



République Algérienne Démocratique et
Populaire



Ministère de l'Enseignement Supérieur et
de la Recherche Scientifique



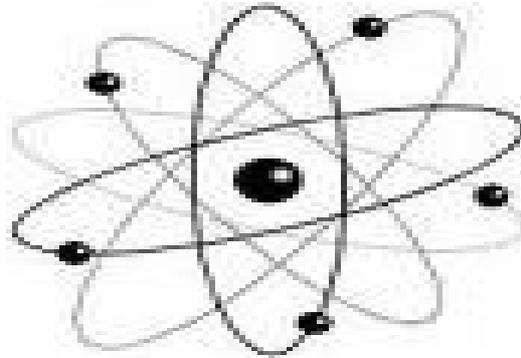
----- Université Med Khider Biskra -----

Département des Sciences de la Matière

Domaine des Sciences de la Matière

Filière de Physique

Spécialité Physique photovoltaïque



Mémoire de fin d'étude en Master
Intitulé :

Etude des caractéristiques
électriques de cellule solaire à
hétérojonction CdS/CIGS (cadmium-
sulfide / cadmium, indium, gallium)

Présenté par:

Mezhoud Leila

Devant le Jury Composé par :

<i>N.Sengo</i>	<i>Profes</i>	<i>Université Med</i>	<i>Présid</i>
<i>uga</i>	<i>seur</i>	<i>Khider - Biskra</i>	<i>ent</i>
<i>Am.Meft</i>	<i>Profes</i>	<i>Université Med</i>	<i>Rappo</i>
<i>ah</i>	<i>seur</i>	<i>Khider - Biskra</i>	<i>rteur</i>
<i>Af.Mefta</i>	<i>Profes</i>	<i>Université Med</i>	<i>Exami</i>
<i>h</i>	<i>seur</i>	<i>Khider - Biskra</i>	<i>nateur</i>

Année Universitaire

2012-2013

Dédicace :

Je dédie ce modeste travail à :

Mes chers parents

Mes frères : Ali, Mohamed Saber, Sami Saïd.

Ma chère sœur : Selsabil.

Mon amie : Nawal.

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



***Mezhoud
Leila***

Remerciement :

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

*Ce travail a été réalisé au laboratoire « **LMSM** » (Laboratoire des **Matériaux Semi-conducteurs et Métalliques**) à l'université de Biskra.*

*Je tiens à exprimer mes remerciements les plus sincères à mon encadreur **Melle Meftah Amjad** d'avoir bien voulu m'encadrer.*

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

Mezhoud Leila

Dans ce travail nous avons effectué l'étude des caractéristiques électriques d'une cellule solaire (n-p) à hétérojonction (CdS/CIGS) sous l'éclairement AM1.5 en utilisant comme outil de simulation numérique le logiciel **AMPS-1D**. L'étude a permis d'extraire les caractéristiques densité de courant - tension ($J-V$), les caractéristiques rendement quantique -longueur d'onde ($QE - \lambda$) ainsi que la densité de courant de court circuit (J_{cc}), la tension de circuit ouvert (V_{co}), le facteur de remplissage (FF), et le rendement de conversion photovoltaïque (η). Nous avons étudié ces caractéristiques photovoltaïques sous l'effet de variation de l'épaisseur, de la densité de défauts et du dopage. Il s'est avéré que les changements apportés aux propriétés de la couche frontale (n-CdS) ont généralement des effets moins significatifs sur les caractéristiques électriques de la cellule. Cela est justifié par le fait que la couche frontale (n-CdS) est toujours d'une épaisseur (x_n) très fine et d'une absorption moins considérable en comparaison avec l'épaisseur (x_p) et l'absorption de la couche absorbante (p-CIGS). En faisant varier l'épaisseur (x_p), le meilleur rendement de conversion est obtenu pour des valeurs de (x_p) autour de 2.5 μm - 2.6 μm ($\eta = 18.40\%$). Plus l'épaisseur (x_n) est fine plus le rendement est élevé ($\eta = 19.3965\%$ pour $x_n = 0.01 \mu\text{m}$). Pour une densité de défauts D_p réduite dans la couche (p-CIGS) à (10^{13} cm^{-3}), le rendement de

Table des matières :

Dédicace.....	.... i
Remerciement.....	.....ii
Résumé.....	..iii
Table des matières.....	.....iv
Liste des figures.....	des vii
Liste des tableaux.....	des x
Liste des Symboles et Acronymes.....	et xii
Introduction générale.....	2

Chapitre I : Conversion photovoltaïque et cellules solaires en couche mince à base de CIGS

I.1.	
Introduction.....	7
I.2.	Le
soleil.....	7
I.3. Le rayonnement solaire.....	7
I.3.1. La constante solaire.....	8
I.3.2. Normalisation.....	10
I.4. Notions de base sur les cellules solaires.....	11
I.4.1. Concepts importants sur les semi-conducteurs.....	11
I.4. 2. Propriétés générales du composé semiconducteur CIGS.....	13
I.4.3. Les techniques conventionnelles de dépôt du CIGS.....	14
I.4.3.a. Evaporation à partir de sources élémentaires.....	16
I.4.3.b. Sélénisation-Sulfuration de précurseurs métalliques.....	18
I.4.4.Cellule solaire à homo-jonction.....	20
I.4.5 .Cellule solaire à hétérojonction.....	21

I.4.6. Cellules solaires en couches minces.....	22
I.4.7. Cellules solaires typiques Cu (In, Ga) Se ₂	23
I.4.8. Méthode de caractérisation électrique.....	26
I.4.8.a : Densité de courant vs. voltage.....	26
I.4.8.b. Rendement quantique.....	28

Chapitre II : Le transport dans la cellule solaire en CIGS

II.1. Introduction.....	32
II.2. Equation de transport.....	32
II.3. Absorption- Génération optique des paires électron-trou.....	34
II.3.1. Absorption optique.....	34
II.3.2. Génération optique des porteurs.....	35
II.4. Recombinaison.....	37

Chapitre III : Logiciel de modélisation AMPS-1D

III.1.				
Introduction	.....			44
	III.1.a. Approche analytique	.....	
	.....			44
	III.1.b. Approche numérique	.....	
	.....			44
III.2.	Généralités		sur	le
programme	.....			44
	III.2.1. Définition du logiciel	.....	
	.....			44
	III.2.2. Bref historique	.....	
	.....			44
			III.2.3.	L'objectif
	d'AMPS	.....	
				45
	III.2.4. Capacités d'AMPS	.....	
	.....			45
III.3.	Description		du	cas
base	.....			de
				45

Chapitre IV: Résultats et discussion

IV.1.	Introduction	.....		54
IV.2.	Structure		de	la
étudiée	.....			cellule
				54
IV.3.	Résultats		et	discussion
	.....			56
	IV.3.1. Effet de l'épaisseur sur les caractéristiques électriques de la cellule	.....	
				56

IV.3.2. Effet de la densité des défauts sur les caractéristiques électriques de la cellule.....	72
---	----

IV.3.3. Effet du dopage sur les caractéristiques électriques de la cellule.....	77
---	-----------

IV.4.	Conclusion
.....	82
Conclusion générale.....	84
Bibliographie.....	87
Résumé.....	xvii

Liste des figures :

N° de figure	Titre	N°de page
I-1	Le soleil	7
I-2	Spectre solaire	8
I-3	Définition de la masse d'air	9
I-4	Le corps noir à 5700 °K et les spectres solaires AM0 et AM1	10

I-5	Structure cristalline de (a) blende de zinc (ou sphalérite avec (Cu,Ga) à la place du Zn), (b) chalcopyrite CuGaS ₂ , (c) Cu-Au ici pour CuGaS ₂ et (d) chalcopyrite Cu(In, Ga) Se ₂	14
I-6	Schéma d'un procédé de co-évaporation en ligne pour la synthèse de couches minces de CIGS [38] à partir de sources élémentaires Cu, In, Ga et Se	16
I-7	Flux de métaux et profil de température de substrat utilisés dans un procédé en trois étapes de synthèse du CIGS par co-évaporation	17
I-8	Schéma du procédé de synthèse des cellules CIGS Shell	19
I-9	Formation d'une jonction <i>p-n</i> dans l'approximation Schottky.	21
I-10	Bande de conduction et de valence pour une cellule solaire à hétérojonction ; le cas de ZnO / CdS / CIGS	22
I-11	Schéma d'une cellule solaire (grille / ZnO / CdS / CIGS / Mo / verre). Seulement les couches semi-conductrices sont reproduites dans les modèles numériques. Les contacts métalliques supérieurs et inférieurs sont définis par leur travail de sortie et les vitesses de recombinaison surfaciques. Une charge externe est connectée entre l'électrode négative (la grille) et l'électrode positive (le Mo)	24
I-12	Image par MEB d'une section de cellule solaire de CIGS à une amplification 20000x. Dans un matériau de haute qualité, des grains s'étendent à travers l'épaisseur du film. Image courtoisie de K. Ramanathan, NREL	25
I-13	(a) Courbes <i>J-V</i> à l'obscurité et sous illumination pour une cellule solaire idéale, les paramètres de <i>J-V</i> standard qui décrivent sa performance sont indiqués. (b) le comportement non idéal comprend des résistances parasites et un facteur de qualité de la diode supérieur à 1	27
I-14	Puissance électrique maximale (P_{max}) fournie par la cellule solaire d'après la courbe <i>J-V</i> sous illumination	28
I-15	Exemple d'une courbe du rendement quantique avec l'inclusion des mécanismes de perte	29
II-1	Spectre d'absorption de ZnO,CdS,CIGS	35
II-2	(a) Taux de génération total calculé dans la cellule solaire ZnO/CdS/CIGS. Les longueurs d'onde courtes éprouvent une forte absorption. Pour les énergies des photons proches du gap d'énergie du CIGS, le taux de génération est plus faible et plus uniforme dans le dispositif. Seulement la lumière faiblement absorbée éprouve une réflexion arrière. (b) Le taux de génération intégré et normalisé	37
II-3	Les processus des recombinaisons dans un semi-	38

	conducteur	
II-4	Schéma descriptif du processus de recombinaison de type radiatif	39
II-5	Schéma descriptif du processus de recombinaison de type Auger	40
II-6	Illustration des états de surface dans une surface semi-conductrice ou une interface entre deux matériaux différents tels que deux semi-conducteurs différents (hétérojonction) ou un métal et un semi-conducteur (contact Schottky)	41
II-7	Présentation des différentes recombinaisons se produisant dans une cellule solaire ZnO/CdS/CIGS. La recombinaison dans le volume du CIGS est indiquée par (A), à la surface arrière de l'absorbeur CIGS est indiquée par (A'). La recombinaison dans la région de charge d'espace (SCR) est indiquée par (B), et la recombinaison à l'interface couche tampon (CdS)/absorbeur (CIGS) est indiquée par (C)	42
III-1	l'interface d'AMPS	46
III-2	spectre d'illumination AM1.5	46
III-3	L'interface des conditions environnementales	47
III-4	L'interface des propriétés électriques de la couche ZnO	48
III-5	l'interface des défauts de la couche ZnO	49
III-6	l'interface des propriétés électriques de la couche CdS	49
III-7	l'interface des défauts de la couche CdS	50
III-8	l'interface des propriétés électriques de la couche CIGS	50
III-9	l'interface des défauts de la couche CIGS	51
III-10	l'interface de l'exécution	51
III-11	l'interface des résultats	52
IV-1	Structure de la cellule solaire à hétérojonction (ZnO/CdS/CIGS)	54
IV-2	Caractéristique $J-V$ pour $x_p = 0.1 \mu\text{m}$ (CIGS)	58
IV-3	Caractéristique $QE-\lambda$ pour l'épaisseur $x_p = 0.1 \mu\text{m}$	58
IV-4	Caractéristique $J-V$ pour l'épaisseur $x_p = 1.7 \mu\text{m}$	59
IV-5	Caractéristique $QE-\lambda$ pour l'épaisseur $x_p = 1.7 \mu\text{m}$	60
IV-6	Caractéristique $J-V$ pour $x_p = 2.5 \mu\text{m}$	60
IV-7	Caractéristique $QE-\lambda$ pour $x_p = 2.5 \mu\text{m}$	61
IV-8	Caractéristique $J-V$ pour $x_p = 3 \mu\text{m}$	61
IV-9	Caractéristique $QE-\lambda$ pour $x_p = 3 \mu\text{m}$	62
IV-10	Caractéristiques $J-V$ pour différentes valeurs de l'épaisseur x_p	63
IV-11	Caractéristiques $QE-\lambda$ pour différentes valeurs de l'épaisseur x_p	63
IV-12	Variation du rendement de conversion photovoltaïque (η) avec l'épaisseur x_p	64

