectrale et Rendement quantique:

On appelle réponse spectrale d'une cellule photovoltaïque, l'efficacité avec laquelle elle transforme l'énergie d'un rayonnement d'une certaine longueur d'onde en énergie électrique. Cette efficacité dépend essentiellement des caractéristiques du matériau constituant la cellule photovoltaïque.

Ainsi, lorsqu'une cellule photovoltaïque est soumise au rayonnement solaire, seule une partie du rayonnement solaire sera transformée en électricité. Le rayonnement solaire est réparti sur une plage de longueurs d'onde débutant en deçà de l'ultraviolet ; longueurs d'onde inférieures à $0.4 \mu\text{m}$ et s'étendant au-delà de l'infrarouge ; longueurs d'onde supérieures à $0.7 \mu\text{m}$. L'œil n'est sensible qu'aux longueurs d'onde comprises entre ces deux valeurs. Comme l'œil, la cellule n'est sensible qu'à une partie du rayonnement solaire (celle comprise entre 0.35 et $1.1\mu\text{m}$); une partie essentiellement visible, et une partie du rayonnement ultraviolet (de 0.35 à $0.4\mu\text{m}$) et du rayonnement infrarouge (de 0.7 à

1.1µm). Cette sélection des longueurs d'onde s'explique par le fait que le photon doit avoir suffisamment d'énergie pour arracher un électron. [3]

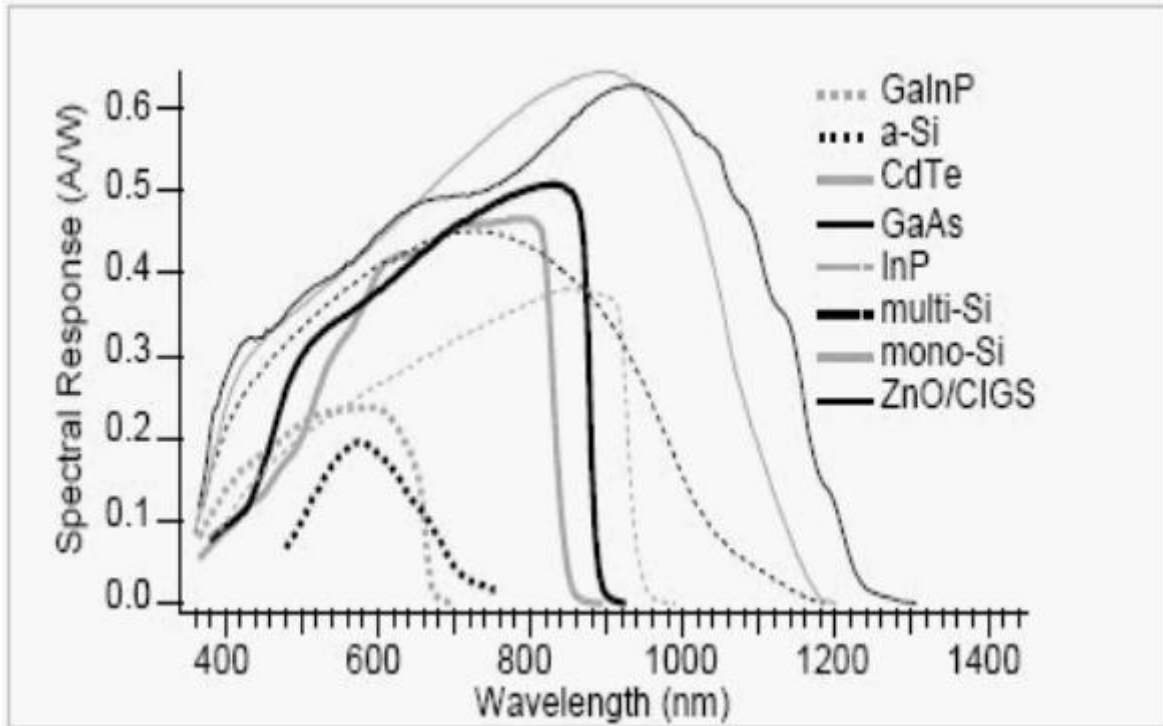


Figure I.14: Courbes de réponse spectrale de différents types de jonctions utilisées pour l'effet photovoltaïque [9]

Le rendement quantique est le rapport entre le nombre d'électrons dans le circuit externe et le nombre de photons incidents. Lorsque des photons perdus par réflexion (à la fenêtre de la cellule) et les photons perdus par transmission à travers toute l'épaisseur de la cellule (à cause de l'absorption incomplète) ne sont pas pris en compte, cette grandeur s'appelle alors le rendement quantique interne IQE (internal quantum efficiency). Dans le cas contraire, ce paramètre s'appelle le rendement quantique externe, EQE (external quantum efficiency). Le rendement quantique externe est défini comme suit [10] :

$$EQE(\lambda) = \frac{J_{sc}(\lambda)}{q \cdot \Phi(\lambda)} = \frac{J_{sc}(\lambda) \cdot h\nu}{q P_{inc}(\lambda)} = \frac{hc}{q \cdot \lambda} S(\lambda) \quad Eq.I.10$$

Avec :

$$S(\lambda) = \frac{J_{sc}(\lambda)}{P_{inc}(\lambda)} \quad \text{Eq.I.11}$$

Où $\phi(\lambda)$ est le flux des photons incidents (Photon / (cm² s)), $P_{inc}(\lambda)$ la puissance optique incidente (W/cm²) en fonction de la longueur d'onde λ , $J_{sc}(\lambda)$ le photo-courant (A/cm²) en fonction de λ à la tension de polarisation zéro, $S(\lambda)$ la réponse spectrale de la cellule (A/W).
[10]

I.8. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté un aperçu sur l'énergie photovoltaïque, le principe de base de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque, l'exploitation de la caractéristique courant tension de la cellule pour calculer ses différents paramètres physiques.

Cette étude bibliographique nous a permis de spécifier le semiconducteur le plus promoteur pour la fabrication des cellules solaires en couches minces, le désiliniure de cuivre et d'indium CuInSe₂ noté CIS ou CISE sous sa forme chalcopyrite. Les propriétés physico chimique de ce matériau peuvent être améliorées par le changement d'une proportion d'indium et de sélénium respectivement par le galium et le soufre pour former des composés quaternaires de type Cu(In, Ga) (Se, S)₂ (CIGS), ce qui augmente son efficacité. Dans le chapitre suivant, nous décrirons les propriétés fondamentales de ce matériau, les cellules solaires à base de CIGS ainsi que les différentes techniques d'élaboration utilisées pour leurs fabrications.

CHAPITRE II :

**Les Cellules Photovoltaïques à base de
Couches Minces**

II-1.Introduction :

Les techniques permettant de réaliser des matériaux en couches minces sont très nombreuses. L'histoire des machines et de la technologie de dépôt de matériaux en couches minces a beaucoup évolué depuis les années soixante. Cela peut s'expliquer par la croissance de la demande industrielle de matériaux en couches minces. Parallèlement à la variété des méthodes de dépôt, les types de matériaux produits en couches minces ne font qu'augmenter : isolants, semi-conducteurs, polymères, supraconducteurs, etc., leurs applications s'étendant sur plusieurs disciplines : microélectronique, optique, mécanique, chimie biomédicale, etc..

En plus, le développement d'un grand nombre de techniques d'analyse des surfaces, le contrôle de plus en plus précis des paramètres intervenant lors du dépôt et une meilleure compréhension des processus de croissance des matériaux en couches minces ont favorisé le développement industriel de ces matériaux.

II-2.Les couches minces :

II-2.1.Définition d'une couche mince :

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" à quelques " μm " (typiquement ce sont des couches de 10 ... 100 nanomètres d'épaisseur). 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 [Harih, 09].

Par exemple la réflexion optique ou l'absorption peuvent être maîtrisées de manière très précise, de même pour la conductivité électrique. La différence essentielle entre le matériau à l'état massif et celui en couches minces est liée au fait que dans l'état massif on néglige,

généralement avec raison le rôle des limites dans les propriétés, tandis que dans une couche mince ce sont, au contraire, les effets liés aux surfaces limites qui sont prépondérants.

II.2.2. Caractéristiques

L'extrême finesse (quelques m d'épaisseur) des dispositifs en couches minces implique l'utilisation d'un élément leur conférant une tenue mécanique : le substrat.

On peut noter la présence d'un oxyde transparent conducteur (TCO) pour récolter plus efficacement les charges du contact avant tout en laissant passer la lumière.

La nature du substrat peut fortement influencer sur les performances de la cellule. L'un des avantages majeurs des cellules en couches minces est qu'elles permettent l'utilisation de substrats légers, flexibles ou encore conformables. Cela ouvre de nouvelles applications, notamment en termes de mobilité. Par exemple, il est possible d'emporter une plus grande surface active avec un module photovoltaïque qui peut être roulé.

De plus, les substrats flexibles permettent d'utiliser des procédés de fabrication de type roll-to-roll, qui ont pour intérêt de réduire les coûts de fabrication. Ces applications sont illustrées dans la figure 1.7.

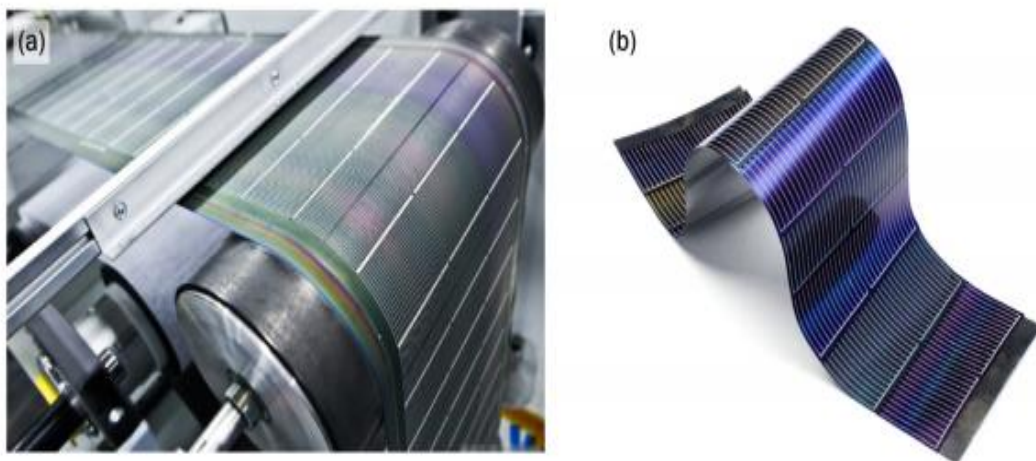


FIGURE 1.7 – a) Fabrication de cellules en couches minces par procédé roll-to-roll. b) Cellule flexible à base de CIGS (Global Solar).

II.3. Les différents filières photovoltaïques

II.3.1 La filière à base de Silicium Cristallin:

Les modules photovoltaïques basés sur silicium cristallin dominent depuis toujours le marché avec plus de 90% des ventes. Les cellules à partir de plaquettes de silicium cristallisé (c-Si) se divisent en deux catégories distinctes, celles à partir de silicium monocristallin (mc-Si) et celles à partir de silicium poly-cristallin (pc-Si). Le silicium monocristallin est plus cher que le silicium multi-cristallin mais permet d'obtenir un rendement plus élevé, avec près de 24.7% contre 19.8% de rendement record sur petite cellule en laboratoire [11].

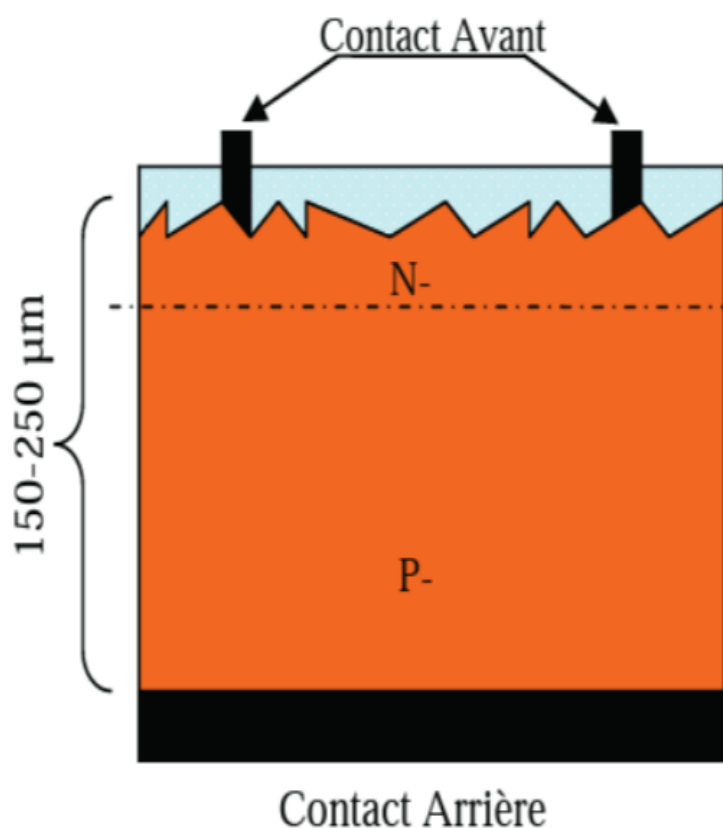


Figure I. 15: Schéma de principe d'une cellule à base de silicium cristallin [11].

Les modules en silicium cristallin sont fabriqués industriellement. Toutes les étapes du processus de fabrication ne cessent de progresser régulièrement afin de viser le plus

Chapitre II : Les Cellules Photovoltaïques à base de Couches Minces

possible les rendements théoriques calculés tout en évitant d'augmenter le prix des modules. Il reste encore aujourd'hui un large potentiel d'optimisation. La première étape consiste à fabriquer des lingots à base de silicium pur pour les différents processus de fusion et de cristallisation du silicium. Le matériau supérieur est le silicium monocristallin, typiquement produit par la méthode de Czochralski, consistant à introduire un germe préformé monocristallin dans le lingot de silicium en fusion [12]. Le silicium se solidifie sur ce germe et garde la même organisation cristalline que celui-ci. Le matériau inférieur est le silicium poly-cristallin, produit en lingots par le biais de différents procédés de fusion et de solidification du silicium. Sa cristallisation est assurée par un contrôle drastique de la température de solidification.

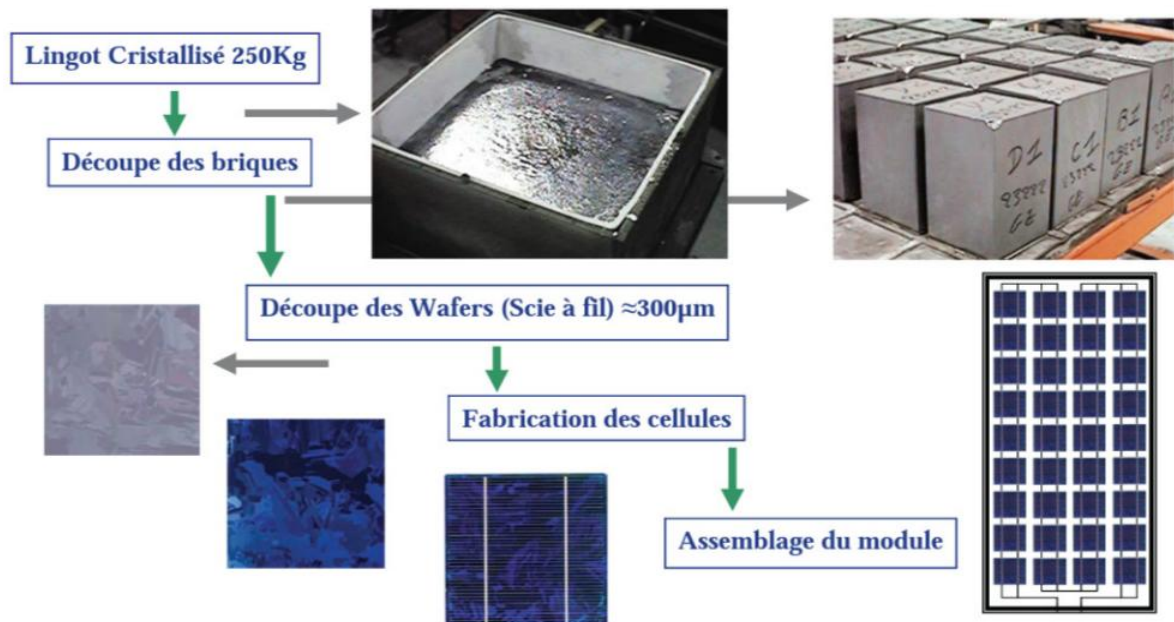


Figure I.16: Exemple de chaîne de production de cellules photovoltaïques en silicium [12].

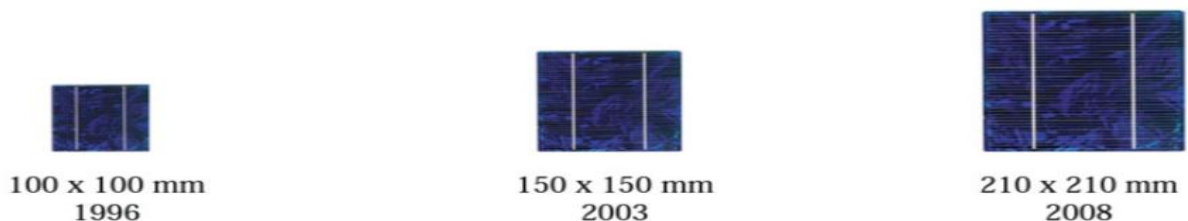


Figure I.17: Evolution de la taille des cellules silicium photovoltaïques ces dernières années [38].

Les industriels du photovoltaïque développent des wafers de nouvelle génération de $210 \times 210 \text{ mm}^2$ et plus large encore, tout en réduisant leur épaisseur pour arriver à un objectif de $100 \mu\text{m}$, (Figure I-17) [13]. L'augmentation de la taille de ces cellules implique donc une augmentation de la puissance produite et donc du courant. Les cellules les plus performantes peuvent déjà fournir des courants de plus de 10 A sous une tension de 0.6V.

II.3.2 Les cellules multi-jonctions à haut rendement:

Aujourd'hui, la plupart des cellules photovoltaïques inorganiques sont constituées d'une simple jonction PN. Dans cette jonction, seuls les photons dont l'énergie est égale ou supérieure à la bande interdite du matériau (notée E_g en eV) sont capables de créer des paires électron-trou. En d'autres termes, la réponse photovoltaïque d'une cellule simple jonction est limitée. Seule la proportion du spectre solaire dont l'énergie des photons est supérieure au gap d'absorption du matériau est utile, l'énergie des photons plus faible n'est donc pas utilisable. D'autre part, même si l'énergie des photons est suffisante, la probabilité de rencontrer un électron est faible. Ainsi, la plupart des photons traversent le matériau sans avoir transféré leur énergie. Une première réponse pour limiter les pertes est connue de longue date du point de vue technologique, il suffit d'utiliser des systèmes à plusieurs niveaux, en empilant des jonctions possédant des gaps décroissants, (figure I.18). Ainsi il est possible d'exploiter le spectre solaire dans sa quasi-totalité avec des rendements de conversion très importants. [14]

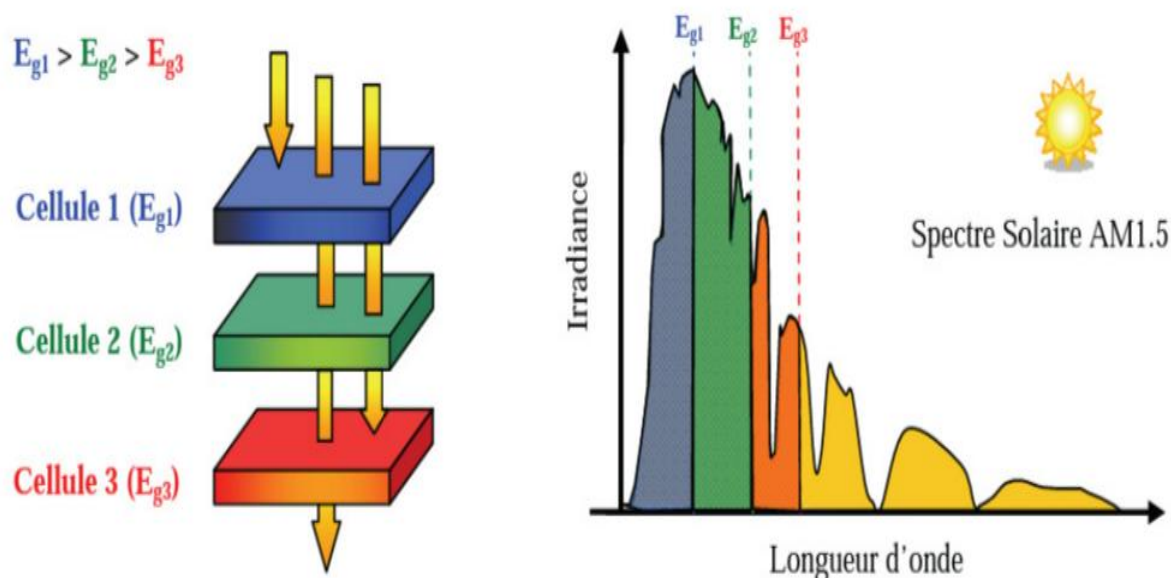


Figure I.18: Principe de la cellule à hétérojonction [40].

Des cellules PV multi-jonctions à base d'associations de matériaux semi-conducteurs III-V (GaAs, AlGaAs, InGaAs, etc) ont ainsi été mises au point depuis les années 60 présentant des rendements très élevés supérieurs parfois à 40%. Elles ne sont pas connues du grand public à cause de leur coût de fabrication, de loin, les plus élevés actuellement (fabrication sous ultra vide, croissance très lente, problème de casses et de défauts aux interfaces). Le développement des cellules à haut rendement a été motivé en priorité par les applications spatiales [14].

II.3.3. Les cellules organiques :

Comme leurs noms les indiquent, les cellules organiques ; autrement dit, les cellules plastiques, sont composées de semiconducteurs organiques. Ce type de cellules est apparu dans les années 90, elles constituent une tentative de réduction du coût de l'électricité photovoltaïque, et elles bénéficient en effet du faible coût des semiconducteurs organiques ainsi que de nombreuses simplifications potentielles dans le processus de fabrication. Son record de rendement de conversion dépasse les 10 % [3].

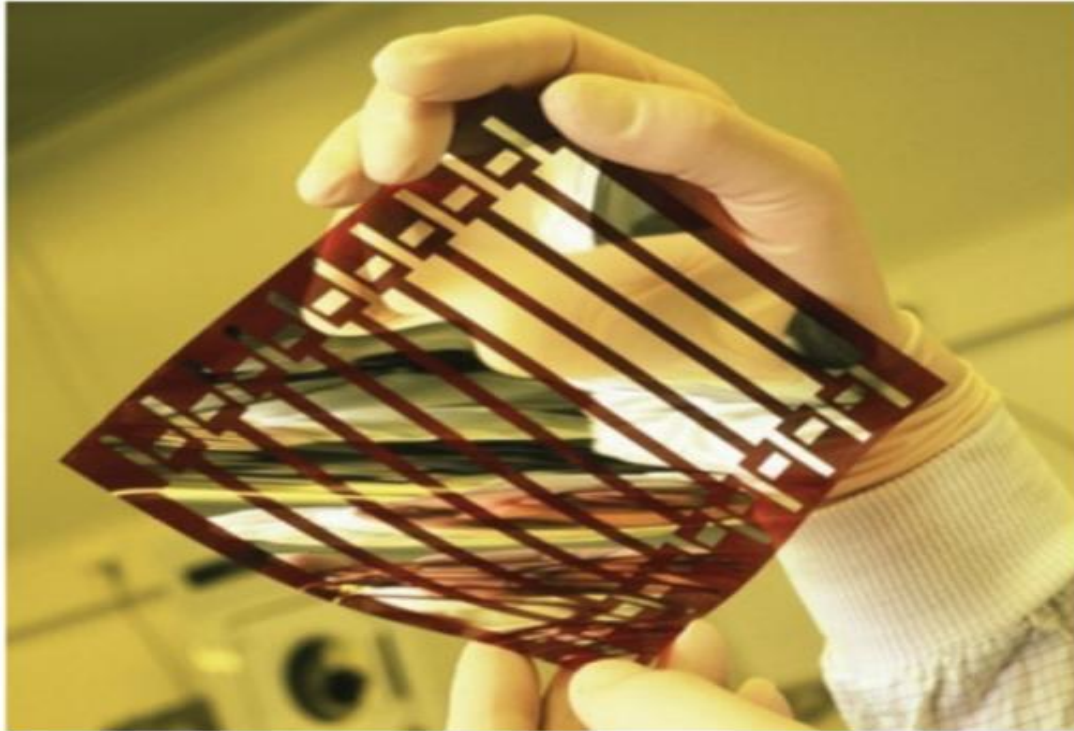


Figure I.19: Cellule solaire tout organique sur substrat souple. [14]

Les matériaux organiques, moléculaires ou polymériques, à base de carbone, d'hydrogène et d'azote, sont particulièrement intéressants en termes d'abondance, de coût, de poids et de mise en œuvre. Comme les semi-conducteurs, ils possèdent des niveaux d'énergies susceptibles d'absorber les photons en créant des paires électron-trou utilisables grâce à des transitions entre les niveaux dits HOMO (Highest occupied molecular orbital) et des niveaux dits LUMO (Lowest unoccupied molecular orbital). En l'absence de séparation, les paires électron-trou peuvent se recombiner en émettant des photons de la longueur d'onde correspondante (fluorescence, luminescence) plutôt que se convertir en chaleur. Si elles peuvent être séparées et transportées vers un circuit extérieur grâce à deux phases adjacentes, on obtient alors des cellules photovoltaïques organiques (figure I.20) [40].

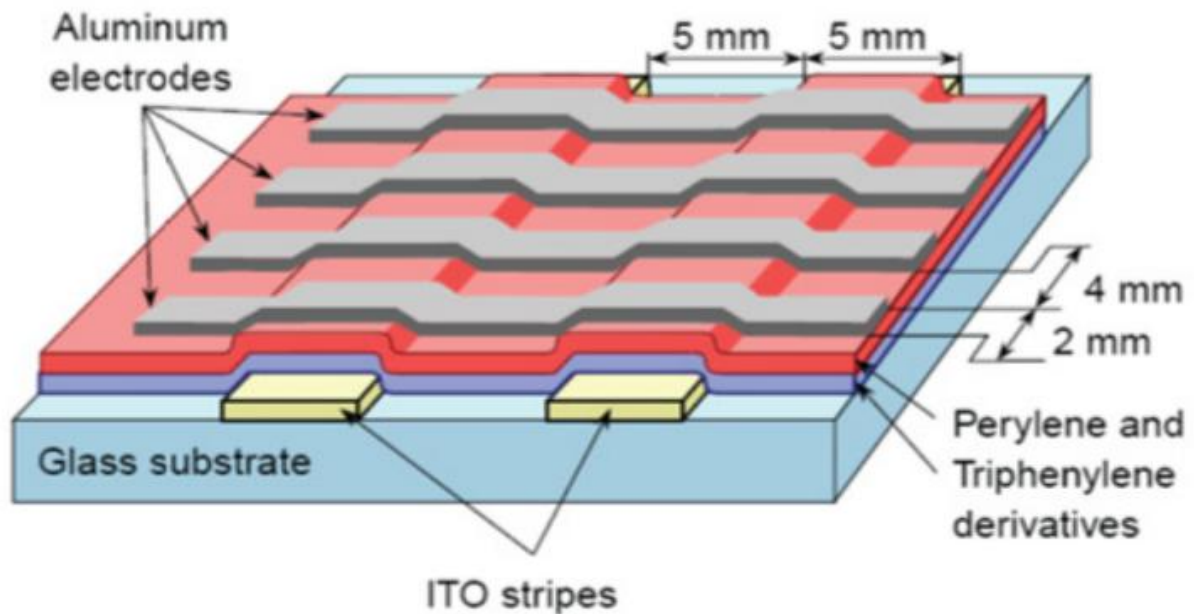


Figure I.20: Schéma de principe d'une cellule organique [14].

II.3.4. Technologie couches mince:

Les cellules PV dites couche mince (Thin-film) constituent ce que certains appellent les cellules de seconde génération car elles font historiquement suite aux cellules en silicium cristallin relativement épaisses. L'intérêt de la technologie couche mince vient de la faible quantité de matériaux nécessaire à la fabrication d'une cellule comparativement aux cellules classiques.

Contrairement aux cellules silicium cristallin de première génération, on ne dépose que la quantité de matériau photosensible efficace pour absorber l'essentiel du rayonnement solaire (quelques microns d'épaisseurs suffisent). Par ailleurs, on utilise des méthodes de fabrication moins coûteuses des cellules qui permettent une intégration totale. Les trois technologies émergentes sont aujourd'hui :

- Le Silicium amorphe et microcristallin noté TFSi (Thin-Film Silicon en anglais).
- Le Semi-conducteur Poly-cristallin CdTe (Tellure de Cadmium).
- L'alliage Cu(In,Ga)Se₂ (Cuivre-Indium/Gallium-Sélénium) noté dans la littérature CIGS [14].

II.3.4.1. Silicium couche mince:

Dans la technologie TFSi basée sur le silicium non cristallisé, le silicium amorphe (noté a-Si) peut être directement déposé sur un substrat de verre à basse température par un procédé de dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma (PECVD pour Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) [15]. On dépose d'abord, sur le verre, une couche d'oxyde transparente conductrice d'une épaisseur de $0,5\mu\text{m}$ (TCO pour Transparent Conductive Oxide). Cette étape est suivie par les étapes de dépôt suivantes : une couche de a-Si de type N, puis une couche a-Si semi-isolante ($1\mu\text{m}$ au total) et enfin une couche de a-Si dopée P. Une dernière couche métallique arrière à base d'argent assure la connectique (figure I.21). Le processus de fabrication de ces cellules permet d'abaisser significativement les coûts de productions. En effet, le cycle de production ne nécessite que très peu d'énergie et le processus peut générer de grandes surfaces unitaires, de l'ordre du mètre carré, en un seul tenant. Pour fabriquer un module, il suffit d'ajouter au processus une déposition de matériau conducteur entre les cellules servant d'interconnexion entre elles

Ainsi, grâce à cette souplesse de fabrication, il est possible de fabriquer simplement des panneaux de n'importe quelle puissance et tension en fonction de la demande et de l'application [14].

Malgré des rendements de conversion faibles de 6% à 7% (limités par le taux de recombinaisons très élevé), cette filière tend à se développer car le prix est dérisoire par rapport au coût actuel des cellules Si de première génération. Le silicium amorphe, possédant un fort coefficient d'absorption, n'a besoin que d'une très faible épaisseur de silicium, de l'ordre du micron, réduisant par conséquent considérablement les coûts de matière première et le risque de pénurie liée au manque de silicium. Plusieurs possibilités existent pour améliorer le rendement de ces cellules dites simple jonction. De nos jours, des matériaux constituant des jonctions microcristallines ($\mu\text{c-Si}$) peuvent être ajoutés ou bien des alliages à base de SiGe peuvent être créés. L'introduction de ces matériaux innovants est prometteuse à long terme pour la technologie TFSi. Cependant, ces technologies restent encore du domaine de la recherche en passe de sortir des laboratoires et subir plusieurs

Chapitre II : Les Cellules Photovoltaïques à base de Couches Minces

modifications pour s'adapter correctement à la production grande échelle industrielle. Reste également à savoir comment ces cellules vont se comporter en vieillissant. Les plus avancées du point de vue technologiques ont une durée de vie inférieure à 10 ans et ne peuvent donc pas être utilisées en toiture ou dans des accès difficiles du point de vue maintenance [14].

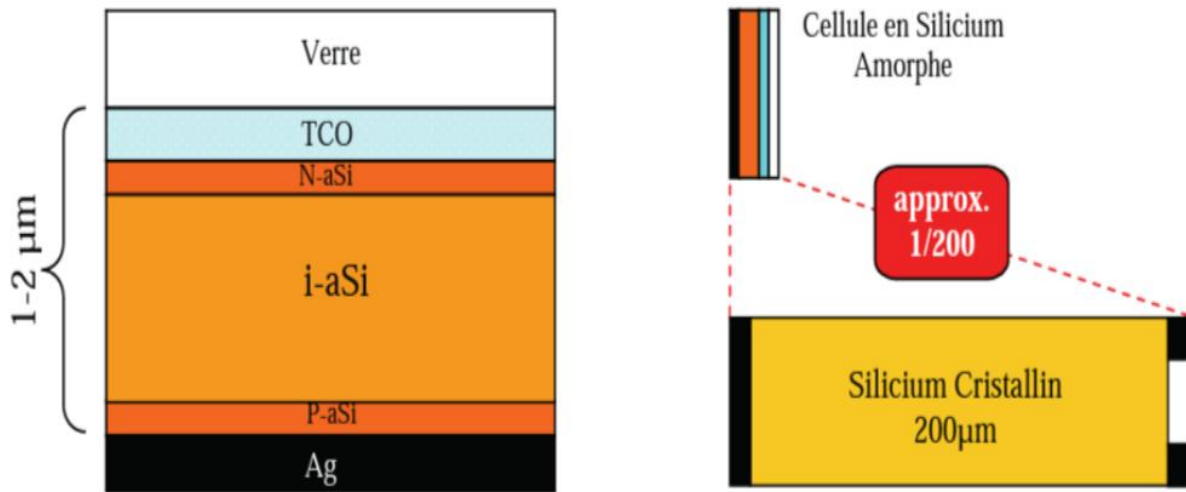


Figure I.21: Schéma de principe d'une cellule à base de silicium amorphe et comparaison à une cellule en silicium cristallin. [14]

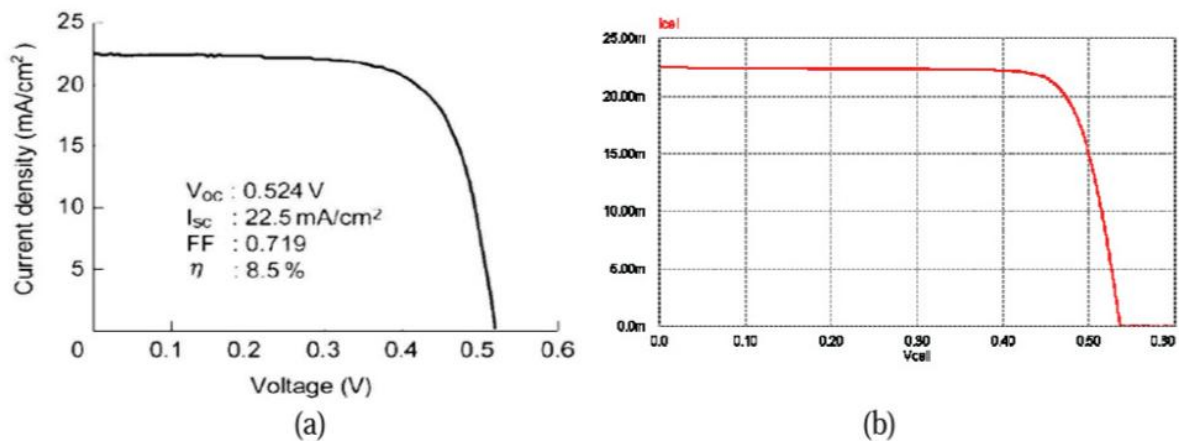


Figure I.22: Caractéristique courant - tension d'une cellule en silicium amorphe.

(a) Courbe réelle, (b) Courbe simulée [14].

Chapitre II : Les Cellules Photovoltaïques à base de Couches Minces

(b)

Technologie	Rendement Typique	Influence Température	Taux de dégradation	Prix d'un module (2008)
Monocristallin	12 à 16%	-0.442% par °C	-0.38% par an	3.13 €/Wc
Poly-cristallin	11 à 14%	-0.416% par °C	-0.35% par an	2.95 €/Wc
Amorphe	6 à 7%	+0.175 % par °C	-1.15% par an	2.35 €/Wc

Tableau I.1: Performance de la filière Silicium simple jonction [14].

II.3.4.2. Les filières non silicium:

Les recherches actuelles sur les matériaux PV portent également sur d'autres matériaux que le silicium, mieux adaptés à une utilisation en couches minces et délivrant de hauts rendements à des coûts relativement bas. Deux filières semblent s'imposer progressivement, l'une basée sur le tellure de cadmium (notée CdTe) et l'autre sur les alliages Cuivre-indium/gallium-Sélénium (noté CIGS).

Les cellules CIGS sont constituées par empilement. Tout d'abord, une couche métallique de molybdène de 0.5 μm d'épaisseur est déposée sur du verre de vitre pour réaliser le contact arrière. Puis on vient déposer une couche CIGS de type P, d'environ 1.5 μm . Suit une couche de CdS ou de ZnS (pour Sulfure de Cadmium et Zinc Sulfuré) d'environ 50 nm, et enfin une couche de ZnO (Oxyde de Zinc) de type N, de 1 μm , servant de contact avant conducteur et transparent. Finalement, la cellule est encapsulée par couverture par une vitre [16].