IV-13	Caractéristique $J-V$ pour $x_n = 0.01 \mu\text{m}$ (CdS)	66
IV-14	Caractéristique $QE-\lambda$ pour $x_n = 0.01 \mu\text{m}$ (CdS)	67
IV-15	Caractéristique $J-V$ pour $x_n = 0.05 \mu\text{m}$	67
IV-16	Caractéristique $QE-\lambda$ pour $x_n = 0.05 \mu\text{m}$	68
IV-17	Caractéristique $J-V$ pour $x_n = 0.07 \mu\text{m}$	69
IV-18	Caractéristique $QE-\lambda$ pour $x_n = 0.07 \mu\text{m}$	69
IV-19	Caractéristiques $J-V$ pour différentes valeurs de l'épaisseur x_n	70
IV-20	Caractéristiques $QE-\lambda$ pour différentes valeurs de l'épaisseur x_n	70
IV-21	Variation du rendement de conversion photovoltaïque (η) avec l'épaisseur x_n .	71
IV-22	Caractéristiques ($J-V$) pour différentes valeurs de la densité de défauts (D_p).	73
IV-23	Caractéristiques ($QE-\lambda$) pour différentes valeurs de la densité de défauts (D_p).	74
IV-24	Effet de la densité des défauts (D_p) sur le rendement de conversion (η).	74
IV-25	Caractéristiques ($J-V$) pour différentes valeurs de la densité de défauts (D_n).	75
IV-26	Caractéristiques ($QE-\lambda$) pour différentes valeurs de la densité de défauts (D_n).	76
IV-27	Effet de la densité des défauts (D_n) sur le rendement de conversion (η).	76
IV-28	Caractéristiques ($J-V$) pour différents dopages N_d	78
IV-29	Caractéristiques ($QE-\lambda$) pour différents dopages N_d	78
IV-30	Rendement de conversion (η) pour différentes valeurs du dopage N_d de la couche (n-CdS).	79
IV-31	Caractéristiques ($J-V$) pour différents dopages N_a	80
IV-32	Caractéristiques ($QE-\lambda$) pour différents dopages N_a	81
IV-33	Rendement de conversion (η) pour différentes valeurs du dopage N_a	81

Liste des tableaux :

N° de tableau	Titre	N°de page
I-1	Paramètres de performance essentiels extraits d'après la courbe $J-V$	27
II-1	Paramètres décrivant la photo-génération dans une cellule solaire ZnO/CdS/CIGS en supposant que la position de la surface du contact frontal est à $x = -0.25 \mu\text{m}$, l'interface ZnO/CdS est à $x = -0.05 \mu\text{m}$, et l'interface CdS/CIGS est à $x = 0$	37
III-1	Propriétés générales de la structure	47
IV-1	Les propriétés de la couche ZnO	55
IV-2	Les propriétés de la couche CdS	55
IV-3	Les propriétés de la couche CIGS	56
IV-4	L'épaisseur de chaque couche de la cellule étudiée	56
IV-5	Effet de l'épaisseur x_p de la couche (CIGS) sur les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire à hétérojonction (CdS/CIGS)	57
IV-6	Valeurs des caractéristiques électriques pour l'épaisseur $x_p = 0.1 \mu\text{m}$	59
IV-7	Valeurs des caractéristiques électriques pour l'épaisseur $x_p = 1.7 \mu\text{m}$	60
IV-8	Valeurs des caractéristiques électriques pour $x_p = 2.5 \mu\text{m}$	61
IV-9	Valeurs des caractéristiques électriques pour $x_p = 3 \mu\text{m}$	62
IV-10	Valeurs du rendement de conversion (η).correspondantes aux différentes épaisseurs x_p	65
IV-11	Effet de l'épaisseur x_n de la couche (CdS) sur les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire à hétérojonction (CdS/CIGS)	66
IV-12	Valeurs des caractéristiques électriques pour l'épaisseur $x_n = 0.01 \mu\text{m}$ (CdS)	67
IV-13	Valeurs des caractéristiques électriques pour $x_n = 0.05 \mu\text{m}$	68
IV-14	Valeurs des caractéristiques électriques pour $x_n = 0.07 \mu\text{m}$	69
IV-15	Valeurs du rendement de conversion (η)	72

	).correspondantes aux différentes épaisseurs x_n .	
IV-16	Valeurs des épaisseurs et densité de défauts dans chaque couche de la cellule	72
IV-17	Valeurs des caractéristiques photovoltaïques correspondantes aux paramètres du tableau IV.16	72
IV-18	Effet de la densité de défauts (D_p) de la couche (p-CIGS) sur les paramètres photovoltaïques de la cellule (CdS/CIGS).	73
IV-19	Effet de la densité de défauts (D_n) de la couche (n-CdS) sur les paramètres photovoltaïques de la cellule (CdS/CIGS) (<i>CdS/CIGS</i>)	75
IV-20	Paramètres principaux de chaque couche de la cellule étudiés	77
IV-21	Valeurs des caractéristiques photovoltaïques correspondantes aux paramètres du tableau IV.20	77
IV-22	Valeurs des caractéristiques photovoltaïques pour différents dopages N_d	79
IV-23	Valeurs des caractéristiques photovoltaïques pour différents dopages N_a	80

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	%
$I_{AM1.5}$	L'intensité de rayonnement $AM_{1.5}$	mA
I_{ph}	Le photo-courant	mA
$F(E)$	Fonction de Fermi Dirac	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_h^*	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
A	Facteur d'idéalité	-
N_c	La densité d'états équivalente dans la BC, ramenée en E_c	cm^{-3}
N_v	La densité d'états équivalente dans la BV, ramenée en E_v	cm^{-3}
E_{fn}, E_{fp}	Quasi-niveaux de Fermi des électrons et des trous respectivement	eV
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}
J_L	le courant photo-généré	mA/cm^2
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 et 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}
J_T	La densité du courant total	A cm^{-2}
$n_t(x)$ et $p_t(x)$	Les densités de charges négatives et positives dans les états des défauts	cm^{-3}
$N_{AD}(x)$	La densité du dopage le long de la cellule	cm^{-3}
N_a -	Concentration en impuretés ionisées de type accepteur	cm^{-3}
N_d +	Concentration en impuretés ionisées de type donneur	cm^{-3}
$U_R(x)$	Le taux de recombinaison total	$\text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}$
$U_n(x)$ et $U_p(x)$	Le taux de recombinaison total des électrons et des trous respectivement	$\text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}$
ξ	le champ électrique	V/m
$I(x)$	Intensité du flux au point x	mA
I_0	Intensité du flux incident sur une surface	mA
R	coefficient de réflexion représente	-
x	La profondeur	cm
$\phi(x)$	La densité de flux à la profondeur x	$\text{photons/cm}^2 \text{s}$
x_0	La surface	μm
$\phi(x_0)$	La densité du flux de photons à la surface x_0	$\text{photons/cm}^2 \text{s}$
m	Un indice reflétant le matériau ou la région	-
R_{srh}	Le taux de recombinaison Shockley -Read -Hall	$\text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}$
τ_{srh}	La durée de vie Shockley -Read -Hall	s
n_i	Concentration intrinsèque de porteurs libres	cm^{-3}
E_T	Energie totale	eV
σ	La section efficace	cm^2

v_{th}	La vitesse thermique des porteurs libres la densité des pièges	m/s
N_T	La densité des pièges	cm^{-3}
n_0	Concentration en électrons libres à l'équilibre thermique	cm^{-3}
p_0	Concentration en trous libres à l'équilibre thermique	cm^{-3}
R_d	Le taux net de recombinaison radiative	$cm^{-3} s^{-1}$
R_{Auger}	Le taux net de la recombinaison Auger	$cm^{-3} s^{-1}$
R_s	Le taux net de la recombinaison Surface	$cm^{-3} s^{-1}$
S_n, S_p	Les vitesses de recombinaison surfacique des électrons et des trous respectivement.	cm/s
B	Coefficient de recombinaison radiative ($B=9.5 \times 10^{-5} cm^{-3} s^{-1}$)	$cm^{-3} s^{-1}$
I_{dis}	Le spectre discret	-
$\phi(\lambda)$	Le flux de photon incident sur la cellule à la longueur d'onde λ	photons/ ($cm^2 \cdot s$)
$\phi_{b0/L}$	Le travail de sortie de contact métallique	J ou eV
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}
W_{CIGS}	L'épaisseur de la couche absorbante CIGS	μm
x_p	Epaisseur de la couche p	μm
x_n	Epaisseur de la couche n	μm
P_i	La puissance incidente fournie par l'éclairement	Watt
Wc	Watt Crête	-
GW	Géga Watt	-
ZnO	Oxyde de Zinc	-
CdS	Sulfure de Cadmium	-
$CIGS$	Di-sélénium de galium d'indium de cuivre (Cu (In, Ga) Se ₂)	-
$CdTe$	Tellure de Cadmium	-
S	Soufre	-
Au	L'Or	-

<i>AM 1.5</i>	Spectre de la lumière solaire	-
<i>Mo</i>	Molybdénium	-
<i>Al</i>	Aluminium	-
<i>AMPS-AD</i>	Logiciel de simulation [Analysis of Microelectronic and Photonic Structures-One Dimensional (analyse unidimensionnelle des structures micro-électroniques et photoniques)]	-
<i>AM</i>	La masse d'air	-
<i>STC</i>	Standard Test Conditions	-
<i>PVD</i>	Physical Vapor Deposition	-
<i>NREL</i>	National Renewable Energy Laboratory (Laboratoire national des énergies renouvelables)	-
<i>ZSW</i>	Zentrum für Sonnenenergie & Wasserstoff Forschung, Allemagne	-
<i>RTP</i>	Rapid Thermal Process	-
<i>SCR ou RCS</i>	Région de charge d'espace	-
<i>QNR</i>	Région quasiment-neutre	-
<i>EJM (MBE)</i>	Epitaxie par Jets Moléculaires (Molecular Beam Epitaxie)	-
<i>CBD</i>	Chemical bath deposition (dépôt en bain chimique)	-
<i>EPRI</i>	Electric Power Research Institute	-
<i>UNIX, OS, NT</i>	systèmes d'exploitation	-
<i>PC</i>	L'ordinateur	-

ملخص

في هذا العمل حققنا دراسة الخصائص الكهربائية لخلية شمسية (n-p) ذات وصلة متغايرة (CdS/CIGS) تحت الإضاءة AM1.5 باستخدام البرنامج **AMPS-1D** كأداة للنمذجة الرقمية. سمحت الدراسة بإستخلاص الخصائص: كثافة التيار - جهد ($J-V$)، الخصائص: المردود الكوانتي - طول الموجة ($QE - \lambda$) وكذلك كثافة تيار الدارة القصيرة (J_{cc})، جهد الدارة المفتوحة (V_{cc})، معامل التعبئة (FF)، و مردود التحول الفوتوفولطائي (η). درسنا هذه الخصائص الفوتوفولطائية تحت أثر تغيير السمك، كثافة العيوب و التطعيم. اتضح أن التغييرات المطبقة على خصائص الطبقة الأمامية (n-CdS) ليس لها على العموم تأثيرات معتبرة على الخصائص الكهربائية للخلية. بُرر ذلك بكون الطبقة الأمامية (n-CdS) هي دائما بامتصاص اقل اعتبارا و بسمك (x_n) أقل بكثير من السمك (x_p) للطبقة الممتصة (p-CIGS). بتغيير السمك (x_p)، فإن أحسن مردود للتحول الفوتوفولطائي تحقق من أجل قيم ل (x_p) حول 2.5 μm ($\eta = 18.40\%$). كلما كان السمك (x_n) أصغر كلما ارتفعت قيمة المردود η = 19.3965% من أجل $x_n = 0.01 \mu\text{m}$. من أجل كثافة عيوب D_p مختزلة في الطبقة (p-CIGS) (10^{13} cm^{-3})، مردود التحول الفوتوفولطائي (η) يصل 21.6673 %. فيما يخص التطعيم، القيمة (N_d) $1.1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ لتطعيم المنطقة (n-CdS) تعطي مردودا جيدا ($\eta = 18.5843\%$). التطعيم $N_a = 2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ للمنطقة (p-CIGS) يعطي مردودا $\eta = 19.1162\%$. على العموم النتائج المتحصل عليها هي في مجال ما وجد من خلال الأبحاث التجريبية و النظرية المجراة على الخلايا الشمسية ذات الوصلة المتغايرة (CdS/CIGS).