Chapitre II : Les Cellules Photovoltaïques à base de Couches Minces

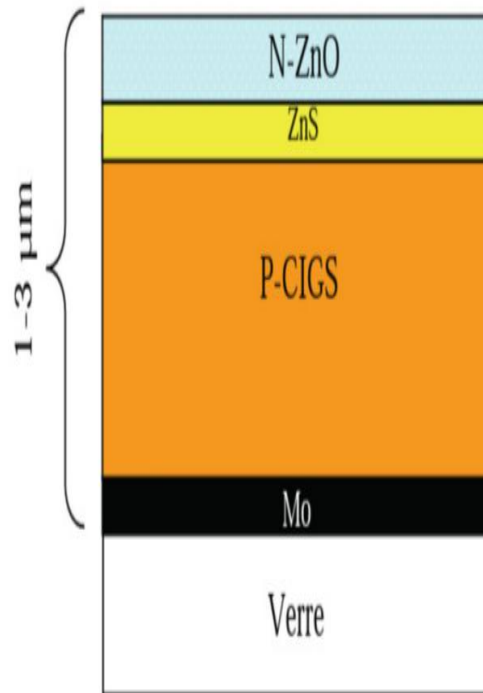


Figure I.23: Schéma de principe d'une cellule à base de CIGS [15]

Dans le cas du CdTe, une couche de CdS de type N est déposée sur du verre, puis une couche de CdTe de type P, d'environ 2 µm, et une couche conductrice de carbone servant de deuxième contact. La technologie CIGS exhibe actuellement le meilleur rendement de production pour une cellule et pour des modules par rapport à toutes les technologies couches minces inorganiques avec des cellules pouvant atteindre 19.9% en laboratoire [17] et des modules commerciaux de 12%. Cependant, il reste un grand nombre de points à améliorer afin de réduire le prix de ces cellules. Le principal challenge de la technologie CIGS couche mince est la réduction du prix des matériaux. Diverses pistes existent pour essayer de remplacer les matériaux chers comme l'InGa par de l'Al. De plus, il est nécessaire également de trouver des solutions pour moins gaspiller la matière première active pendant la fabrication. Une dernière piste consiste à réduire tout simplement l'épaisseur de la couche active.

Chapitre II : Les Cellules Photovoltaïques à base de Couches Minces

La simplicité chimique du matériau à base de tellure de cadmium - (CdTe) et sa stabilité en font un matériau attractif. Ses propriétés thermo-physiques et ses caractéristiques chimiques permettent de fabriquer des cellules simplement et à faible coût. Le rendement des cellules en CdTe dépend fortement de la manière dont les couches actives sont déposées (température de dépôt, vitesse et nature du substrat). Comparé aux autres technologies couche mince, le CdTe est plus facile à déposer et donc plus approprié à la production de module PV de surface importante. L'inconvénient majeur actuel repose sur la toxicité reconnue du Cadmium bien qu'il a été démontré que les risques environnementaux liés aux cellules PV en CdTe sont minimales [18]. En effet, les modules en CdTe ne présenteraient pas de risques sanitaires et environnementaux, et un simple recyclage des modules en fin de vie résoudrait définitivement le problème de pollution. L'utilisation de CdTe dans les modules photovoltaïques est en fait beaucoup moins inquiétante que d'autres utilisations du cadmium, comme par exemple dans les batteries Ni-Cd. Le fabricant américain de panneaux CdTe First Solar est l'un des premiers industriels à proposer un recyclage de ses propres produits. En effet, l'entreprise est soucieuse de récupérer le cadmium pour des raisons environnementales et de coûts. Contrairement aux wafers de silicium, les cellules ne peuvent pas être extraites et réutilisées presque telles quelles.

Elles doivent impérativement repasser par une étape métallurgique. First Solar estime que ce traitement pourrait également convenir aux cellules de type CIS (Cuivre-Indium-Sélénium).

D'un point de vue rendement énergétique, la filière CdTe, présente des rendements de cellules record de 16.5% en laboratoire [18] et des modules commerciaux à près de 10.7% [48]. L'Europe et les USA produisent déjà des panneaux en couches minces CdTe. Leurs rendements avoisinent les 9% et les coûts de fabrication semblent être compétitifs avec la filière c-Si. Les recherches montrent que le CdTe pourrait atteindre un rendement de 15% pour un prix de 0.5€/Wc à moyen terme [18].

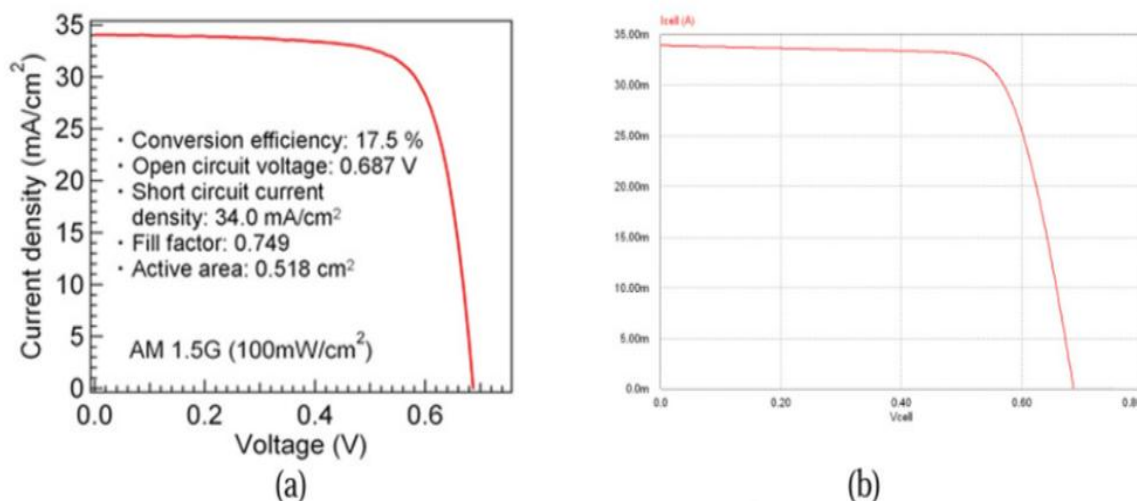


Figure I.24: Caractéristique courant – tension d’une cellule CIGS.

(a) Courbe réelle, (b) Courbe simulée [18]

On peut trouver en Figure I.24 les caractéristiques I(V) réelle et simulée d’une cellule CIGS réalisée en laboratoire avec un rendement de 17.5% pour un ensoleillement AM1.5. Ces résultats, tout à fait remarquables, positionnent le CIGS comme le CdTe au dessus des cellules silicium en termes de compromis coût-rendement. Bien que moins développées jusqu’à présent que les filières silicium, celles-ci montent néanmoins en puissance avec un fort potentiel de développement en termes de coût de production. La séquence de fabrication des modules en couches minces a-Si, CdTe et CIGS diffère complètement de celle des modules classiques au silicium. Elle est basée sur le principe d’interconnexion monolithique où les cellules sont des bandes isolées par gravure et connectées en série entre elles par dépôt de contacts [18].

II.3.4.3 Les multi-jonctions en couche mince:

Pour améliorer les performances des cellules couche-mince, des architectures double et triple jonctions ont été développées. Elles sont inspirées des cellules multi-jonction développées initialement pour le spatial pour bénéficier au maximum du spectre solaire.

Chapitre II : Les Cellules Photovoltaïques à base de Couches Minces

Elles présentent néanmoins une mise en œuvre plus simple et mieux maîtrisée aujourd'hui pour le marché terrestre.

Nous pouvons citer par exemple les cellules tandem à base de silicium à la fois amorphe et polycristallin (a-Si/ μ c-Si) [20]. Les meilleurs rendements stabilisés en laboratoire sont de l'ordre de 12% pour ces cellules. Il s'agit comme pour les multi-jonctions d'empiler deux cellules photovoltaïques qui absorbent des photons de longueurs d'onde différentes. Par ce mécanisme, l'ensemble tandem composé de l'association de deux cellules, permet d'absorber un plus large spectre lumineux et ainsi produire plus d'énergie qu'une cellule simple jonction. La première couche en silicium amorphe absorbe une partie du spectre alors que l'autre partie, qui la traverse, est absorbée par la seconde couche en silicium microcristallin. Le procédé de fabrication est le même que pour les couches minces, les différentes couches qui composent la cellule sont déposées par plasma (PECVD) sur un substrat de verre [18].

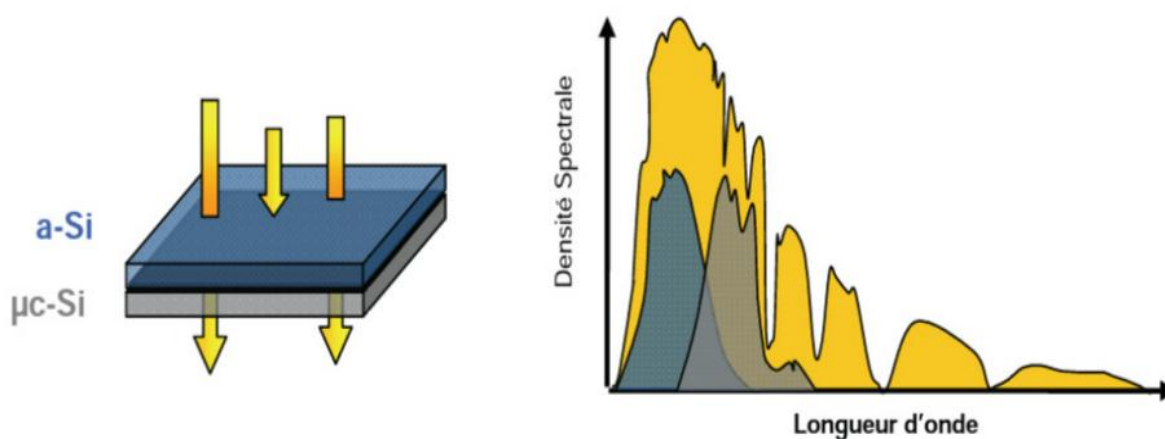


Figure I.25: Cellule Tandem a-Si/ μ c-Si, spectre solaire et spectres d'absorption [18].

On peut observer en figure I.26 les caractéristiques électriques réelles et simulées d'une cellule tandem a-Si/ μ c-Si. Contrairement aux autres cellules simple jonction, la tension de circuit ouvert de cette cellule s'élève à 1.39V. Cette hausse de tension s'explique par l'architecture tandem équivalente à la mise en série de deux cellules. Par conséquent, les

Chapitre II : Les Cellules Photovoltaïques à base de Couches Minces

tensions V_{oc} de la cellule a-Si et de la cellule μ -Si s'additionnent. Cette configuration lie cependant électriquement les deux cellules. Ainsi, le courant produit par cette association dépend de la cellule produisant le plus faible courant.

Généralement, on optimise conjointement les deux cellules afin d'optimiser la puissance fournie par l'ensemble tandem [18].

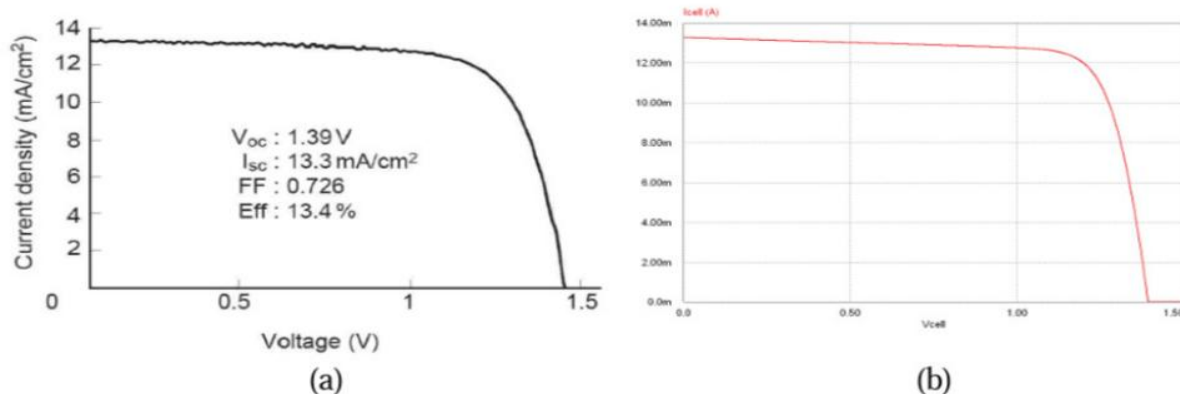


Figure I.26: Caractéristique courant – tension d'une cellule Tandem a-Si/ μ c-Si.

(a) Courbe réelle, (b) courbe simulée [18].

I.6. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque:

I.6.1. Avantages:

- ✚ Une haute fiabilité ; les modules sont garantis pendant 25ans par la plupart des constructeurs.
- ✚ Elle 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.
- ✚ Le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt.
- ✚ Leurs coûts de fonctionnement sont très faibles vu les entretiens réduits, et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.

Chapitre II : Les Cellules Photovoltaïques à base de Couches Minces

- ✚ Généralement la maintenance est limitée à une ou deux visites annuelles effectuées par un professionnel.
- ✚ 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. [3]

I.6.2. Inconvénients:

- ✚ La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- ✚ L'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.
- ✚ Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28 %).
- ✚ Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs Diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- ✚ Enfin, lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru. La fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulations associés soient judicieusement choisis. [3]

I.7. Les applications de l'énergie photovoltaïque:

En dehors des applications spatiales à l'origine du développement des techniques photovoltaïques et des applications en électronique (alimentation de calculettes, de montres, etc.), on trouve deux grandes familles d'applications à savoir: [3]

a. Les générateurs autonomes: Pour l'alimentation de sites isolés du réseau de distribution d'électricité (habitat, relais hertzien, pompage, balisage en mer, électrification rurale des pays du sud, etc.).

Chapitre II : Les Cellules Photovoltaïques à base de Couches Minces

b. Les centrales photovoltaïques: Il est possible d'utiliser un générateur photovoltaïque de façon non autonome, en le connectant au réseau public de distribution d'électricité. Nous aurons alors, une petite centrale de production d'électricité, dont l'énergie sera soit consommée sur place par le propriétaire, soit revendue sur le réseau. En cas de production excédentaire, le générateur photovoltaïque alimente le réseau et inversement, le réseau alimente la distribution en cas de déficit ou hors production solaire. L'ensemble est entièrement automatisé et géré par un ou plusieurs onduleurs.

Le système est donc beaucoup plus simple. Il n'y a plus de batterie (c'est le réseau qui joue ce rôle), il n'y a plus d'armoire de régulation complexe. Ces centrales peuvent être installées sur des maisons d'habitation individuelles, des bâtiments publics ou privés. Elles peuvent remplacer la toiture ou être installées en façade [3].

II-6.Conclusion :

Ce chapitre a été consacré aux différentes technologies photovoltaïques en couches minces, qui se composent de trois filières principales: la filière à base de silicium (amorphe et polycristallin), la filière à base de CdTe, et la filière à base de CIGS.

Ceci est suivi par des brefs aperçus de quelques techniques et méthodes d'élaboration qui sont les plus utilisées pour la technologie de couches minces.

Cette étude bibliographique nous a permis de spécifier les semi-conducteurs les plus intéressants pour la fabrication de cellules solaires en couches minces, le diséléniure de cuivre et d'indium CuInSe_2 et ses alliages avec Ga (Cu(In,Ga)Se_2) sous sa forme chalcopyrite. Dans le chapitre qui suit nous décrivons les propriétés fondamentales de ce matériau.

CHAPITRE III :

**Cellules solaires à base
de $\text{Cu}(\text{In},\text{Ga})\text{Se}_2$ (CIGS)**

III.1. Introduction:

Le développement de cellules solaires à base de CIGS a débuté dans les années 1970 [4]. Depuis, les rendements de conversion des dispositifs dépassent 18% en laboratoire et atteignent 13% à l'échelle industrielle. Bien qu'une cellule CIGS soit constituée d'au moins 6 matériaux différents, c'est principalement la compréhension et l'amélioration des propriétés du matériau absorbeur qui sont au cœur des progrès réalisés. L'utilisation de substrats métalliques à la place du verre constitue une véritable problématique additionnelle.

Dans ce chapitre nous décrivons la structure d'une cellule solaire à base de CIGS, le rôle et les caractéristiques des différentes couches constituant la cellule. Ensuite nous présentons les propriétés fondamentales du matériau CuInSe_2 , à savoir sa structure cristalline, ses propriétés électriques et optiques. Le contrôle des propriétés optoélectroniques du semi-conducteur en fonction de la teneur en éléments Cu, In, Ga et Se rend compte d'une ingénierie fine du matériau à maîtriser, afin d'en accroître les performances. Enfin, nous donnons un aperçu sur les différentes méthodes de déposition des couches minces pour les cellules solaires à base de CIGS.

III.2. Structure d'une cellule CIGS

Dans sa configuration la plus répandue, une cellule CIGS est formée d'un empilement de plusieurs matériaux en couches minces déposés successivement sur un substrat. Ce dernier est généralement une plaque de verre sodocalcique (Soda-Lime Glass, SLG). La figure 2.1 présente la structure standard d'une cellule à base de CIGS.



FIGURE 2.1 – Structure standard d'une cellule à base de CIGS.

III.2.1. Le substrat :

Le substrat est le support permettant la tenue mécanique des différentes couches, dont l'empilement ne dépasse pas quelques micromètres d'épaisseur. Il doit répondre à différents critères chimiques et mécaniques, qui le rendent apte à suivre toutes les étapes de fabrication de la cellule, sans en détériorer la qualité, tout en ayant un coût limité. Il existe trois catégories de substrat : le verre, les métaux, et les polymères. Le substrat le plus couramment utilisé est le verre sodocalcique, qui présente toutes les propriétés requises. [51]

III.2.2. Le contact métallique arrière :

La première couche déposée sur le substrat est l'électrode de contact arrière. Elle a pour rôle principal de collecter les charges générées dans la cellule. D'un point de vue électrique, elle constitue le pôle positif du générateur photovoltaïque. Cette couche est composée de molybdène (Mo) et son épaisseur est d'environ 300 nm à 1000 nm. La méthode de dépôt la plus utilisée pour le contact arrière est la pulvérisation cathodique.

III.2.3. L'absorbeur :

La couche située directement au dessus du contact arrière est composée du matériau absorbeur, le CIGS. Il s'agit d'un semi-conducteur de type p qui forme la première partie de l'hétérojonction p-n. C'est aussi dans ce matériau que la majorité des photons est absorbée pour former les paires électron-trou. Son épaisseur est d'environ 1 μm à 2 μm . Les méthodes de dépôt du CIGS sont variées, les plus communes étant la co-évaporation et le recuit de précurseurs métalliques en présence de vapeurs de sélénium.

III.2.4. La couche tampon :

L'hétérojonction p-n avec le CIGS est formée en ajoutant une couche appelée « couche tampon ». Cette dénomination provient du fait qu'elle joue aussi un rôle de protection physique du CIGS lors du dépôt par pulvérisation cathodique des couches suivantes [5].

Actuellement, les meilleurs rendements sont obtenus en utilisant des couches tampon à base de sulfure de cadmium (CdS). Aussi, c'est le matériau le plus utilisé. Cependant, en raison de la toxicité du cadmium, d'importants efforts sont tournés vers le développement de couches tampon alternatives (Zn (O,S), (Zn,Mg)O, $\text{In}_2(\text{S,Se})_3$, etc.). L'épaisseur typique d'une couche tampon en CdS est d'environ 50 nm. La méthode la plus courante de dépôt du CdS est le bain chimique (Chemical Bath Deposition, CBD).

III.2.5. La couche fenêtre :

La couche tampon est recouverte d'une couche fenêtre (Window Layer). Cette couche est composée d'un dépôt d'oxyde de zinc (ZnO) et d'un dépôt d'oxyde transparent conducteur (Transparent Conducting Oxide, TCO). La couche de ZnO est résistive et sert à limiter la formation de court-circuits dans les zones présentant un recouvrement imparfait du CIGS par la couche tampon [6]. Les TCO les plus utilisés sont le ZnO dopé aluminium (ZnO : Al) et l'oxyde d'indium et d'étain (Indium Tin Oxide, ITO) déposés par pulvérisation cathodique. Le TCO permet à la couche fenêtre de constituer en partie le contact avant de la cellule photovoltaïque tout en étant transparente au rayonnement solaire, ce dernier devant être absorbé dans la couche de CIGS. L'épaisseur de la couche fenêtre est de l'ordre de 300 nm à 500 nm.

III.2.6. La grille

Le contact avant final est réalisé en ajoutant à l'empilement une grille qui collectera les charges générées par le dispositif. Cette grille est composée d'une couche de nickel et d'une couche d'aluminium. Le Ni sert de couche d'accroche et permet d'éviter l'oxydation de l'Al liée à la présence sous-jacente du TCO. Les grilles sont déposées en général par évaporation en utilisant un masque de dépôt

III.3. Propriétés du CIGS

Le rendement d'une cellule solaire à base de CIGS est fortement dépendant des propriétés du matériau absorbeur. Comme dans le cas d'autres semi-conducteurs, la structure cristalline du CIGS ainsi que sa composition peuvent fortement influencer sur ses propriétés optiques et électroniques. La bonne compréhension de la structure de ce matériau est donc nécessaire dans le but d'optimiser un dispositif à base de CIGS.

III.3.1. Structure cristalline

Le matériau à la base du CIGS est le CIS (CuInSe_2). C'est un semi-conducteur I-III-VI₂ qui possède une structure cristalline chalcopyrite. Cette structure tétragonale peut être décrite comme un empilement de deux structures zincblende dans lequel les sites tétraédriques sont occupés par des atomes du groupe III (Se) (anions) et les autres sites sont occupés de manière ordonnée par des atomes des groupes I (Cu) et II (In) (cations). Le ratio des paramètres de maille c/a est légèrement différent de 2 (distorsion tétraédrique), ce qui est dû à des différences d'énergie entre les liaisons Cu-Se et In-Se [4].

Dans le cas du CIGS, les sites des atomes du groupe III sont donc occupés par des atomes d'In ou de Ga, dans des proportions dépendant de la composition de l'alliage.

En d'autres termes, le CIGS est une solution solide de CuInSe_2 et de CuGaSe_2 . La figure 2.2 présente les différences de structure cristalline entre 3 matériaux semiconducteurs utilisés dans le photovoltaïque : le Si, le CdTe et le CIGS.

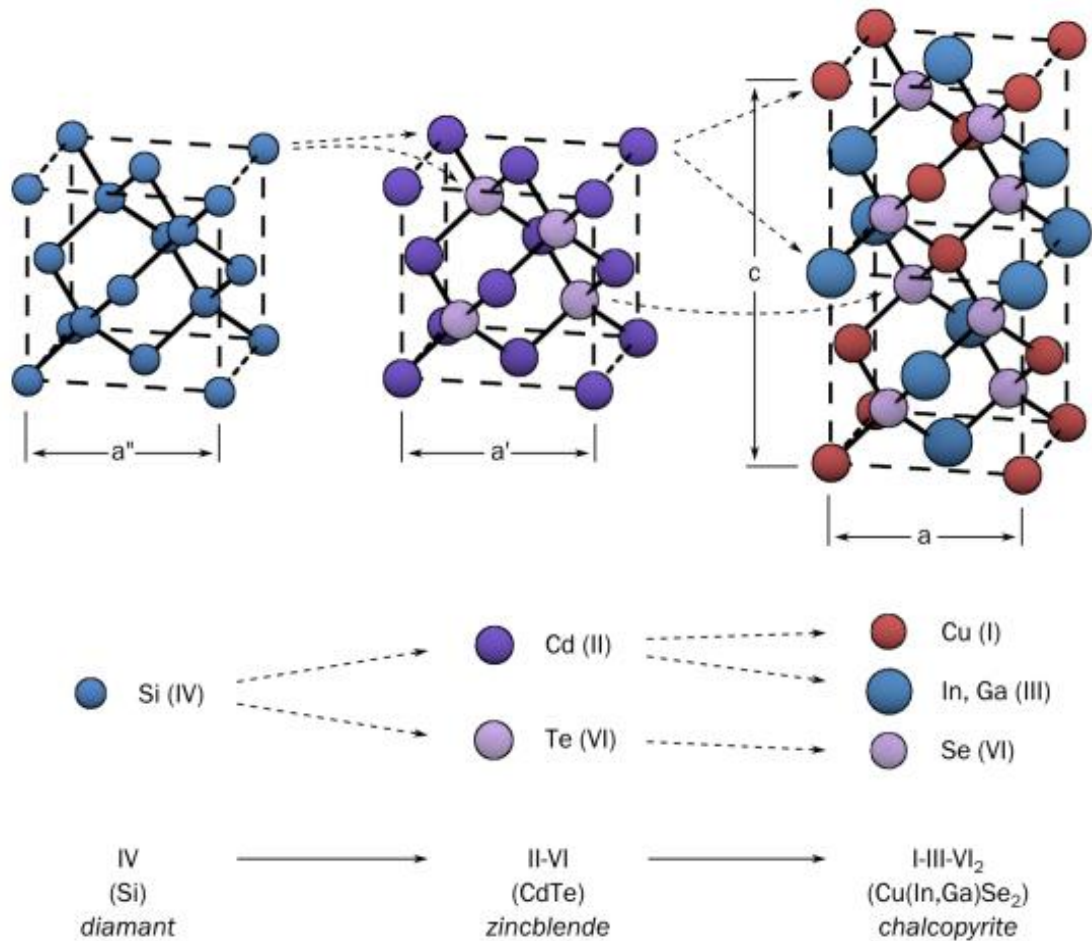


FIGURE 2.2 – Comparaison des mailles élémentaires des structures cristallines du Si, du CdTe et du CIGS. Structure chalcopyrite d’après [4].

III.3.2. Propriétés électroniques

➤ Structure de bandes

Le CuInSe_2 et le CuGaSe_2 sont des matériaux semi-conducteurs possédant respectivement des gaps directs de 1.035eV et 1.68eV. Cette différence est majoritairement liée à une différence de minimum de la bande conduction (E_C) [18]. Comme nous l’avons vu précédemment, le CIGS est une solution solide de ces deux matériaux.

Chapitre III : Cellules solaires à base de CIGS

Le ratio $x = [\text{Ga}]/([\text{In}]+[\text{Ga}])$ détermine le taux d'atomes de gallium qui remplacent les atomes d'indium dans la structure. La largeur de la bande interdite du CIGS varie en fonction de x entre les valeurs du pur CIS et du pur CGS, suivant la loi empirique suivante [19] :

$$E_g = 1.035 + 0.65x - 0.264x(1 - x) \quad (2.1)$$

Le CIGS est donc un matériau dont E_g peut être ajusté entre 1.035eV et 1.68eV en fonction du taux de gallium. La valeur optimale d' E_g dépend de plusieurs facteurs. Du point de vue de l'absorption des photons, il est préférable d'avoir une valeur d' E_g réduite, permettant d'absorber un spectre plus large (plus grandes longueurs d'onde). Il en résulte un courant plus important délivré par la cellule solaire (J_{sc}). Cependant, c'est la valeur d' E_g qui détermine la tension maximale délivrée par la cellule. Afin de maximiser le rendement de conversion, il est donc nécessaire d'obtenir un compromis idéal entre courant et tension. La plupart des résultats expérimentaux publiés dans le domaine des cellules CIGS montrent que les meilleurs rendements sont obtenus avec un gap d'environ 1.2eV [20], ce qui correspond à un taux de Ga proche de 30%.

La présence d'un gradient de concentration en Ga dans la couche d'absorbeur permet donc d'obtenir une variation de la bande interdite dans l'épaisseur du matériau. Ce gradient de gap (Band gap grading) fait l'objet de nombreuses études dans le domaine du CIGS. En effet, il peut être contrôlé dans les procédés usuels de dépôt de CIGS tels que la coévaporation en 3 étapes [21]. La figure 2.4 présente les 3 types de gradients de gap principalement rencontrés dans les cellules CIGS. Dans le cas où aucun gradient n'est présent (a), le transport des électrons n'est pas particulièrement influencé par la structure de bandes.

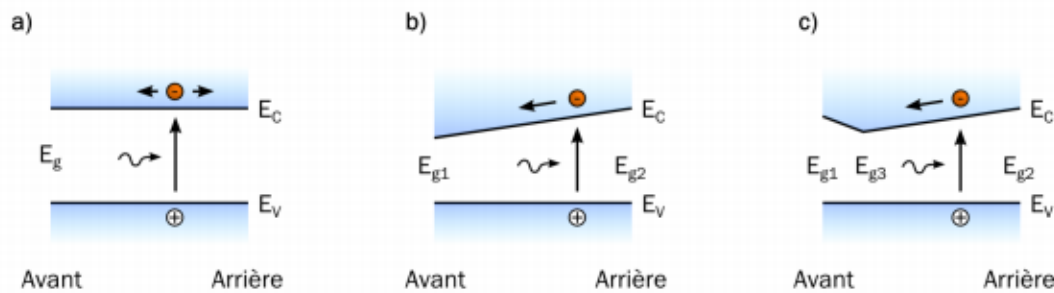


FIGURE 2.4 – Principaux types de gradients de bande interdite rencontrés dans les couches de CIGS : a) Bandes plates, b) Simple gradient, c) Double gradient avec présence d’un notch. D’après [23].

Dans le cas dit d’un gradient simple (b), le gap au contact arrière (E_{g2}) est plus grand que le gap au contact avant (E_{g1}). La différence de potentiel induite facilite ainsi le transport des électrons vers la zone de charge d’espace [18]. De plus, du fait de la présence d’un plus grand gap au contact arrière, les recombinaisons dans cette même zone sont réduites [22]. Le troisième profil de gap est appelé double gradient (c).

Il est en effet composé d’une première zone allant du contact arrière (E_{g2}) jusqu’à une position communément appelée notch, d’un gap plus faible (E_{g3}). Ce premier gradient présente les mêmes avantages que le profil simple (différence de potentiel et plus large gap au contact arrière). Dans la seconde partie, le gradient est inversé et remonte jusqu’à un gap E_{g1} . Ce dernier permet d’augmenter le gap effectif à l’hétérojonction et de limiter les recombinaisons à l’interface avec la couche de type n [23]. Ainsi, dans la configuration en double gradient, la valeur du gap minimum (E_{g3}) sera déterminante pour l’absorption des photons et donc le courant en court-circuit (J_{sc}). De même, les valeurs des gaps maximums (E_{g1} et E_{g2}) influenceront sur la tension en circuit ouvert (V_{oc}) [22].

➤ Dopage

Le CIGS utilisé dans les cellules standard est de type p. Ce dopage est dû à la présence de défauts cristallins générant des états accepteurs (dopage intrinsèque). La figure 2.6 récapitule les niveaux d’énergie théoriques correspondant aux principaux défauts cristallins

présents dans le CIS. Dans le cas du CIGS, ces valeurs varient dans de faibles proportions en fonction du taux de Ga [30].

Les niveaux accepteurs sont principalement dus aux lacunes de cuivre (V_{Cu}) et d'indium (V_{In}), ainsi qu'aux substitutions d'indium par le cuivre (Cu_{In}). Cependant le dopage p du CIGS est essentiellement lié aux V_{Cu} pour deux raisons. Premièrement, ils génèrent un niveau accepteur très proche (0.03 eV) du maximum de la bande de valence. Deuxièmement, leur énergie de formation est la plus favorable ($E_f = 0.6\text{eV}$) [12]. Quant aux défauts générant des niveaux donneurs (In_{Cu} et Cu_i), ils possèdent une énergie de formation beaucoup élevée que les V_{Cu} . C'est donc l'abondance de ce dernier défaut dans le CIGS qui est à l'origine de son dopage p.

➤ Zones de recombinaisons

La caractéristique électrique courant-tension d'une cellule solaire idéale (exempte de courts circuits et de résistance série) suit la loi de Shockley :

$$J = J_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] - J_{ph} \quad (2.13)$$

Avec J_0 le courant de saturation, q la charge élémentaire, V la tension appliquée, n le facteur d'idéalité de la diode, k la constante de Boltzmann, T la température et J_{ph} le courant photogénéré. Le courant de saturation vaut :

$$J_0 = J_{00} \exp\left(\frac{-\phi_b}{nkT}\right) \quad (2.14)$$

L'énergie d'activation ϕ_b et le préfacteur exponentiel J_{00} sont propres au mécanisme de recombinaison dominant. Il en est de même pour le facteur d'idéalité de la diode n . Dans les conditions normales de fonctionnement d'une cellule solaire ($J_{ph} \gg J_0$), le terme -1 dans $[\exp(qV/nkT) - 1]$ (équation 2.13) est négligeable. Ainsi, à partir des équations

2.13 et 2.14, il est possible d'exprimer le V_{oc} . Ce dernier correspond aux conditions pour lesquelles $J=0$ (circuit ouvert). On obtient donc :

$$V_{oc} = \frac{\phi_b}{q} - \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{J_{00}}{J_{ph}}\right) \quad (2.15)$$

L'énergie d'activation ϕ_b peut être considérée comme égale au gap E_g du CIGS [4].

On retrouve donc dans cette équation l'influence du gap sur le Voc. De plus, le Voc dépend aussi des recombinaisons et de leur mécanisme. Ces dernières peuvent se produire à différentes positions dans l'épaisseur de la cellule. Les trois principales zones dans lesquelles elles se produisent sont : la zone quasi-neutre du CIGS (A), la zone de charge d'espace (B) et l'interface CIGS/CdS (C) [25]. La figure 2.8 montre la structure de bandes d'un empilement ZnO/CdS/CIGS et ces principales zones de recombinaison.

Selon la zone où se situent la majorité des recombinaisons, l'expression du Voc sera donc différente car J_{00} , n et ϕ_b dépendront de paramètres différents. Il a été montré que la majorité des recombinaisons se produisent dans le CIGS, c'est à dire dans les zones (A) et (B) [34]. Ainsi, si les recombinaisons sont majoritairement dans la zone quasi-neutre (voie A), l'expression du Voc devient [25] :

$$V_{oc, A} = \frac{E_g}{q} - \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{1}{J_{ph}} \cdot \frac{qD_n N_C N_V}{L_n N_A}\right) \quad (2.16)$$

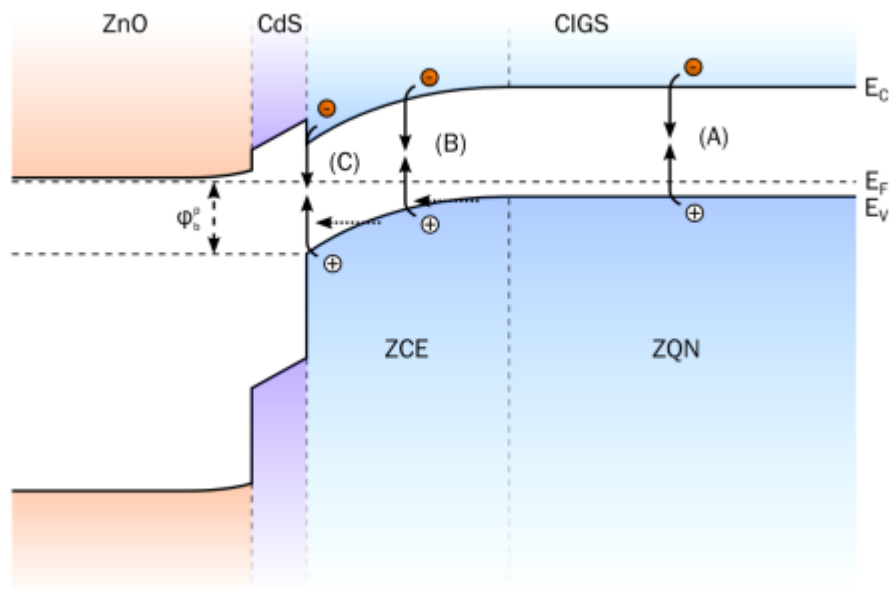


FIGURE 2.8 – Diagramme de bande d’une structure ZnO/CdS/CIGS présentant les trois principales zones de recombinaisons : A) dans la zone quasi-neutre (ZQN) du CIGS, B) dans la zone de charge d’espace (ZCE), C) à l’interface CdS/CIGS. Les flèches horizontales en pointillés indiquent la possible participation de l’effet tunnel aux recombinaisons. D’après [25].

Avec D_n le coefficient de diffusion des électrons, N_c et N_v les densités d’états dans la bande de conduction et de valence, L_n la longueur de diffusion des électrons et N_A la densité d’états accepteurs dans la couche de CIGS. Dans ce cas, le facteur d’idéalité n vaut 1. Le dopage (N_A) ainsi que la longueur de diffusion des électrons dans le CIGS sont déterminants pour la tension délivrée par la cellule.

III.3.3. Propriétés optiques et génération de courant

Si le CIGS est utilisable dans des dispositifs photovoltaïques en couches minces, c’est parce qu’il possède un gap direct. De ce fait, l’absorption des photons ayant une énergie proche du gap ne nécessite pas l’intervention de phonons et il en résulte un coefficient

d'absorption optique α élevé (comparé à un semi-conducteur à gap indirect comme le silicium). Pour une énergie de photon h donnée, le coefficient d'absorption vaut approximativement [4] :

$$\alpha(h\nu) = \frac{A}{h\nu} \sqrt{h\nu - E_g} \quad (2.20)$$

Cette relation illustre clairement l'influence du gap sur la plage d'énergies dans laquelle le CIGS absorbe.

CHAPITRE IV:

Modélisation et Simulation de Cellules Solaires à base de CIGS

IV.1 Introduction :

Après avoir présenté les généralités indispensables à l'étude des cellules photovoltaïques à couches minces, nous allons maintenant déterminer les caractéristiques de ces cellules à base d'un type de structure choisi.

La résolution des trois équations fondamentales qui régissent le comportement des porteurs de charges nous permet de calculer la caractéristique $I(V)$ d'une cellule solaire ainsi que d'autres paramètres physiques tels que le champ E , le potentiel, ce qui fournit les renseignements utiles des performances d'une cellule solaire. La résolution analytique étant compliquée et pratiquement impossible, nous avons recours à la résolution numérique qui nécessite un grand nombre d'itérations.

Le simulateur TCAD (Technology Computer-Aided Design) permet la modélisation du comportement physique et électrique d'un composant électronique. Ceci nous permet d'économiser le temps et le coût de développement, et ainsi de pouvoir envisager et optimiser des solutions pour améliorer les performances des dispositifs. Les simulateurs existants sur le marché (SCAPS, SILVACO, PC1D,...) ont le même principe de fonctionnement. Ils résolvent les équations différentielles qui régissent le fonctionnement des dispositifs électroniques par des méthodes numériques (éléments finis, moindre carré, méthode de monté Carlo, etc.).

Dans notre étude nous avons modélisé une structure de cellule solaire réalisée à base de couches minces $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ et nous avons simulé ses paramètres physiques et électriques par le logiciel unidimensionnel appelé SCAPS . Pour cela nous avons choisi un modèle de structure selon la littérature et nous avons essayé de caller nos résultats simulés sur des exemples expérimentaux réels pour calibrer notre logiciel et établir un code de calcul spécifique aux structures étudiées. Par la suite nous avons défini la structure qui nous donne un rendement électrique optimal.