Résumé

Dans ce travail nous avons effectué l'étude des caractéristiques électriques d'une cellule solaire (n-p) à hétérojonction (CdS/CIGS) sous l'éclairement AM1.5 en utilisant comme outil de simulation numérique le logiciel **AMPS-1D**. L'étude a permis d'extraire les caractéristiques densité de courant - tension ($J-V$), les caractéristiques rendement quantique - longueur d'onde ($QE - \lambda$) ainsi que la densité de courant de court circuit (J_{cc}), la tension de circuit ouvert (V_{cc}), le facteur de remplissage (FF), et le rendement de conversion photovoltaïque (η).

Nous avons étudié ces caractéristiques photovoltaïques sous l'effet de variation de l'épaisseur, de la densité de défauts et du dopage. Il s'est avéré que les changements apportés aux propriétés de la couche frontale (n-CdS) ont généralement des effets moins significatifs sur les caractéristiques électriques de la cellule. Cela est justifié par le fait que la couche frontale (n-CdS) est toujours d'une épaisseur (x_n) très fine et d'une absorption moins considérable en comparaison avec l'épaisseur (x_p) et l'absorption de la couche absorbante (p-CIGS). En faisant varier l'épaisseur (x_p), le meilleur rendement de conversion est obtenu pour des valeurs de (x_p) autour de 2.5 μm - 2.6 μm ($\eta = 18.40\%$). Plus l'épaisseur (x_n) est fine plus le rendement est élevé ($\eta = 19.3965\%$ pour $x_n = 0.01 \mu\text{m}$). Pour une densité de défauts D_p réduite dans la couche (p-CIGS) à (10^{13} cm^{-3}), le rendement de conversion (η) atteint 21.6673 %. Concernant le dopage, la valeur ($N_d = 1.1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) du dopage de la région (n-CdS) donne un bon

rendement de conversion ($\eta = 18.5843\%$). Le dopage $N_a = 2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ de la région (p-CIGS) donne un rendement $\eta = 19.1162\%$. Généralement, les résultats obtenus sont dans la gamme de ce qu'a été trouvé par les travaux expérimentaux et théoriques menés sur les cellules solaires à hétérojonction (CdS/CIGS).

Abstract

In this work, we realised the study of the electrical characteristic of (n-p) (CdS/CIGS) hetero-junction solar cell under AM1.5 illumination by using **AMPS-1D** logical as numerical simulation tool. The study allowed to extract the current density - voltage ($J-V$) characteristic, the quantum efficiency - wave length ($QE - \lambda$) characteristic and the short circuit current density (J_{cc}), the open circuit voltage

(V_{co}) , the fill factor (FF) and the photovoltaic conversion efficiency (η). We have studied these photovoltaic characteristics under the variation of thickness, defect density and doping effect. It has been proved that changes provided to the properties of the (n-CdS) frontal layer have generally effects less significant on the electrical characteristics of the cell. This has been justified by the fact that the (n-CdS) frontal layer is always with (x_n) thickness very thin and absorption less significant relatively to (x_p) thickness of the absorbing (p-CIGS) layer and its absorption. By changing the (x_p) thickness, the better photovoltaic conversion efficiency is obtained for (x_p) values around $2.5 \mu\text{m}$ - $2.6 \mu\text{m}$ ($\eta = 18.40\%$). More the (x_n) thickness is thin, more the efficiency is high ($\eta = 19.3965\%$ for $x_n = 0.01 \mu\text{m}$). For a reduced defect density D_p in the (p-CIGS) layer (10^{13} cm^{-3}), the conversion efficiency (η) reach 21.6673% . Concerning the doping, the value $1.1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ of the N_d doping of the (n-CdS) layer give a good conversion efficiency ($\eta = 18.5843\%$). The N_a doping $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ of the (p-CIGS) layer give an efficiency $\eta = 19.1162\%$. Generally, the obtained results are in the range of what has been found by experimental and theoretical works carried on (CdS/CIGS) hetero-junction solar cells.

Introduction Générale

Introduction générale

La crise actuelle dans les sources d'énergie, à la fois économique, écologique et sociale, requiert de profondes mutations des transitions d'énergies non renouvelables aux énergies renouvelables. En particulier, notre empreinte sur l'environnement a dépassé les capacités biologiques de notre planète depuis les années 1980 [1] : le développement actuel n'est pas soutenable. Une économie énergétique basée sur des combustibles fossiles ne peut subsister, à la fois à cause de l'épuisement des ressources fossiles, des dangers climatiques induits par une production excessive de gaz à effet de serre et de la nécessité de sécuriser notre accès à l'énergie [2]. De plus, les besoins énergétiques continuent de croître, notamment dans les pays en développement, ne serait-ce que parce que plus d'un milliard de personnes n'ont pas encore accès à l'électricité. Les sources énergétiques renouvelables, telles que l'hydroélectricité, la biomasse, l'éolien et le solaire, sont donc appelées à se développer largement dans les prochaines années. Comme la demande est très importante, et que chaque énergie présente un caractère intermittent et des capacités de stockage différentes, un développement complémentaire des différentes énergies renouvelables est nécessaire. Au sein de ces énergies, l'énergie solaire a une place de choix. Le soleil en effet fournit en une heure l'énergie utilisée par l'humanité en une année. C'est d'ailleurs son énergie qui est indirectement à l'origine de toutes les autres sources d'énergie, mis à part le nucléaire et la géothermie, notamment grâce à la photosynthèse, au cycle de l'eau, ou à la convection de l'air.

Au sein de la filière solaire, l'énergie photovoltaïque se différencie de l'énergie solaire thermodynamique, car elle produit directement de l'électricité, ne nécessitant ni cycle vapeur, ni pièces mécaniques tournantes. De plus, elle ne nécessite pas un ensoleillement direct. C'est donc une énergie de premier choix dans les pays tempérés, où l'ensoleillement n'est que rarement direct, par suite de la diffusion par les nuages. Le photovoltaïque peut être une énergie significative : en France, 5 000 km² de panneaux à 10 % de rendement de conversion seraient suffisants pour produire l'équivalent de 550 TWh (production d'électricité actuelle).

C'est environ cinq fois moins que la surface des infrastructures en France (toitures, routes...).

De plus, c'est une énergie décentralisée, déjà compétitive pour les besoins des sites isolés dont le raccordement au réseau électrique est trop onéreux. Pour favoriser un développement rapide de

cette énergie, les coûts restent encore à optimiser : le coût final pour le consommateur, mais aussi la consommation en matières premières et en énergie par les procédés de transformation de ces matières premières en modules photovoltaïques efficaces.

Une cellule photovoltaïque classique est basée sur une jonction de deux semiconducteurs (l'un de type p , l'autre de type n) qui produit sous illumination un courant électrique: c'est l'effet photovoltaïque. Un module photovoltaïque est constitué de cellules photovoltaïques associées en série ou en parallèle et constitue l'unité de base pour les installations solaires. Plusieurs filières photovoltaïques se sont développées.

La première génération s'est basée sur des cellules à base de silicium. Les rendements maximum en laboratoire sont de 20% pour les cellules à base de silicium polycristallin et 25% pour les cellules à base de silicium monocristallin [3]. Les rendements des modules industriels atteignent 15 à 20% selon la technologie. Les cellules à base de silicium dominent encore le marché (85% du marché mondial en 2010 [4]). Néanmoins, les nombreuses étapes du procédé de fabrication et les températures élevées nécessaires en font une technologie assez coûteuse.

La seconde génération développe des cellules en couches minces, au pouvoir d'absorption important, qui nécessitent environ 100 fois moins de matériau (quelques μm d'épaisseur) que les cellules au silicium (d'environ 0,2 mm d'épaisseur), et offrent de nombreux autres avantages : elles peuvent être déposées sur des substrats souples (ce qui multiplie le nombre d'applications possibles), par des procédés simples, rapides, en peu d'étapes, à températures modérées. Ainsi l'énergie ayant servi à la production des modules représente environ un an de leur propre production d'énergie, contre environ 2 ans pour les cellules au silicium [5]. Les technologies couches minces prennent une part croissante du marché du photovoltaïque (14% du marché mondial en 2010, soit 2,8 GW) [4].

Différentes filières industrielles de couches minces se distinguent [2] :

- Les couches minces au silicium amorphe hydrogéné a-Si:H. C'est une filière déjà industrielle : des panneaux solaires flexibles de large superficie (par exemple, la « moquette solaire » d'Unisolar) sont produites. Néanmoins les rendements stabilisés des modules restent autour de 8%, pour des rendements de 13% en laboratoire en tandem avec du Si microcristallin [3].
- Les couches minces au tellure de cadmium CdTe. Les cellules à base de CdTe sont les premières à présenter un coût de production inférieur à 1 \$/Wc (par watt crête). Le rendement est autour de 11% en module (et 17% en laboratoire [6]), mais le cadmium est un métal toxique, ce qui requiert

des garanties supplémentaires pour l'environnement et le recyclage. L'acteur principal de cette filière, First Solar, est un des premiers producteurs mondiaux pour les fermes solaires.

- Les couches minces au diséléniure de cuivre, d'indium et de gallium, noté CIGS. Cette filière présente des rendements de conversion élevés (20,3% atteint en 2011 [7] en laboratoire, de 11 à 13% en modules) et des perspectives de coûts faibles identiques à ceux de cellules à base de CdTe. De petites unités de production existent et cette filière est amenée à se développer. La société japonaise Solar Frontier vient d'ouvrir une usine de 1 GW [8].

Enfin, une troisième génération de cellules solaires émerge dans les laboratoires de recherche, basée sur des concepts différents [9] : de nombreuses voies sont développées, telles que les cellules hybrides à colorant, par M. Graetzel (de rendement 11,1%), ou les cellules entièrement organiques (cellules de rendement jusqu'à 8% développées par Konarka) [3]. De nouveaux modèles sont envisagés pour dépasser la limite de rendement à environ 30% d'une cellule classique : ces systèmes utilisent des convertisseurs de photons, des porteurs chauds ou encore de la plasmonique. Les concepts déjà anciens de concentration de la lumière et d'empilement contrôlé de plusieurs jonctions connaissent un regain d'intérêt [10], en vue d'applications industrielles. Des cellules de 42,3% peuvent être obtenues [3].

Si les technologies silicium sont déjà bien maîtrisées, celles à base de couches minces nécessitent encore un effort de recherche important, et un retour d'expérience à des échelles de production plus importantes. Le développement de procédés à bas coût pourrait permettre à moyen terme d'affirmer leurs avantages. La filière à base de CIGS est particulièrement prometteuse, avec une élaboration facile du matériau CIGS, et des rendements de conversion similaires à ceux des cellules à base de silicium polycristallin.

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

Ce travail aborde l'étude des caractéristiques électriques de la cellule solaire en couches minces à base du $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ (CIGS), de structure à hétérojonction $\text{ZnO}/\text{CdS}/\text{CIGS}$. Où le semiconducteur de type p, le CIGS, est l'absorbeur de la cellule (c'est-à-dire la zone où les paires électrons trous sont générées sous illumination). La jonction est formée avec le CdS/ZnO , des semiconducteurs de type n. Le ZnO est appelé couche fenêtre, car il doit laisser passer le rayonnement jusqu'à l'absorbeur. Le CIGS présente un gap direct et donc un grand coefficient d'absorption : 2 μm à 3 μm d'épaisseur sont suffisants par rapport à 200 μm pour l'homojonction Si.

La cellule est soumise à l'éclairement AM1.5, et en utilisant le logiciel de simulation numérique **AMPS-1D**, nous allons générer et étudier les caractéristiques électriques de la cellule telles que : la caractéristique densité de courant - tension ($J-V$), la caractéristique rendement quantique -longueur d'onde ($QE - \lambda$), ainsi que la densité de courant de court circuit (J_{cc}), la tension de circuit ouvert (V_{co}), le facteur de remplissage (FF), et le rendement de conversion photovoltaïque (η). Ces caractéristiques sont étudiées et analysées sous la variation des grandeurs des paramètres : épaisseur de la couche (n-CdS) et (p-CIGS), densité des défauts et dopage dans les deux régions de la cellule.