IV.2- Présentation du logiciel de simulation SCAPS :

IV.2.1. Introduction

SCAPS (Solar Cell Capacitance Simulator) est un logiciel de simulation numérique des cellules solaires unidimensionnelles développé par le département des systèmes électroniques et informatiques (ELIS), à l'université de Gent en Belgique. Plusieurs chercheurs ont contribué au développement de ce logiciel: Alex Niemegeers, Marc Burgelman, Koen Decock, Johan Verschraegen, Stefaan Degraeve[39].

Ce logiciel est disponible gratuitement pour la communauté des recherches photovoltaïques (PV) (Instituts et établissements de recherche). Il fonctionne sur PC sous les systèmes d'exploitation Windows 95, 98, NT, 2000, XP, Vista, Windows 7, Windows 8 et occupe à peu près 50 MB d'espace sur le disque.

SCAPS est originellement développé pour les structures de cellules de famille CuInSe_2 et CdTe . Cependant, plusieurs extensions ont amélioré ses capacités de façon à devenir applicable pour les cellules solaires cristallines (de la famille Si et GaAs), ainsi que les cellules solaires amorphes (a-Si et les micro-morphes Si).

IV.2.3- Principe de la simulation numérique :

L'étude de la plus part des dispositifs à semi-conducteurs est basée sur la résolution simultanée de l'équation de Poisson et de l'équation de continuité.

Il calcule à chaque instant et en tout point de l'espace en une suite d'éléments finis, la concentration des électrons et des trous et la valeur du potentiel électrostatique. L'équation de Poisson définit la relation entre le potentiel et la densité des porteurs :

$$\Delta V = \frac{-q}{\epsilon} (N_d - N_a + p - n) \quad (\text{IV.1})$$

Où : ϵ est la constante diélectrique,

V le potentiel,

Chapitre IV : Modélisation et Simulation de Cellules Solaires à base de CIGS

q est la charge élémentaire d'électrons,

N_d et N_a sont les concentrations des dopants donneurs et accepteurs ionisées,

n et p sont les densités des porteurs.

L'évolution temporelle des densités de porteurs obéit aux équations de continuité (V.2) et (V.3) pour respectivement les électrons et les trous :

$$\frac{\partial n}{\partial t} = G - U_n + \frac{1}{e} \text{div} \vec{J}_n \quad (\text{IV.2})$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = G - U_p + \frac{1}{e} \text{div} \vec{J}_p \quad (\text{IV.3})$$

Où : G et U sont respectivement les taux de génération et de recombinaison des porteurs, et sont respectivement les densités de courant des électrons et des trous.

Les dérivations basées sur la théorie de transport de Boltzmann ont prouvé que la densité des courants dans les équations de continuité peut être définie par le modèle d'entraînement-diffusion. Les densités de courants sont exprimées en deux termes. Le premier correspond à l'entraînement des charges par le champ électrique et le second correspond à la diffusion des porteurs.

$$\vec{J}_n = q n \mu_n \vec{E} + q D_n \overrightarrow{\text{grad}} n \quad (\text{IV.4})$$

$$\vec{J}_p = q p \mu_p \vec{E} + q D_p \overrightarrow{\text{grad}} p \quad (\text{IV.5})$$

Où : D_n et D_p sont les coefficients de diffusion.

IV.2.4. Structure et paramètres de la cellule étudiée:

IV.2.5. présentation de la cellule étudiée :

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

Dans notre étude, nous utilisons une cellule solaire composée des hétérojonctions suivantes : ZnO /CdS /CIGS/ Mo/verre. Le schéma simplifié de l'hétérostructure est représenté sur la figure V -2.

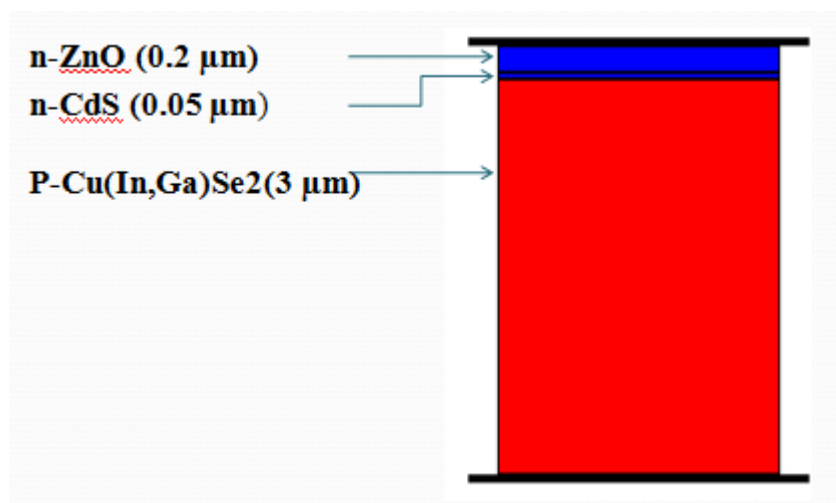


Figure IV-3 : Structure de la cellule solaire à hétérojonction (n-ZnO/n-CdS/p-CIGS) étudiée.

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

IV.2.6. Paramètres des différentes couches :

Tableau V-2 : propriétés des trois couches ZnO, CdS et CIGS d'après la base des données de SCAPS.

Chapitre IV : Modélisation et Simulation de Cellules Solaires à base de CIGS

	ZnO	CdS	CIGS
Epaisseur (μm)	0.2	0.05	3
Constante diélectrique	9	10	13.6
Mobilité d'électron ($\text{cm}^2/\text{V.s}$)	100	100	100
Mobilité du trou ($\text{cm}^2/\text{V.s}$)	25	25	25
Densité de porteur (cm^{-3})	10^{18}	10^{18}	2×10^{16}
Bande de gap	3.3 eV	2.4 eV	1.15eV
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}
Affinité électronique (eV)	4.45	4.2	4.5

IV.3. Résultats de la simulation :

IV.3.1.Introduction :

Dans le but d'optimiser une conception spécifique d'une structure d'hétérojonction ZnO/CdS/CIGS, nous devons analyser et interpréter les résultats pour déterminer l'influence des paramètres physiques et technologiques sur les performances du dispositif tels que le dopage et l'épaisseur.

Dans notre travail nous allons étudier l'effet des trois couches ZnO, CdS et CIGS sur le rendement de conversion électrique.

Pour cela, dans notre simulation, nous avons fait varier les paramètres (épaisseur et dopage) de l'une tout en gardant constants ceux des deux autres couches. Les résultats obtenus dans cette opération sont présentés dans la section qui suit.

V.3.2. Effet des couches CdS, CIGS et ZnO :

a) Effet de la couche tampon CdS :

- Influence du dopage de la couche tampon CdS :

Les figures IV -7 et IV-8 représentent respectivement la caractéristique I-V de notre cellule photovoltaïque pour une gamme de dopage de la couche tampon CdS allant de 10^{16}

Chapitre IV : Modélisation et Simulation de Cellules Solaires à base de CIGS

jusqu'à $5 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ et la variation du rendement électrique en fonction du dopage, pour une épaisseur de $0.05 \mu\text{m}$ de CdS. La figure IV -9 représente la variation de la tension en circuit ouvert V_{co} en fonction du dopage de cette couche.

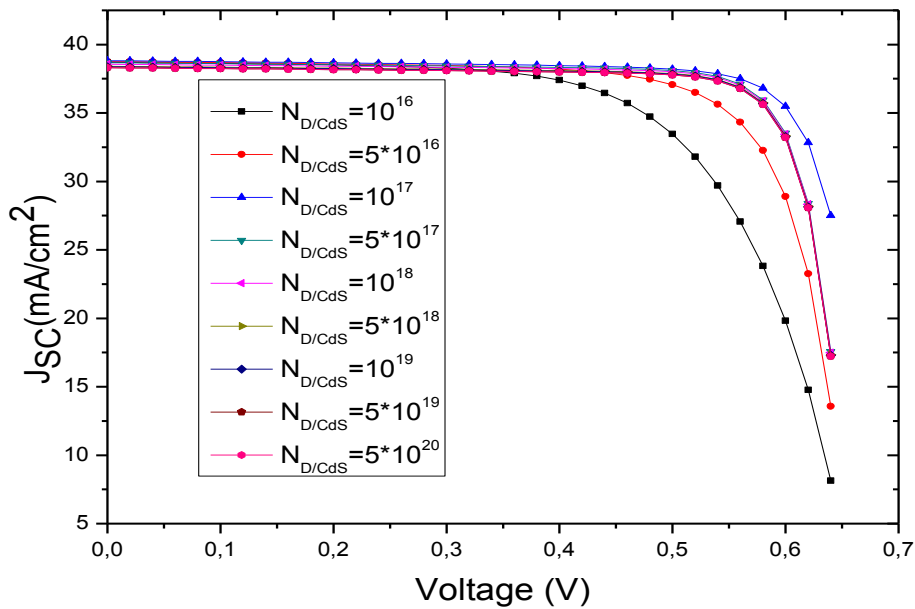


Figure IV-7 : Influence du dopage de la couche tampon $N_{D/CdS}$ sur la caractéristique I-V.

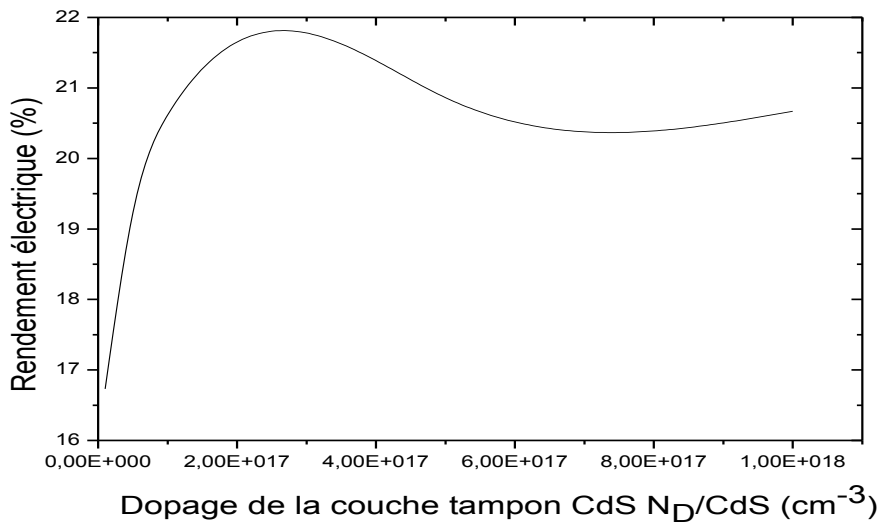


Figure IV-8: Influence du dopage de CdS sur le rendement de conversion.

Chapitre IV : Modélisation et Simulation de Cellules Solaires à base de CIGS

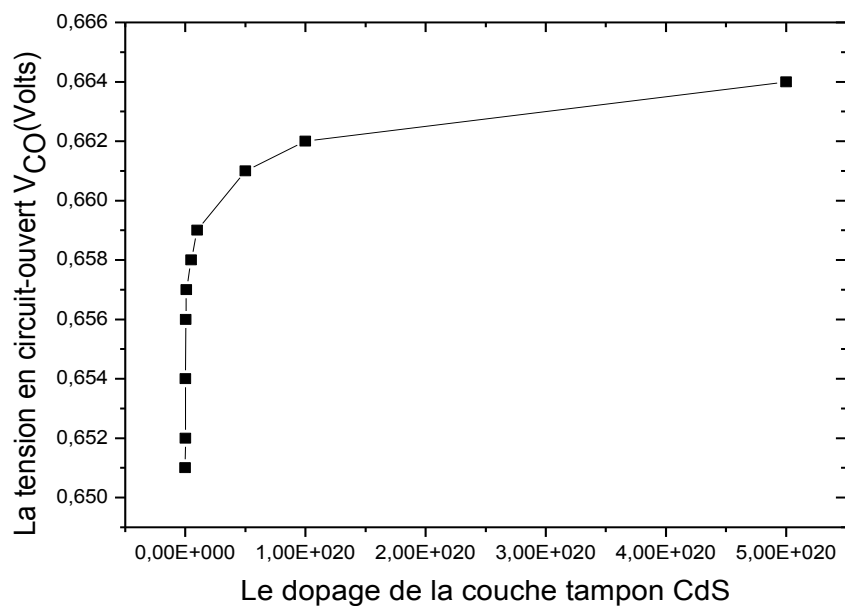


Figure IV-9: La variation de V_{CO} en fonction du dopage de la couche tampon CdS.

Les paramètres de la structure tirés des différentes caractéristiques représentées précédemment, sont récapitulés dans le tableau V-4.

Tableau V-4 : Caractéristiques de cellule solaire de CIGS.

Densité de dopage $N_{D/CdS}$	Tension en circuit ouvert $V_{CO}(V)$	Courant à court-circuit $I_{CC} (mA/cm^2)$	Facteur de forme FF(%)	Rendement η (%)
10^{16}	0.651	38.70	65.6	16.73
5.10^{16}	0.652	38.75	75.61	17.43
10^{17}	0.654	38.80	80.92	18.75
5.10^{17}	0.656	38.67	82.18	20.86
10^{18}	0.657	38.56	82.23	20.81
5.10^{18}	0.658	38.41	82.25	20.73
10^{19}	0.659	38.37	82.25	20.71
5.10^{19}	0.660	38.32	82.25	20.67
10^{20}	0.662	38.30	82.25	20.67
5.10^{20}	0.664	38.29	82.25	20.66

Chapitre IV: Modélisation et Simulation de Cellules Solaires à base de CIGS

Après la variation du dopage de la couche tampon CdS, nous observons que ces courbes présentent deux zones différentes :

-La première zone (0-0.5V) : les courbes I-V sont identiques (ont la même allure) ; l'élévation du dopage n'a pas une influence significative sur la caractéristique I-V jusqu'à une tension de l'anode de 0.5V.

-La deuxième zone (0.5 -0.65V) : les courbes I-V subissent des modifications, ces dernières présentent un changement significatif au point de fonctionnement (le maximum de puissance).

La figure V -8 : Au début montre qu'il y a une augmentation du rendement avec l'augmentation de dopage de la couche tampon CdS. Nous avons obtenu un rendement maximal de 21.56% avec un dopage de $3.10^{17} \text{ cm}^{-3}$, les différents paramètres et caractéristiques s'améliorent (la tension en circuit ouvert augmente avec la concentration du dopage).

La figure V -9 : nous observons que la tension de circuit ouvert augmente avec la concentration du dopage.

Les courbes de caractéristique I-V subissent des changements au point de fonctionnement à cause de l'impact des résistances série et parallèle. En effet, la résistance série affecte l'allure de la caractéristique I-V (la caractéristique se déforme très rapidement, mais la tension de circuit ouvert n'est pas modifiée). Les résistances série et shunt sont liées à la technologie d'élaboration des jonctions et des électrodes. Il faut minimiser la résistance série R_s et faire en sorte que R_{sh} ne soit pas trop faible.

La tension de circuit ouvert V_{CO} diminue lorsque la concentration du dopage augmente. Ceci est dû à la diminution du courant de saturation puisque ce dernier est lié à la tension du circuit ouvert par la relation suivante :

$$V_{CO} = \frac{k_B T}{q} \ln \left(1 + \frac{I_{CC}}{I_0} \right) \quad (V.6)$$

Et au dopage par la relation suivante :

$$I_0 = \frac{qD_n n_i^2}{L_n N_A} + \frac{qD_p n_i^2}{L_p N_D} \quad (V.7)$$

D'un autre côté, lorsque le dopage de la couche tampon augmente, la barrière de potentiel dans l'hétérojonction CdS/CIGS diminue, et permet une augmentation de la zone de charge d'espace, d'où une amélioration de la collecte des porteurs photogénérés et donc une augmentation du rendement de conversion.

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

Influence de l'épaisseur de la couche tampon CdS (X_{CdS}) :

L'effet de la variation de l'épaisseur de la couche tampon X_{CdS} de 0.05 à 0.005 μm sur la caractéristique I-V et sur le rendement est illustré respectivement sur les figures V -10 et V-11 pour un dopage de 10^{18} cm^{-3} . La variation de la tension en circuit ouvert V_{CO} est représentée sur la figure V -12.

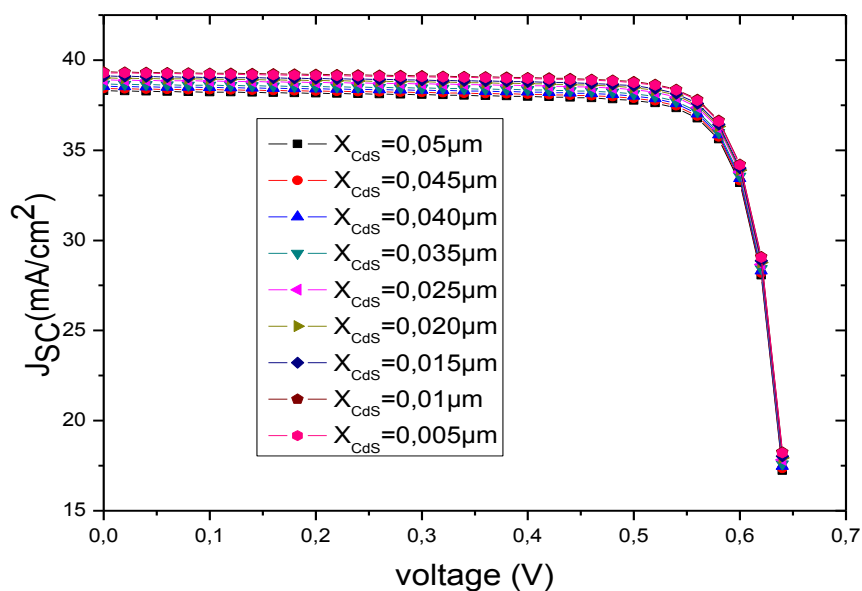


Figure IV-10: Influence de l'épaisseur de la couche tampon CdS sur la caractéristique I -V.

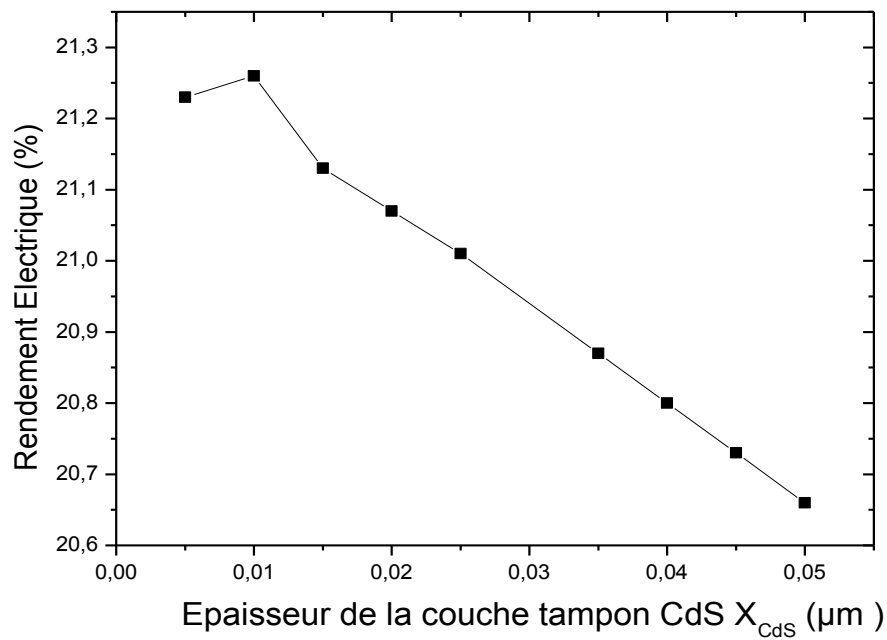


Figure IV-11: La variation du rendement en fonction de l'épaisseur de la couche tampon CdS.