Le mémoire est structuré en quatre chapitres plus une introduction et une conclusion générale.

Dans le premier chapitre, un rappel est présenté sur tous les éléments concernés par la conversion photovoltaïque depuis le rayonnement solaire jusqu'aux cellules solaires en couches minces à base du composé chalcopyrite $Cu(In,Ga)Se_2$ (CIGS).

Dans le deuxième chapitre sont présentés les modèles physiques appropriés pour décrire les phénomènes de transport, d'absorption, de génération et de recombinaison, se produisant dans un milieu semi-conducteur.

Le troisième chapitre présente une description du logiciel de simulation numérique *AMPS-1D* et son utilisation permettant de calculer les caractéristiques électriques de la cellule solaire telles que : la caractéristique densité de courant - tension ($J-V$), et la caractéristique rendement quantique - longueur d'onde ($QE - \lambda$).

Dans le dernier chapitre, Nous présentons et discutons les résultats essentiels obtenus de l'étude des caractéristiques électriques de la cellule solaire à hétérojonction ZnO/CdS/CIGS. Ses caractéristiques sont étudiées et analysées sous la variation des grandeurs des paramètres : épaisseur de la couche (n-CdS) et (p-CIGS), densité des défauts et dopage dans les deux régions de la cellule.

Conversion photovoltaïque et cellules solaires en couche mince à base de CIGS

Introduction : **Conversion photovoltaïque et cellules solaires en couche mince à base de CIGS**

l'énergie lumineuse en une puissance électrique. La puissance électrique qu'elle délivre dépend du flux lumineux incident et de la répartition spectrale du rayonnement solaire.

Dans ce chapitre, on fait un rappel sur tous les éléments concernés par la conversion photovoltaïque depuis le rayonnement solaire jusqu'aux cellules solaires en couches minces à base du composé chalcopyrite $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ (CIGS).

1.2 .Le soleil :

Le soleil est une étoile - notre étoile - située à environ 150 millions de kilomètres de la terre et la vitesse de la lumière est d'un peu plus de 3×10^8 m/s, les rayons du soleil mettent donc environ 8 min à nous parvenir [11]. Vu de notre planète, il se présente sous la forme d'une sphère gazeuse de 696 000 km de rayon, soit 109 fois celui de la terre et sa masse est 333 000 fois celle de notre planète. La lune est 400 fois plus petite que le soleil, mais 400 fois plus près de la terre, ce qui explique la taille apparente similaire des deux astres dans le ciel, ce dont on peut se rendre compte en particulier lors des éclipses de Soleil [12,13].

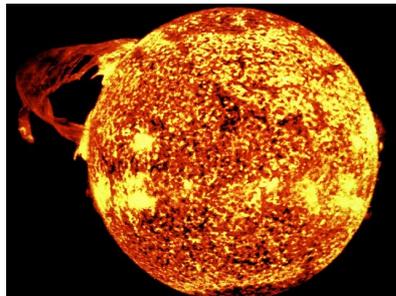


Figure I.1 : Le soleil

I.3. 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 : Conversion photovoltaïque et cellules solaires en couche mince à base de CIGS

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 liée à leur longueur d'onde par la relation [15]:

$$E = h \nu = \frac{hc}{\lambda}$$

(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.2 [11] :

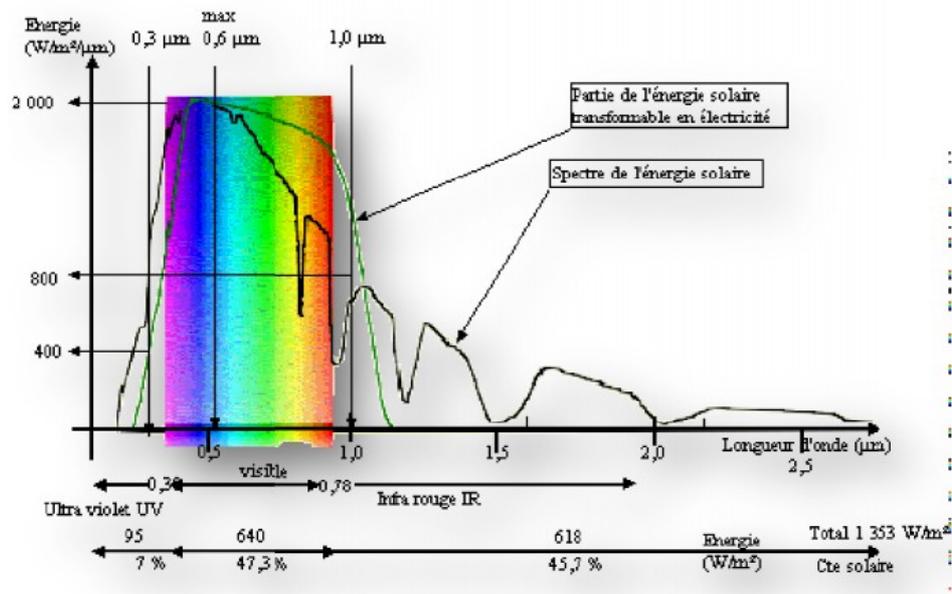


Figure I.2 : Spectre solaire [11].

- **L'énergie solaire photovoltaïque :**

L'énergie solaire photovoltaïque désigne l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire avec une cellule photovoltaïque [16].

I.3 .1 . La constante solaire :

La constante solaire est la densité d'énergie solaire qui atteint la frontière externe de **Conversion photovoltaïque et cellules solaires en couche mince à base de CIGS**

W/m^2 (bien qu'elle varie de quelques % dans l'année à cause des légères variations de la distance Terre-Soleil) [17]. Lors de la traversée de l'atmosphère, ce rayonnement de $1360 W/m^2$ subit des déperditions, du fait de son absorption partielle par les gaz atmosphérique et la vapeur d'eau. Ainsi, le flux reçu sur la Terre est inférieur au flux « initial » et dépend de l'angle d'incidence, et donc de l'épaisseur d'atmosphère traversée [17].

- **Masse d'air :**

Plus le soleil est bas sur l'horizon, plus il va traverser une épaisseur importante d'atmosphère et plus il va subir de transformation. On appelle *masse d'air* ou *Air Masse* en anglais, le rapport entre l'épaisseur d'atmosphère traversée par le rayonnement direct pour atteindre le sol et l'épaisseur traversée au vertical du lieu [18].

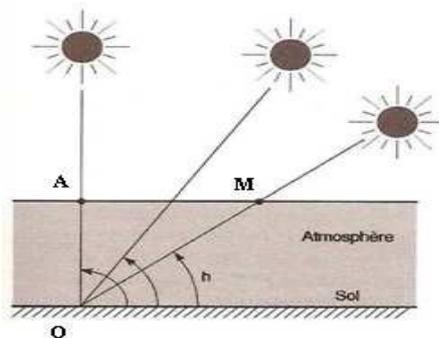


Figure I.3 : Définition de la masse d'air [19].

La longueur du trajet d'un rayon solaire incliné par rapport à l'horizontale d'un angle h est donné par la formule [16]:

$$OM = \frac{OA}{\sin h}$$

(I-2)

Donc la masse d'air est [16]:

Conversion photovoltaïque et cellules solaires en couche mince à base de CIGS

(I-3)

Le rayonnement signalé comme rayonnement de la masse d'air « 1 » (ou AM1) est celui qui accède au niveau de la mer à midi dans un ciel clair, son irradiante sera à ce moment précis de 1000 W/m^2 . La perte d'énergie peut être provoquée par une perte d'altitude du soleil dans le ciel car elle doit à ce moment là traverser une masse d'air plus importante. Etant donné que le soleil se trouve au zénith pendant une courte durée, l'énergie disponible sera inférieure à 1000 W/m^2 en permanence étant donné que la masse d'air sera plus grande [18].

AM1.5G ou AM1.5D sont les noms du prisme standard des rayons du soleil sur la surface de la terre octroyés par les scientifiques. Le nombre se trouvant à la suite de « AM » dans ce cas « 1.5 » signifie que la distance de la lumière dans l'atmosphère est supérieure de 1.5 fois la distance lorsque le soleil est au zénith (c'est-à-dire que le soleil se trouve à 45° par rapport au zénith). Les lettres « D » et « G » désignent le rayonnement du soleil. Le « G » correspond au rayonnement 'global' qui comprend le rayonnement direct et le rayonnement diffus alors que le « D » ne correspond qu'au rayonnement direct. AM0 désigne le rayonnement solaire hors de l'atmosphère [20].

- **Rayonnement au sol:**

L'atmosphère modifie le spectre énergétique du rayonnement solaire à travers trois mécanismes principaux [21]:

- L'absorption par les différents gaz, chacun ayant des raies caractéristiques.
- La diffusion moléculaire de Rayleigh.
- La diffusion par les aérosols, par les poussières et par les nuages.

Conversion photovoltaïque et cellules solaires en couche mince à base de CIGS

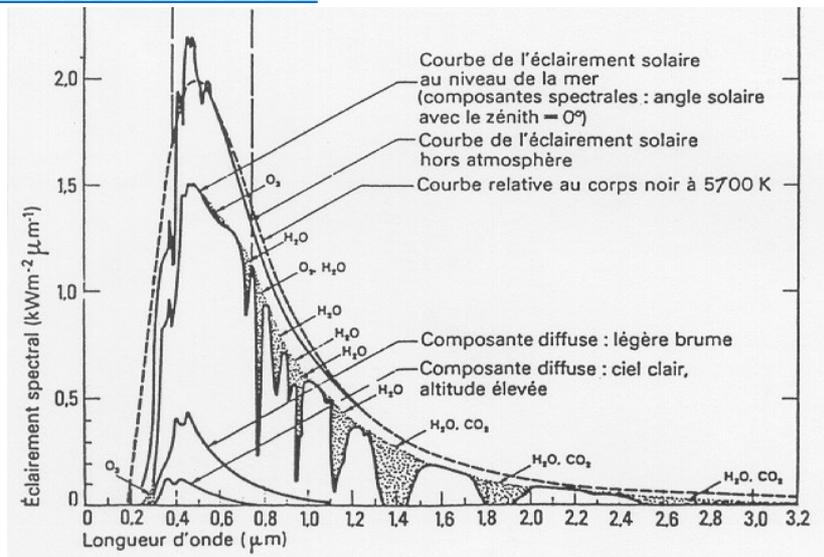


Figure I.4 : Le corps noir à 5700 °K et les spectres solaires AM0 et AM1 [22].

I.3.2. Normalisation :

Les conditions standards de test des panneaux solaires sont caractérisées par [20]:

- un rayonnement instantané de 1000 W/m^2 .
- un spectre solaire AM 1.5.
- 25°C de température ambiante.

Ces conditions sont appelées STC (*Standard Test Conditions*).

I.4. Notions de base sur les cellules solaires:

I.4.1. Concepts importants sur les semi-conducteurs:

Les semi-conducteurs sont une famille des solides ayant un gap d'énergie modéré (jusqu'à quelques électrons volts) dans la distribution des états d'énergies permises. À $T = 0 \text{ K}$ dans un matériau pur, ce gap sépare une bande entièrement remplie (bande de valence) de celle qui est entièrement vide (bande de conduction). Pour $T > 0 \text{ K}$, un nombre fini d'états électroniques sont occupés dans la bande de conduction ("électrons libres") et un nombre fini d'états sont inoccupés dans la bande de valence ("trous libres"). Ces électrons et trous libres peuvent gagner de l'énergie cinétique depuis un quasi-continuum d'états plus ou moins élevés mis à leur disposition, respectivement, et ils sont donc en mesure de répondre à des champs électriques et des gradients de concentration qui permettent la circulation du courant macroscopique [23].

Les concentrations à l'équilibre des électrons et des trous peuvent être modifiées par des **Conversion photovoltaïque et cellules solaires en couche mince à base de CIGS**

d'énergie) qui sont intrinsèques dans le semi-conducteur. L'occupation des états de la bande de conduction et de valence est régie par les statistiques de Fermi-Dirac [23],

$$F(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_f}{KT}\right)}$$

(I- 4)

Où K est la constante de Boltzmann et T la température absolue. L'équation (I- 4) décrit la probabilité d'occupation d'électrons dans la bande de conduction et, similairement, le $1 - F(E)$ décrit la probabilité pour les trous dans la bande de valence. Si le niveau de Fermi E_f n'est pas très proche de l'un des bords de la bande, $E_c - E_f \gg kT$ et $E_f - E_v \gg kT$, $F(E)$ et $1 - F(E)$ peuvent pour des causes pratiques, être remplacés par les facteurs de Boltzmann [23]

$$\exp\left(\frac{-E - E_f}{KT}\right) \text{ et } \frac{-E_f - E}{KT} \exp\left(\frac{-E_f - E}{KT}\right)$$

(I- 5)

Pour les électrons dans la bande de conduction et les trous dans la bande de valence, respectivement.