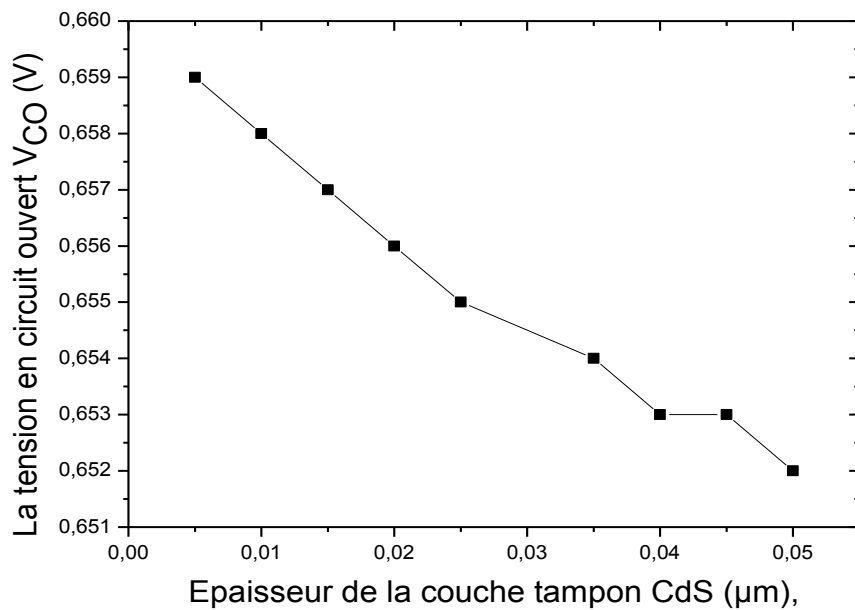


Figure IV-12: La variation de V_{CO} en fonction de l'épaisseur de la couche tampon CdS.

Chapitre IV : Modélisation et Simulation de Cellules Solaires à base de CIGS

Les paramètres de la structure, pour différentes épaisseurs X_{CdS} , tirés des différentes caractéristiques, sont récapitulés dans le tableau suivant V-5:

Tableau V-5 : Caractéristiques de cellule solaire de CIGS.

Epaisseur de la couche CdS X_{CdS} (μm)	Tension en circuit ouvert V_{CO} (V)	Courant à court-circuit I_{CC} (mA/cm^2)	Facteur de forme FF(%)	Rendement η (%)
0.05	0.652	38.29	82.25	20.66
0.045	0.653	38.41	82.25	20.73
0.040	0.654	38.54	82.26	20.80
0.035	0.655	38.66	82.26	20.87
0.030	0.656	38.89	82.27	21.01
0.025	0.657	39.00	82.28	21.07
0.020	0.658	39.11	82.28	21.13
0.015	0.659	39.34	82.29	21.26
0.01	0.659	39.29	82.29	21.23
0.005	0.659	39.27	82.29	21.26

Nous remarquons que la caractéristique I-V a une meilleure forme pour les petites épaisseurs de CdS. Chaque fois que l'épaisseur augmente la caractéristique I-V se déforme. La variation de l'épaisseur de la couche tampon avec le rendement montre qu'il y a une diminution du rendement avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche CdS. Nous obtenons un rendement de 21.26% avec une épaisseur de 0.005 μm .

La tension en circuit ouvert V_{CO} augmente avec la diminution de l'épaisseur de la couche tampon CdS puis une saturation au delà de 0.015 μm .

Les variations de l'épaisseur de la couche CdS influent sur les courbes I-V et sur le rendement. Ceci s'explique par une absorption considérable de photons ($E_{\text{photon}} > E_{g \text{ CdS}} = 2.4\text{eV}$) dans cette couche. L'absorption dans la couche tampon diminue le nombre des photons incidents qui ont une énergie $h\nu > E_{g \text{ CdS}}$. Tous les photons possédant une longueur d'onde supérieure à celle associée au gap du semi-conducteur ne peuvent pas générer de paire électron-trou et par conséquent, sont perdus. L'excès d'énergie supérieure à la largeur de bande interdite est principalement dissipé sous forme de chaleur (phénomène de

Chapitre IV : Modélisation et Simulation de Cellules Solaires à base de CIGS

thermalisation). Ceci influe sur la création de paires électron-trou contribuant à l'ensemble de photocourant d'où la diminution du rendement.

La couche CdS avec son gap de 2.4eV agit de sorte que l'absorption soit dans le domaine de courtes longueurs d'ondes. De ce fait, un film de CdS d'une épaisseur de 0.1 μ m peut absorber jusqu'à 63% de la lumière incidente à énergie supérieure à E_g [Moualkia, 10].

Le but est donc de récupérer les photons perdus afin d'améliorer le rendement de conversion de la cellule solaire. Du fait que la lumière absorbée dans le CdS ne contribue pas significativement dans le photocourant collecté, il est souhaitable que cette couche soit d'épaisseur minimale. En outre, la collecte des porteurs se fait par le champ plutôt que la diffusion. Comme il n'y a pas de zone de charge dans le CdS qui est fortement dopé et parce que la durée de vie des porteurs minoritaires y est très courte, la couche CdS est en fait une couche « morte » du point de vue photovoltaïque. Il est donc préférable de minimiser son épaisseur pour réduire les pertes d'absorption optique.

Le rendement le plus élevé (21.26%) a été obtenue pour une épaisseur de 0.005 μ m. En effet, lorsque leur taille diminue, le nombre de particules par gramme s'accroît considérablement.

Et donc si la taille de la couche tampon diminue, le matériau CdS devient un bon absorbeur.

b) Effet de la couche d'absorbeur CIGS :

- Influence du dopage de l'absorbeur CIGS ($N_{A/CIGS}$) :

Pour voir l'influence du dopage de l'absorbeur CIGS nous avons procédé à la variation de $N_{A/CIGS}$ de 10^{15} à 10^{17} cm^{-3} . L'influence du dopage de l'absorbeur CIGS sur la caractéristique I-V est représentée sur la figure IV-13 et la variation du rendement de conversion en fonction du dopage est illustrée sur la figure IV -14.

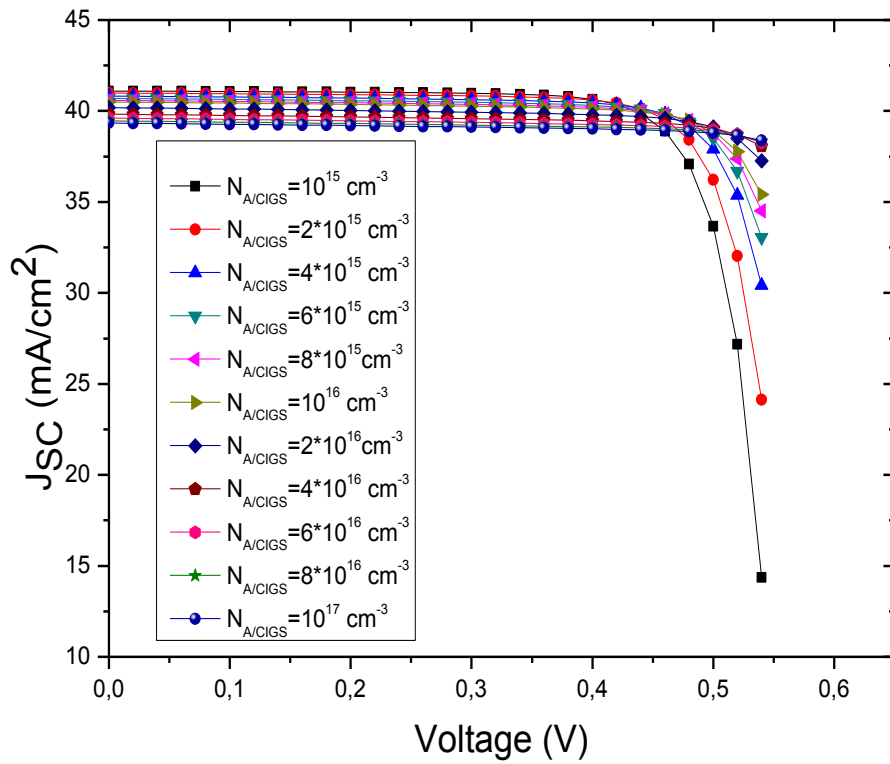


Figure IV-13 : Influence du dopage $N_{A/CIGS}$ sur la caractéristique I-V.

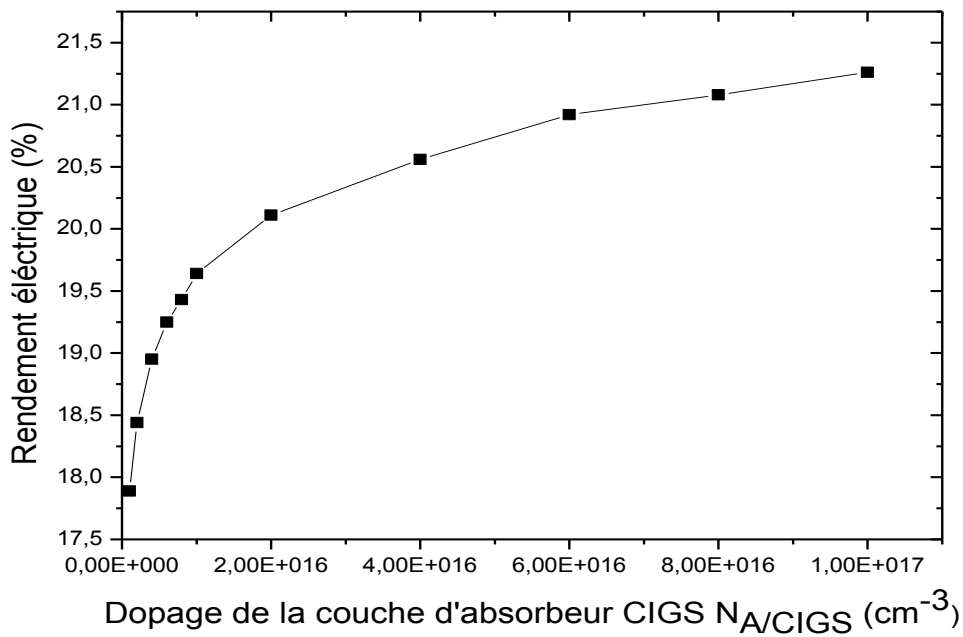


Figure IV-14 : Influence du dopage de l'absorbeur CIGS sur le rendement.

Chapitre IV : Modélisation et Simulation de Cellules Solaires à base de CIGS

Densité de dopage $N_{D/CIGS}$ (cm^{-3})	Tension en circuit ouvert V_{CO} (V)	Courant à court-circuit I_{CC} (mA/cm^2)	Facteur de forme FF(%)	Rendement η (%)
10^{15}	0.55	41.09	78.84	17.89
2.10^{15}	0.56	40.98	79.34	18.44
4.10^{15}	0.58	40.81	79.76	18.95
6.10^{15}	0.59	40.69	80.11	19.25
8.10^{15}	0.59	40.58	80.19	19.43
10^{16}	0.60	40.49	80.56	19.64
2.10^{16}	0.61	40.18	81.04	20.11
4.10^{16}	0.63	39.82	81.44	20.56
6.10^{16}	0.64	39.61	82.00	20.92
8.10^{16}	0.65	39.45	82.07	21.08
10^{17}	0.65	39.33	82.28	21.26

Tableau IV-8 : Caractéristiques de cellule solaire de CIGS.

Nous remarquons que ces caractéristiques I(V) présentent deux zones :

-La première zone (0-0.5V): pas de variation avec le dopage.

-La deuxième zone (0.5-0.6V): nous remarquons que les courbes diminuent respectivement à partir de la valeur de la tension 0.5V.

Nous remarquons aussi que le rendement augmente pour un dopage entre 10^{15} et $10^{17} cm^{-3}$. Le rendement le plus élevé est obtenue à la concentration de $10^{17} cm^{-3}$.

Les caractéristiques des matériaux semi-conducteurs sont fortement influencées par les impuretés ou les défauts. Ces derniers sont ajoutés pour augmenter la conductivité électrique ou le contrôle de la durée de vie, mais souvent ces impuretés ou ces imperfections dans le réseau, à partir d'un certain seuil, agissent comme facteurs de perte, par conséquent une concentration élevée de défauts défavorise le transport des porteurs, réduisant ainsi le rendement de conversion.

➤ **Influence de l'épaisseur de la couche d'absorbeur CIGS (X_{CIGS}) :**

L'effet de la variation de l'épaisseur de la couche tampon X_{CIGS} de 0.4 à $3\mu m$ sur la caractéristique I-V et sur le rendement est illustré respectivement sur les figures IV-15 et IV-16 pour un dopage de $10^{17} cm^{-3}$.

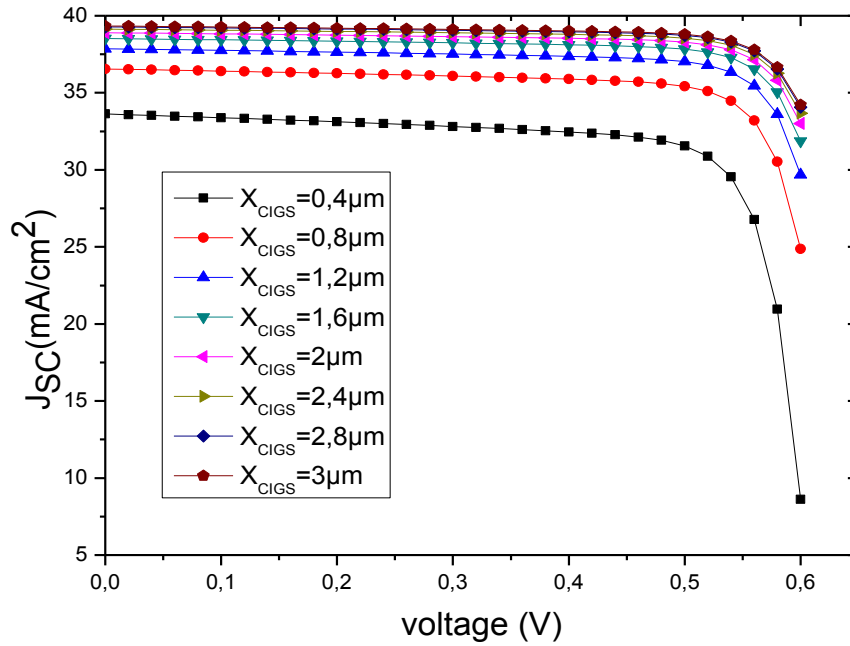


Figure IV-15 : Influence de l'épaisseur de la couche d'absorbeur CIGS (X_{CIGS}) sur la caractéristique I-V.

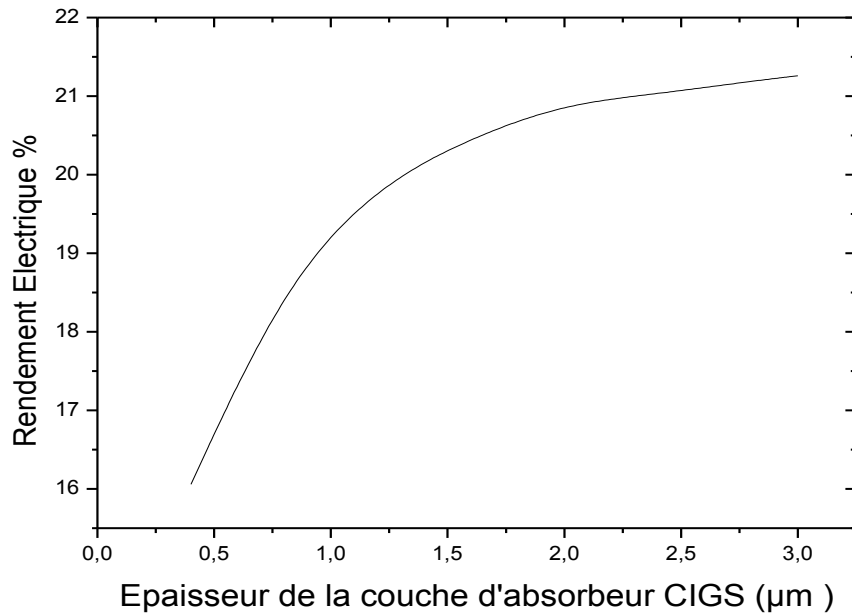


Figure V-16 : Influence de l'épaisseur de la couche d'absorbeur CIGS (X_{CIGS}) sur la caractéristique I-V.

Chapitre IV : Modélisation et Simulation de Cellules Solaires à base de CIGS

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

Tableau V-9 : Caractéristiques de cellule solaire de CIGS

Épaisseur de la couche CIGS X_{CIGS} (μm)	Tension en circuit ouvert V_{CO} (V)	Courant à court-circuit I_{CC} (mA/cm ²)	Facteur de forme FF(%)	Rendement η (%)
0.4	0.60	33.62	78.57	16.06
0.8	0.63	36.64	70.69	18.62
1.2	0.64	37.85	81.66	19.86
1.6	0.64	38.52	81.95	20.47
2	0.65	38.90	82.00	20.80
2.4	0.65	39.13	82.10	21.03
2.8	0.65	39.28	82.23	21.19
3	0.65	39.33	82.28	21.26

La figure IV -17 montre qu'il y a une augmentation du rendement avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche CIGS. Nous avons obtenu un rendement maximal de 21.26% avec une épaisseur de 3 μm .

Le rendement décroît lorsque l'épaisseur de la CIGS est réduite. Donc la probabilité de recombinaison des transporteurs générés est plus importante au voisinage du contact arrière. Quand les porteurs atteignent la couche d'absorbeur CIGS (la jonction p-n), ils vont se recombiner dans la couche tampon CdS, ou ils vont circuler dans la couche d'absorbeur CIGS ce qui diminue la densité du courant photo-généré ce qui implique la diminution du rendement de conversion.

Nous concluons qu'il faudrait choisir une épaisseur seuil pour avoir le rendement électrique optimal. Dans notre cas, cette épaisseur est de 3 μm .

c) Effet de la couche fenêtre ZnO :

- Influence du dopage de la couche ZnO ($N_{\text{D}/\text{ZnO}}$):

Les figures IV -17 et IV-18 représentent respectivement la caractéristique I -V de la cellule photovoltaïque pour une gamme de dopage de la couche fenêtre ZnO allant de 10^{16} jusqu'à

Chapitre IV : Modélisation et Simulation de Cellules Solaires à base de CIGS

5.10^{21}cm^{-3} et la variation du rendement électrique en fonction du dopage, pour une épaisseur de $0.2 \mu\text{m}$ de ZnO.