Les semi-conducteurs sont classifiés en tant que type- n -ou type- p selon lesquels des électrons ou trous sont les porteurs majoritaires. Le niveau de Fermi peut être calculé par les relations suivantes [23]:

$$n = N_c \cdot \exp\left(\frac{-E_c - E_f}{KT}\right)$$

(I-6)

et

Conversion photovoltaïque et cellules solaires en couche mince à base de CIGS

(I-7)

Où:

$$N_c = 2 \left(\frac{2\pi m_e^i KT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \quad \text{et} \quad N_v = 2 \left(\frac{2\pi m_h^i KT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}}$$

(I-8)

sont les densités effectives des états dans la bande de conduction et de valence. Pour les semi-conducteurs dopés soit avec des niveaux donneurs ou accepteurs peu profonds, n est similaire à la densité des donneurs et p est similaire à la densité des accepteurs. Tous les paramètres dans l'équation (I- 8) ont leur signification habituelle, m_e^i et m_h^i sont les masses effectives des électrons et des trous. A l'équilibre, le produit de n et p est constant et dépend seulement de la température, des masses effectives, et du gap d'énergie du semi-conducteur [23],

$$np = n_i^2 = N_c \cdot N_v \cdot \exp\left(\frac{-E_g}{KT}\right)$$

(I-9)

Non-équilibre:

Dans les conditions de non-équilibre, comme sous illumination ou sous injection des porteurs en raison de polarisation électrique appliquée extérieurement, aucun niveau uniforme de Fermi n'existe. Dans l'état stationnaire, cependant, des quasi-niveaux de Fermi E_{fn} et E_{fp} , peuvent être introduits, qui sont essentiels dans l'analyse et interprétation des semi-conducteurs. Ces quasi-niveaux de Fermi sont définis par [23] :

Conversion photovoltaïque et cellules solaires en couche mince à base de CIGS

(I-10)

et

$$p = N_v \cdot \exp\left(\frac{-E_{fp} - E_v}{KT}\right)$$

(I-11)

En supposant que E_{fn} et E_{fp} dans la région de type-n et de type-p d'une diode à jonction p-n sont en équilibre avec le contact électrique respectif, la différence entre les quasi-niveaux de Fermi à proximité de la région de charge d'espace de la diode est donnée par la tension appliquée V , et s'ensuit que le produit np est dépendant de la tension [23]:

$$np = n_i^2 = \exp\left(\frac{qV}{KT}\right)$$

(I-12)

La solution numérique du problème de la jonction $p-n$, comprend les phénomènes de génération, de recombinaison et du transport qui seront discutés dans le 2^{ème} chapitre. Plus d'informations sur les propriétés des semi-conducteurs peuvent être trouvés dans de nombreux ouvrages sur les semi-conducteurs [24] et les cellules solaires [25-26].

I.4. 2. Propriétés générales du composé semiconducteur CIGS :

Le composé chalcopyrite $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ (CIGS) est un matériau semi-conducteur à gap direct et possède un coefficient d'absorption lumineuse qui dépasse 10^5 cm^{-1} . Ces propriétés inhérentes du matériau associées à son gap d'énergie acceptable et sa stabilité chimique et thermique, fait du CIGS l'un des matériaux les plus prometteurs en tant que matériau absorbeur destiné à la fabrication des cellules solaires en couches minces. La meilleure cellule solaire à base de (CIGS) a déjà atteint un rendement de conversion photovoltaïque au voisinage de 20% [27,28].

Conversion photovoltaïque et cellules solaires en couche mince à base de CIGS

Les se caractérisent par une distribution d'atomes, avec quatre atomes de valence par site atomique. Ces structures sont dérivées de celle de ZnS (blende de zinc) type diamant, qui présente deux sous-réseaux interpénétrés (anions et cations) cubiques à faces centrées, décalés d'un vecteur $(1/4, 1/4, 1/4)$. Dans le cas du CIGS, le sous-réseau cationique se partage entre cations de valences inférieure et supérieure. La structure est de type sphalérite s'il y a distribution aléatoire des sites cationiques. Sinon, suivant la répartition des cations (I) (ici le Cu) et (III) (ici l'In ou le Ga), les composés adoptent une structure soit chalcopyrite soit « Cu-Au ». Dans ce cas, des déformations dues aux deux cations de taille différentes surviennent : la structure n'est plus cubique mais quadratique (aussi appelée tétragonale). Par conséquent le rapport c/a des paramètres de maille (figure I.5) est différent de 2. La figure I.5 présente les différentes structures cristallines mentionnées ci-dessus [29, 30, 31]

Conversion photovoltaïque et cellules solaires en couche mince à base de CIGS

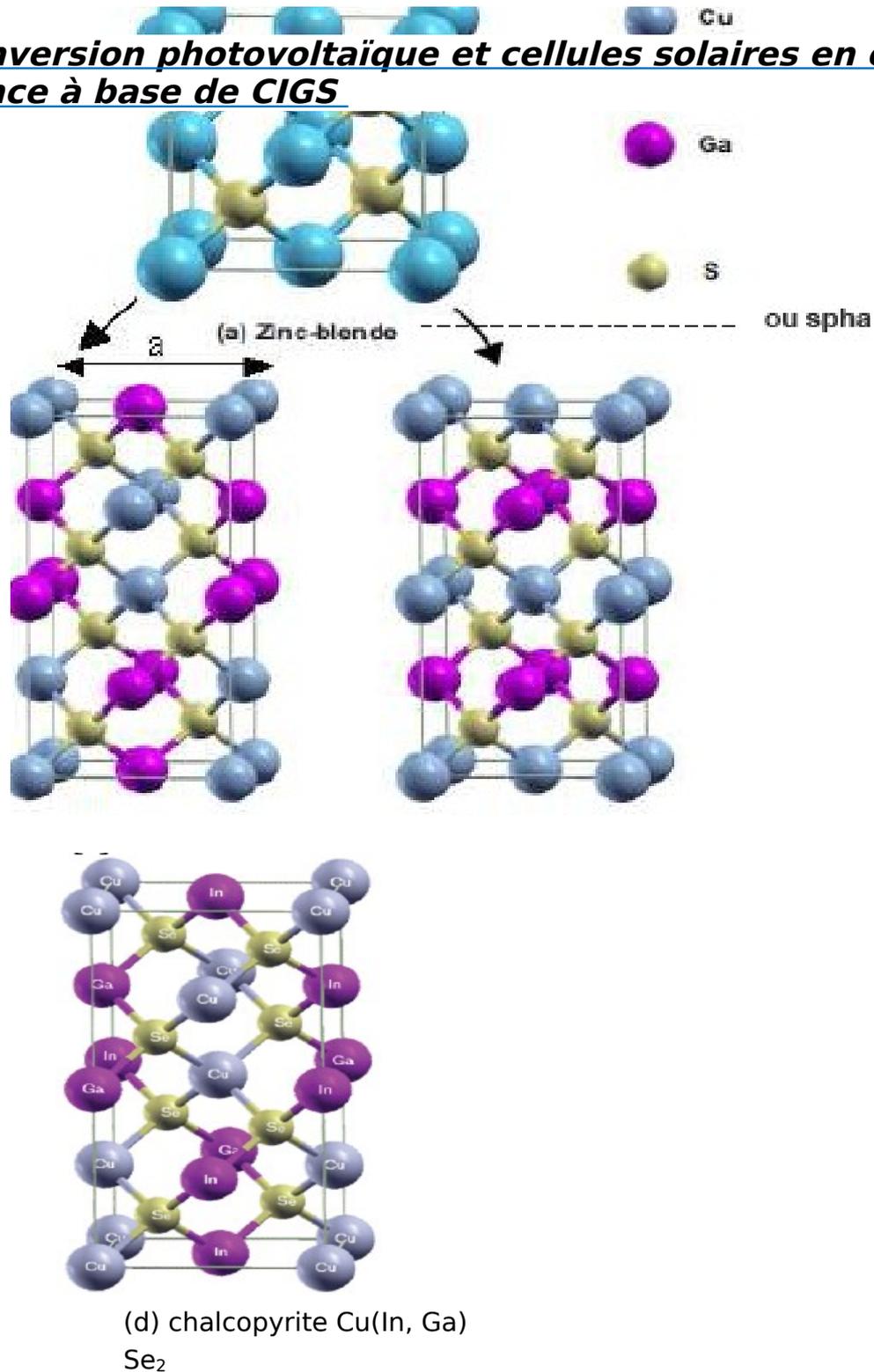


Figure I. 5 : Structure cristalline de (a) blende de zinc (ou sphalérite avec (Cu,Ga) à la place du Zn), (b) chalcopyrite CuGaS₂, (c) Cu-Au ici pour CuGaS₂ et (d) chalcopyrite Cu(In, Ga) Se₂ [30, 32] .

Les variations de composition ont également une influence sur les valeurs de **Conversion photovoltaïque et cellules solaires en couche mince à base de CIGS**

composé dont la valeur de la bande interdite est comprise entre 1.04 eV pour le CuInSe_2 pur et 1.7 eV pour le CuGaSe_2 pur. Jusqu'à présent, ce sont les matériaux $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ avec un rapport $\text{Ga}/(\text{In}+\text{Ga})$ de 25 à 35% (bande interdite de 1.1 à 1.2 eV) qui ont obtenu les meilleurs rendements [33, 34].

On observe une diminution de la densité de défauts pour une quantité optimale de Ga ($\text{Ga}/(\text{In}+\text{Ga})=0,3$) pour un composé $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ homogène en épaisseur [35].

Propriétés optiques et électriques

Une propriété caractéristique de CIGS est la haute capacité d'absorption. Environ 99% de la lumière entrante sera absorbée dans les premiers micromètres de la matière [29].

La durée de vie des porteurs minoritaires, les longueurs de diffusion électroniques et les mobilités des porteurs de charge sont des propriétés qui dépendent en grande partie des conditions de la préparation des films minces. Par conséquent, seules des valeurs approchées peuvent être fournies. La durée de vie des porteurs minoritaires s'élève à plusieurs ns, la longueur de diffusion des électrons est de l'ordre de quelques microns et la mobilité des électrons dans le cristal unique peut atteindre $1000 \text{ cm}^2 / \text{Vs}$. [29]

1.4.3. Les techniques conventionnelles de dépôt du CIGS:

Les techniques de dépôt peuvent se diviser en deux catégories :

- un dépôt simultané possible des éléments Cu-In-Ga-Se-S à chaud : alors la croissance cristalline du matériau CIGS peut être contrôlée pendant le procédé. Les techniques correspondantes sont la co-évaporation ou la co-pulvérisation réactive.

- un dépôt à froid, suivi d'un recuit. C'est le cas de la pulvérisation cathodique (« sputtering »), de l'électrodépôt, des techniques par impression, qui

Les techniques de dépôt sous vide sont les techniques qui permettent actuellement d'obtenir les meilleurs rendements de cellules. Ce sont les techniques déjà présentes industriellement. Les paragraphes suivants décrivent les principes des différentes techniques, et les caractéristiques des meilleures cellules synthétisées [31].

1.4.3.a. Evaporation à partir de sources élémentaires:

La co-évaporation est, avec la pulvérisation cathodique, une méthode de dépôt physique par phase vapeur (ou PVD : Physical Vapor Deposition). Les matériaux purs à déposer sont placés sous forme solide dans des creusets portés à haute température. La température des creusets conditionne les flux de vapeur de chaque élément et donc la composition du dépôt. Un vide poussé est nécessaire pour permettre aux flux de vapeur d'atteindre le substrat et pour éviter les impuretés. Le substrat est porté à une température permettant la diffusion des éléments et le contrôle de la croissance cristalline du matériau au fur et à mesure de l'arrivée des vapeurs réactives. Un schéma du montage est présenté en figure (I.6) [31].