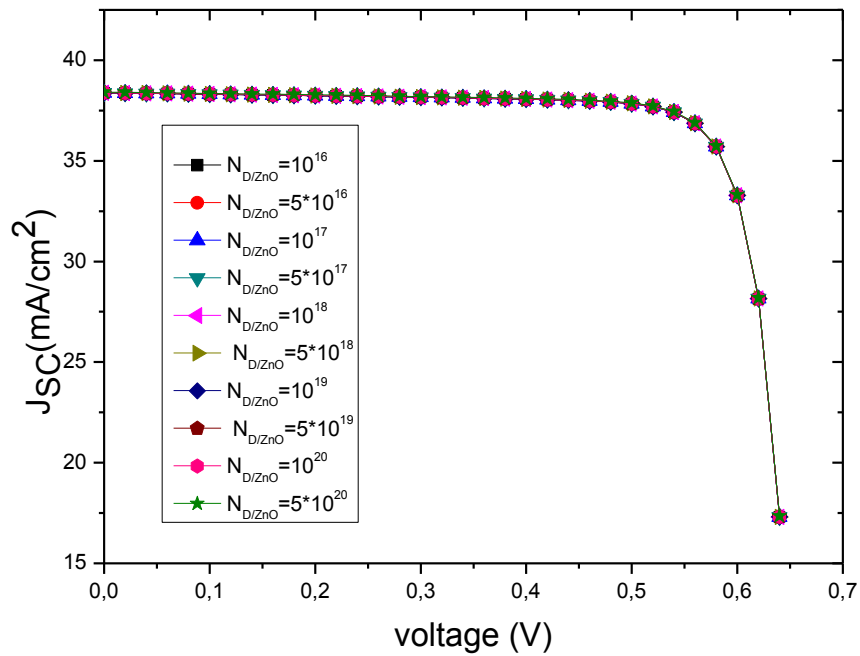


Figure IV-17 : Influence du dopage de la couche fenêtre $N_{D/ZnO}$ sur la caractéristique I-V.

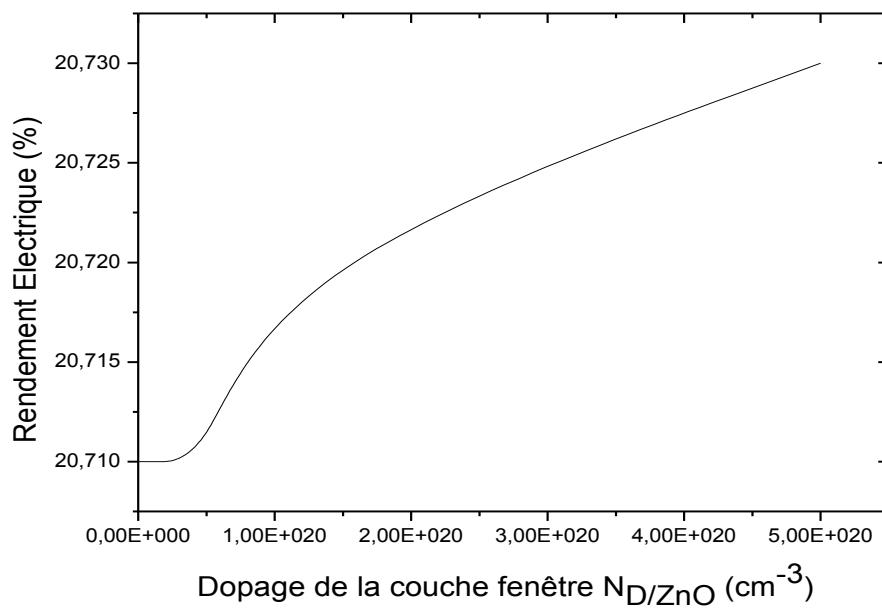


Figure IV-18: Influence de la densité de dopage de la couche fenêtre $N_{D/ZnO}$ sur le rendement.

Chapitre IV : Modélisation et Simulation de Cellules Solaires à base de CIGS

Les résultats de simulation sont récapitulés dans le tableau V-6 suivant:

Tableau V-6 : Caractéristiques de cellule solaire de CIGS.

Densité de dopage $N_{D/ZnO}(\text{cm}^{-3})$	Tension en circuit ouvert $V_{CO}(\text{V})$	Courant à court-circuit $I_{CC}(\text{mA}/\text{cm}^2)$	Facteur de forme FF(%)	Rendement η (%)
10^{16}	0.65	38.77	82.25	20.71
5.10^{16}	0.65	32.16	81.94	17.16
10^{17}	0.65	32.16	81.94	17.16
5.10^{17}	0.65	32.16	81.94	17.16
10^{18}	0.65	32.16	81.94	17.16
5.10^{18}	0.65	32.16	81.94	17.16
10^{19}	0.65	32.16	81.94	17.16
5.10^{19}	0.65	38.38	82.25	20.71
10^{20}	0.65	38.39	82.25	20.72
5.10^{20}	0.65	38.41	82.25	20.73
10^{21}	0.65	38.42	82.25	20.74
5.10^{21}	0.65	38.47	82.25	20.76

D'après l'allure de différentes courbes (I-V), nous constatons qu'elles ont parfaitement la même forme. Ceci nous permet de dire que la concentration du dopage de la couche fenêtre n'influe pas de manière significative sur la caractéristique I-V de la structure.

Nous remarquons ainsi que le rendement électrique reste stable de 17.16 % entre $N_{D/ZnO} = 5.10^{16} \text{ cm}^{-3}$ et $N_{D/ZnO} = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ puis il augmente de 17.16% jusqu'à 20.76% pour un dopage de $5.10^{21} \text{ cm}^{-3}$.

Pour la couche fenêtre ZnO, le rendement n'augmente que lorsque le dopage atteint la valeur de 10^{19} cm^{-3} . C'est à partir cette concentration que l'augmentation du nombre des dopants peut améliorer la collecte des porteurs photogénérés et qui par conséquent favorise l'augmentation du rendement électrique.

Donc, pour avoir une amélioration du rendement, il faudrait utiliser une couche fenêtre de ZnO de type n fortement dopée.

➤ Influence de l'épaisseur de la couche fenêtre ZnO (X_{ZnO}) :

Les figures IV -19 et IV-20 représentent respectivement la caractéristique I -V de la cellule photovoltaïque pour différentes épaisseurs de la couche fenêtre ZnO entre 0.2 μm et

Chapitre IV : Modélisation et Simulation de Cellules Solaires à base de CIGS

0.02 μm et la variation du rendement électrique en fonction de l'épaisseur, pour un dopage de 10^{18} cm^{-3} .

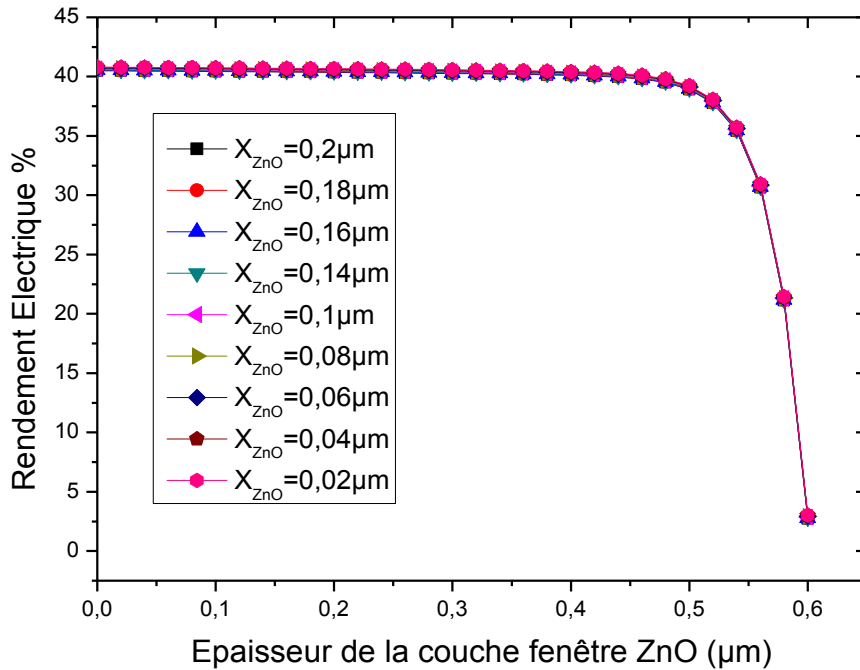


Figure IV-19 : Influence de l'épaisseur de la couche fenêtre ZnO (X_{ZnO}) sur la caractéristique I-V.

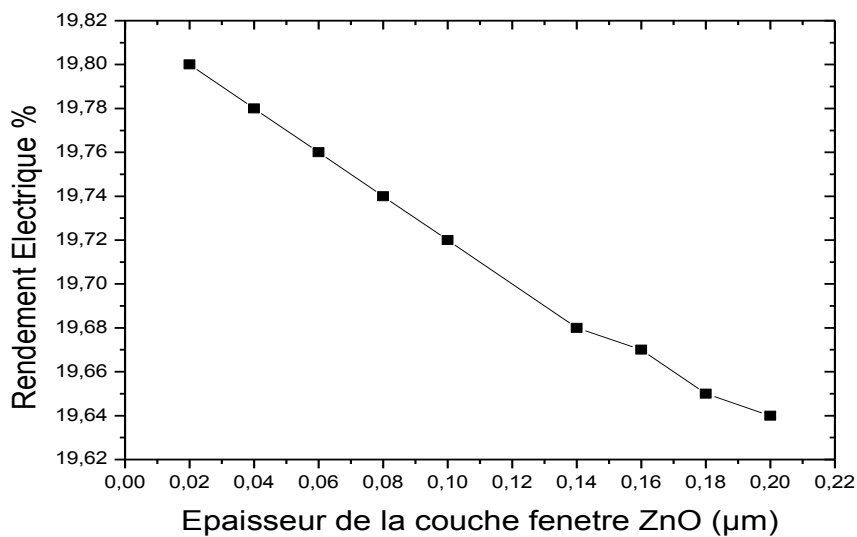


Figure V-20 : Influence de l'épaisseur de la couche fenêtre ZnO (X_{ZnO}) sur le rendement électrique.

Chapitre IV : Modélisation et Simulation de Cellules Solaires à base de CIGS

Le tableau V-7 suivant résume les différentes caractéristiques de la structure pour différentes épaisseurs.

Tableau V-7 : Caractéristiques de cellule solaire de CIGS.

Epaisseur de la couche ZnO X_{ZnO} (μm)	Tension en circuit ouvert V_{CO} (V)	Courant à court-circuit I_{CC} (mA/cm ²)	Facteur de forme FF(%)	Rendement η (%)
0.2	0.60	40.49	80.56	19.64
0.18	0.60	40.52	80.56	19.65
0.16	0.60	40.54	80.57	19.67
0.14	0.60	40.57	80.57	19.68
0.1	0.60	40.64	80.57	19.72
0.08	0.60	40.68	80.57	19.74
0.06	0.60	40.72	80.57	19.76
0.04	0.60	40.77	80.58	19.78
0.02	0.60	40.80	80.58	19.80

Les caractéristiques I-V présentés dans la figure V-19 ont exactement la même allure malgré la variation de l'épaisseur de cette couche. Il en est de même pour la concentration du dopage ; la variation de l'épaisseur de cette couche ne montre aucune influence sur la caractéristique I-V.

La variation du rendement de conversion en fonction de l'épaisseur de la couche fenêtre ZnO diminue avec l'augmentation de l'épaisseur, nous avons obtenu un meilleur rendement à petit épaisseur.

Le rendement électrique varie avec l'épaisseur de la couche fenêtre ZnO. Le rendement le plus élevé a été réalisé pour une épaisseur de la couche ZnO d'environ 0.02 μm .

Cette étude nous a permis dans une première étape, de trouver les paramètres optimums de chacune des différentes couches constituant la structure solaire (ZnO, CdS et CIGS) qui donnent les meilleurs rendements. Ceci nous a permis dans une deuxième étape de concevoir la structure optimale de notre cellule solaire, en combinant les paramètres optimaux de chaque couche. Ceci nous a permis d'obtenir la structure optimale, qui nous a donné un rendement de conversion de 21.26%.

Les rendements optimaux obtenus par la simulation sont récapitulés dans le tableau ci-dessous représenté.

Chapitre IV : Modélisation et Simulation de Cellules Solaires à base de CIGS

Tableau V-10: Les rendements optimaux obtenus en fonction du dopage et l'épaisseur de la couche fenêtre ZnO, la couche tampon CdS et la couche d'absorbeur CIGS.

	ZnO		CdS		CIGS		Rendement électrique (%)
	$N_{D/ZnO}$ (cm^{-3})	X_{ZnO} (μm)	$N_{D/CdS}$ (cm^{-3})	X_{CdS} (μm)	$N_{A/CIGS}$ (cm^{-3})	X_{CIGS} (μm)	
Cellule de référence	10^{18}	0.2	10^{18}	0.05	2×10^{16}	3	$\eta = 16.83$
Cellule n°1	5.10^{20}	0.2	10^{18}	0.05	2×10^{16}	3	$\eta = 19.69$
Cellule n°2	10^{18}	0.002	10^{18}	0.05	2×10^{16}	3	$\eta = 19.77$
Cellule n°3	5.10^{20}	0.002	10^{18}	0.05	2×10^{16}	3	$\eta = 19.84$
Cellule n°4	10^{18}	0.2	5.10^{20}	0.05	2×10^{16}	3	$\eta = 19.67$
Cellule n°5	10^{18}	0.2	10^{18}	0.005	2×10^{16}	3	$\eta = 20.25$
Cellule n°6	10^{18}	0.2	5.10^{20}	0.005	2×10^{16}	3	$\eta = 20.25$
Cellule n°7	10^{18}	0.2	10^{18}	0.05	2×10^{16}	3	$\eta = 19.68$
Cellule n°8	10^{18}	0.2	10^{18}	0.05	10^{15}	3	$\eta = 17.52$
Cellule n°9	10^{18}	0.2	10^{18}	0.05	10^{16}	3	$\eta = 19.22$
Cellule n°10	5.10^{21}	0.2	5.10^{18}	0.005	10^{17}	3	$\eta = 21.26$

Le rendement électrique de conversion de la cellule solaire augmente de 16.83% jusqu'à 21.26%. Cette amélioration varie d'une couche à une autre.

Nous présentons les paramètres optimaux de la structure optimale obtenus par notre simulation dans le tableau V-11 suivant.

Tableau V-11 : Paramètres optimum ayant donné $\eta=21.26\%$

ZnO		CdS		CIGS		η (%)	FF (%)	I_{cc} (mA/cm^2)	V_{co} (V)
$N_{D/ZnO}$ (cm^3)	X_{ZnO} (μm)	$N_{D/CdS}$ (cm^3)	X_{CdS} (μm)	$N_{A/CIGS}$ (cm^{-3})	X_{CIGS} (μm)				
5.10^{21}	0.2	5.10^{18}	0.005	10^{17}	3	21.26	82.28	39.33	0.66

V.3.3.2- Résultats de référence [Gloeckler, 05] :

La figure IV -6 représente la caractéristique courant -tension (I-V) simulée, du dispositif d'hétérojonction CIGS/CdS/ZnO de référence [Gloeckler, 05].

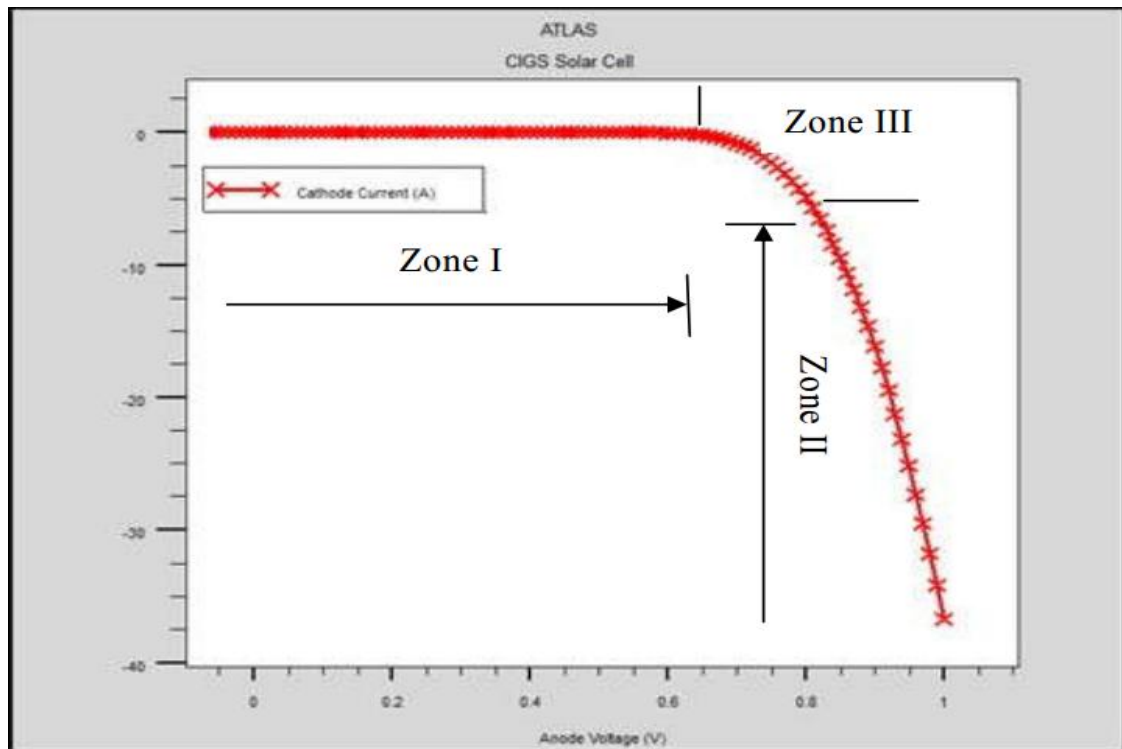


Figure V-6 : Caractéristique I-V de la cellule solaire référence [Gloeckler, 05] à base de CIGS.

La caractéristique de notre cellule solaire présente trois zones :

Zone I : la cellule se comporte comme un générateur de courant (pratiquement constant de valeur voisine de I_{CC}), Le fonctionnement de la cellule dans cette zone donne des puissances faibles, des courants élevés et des tensions petites.

Zone II : la cellule solaire se comporte comme un générateur de tension en circuit ouvert V_{CO} . Le fonctionnement de la cellule dans cette zone donne des puissances faibles, des courants petits et des tensions élevées.

Zone III : Le fonctionnement de la cellule dans cette zone donne des puissances élevées, des courants et des tensions acceptables (son comportement est aléatoire). Les paramètres de la cellule solaire de référence [Gloeckler, 05], sont évalués à partir de la caractéristique (I-V) simulée. Ils sont représentés dans le tableau IV-3 suivant :

Chapitre IV : Modélisation et Simulation de Cellules Solaires à base de CIGS

Simulation(Silvaco)	
I_{CC} (mA/cm²)	31,90
V_{CO} (V)	0.58
FF (%)	68.10
η (%)	16.83

En comparant nos résultats avec les résultats trouvés dans la référence [Gloeckler, 05], nous remarquons que les paramètres (I_{CC} , V_{CO} , FF et η) sont légèrement inférieurs à ceux de la littérature. A cet effet, nous allons essayer d'améliorer le rendement obtenu de 16.83% en optimisant les deux paramètres électrique (dopage) et technologique (épaisseur) des trois couches (ZnO, CdS, CIGS).

IV. Conclusion :

Dans ce travail nous avons étudié l'impact des trois couches, CdS (couche tampon), CIGS (couche absorbeur) et ZnO (couche fenêtre) dans le but de concevoir une structure optimale à hétérojonction ZnO/CdS/CIGS qui donne le meilleur rendement électrique.

A cet effet, nous avons simulé les paramètres de sortie d'une cellule solaire à base de CIGS à hétérojonction en essayant de trouver les paramètres optimaux, donnant les meilleures caractéristiques de sortie. Nous avons alors, étudié l'effet du dopage et de l'épaisseur de chaque couche sur la caractéristique I-V ainsi que sur le rendement électrique.

Nous avons constaté que les deux paramètres, dopage et épaisseur, ont un impact très significatif sur l'amélioration du rendement de la conversion électrique. En effet, la variation du dopage peut affecter les porteurs photogénérés. D'un côté, il est préférable d'augmenter la concentration du dopage, car cette augmentation permet une amélioration de la collecte des porteurs photogénérés dans la couche fenêtre ZnO ou la couche tampon CdS. Par contre, au niveau de l'absorbeur CIGS, un dopage de l'ordre de 10^{16} cm^{-3} est suffisant pour donner un meilleur rendement. Du fait des largeurs de bandes interdites élevées, les couches ZnO et tampon (Cd S) laissent passer le rayonnement visible (d'où leur

Chapitre IV : Modélisation et Simulation de Cellules Solaires à base de CIGS

nom de couches fenêtrées), qui est ensuite absorbé dans la couche de CIGS. Donc une concentration de dopage élevée peut affecter le transport des porteurs au sein de l'absorbeur CIGS ce qui provoque une diminution du rendement.

Selon notre étude basée sur la simulation, l'amélioration du rendement de conversion est obtenue pour une couche de CdS et une couche de ZnO de type n, fortement dopé (de l'ordre de $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$), ainsi qu'une couche d'absorbeur CIGS dopé de type p de l'ordre de 10^{16} cm^{-3} . De même la variation de l'épaisseur peut affecter la collecte des porteurs photogénérés. Nous avons, par ailleurs, pu optimiser des épaisseurs pour chaque couche. Ce qui permet à la fois une meilleure absorption de porteur des photons de courte longueur d'onde et une réduction considérable des pertes électriques associées aux mécanismes de recombinaison à l'interface.

D'après notre étude, il est nécessaire de diminuer l'épaisseur pour avoir un rendement optimale, 20nm pour la couche ZnO et jusqu'à 5nm pour la couche CdS. Une épaisseur de $4 \mu\text{m}$ de l'absorbeur CIGS assure le meilleur transport des porteurs en réduisant leurs recombinaisons au niveau du contact arrière.

En effet, Cette étude nous a permis d'optimiser le rendement électrique de la structure ZnO/CdS/CIGS. Nous pouvons dire que les paramètres de chaque couche jouent un rôle très important vis-à-vis des performances du dispositif étudié et en particulier dans l'amélioration du rendement de conversion des cellules solaires à base de matériaux chalcopyrites $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ (CIGS). Effectivement, puisqu'ils affectent les propriétés électriques de la jonction.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion Générale :

L'objectif de notre travail était d'étudier l'intégration des couches minces chalcopyrite Cu(In,Ga)Se_2 dans la technologie photovoltaïque et leur influence sur le rendement électrique tout en identifiant certains verrous qui limitent cette technologie. Ceci dans le but d'optimiser le temps et le coût de fabrication de ces cellules photovoltaïques à couches minces (CIGS) et d'étendre ainsi la technologie à la fabrication en série.

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

La modélisation et la simulation ont été faites par le logiciel Scaps -1D, pour étudier les performances des cellules solaires à base de Cu(In,Ga)Se_2 (CIGS).

Nous avons évalué, dans un premier temps, le courant de court-circuit I_{CC} , la tension en circuit ouvert V_{CO} , le facteur de forme FF et le rendement électrique η pour une structure typique de ZnO/CdS/CIGS .

Dans la modélisation et la simulation nous avons utilisé les données d'une structure de référence développée par Gloeckler [Gloeckler, 05]. Le rendement de la cellule solaire de référence a été évalué à partir de la caractéristique $I(V)$ simulée. Le rendement électrique optimal obtenu est de 16.83% avec un facteur de forme de 76.04%. Par la suite nous avons étudié l'effet des trois couches ZnO, CdS et CIGS sur le rendement électrique. Nous, nous sommes alors intéressés au dopage et à l'épaisseur des trois couches pour voir l'influence de ces deux paramètres sur le rendement électrique de la structure. Nous avons alors, fait varier les paramètres (épaisseur et dopage) de l'une tout en gardant constants ceux des deux autres couches pour voir l'influence de ces deux paramètres sur le rendement électrique de la structure. En faisant varier le dopage et l'épaisseur de la couche d'absorbeur CIGS, un rendement optimal de 21.08 % a été obtenu pour un dopage de $8 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ et une épaisseur de $4 \mu\text{m}$. En faisant varier le dopage et l'épaisseur de la couche fenêtre ZnO, un rendement optimal de 20.73% a été obtenu pour un dopage de $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ et une épaisseur de $0.02 \mu\text{m}$.

Chapitre IV : Modélisation et Simulation de Cellules Solaires à base de CIGS

Et en faisant varier le dopage et l'épaisseur de la couche tampon CdS, un rendement optimal de 20.66% pour un dopage de $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ et une épaisseur de $0.005 \mu\text{m}$.

En prenant une structure qui combine les paramètres optimaux (épaisseur et dopage) de chaque couche, nous avons pu atteindre un rendement de conversion électrique de 21.26% avec un facteur de forme de 82.28%. Les paramètres optimums de la structure optimale obtenus par notre simulation pour les trois couches minces (ZnO, Cds et CIGS) sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau V-11 : Paramètres optimum ayant donné $\eta=24.36\%$

ZnO		CdS		CIGS		η (%)	FF (%)	I_{cc} (mA/cm^2)	V_{co} (V)
$N_{D/ZnO}$ (cm^3)	X_{ZnO} (μm)	$N_{D/CdS}$ (cm^3)	X_{CdS} (μm)	$N_{A/CIGS}$ (cm^{-3})	X_{CIGS} (μm)				
5.10^{21}	0.2	5.10^{18}	0.005	10^{17}	3	21.26	82.28	39.33	0.66

Cette étude nous a permis d'optimiser le rendement électrique de la structure ZnO/CdS/CIGS et de montrer l'impact de chaque couche sur les performances du dispositif en fonction du rôle de chacune d'elle. Nous pouvons dire que les paramètres de la couche tampon CdS jouent un rôle très important dans l'amélioration du rendement des cellules solaires à base de matériaux chalcopyrites $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ (CIGS). Effectivement, une jonction p-n est créée au niveau de l'interface CdS/CIGS. Celle-ci affecte à la fois les propriétés électriques de la jonction et la protège contre les réactions chimiques (pulvérisation). De même, les paramètres de la couche fenêtre ZnO et de l'absorbeur CIGS ont une influence significative sur la performance de la cellule solaire. La couche de ZnO établie, avec la CdS, la jonction p-n en permettant une meilleure collecte de porteur de photon de courte longueur d'onde et une réduction considérable des pertes électriques associées aux mécanismes de recombinaison à l'interface. Du fait des largeurs de bande interdites élevées, les couches de ZnO et la couche tampon CdS, laissent passer le rayonnement visible (d'où leur nom de couches fenêtre), qui est ensuite absorbé dans la couche de CIGS.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES



Références bibliographiques

- [1] Martin A Green, Keith Emery, Yoshihiro Hishikawa, Wilhelm Warta, and Ewan D Dunlop. Solar cell efficiency tables (version 41). Progress in Photovoltaics : Research and Applications, 21(1) :1–11, January 2013.
- [2] William N. Shafarman, Susanne Siebentritt, and Lars Stolt. Cu(InGa)Se₂ SolarCells. In Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, page 546. 2011.
- [3] Solar Energy Perspectives. International Energy Agency, 2011.
- [4] M. Agrawal, C. Bolman, S. Carnahan, B. Merewitz, G. Phipps, M. Rogol, S. Willhaus, and T. Xu, “Solar Annual 2012: The Next Wave.” Photon Consulting, 2012.
- [5] M. Bouafia & L. Deblaoui, « Modélisation et simulation d’une cellule solaire en couche mince à base de diséleniure de Cuivre, d’Indium et de Gallium (CIGS) », diplôme de Master professionnel, 2012, Université de Ouargla.
- [6] Wenham S. R., Green M. A. and Watt M. E, «Applied Photovoltaic», Bridge Printer, Sidney, (1994).
- [7] A. BOURAIOU, «Élaboration et Caractérisation des Couches Minces CuInSe₂ par Électrodéposition » ;thèse de doctorat,2009 université mentouri – constantine, PP 15-26 ;43-44.
- [8] Anne Labouret & Pascal Cumuenel & Jean-Paul Braun & Benjamin Faraggi: « Cellules Solaires Les bases de l’énergie photovoltaïque », Dunod 5eme édition, 2005.
- [9] B. Zouak, « Etude de l’évolution des caractéristiques des matériaux thermoélectriques des anciennes et nouvelles générations et applications photovoltaïque-thermoélectricité », mémoire de magister, 2012, Université de Tizi-Ouzou.
- [10] M. Adaika, « Étude par Simulation Numérique de L’effet des Couches Sur-dopées Coté Contacts Avant et Arrière sur Les Caractéristiques Électriques d’une Cellule Solaire n /p en Silicium», thèse de master, 2012, Université de Biskra.
- [11] N. Benabdallah, « Propriétés physiques des semi-conducteurs (Si monocristallin et Ge) et Simulation des cellules solaires à base de Si et SiGe », thèse de magister, 2006, université Abou Bekrbelkaid Tlemcen.
- [12] A. Ricaud, “Gisement solaire et transferts énergétiques ”, Master Energies Renouvelables, Université de Cergy-Pontoise. Jan 2011.

[13] A. Ricaud, "photopiles solaires de la physique de la conversion photovoltaïque aux filières, matériaux et procédés", ©1997. presses polytechniques et universitaires romandes.

[14] L. Ribeaucourt « Electrodeposition et sélénisation d'alliages Cu-In-Ga en vue de la synthèse de couches minces de Cu(In,Ga)Se₂ pour cellules solaires », These De Doctorat De L'universite Pierre Et Marie Curie, 2011 ; PP17-20.

[15] A. Duchatelet « Synthèse de couches minces de Cu(In,Ga)Se₂ pour cellules solaires par électrodeposition d'oxydes mixtes de cuivre-indium-gallium », These De Doctorat De L'universite Lille1 ; 2012, pp17-27

[16] Site oja service : www.ojaservices.nl/iea_pvps

[17] Site NREL : <http://www.NREL.com>

[18] Jianhua Zhao; Aihua Wang; Campbell, P.; Green, M.A.; « A 19.8% efficient honeycomb multicrystalline silicon solar cell with improved light trapping », Electron Devices, IEEE Transactions on Volume 46, Issue 10, Oct. 1999, pp1978–1983

[19] Huang, A.Q.; Sun, N.X.; Zhang, B.; Zhou, X.; Lee, F.C. ; « Low voltage power devices for future VRM »; Power Semiconductor Devices and ICs, 1998. ISPSD 98. Proceedings of the 10th International Symposium on, 3-6 June 1998 Page(s):395 – 398

[20] K. Kobayashi, H. Matsuo and Y. Sekine, « An Excellent operating point tracker of the solar-cell power supply system, IEEE Trans. On Industrial Electronics », Vol, 53, no. 2, April 2006.

[21] M. PETIBON Stéphane « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques », thèse de doctorat de l'université de toulouse ; 2009 pp18-33

[22] Stephan, U.; Kuske, J.; Frammelsberger, W.; Lechner, P.; Psyk, W.; Schade, H.; « Large area deposition technique for PECVD of amorphous silicon[solar cells] », Photovoltaic Specialists Conference, 1997., Conference Record of the Twenty-Sixth IEEE 29 Sept.-3 Oct. 1997 Page(s):647 – 650, Digital Object Identifier 10.1109/PVSC.1997.654172

[23] Ki Hwan Kim; Min Sik Kim; Byung Tae Ahn; Jae Ho Yun; Kyung Hoon Yoon; « Improvement of CIGS microstructure and its effect on the conversion efficiency of CIGS solar cells »; Photovoltaic Energy Conversion, Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference on Volume 1, May 2006 pp575–578, Digital Object Identifier 10.1109/WCPEC.2006.279521

[24] Abushama, J.A.; Wax, J.; Berens, T.; Tuttle, J.; « Progress Toward Improved Device Performance in Large-Area Cu(In,Ga)Se₂ Thin Film Solar Cells »; Photovoltaic Energy Conversion, Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference on Volume 1, May 2006, Page(s):487–490 Digital Object Identifier 10.1109/WCPEC.2006.279497

[25] Takatsuka, H.; Yamauchi, Y.; Takeuchi, Y.; Fukagawa, M.; Kawamura, K.; Goya, S.; Takano, A.; « The World's Largest High Efficiency Thin Film Silicon Solar Cell Module » ; Photovoltaic Energy Conversion, Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference on Volume2, May 2006 Page(s):w<<202833.

[26] Communiqué de presse du NREL, 24 mars 2008, Record Makes Thin-Film Solar Cell Competitive with Silicon Efficiency. www.nrel.gov/news/press/2008/574.html

[27] Life cycle impact analysis of cadmium in CdTe PV production, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 8, Issue 4, August 2004, Pages 303-334, Vasilis M. Fthenakis.

[28] Sana HARIECH, « Elaboration et caractérisation des couches minces de Sulfure de Cadmium (CdS) préparées par bain chimique (CBD) ». Mémoire de Magistère de l'université Mentouri– Constantine, 2009.

[29]: R .Hull, R.M. Osgood, jr, J. Parisi H. Warlimont, WIDE GAP

CHALCOPYRITES (1 Cu-Chalcopyrite – Unique Materials For Thin-Films Solar Cells 1, 2). Edition Springer 2006.

[30] : Philip Jackson, DimitriosHariskos, Erwin Lotter, Stefan Paetel, Roland

Wuerz, Richard Menner, Wiltraud Wischmann, Michael Powalla,

«New world record efficiency for Cu(In,Ga)Se₂ thin -film solar cells beyond 20%», Progress in photovoltaic, 2011.

[31] : Bessem Kaghouché, « Etude par TCAD-SILVACO d'une structure

MOS pour la réalisation de capteur ISFET : paramètres technologiques

et électriques », Mémoire de magister, université de Mantouri-Constantine, 2010.

[32] : Daniel Lincot, Jean-François Guillemoles, « Cellules solaires en

couches minces à base de CuInSe₂ », Revue scientifique « Reflet de la

Physique », n°5, 2010.

[33]: Olle Lundberg, MarikaBodegard, Jonas Malmstrom and Lars Stolt.,

“Influence of the Cu(In,Ga)Se₂ Thickness and Ga Grading on Solar Cell Performance” Prog. Photovolt: Res. Appl. 2003; 11:77–88.

[34] : Réalisation de Parc Solaire, Le « Photovoltaïque», M3P Solar : 2009.

[35] : Malika Madani, « Réalisations des Couches Antireflets Dans Les Cellules Solaires A Couches Minces », Mémoire de Magister à l'Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, 2006.

[36]: Tom Markvart et Luis Castaner, « SOLAR CELLS Material, Manufacture and Opération (partie IIa, chapitre 1 : principes of solar cell operation 6 -15), First Edition 2005.

[37]: Tom Markvart et Luis Castaner, "Solar Cells Material, Manufacture and Opération" (partie II, chapitre 4: Cu(Ga,In)(S,Se)₂ Thin-Films Solar Cells) 305,312,322, First Edition 2005.

[38] : Selma Mostefa Kara, « Les Matériaux Chalcopyrites : Elaboration, Application Photovoltaïques et Classification », Mémoire de fin d'étude (DES) à l'Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, 2009.

[39] : Mohammed Ouled Ali, « propriétés optoélectroniques du semi-conducteur Cu(In,Ga)Se₂ appliquée aux cellules photovoltaïques ». Mémoire de magister à l'Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement Technologique d'Oran, 2010.

[40] : Stéphane Petibon, «Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques » Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2009.

Abstract:

In the global context of the diversification of the use of the natural resources, the recourse to renewable energies and in particular the solar photo voltaic one is done more and more loud. For this reason, the development of a new generation of photovoltaic cells based on Cu (In, Ga) Se₂ seems promising. Indeed, the efficiency of these cells has exceeded the 20% these last years.

In this work of modeling and simulation, we use the software Scaps -1D, to study the performances of the solar cells based on Cu(In,Ga) Se₂ (CIGS). We evaluate initially, the current of short- circuit I_{SC} , the tension in open circuit V_{OC} , maximum power P_M , the factor of form FF and the electrical efficiency η for a typical structure of ZnO/CdS/CIGS. Thereafter we are interested by the doping and the thickness of the three layers (ZnO , CdS and CIGS) to investigate the influence of these -ones on the electric al efficiency of the structure.

Keys Words: Solar cells, photovoltaic, thin films, Cu(In, Ga)Se₂ (CIGS), simulation, SCAPS.

ملخص:

في السياق العام للاستخدام المتنوع للموارد الطبيعية، الرجوع إلى الطاقة المتجددة وبشكل خاص الطاقة الشمسية الكهروضوئية أصبح أقوى . ولهذا تطوير جيل جديد من الخلايا الضوئية القائمة على أساس $\text{Cu}(\text{Ga},\text{In})\text{Se}_2$ تبدو واعدة في الواقع فاق أداء هذه الخلايا 20 ٪ في السنوات الاخيرة.

في هذه النمذجة والمحاكاة نستخدم برنامج Scaps-1D لدراسة أداء الخلايا الشمسية القائمة على $\text{Cu}(\text{Ga},\text{In})\text{Se}_2$ (CIGS). نقيم في البداية الدارة القصيرة تيار I_{CC} وجهد الدارة المفتوحة V_{CO} و الطاقة القصوى P_M عامل الشكل FF والمردود الكهربائي η للهيكل النموذجي ZnO/CdS/CIGS .

نهتم بعد ذلك بسمك وشوائب الطبقات الثلاث لدراسة تأثير هذه الأخيرة على المردود الكهربائي للخلية الضوئية.

كلمات مفتاحية : الخلايا الشمسية. الكهروضوئية. الأفلام الرقيقة. CIGS المحاكاة ، Scaps