La co-évaporation sous vide (à partir de sources élémentaires) de Cu(In,Ga)Se_2 avec un gradient du rapport $\text{Ga}/(\text{In}+\text{Ga})$ en profondeur a permis récemment d'obtenir des cellules avec un rendement de 19,9% au NREL (National Renewable Energy Laboratory) [33] et un rendement de 20,3% pour ZSW (Zentrum für Sonnenenergie & Wasserstoff Forschung, Allemagne) [34]. Il reste encore un écart par rapport au rendement théorique maximal qui est de 30% pour une largeur de bande interdite optimale de 1,5 eV [36]. Le procédé de co-évaporation à partir de sources élémentaires, optimisé pour obtenir des cellules de haut rendement, se compose typiquement de trois étapes (« three-stage process », [37]), présentées en figure I.7.

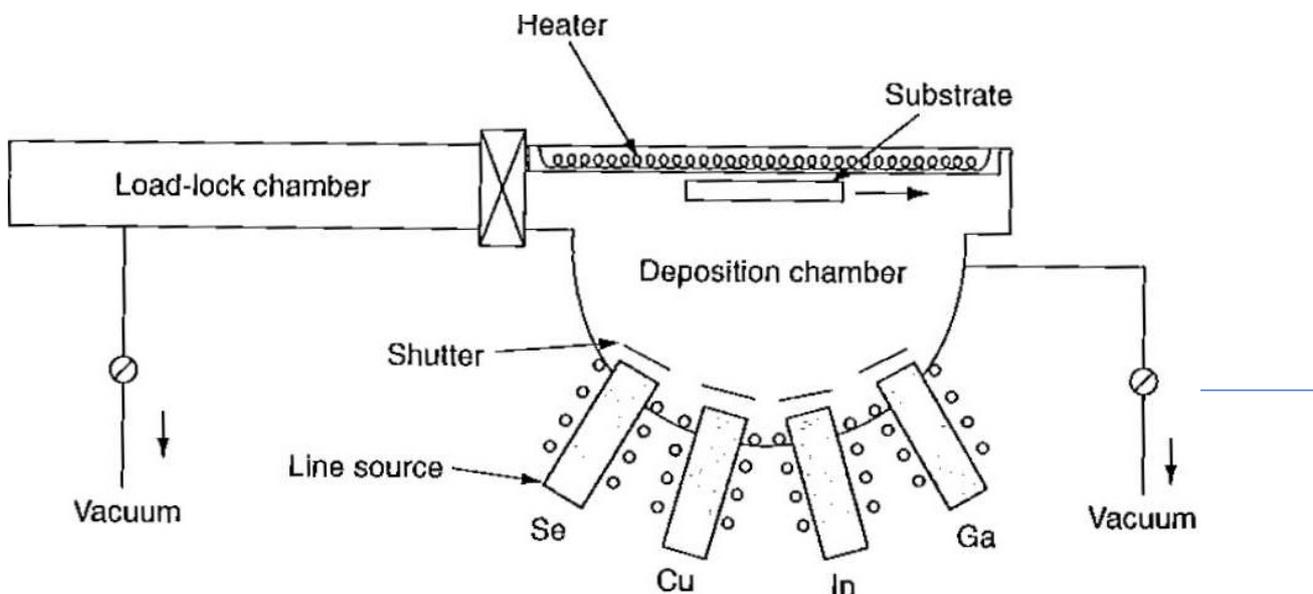


Figure I. 6 : Schéma d'un procédé de co-évaporation en ligne pour la synthèse de couches **Conversion photovoltaïque et cellules solaires en couche mince à base de CIGS**

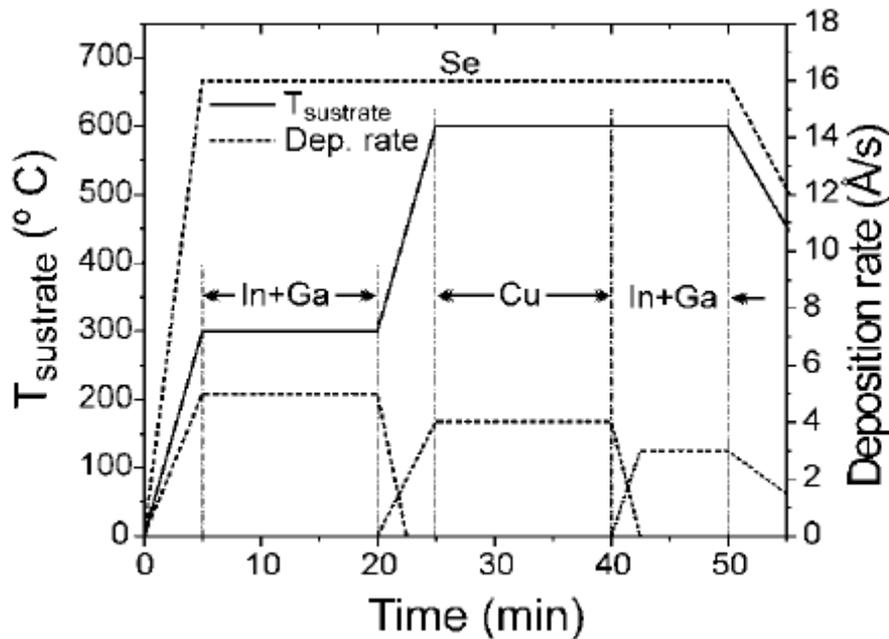


Figure I.7: Flux de métaux et profil de température de substrat utilisés dans un procédé en trois étapes de synthèse du CIGS par co-évaporation [39].

Une première étape implique le dépôt de $(\text{In,Ga})_2\text{Se}_3$ sur un substrat à 300-350°C. Une deuxième étape de dépôt de Cu et Se permet d'obtenir une couche riche en cuivre et d'initier la croissance de gros grains, alors que le procédé se termine par un dépôt riche en indium et gallium pour assurer les bonnes propriétés électroniques de la couche. Les dernières étapes sont effectuées avec une température de substrat de 550 à 600°C. Le refroidissement se fait sous vapeur de Se.

L'avantage de cette technique est de pouvoir ajuster facilement la composition, et d'obtenir des films de haute cristallinité avec peu d'impuretés. Mais le changement d'échelle pour obtenir de grands panneaux reste difficile, et la technique est coûteuse en énergie à cause du vide poussé (de l'ordre de 10^{-8} mbar). De plus, elle ne permet qu'une utilisation partielle des matériaux utilisés dans les creusets d'évaporation puisque le matériau se dépose aussi sur les parois de l'évaporateur.

L'entreprise Würth Solar développe des modules à partir de CIGS co-évaporé qui atteignent des rendements de 13% ($60 \times 120 \text{ cm}^2$ de superficie [40]). Ils sont partenaires avec le laboratoire ZSW qui développe des modules photovoltaïques de $10 \times 10 \text{ cm}^2$ de superficie avec 15% de rendement [41].

Conversion photovoltaïque et cellules solaires en couche mince à base de CIGS

I.4.3.b. Sélénisation-Sulfuration de précurseurs métalliques:

Le procédé est divisé en deux étapes : dépôt des précurseurs métalliques, à basse température (en général inférieure à 200°C), puis recuit réactif, avec sélénisation et/ou sulfuration pour former l'absorbeur CIGS. Composé d'étapes plus simples à mettre en œuvre, le procédé peut offrir une maîtrise à grande échelle pour un moindre coût, et moins de dépenses en énergie.

Les méthodes sont très variées pour obtenir la couche métallique, formée ou non de multicouches : les méthodes industrielles sont la pulvérisation cathodique [42, 43] ou l'évaporation sous vide [44], mais le dépôt de nanoparticules ou l'électrodépôt peuvent être utilisés et sont développés ultérieurement dans ce manuscrit. Cette première étape, impliquant dans la majorité des cas des couches élémentaires de précurseurs, peut permettre une meilleure homogénéité en composition et en épaisseur.

Enfin un recuit sous atmosphère à base de Se (H_2Se ou Se élémentaire, avec Ar) est effectué, utilisant typiquement des températures au-dessus de 400°C. H_2Se est le composé sélénisant le plus efficace [45] mais est hautement toxique. Puis une sulfuration de surface à plus haute température est en général réalisée. Des précisions sur cette technique seront apportées dans une partie plus développée sur le recuit des précurseurs métalliques.

Les meilleurs rendements de cellule solaire reportés dans la littérature sont de 16,5% [46]. L'entreprise Solar Frontier (anciennement Showa-Shell) a développé des modules de surface 30x30 cm² avec $\eta = 17,2\%$ de rendement photovoltaïque (pour une surface active de 808 cm²) ($V_{oc}/\text{cellule} = 0,693 \text{ V}$; $J_{sc} = 34,6 \text{ mA.cm}^{-2}$; $FF = 71,6\%$) en conditions standard d'éclairement [47].

La figure I.8 présente les différentes étapes du procédé développé par Avancis (anciennement Shell Solar): une pulvérisation cathodique des éléments Cu, In et Ga est effectuée suivie d'un recuit rapide (RTP : « Rapid Thermal Process ») a donné parmi les meilleurs modules par cette technique.

Conversion photovoltaïque et cellules solaires en couche mince à base de CIGS

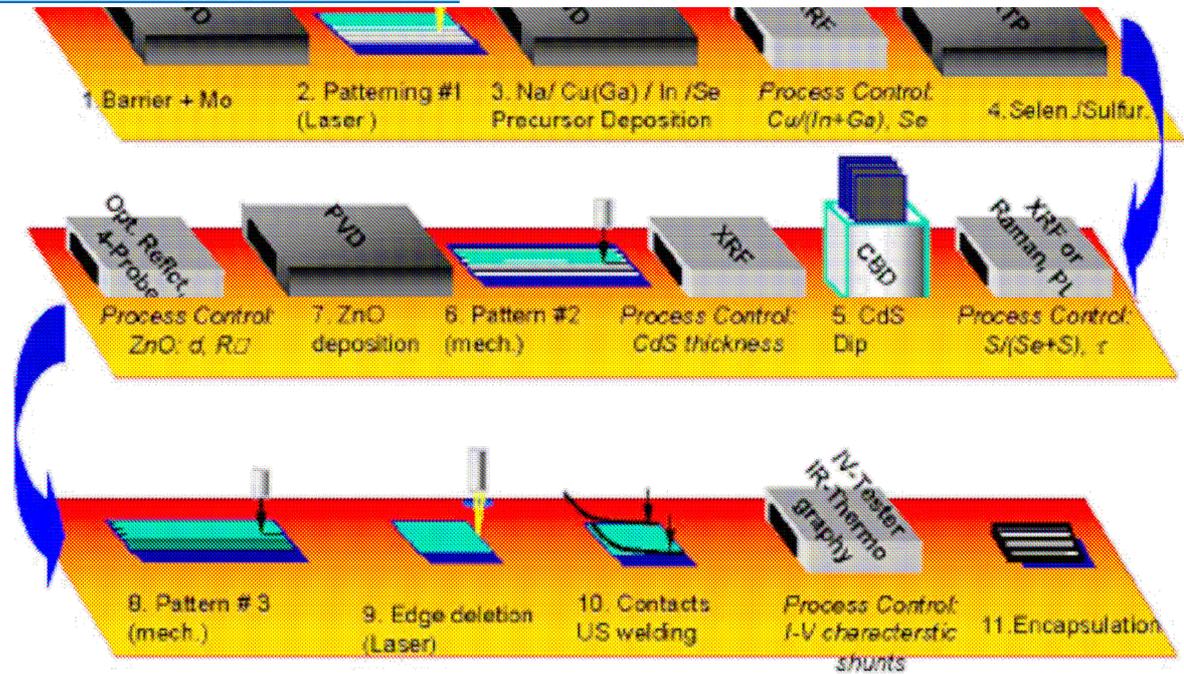


Figure I.8 : Schéma du procédé de synthèse des cellules CIGS Shell [43].

Les méthodes conventionnelles offrent les meilleurs rendements de cellule, avec des procédés nécessitant un vide poussé. Cependant ces procédés sont coûteux et l'utilisation des matériaux n'est pas optimale (dépôts sur les parois des chambres sous vide). C'est pourquoi le développement de procédés à pression atmosphérique, nécessitant moins d'appareillage, est intéressant.

Les méthodes à faible coût de synthèse du CIGS présentent les avantages suivants :

- Les procédés utilisent moins d'énergie, avec en général des précurseurs déposés à température ambiante et pression atmosphérique, puis un recuit rapide.
- Un dépôt peut être rapide et compatible avec un procédé « roll-to-roll » sur substrats flexibles.

Ces méthodes se basent essentiellement sur un dépôt de précurseur suivi d'un recuit sélénisant et/ou sulfurisant. Elles peuvent se diviser en trois types :

- les procédés qui utilisent des solutions de précurseurs moléculaires puis l'étalent par pulvérisation « spray » ou « spin coating » (dépôt à la tournette) ;
- les procédés à base de particules solides dispersées dans un solvant, pour former une encre qui peut être étalée sur le substrat ;
- les procédés électrochimiques.

Conversion photovoltaïque et cellules solaires en couche mince à base de CIGS

Le type- p permet l'échange des électrons et des trous jusqu'à atteindre l'état d'équilibre. Les électrons diffusent vers la région de type p , en laissant des niveaux donneurs peu profonds ionisés, et les trous diffusent vers la région de type n , en laissant derrière eux des niveaux accepteurs peu profonds ionisés. Au voisinage de l'interface $p-n$, les deux semi-conducteurs sont dépeuplés des porteurs libres et une région de charge d'espace (SCR) est établie. Cela est représenté dans la figure I.9 (a) pour une homo-jonction $p-n$ en prenant un dopage type- n et p de 10^{16}cm^{-3} . Le processus de diffusion s'arrête une fois le courant d'entraînement établi par le champ électrique, figure I.9 (b), équilibre exactement le courant de diffusion, et un niveau de Fermi horizontal est établi tout le long du dispositif. Il est classique de présenter les bords de la bande de conduction et de valence en termes de l'énergie électronique et par conséquent, du potentiel électrostatique $\phi = -E_c + (\text{constante})$ (figure (I. 9) [c] et [d]) [23].

La figure (I. 9) (d) illustre en outre le principe d'une cellule solaire à jonction $p-n$. la lumière incidente (par exemple, à partir de la gauche) génère des paires électron-trou additionnelles dans la cellule solaire. Si la génération se produit dans la région de charge d'espace (SCR), les deux types de porteurs de charges (électrons et trous) sont facilement balayés par le champ électrique vers l'extérieur de la région de charge d'espace (processus "Gen1" dans la figure (I. 9) [d]). Le trou atteint rapidement la région de type- p et l'électron la région de type- n ; une fois que les deux porteurs sont des porteurs majoritaires, ils peuvent alors traverser en toute sécurité la région quasiment-neutre (QNR) et être collectés aux contacts électriques extérieurs. En cas de génération à l'extérieur de la région de charge d'espace (SCR), soit dans le volume de la région n ou région p (illustré par "Gen2" dans la figure (I. 9) [d]), l'un des deux porteurs générés est considéré un porteur minoritaire (électrons dans la figure (I. 9) [d]) et doit traverser la SCR avant d'être recombiné ; le

succès de ce transport par diffusion dépend de la qualité du matériau et est de diffusion L [23].

Conversion photovoltaïque et cellules solaires en couche mince à base de CIGS

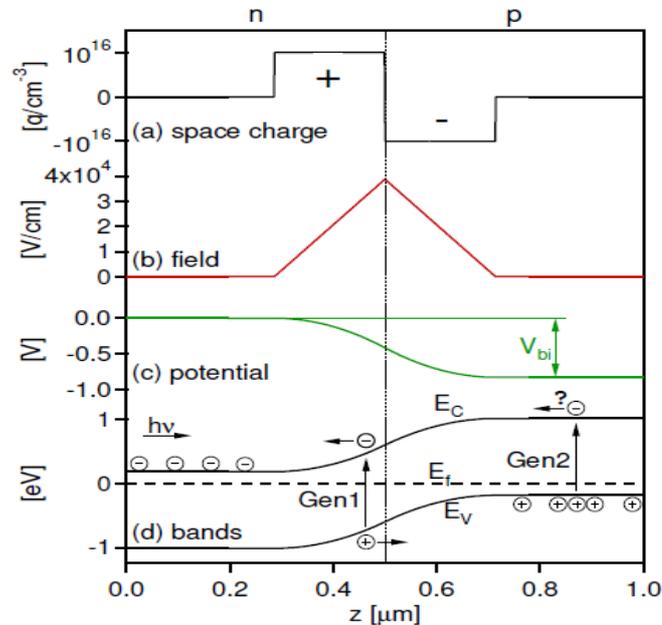


Figure I. 9 : Formation d'une jonction p - n dans l'approximation Schottky. (a) la distribution de la charge d'espace due aux dopants ionisés fixes, (b) le champ électrique obtenue par l'intégral de l'équation de Poisson, (c) un 2^{ème} intégral donne le potentiel électrostatique. La tension interne V_{bi} décrit la différence de potentiel entre le coté n et p de la jonction à l'équilibre. La collection des porteurs photo-générés nécessite que la tension appliquée $V < V_{bi}$ et, par conséquent, V_{bi} est une limite supérieure de la tension en circuit ouvert d'une cellule solaire; (d) le minimum de la bande de conduction E_c , et le maximum de la bande de valence E_v , et le niveau de Fermi à l'équilibre. On présente, schématiquement, la génération d'une paire électron-trou à l'intérieur (Gen1) et à l'extérieur (Gen2) de la SCR [23].

1.4.5 .Cellule solaire à hétérojonction :

La situation d'une cellule solaire p - n homo-jonction représentée sur la figure (I. 9) (d) est loin d'être idéale. La photo-génération des porteurs décroît exponentiellement avec la profondeur de pénétration et, par conséquent, en supposant que la lumière est incidente du côté de type- n de la cellule solaire, la plupart de la génération se produirait dans la région quasiment neutre type $-n$ (QNR) et non pas à l'intérieur de la RCS où une bonne collection serait assurée [23].

Il existe deux approches effectives pour s'améliorer de cette situation: **Conversion photovoltaïque et cellules solaires en couche mince à base de CIGS**

cellules solaires à base de silicium, ou (2) en utilisant un matériau de type- n ayant un gap d'énergie large. Ce dernier décale le profil de génération directement dans la jonction, puisque le gap d'énergie plus large empêche l'absorption dans la couche de type- n , et de telle configuration peut former une cellule solaire rentable. C'est le principe de la cellule solaire à hétérojonction tels que ZnO / CdS / CIGS, qui fera l'objectif de ce travail. CIGS est l'abréviation de Cu (In, Ga) Se₂. Les couches de type- n sont souvent désignées comme des couches «fenêtres», en raison de leur transparence prévue aux photons [23].

Le diagramme de bande de la cellule solaire ZnO / CdS / CIGS est illustré dans la figure I. 10. Les photons ayant une énergie $E_{ph} < 3.3$ eV vont passer à travers la couche fenêtre de ZnO. Certains photons ayant une énergie 2.4 eV $< E_{ph} < 3.3$ eV seront absorbés dans la couche tampon de CdS, qui est introduite dans ces dispositifs pour des raisons technologiques, mais la plupart des photons atteignent la couche CIGS et sont fortement absorbés dans la région de charge d'espace (SCR). Le CIGS, ainsi que le CdTe, sont des semiconducteurs à gap direct avec de très forte absorption, de telle sorte que la longueur d'absorption est très court, $\alpha^{-1} \ll 1$ μm . La mauvaise absorption de CdS est minimisée par l'amincissement de cette couche ou l'allier avec d'autres éléments afin d'augmenter son gap d'énergie [48].

Conversion photovoltaïque et cellules solaires en couche mince à base de CIGS

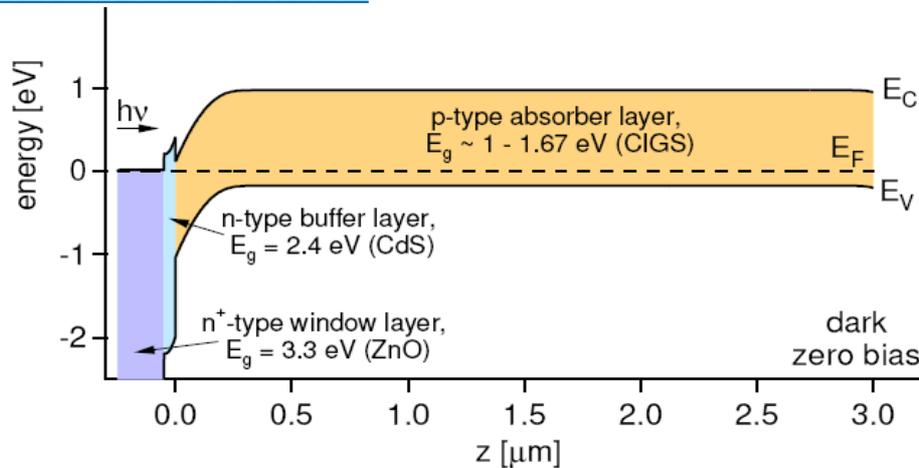


Figure I. 10 : Bande de conduction et de valence pour une cellule solaire à hétérojonction ; le cas de ZnO / CdS / CIGS [23].

I.4.6. Cellules solaires en couches minces:

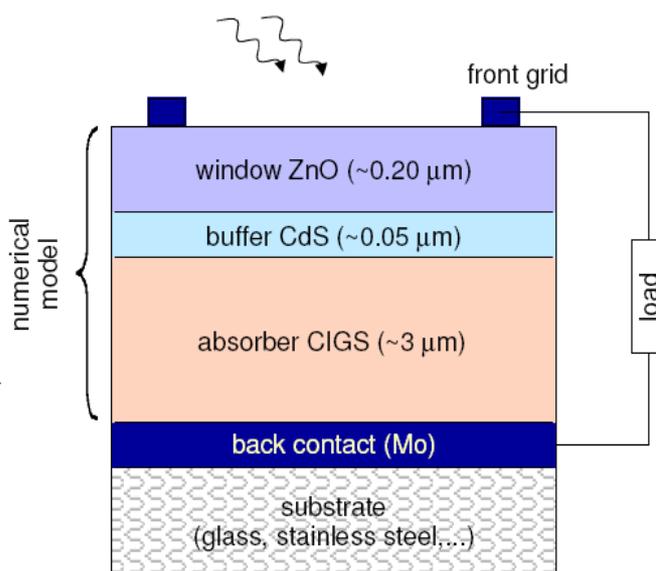
La lumière du soleil est incidente sur la terre (au niveau de la mer) avec une densité de puissance $\sim 1000 \text{ W/m}^2$ et, par conséquent, pour réaliser une ampoule standard de 100 W par l'énergie solaire, une surface d'environ 1 m^2 est nécessaire (même plus si l'ampoule fonctionne 24 heures ou les conditions météorologiques défavorables sont prises en compte). Pour une production considérable de l'énergie, des installations de cellules solaires à grande surface sont nécessaires. En comparaison avec la technologie de plaquette à base de Si, les cellules solaires en couches minces peuvent être déposées à faible coût sur des surfaces larges de verre de (soda-calcique) [49], d'acier inoxydable [50], ou même sur des substrats polyamide, ce qui rendrait ces cellules solaires vraiment légères [51, 52]. Un autre problème avec les cellules solaires traditionnelles à base de silicium est le temps de récupération de l'énergie nécessaire est à l'échelle de 2-3 ans et, par conséquent, 10% de la durée de vie d'un module solaire en silicium est perdu; les cellules solaires en couches minces sont moins exigeantes et ont la capacité d'atteindre des temps de récupération d'un an [53]. En raison de ces arguments, mais aussi en raison de nombreux autres facteurs, les cellules solaires en couches minces ont la

possibilité d'être considérablement moins couteuses dans la production à « échelle supère-grande» des cellules solaires en couches minces conduirait à des prix de l'électricité solaire qui concurrencent les sources d'énergie conventionnelles [54].

1.4.7. Cellules solaires typiques Cu (In, Ga) Se₂:

Malgré leur nature poly-cristalline, les cellules solaires en couches minces à base des composés chalcopyrite de Cu (In, Ga) Se₂ (CIGS) atteignent des rendements de conversion photovoltaïques étonnamment élevés approchant 20% [55-56]. Outre que la présence des joints de grains (grain boundaries GBs), les films minces de CIGS sont capables d'atteindre un rendement élevé considérablement différent des monocristaux, en particulier des semi-conducteurs élémentaires tel que le silicium, ils sont toujours non stœchiométrique (faible en Cu) [55, 57], souvent non uniforme dans la composition Ga / (Ga + In) à travers l'épaisseur du film [55], peuvent former des défauts complexes qui sont bénignes à la performance du dispositif [58], et dans la plupart des cas, ils nécessitent la présence de sodium au cours de la croissance ou de sodium introduit par des traitements de post-déposition [59]. Une structure du dispositif typique [49, 57] est illustrée dans la figure (I- 11). Les cellules solaires de CIGS sont presque toujours conçues dans une configuration de substrat commençant du verre de soda-calcique, un acier inoxydable, ou un matériau polyamide. Le contact arrière est typiquement le Mo pulvérisé et forme un contact non-bloquant avec le CIGS. Contrairement aux cellules solaires à base de CdTe par exemple, où le contact arrière forme une barrière Schottky et obstacle majeur à la commercialisation de

en raison du stabilité [60].



problème de

Figure I. 11: Schéma d'une cellule solaire (grille / ZnO / CdS / CIGS / Mo / verre). Seulement les couches semi-conductrices sont reproduites dans les modèles numériques. Les contacts métalliques supérieurs et inférieurs sont définis par leur travail de sortie et les vitesses de recombinaison surfaciques. Une charge externe est connectée entre l'électrode négative (la grille) et l'électrode positive (le Mo) [23].

Le matériau CIGS absorbeur ayant des épaisseurs typiques de 2-3 μm est déposé par une grande variété de processus qui peuvent être grossièrement classés [49, 58] en deux processus ; la co-évaporation sous vide et la sélénisation à deux étapes. Nous avons déjà expliqué ces deux méthodes dans la section I.4.3.

La couche tampon de CdS et la couche fenêtre de ZnO sont typiquement déposées au dessus de la couche absorbante CIGS par une déposition à bain chimique et une pulvérisation-RF, respectivement. La couche tampon, tel que le CdS, bien que n'étant pas nécessaire dans le concept d'une cellule solaire à hétérojonction, s'est avérée bénéfique aux performances du dispositif. Le CdS est un matériau présentant un bon compromis entre largeur de bande interdite (2.4 eV), qui doit être grande pour limiter l'absorption, et bon alignement de bande, permettant la meilleure collecte des porteurs. Une couche de quelques nanomètres de CdS, réalisée par dépôt en bain chimique (CBD ou « chemical bath deposition »), permet une couverture complète de la surface rugueuse de CIGS, la protégeant ainsi pour les étapes suivantes de pulvérisation cathodique, qui, sans couche tampon de CdS, endommagent le CIGS [61]. Néanmoins, le cadmium est toxique, c'est pourquoi son

placement fait l'objet de nombreuses recherches [62]. Les matériaux Zn(S,O,OH) [63, 64] et **Conversion photovoltaïque et cellules solaires en couche mince à base de CIGS**

Les couches de ZnO sont souvent réalisées dans une configuration bicouche contenant une couche intrinsèque et une couche dopée avec de l'aluminium (Al).

Une section d'une cellule solaire ZnO / CdS / CIGS prise en photo par un microscope électronique à balayage (MEB) est représentée dans la figure (I. 12).

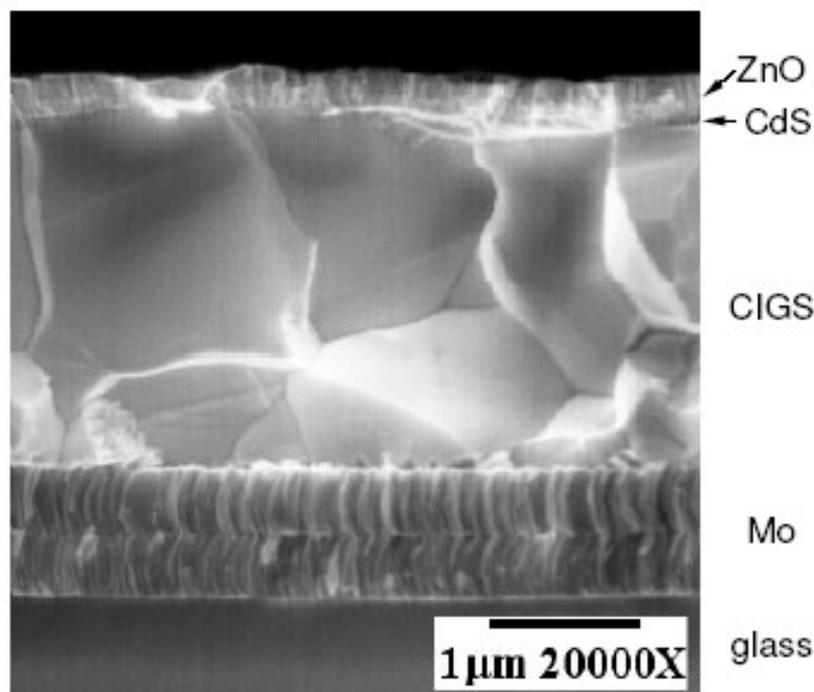


Figure I. 12 : Image par MEB d'une section de cellule solaire de CIGS à une amplification 20000x. Dans un matériau de haute qualité, des grains s'étendent à travers l'épaisseur du film. Image courtoisie de K. Ramanathan, NREL [23].

Cette image a été prise sur un échantillon fabriqué au National Renewable Energy Laboratory (NREL) et qui a atteint un rendement de conversion de 19.3% [66]. De bas en haut nous avons : le verre de soda-calcique, une double couche de Mo, la couche de CIGS d'environ 2 μm , la couche de CdS 50 nm (difficilement discernable dans la figure (I.12)), et une double couche de ZnO intrinsèque et dopé. Remarquablement, les tailles des grains sont comparables

à l'épaisseur du film, conduisant à une structure colonnaire du film. Dans la **Conversion photovoltaïque et cellules solaires en couche mince à base de CIGS**

localisée, le matériau apparaît presque libre de défauts macroscopiques, à l'exception des joints de grains colonnaires. Au début de la croissance, à l'interface Mo / CIGS, certains joints de grains supplémentaires se développent durant la cristallisation.

I.4.8. Méthode de caractérisation électrique :

Dans la gamme large des méthodes de caractérisation disponibles pour les cellules solaires en couches minces, la mesure des courbes de la densité de courant vs. voltage ($J-V$) est d'une grande importance, puisqu'elle détermine le rendement auquel la cellule solaire convertit la puissance du soleil en électricité. Cependant, autre que la caractéristique fondamentale du rendement de conversion, une courbe $J-V$ porte peu d'informations concernant le dispositif présent. Une extension d'une mesure régulière de la courbe $J-V$ est la mesure de la réponse du courant dépendant de la longueur d'onde, typiquement effectuée en polarisation zéro. Cela est référé à ce qu'on appelle le "rendement quantique" (QE) qui, après une normalisation appropriée, représente la fraction des photons de longueur d'onde λ qui sont convertis en paires électron-trou et collectées en tant que courant. Les mesures de QE sous la lumière ou la polarisation électrique, peuvent également être trompeuses et l'analyse prudente est nécessaire [67, 68].

Les simulations numériques des cellules solaires ont l'avantage de bien contrôler les propriétés du dispositif et du matériau comme elles sont les paramètres à introduire du modèle, et, par conséquent, l'évaluation des tendances et des changements quantifiés dans les mesures de $J-V$ ou QE sont possibles. Bien que quelques outils du logiciel permettent aussi la simulation des techniques liées à la mesure de capacité [69, 70], ces méthodes de caractérisation ne seront pas abordées dans ce travail.

I.4.8.a : Densité de courant vs. voltage :

La mesure standard de $J-V$ est réalisée à température ambiante et sous l'illumination standard « one-sun » [71]. Expérimentalement, il est nécessaire de refroidir la cellule solaire durant l'illumination, sinon la lumière intense va augmenter la température de la cellule. Pour les détails du

montage utilisé dans the Photovoltaic Laboratory at Colorado State University voir Refs. [72] et [73] **Conversion photovoltaïque et cellules solaires en couche mince à base de CIGS**

utilisés pour appliquer une tension de polarisation, et deux contacts supplémentaires sont utilisés pour déterminer le courant de la cellule résultant.

Un exemple d'une courbe $J-V$ est représenté sur la figure (I.13) (a) et à partir d'une telle courbe, les paramètres de performance essentiels peuvent être extraits comme il est indiqué dans le tableau (I.1).

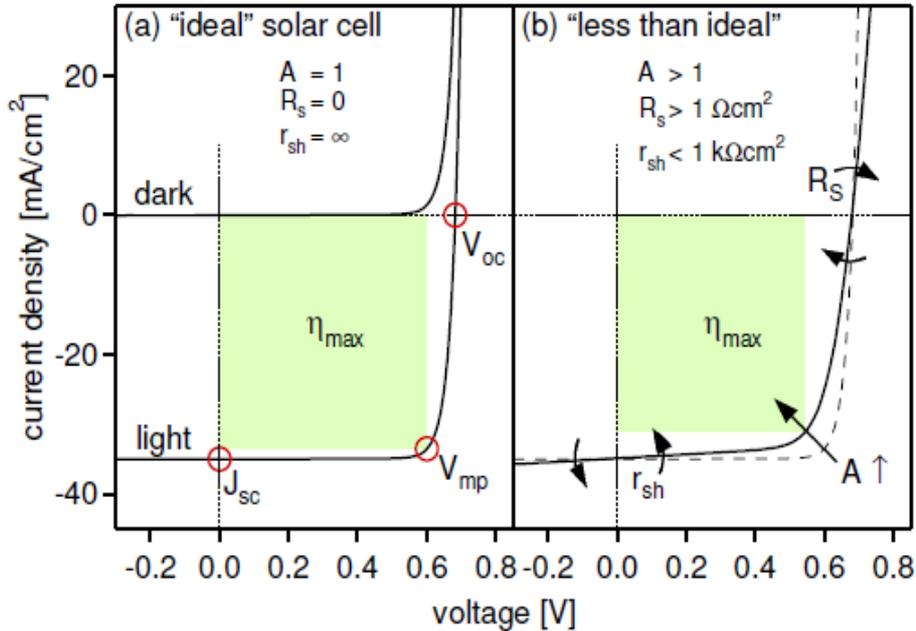


Figure I.13: (a) Courbes $J-V$ à l’obscurité et sous illumination pour une cellule solaire idéale, les paramètres de $J-V$ standard qui décrivent sa performance sont indiqués. (b) le comportement non idéal comprend des résistances parasites et un facteur de qualité de la diode supérieur à 1 [23].

<i>Paramètre</i>	<i>Symbole</i>	<i>Unité</i>	<i>déterminé par</i>
Tension en circuit ouvert	V_{co}	V	$J = 0$
La densité de courant de court-circuit	J_{cc}	mA/cm^2	$V = 0$
La tension maximale	V_{max}	V	V à $(J \square V)_{max}$
Le courant maximal	J_{max}	mA/cm^2	J à $(J \square V)_{max}$
Facteur de remplissage	FF	%	$(J \square V)_{max} / (V_{co} J_{cc})$
Efficacité	η	%	$(J \square V)_{max} / P_{incident}$

Tableau I.1: Paramètres de performance essentiels extraits d'après la courbe **Conversion photovoltaïque et cellules solaires en couche mince à base de CIGS**

En supposant que la courbe suit un comportement exponentiel, il existe une redondance dans ces paramètres et seulement trois paramètres (par exemple, V_{co} , J_{cc} , et η) sont nécessaires pour spécifier tous les paramètres. Idéalement, une courbe J - V de la cellule solaire est égale à celle d'une diode à jonction p - n décalée par le courant photo-généré (J_L), $J_L \approx J_{cc}$:

$$J(V) = J_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{KT}\right) - 1 \right] - J_L \quad (I.13)$$

Cependant, l'application de cette équation aux cellules solaires en couches minces exige que les pertes parasites soient incluses [74]:

$$J(V) = J_0 \left[\exp\left(\frac{q(V - R_s J)}{AKT}\right) - 1 \right] + \frac{V - R_s J}{r_{sh}} - J_L$$

(I.14)

La résistance en série R_s , la résistance de shunt ou en parallèle r_{sh} , et le facteur de qualité de la diode A décrivent ces non-idéalités. L'effet de chacun de ces paramètres sur la courbe J - V est indiqué dans la figure (I.14) (b). Dans les cellules solaires de CIGS avec un rendement de record [56], les effets de R_s et r_{sh} sont négligeables et le meilleur facteur de qualité de la diode est autour de 1.3. Les valeurs typiques de ces paramètres sont $R_s \approx 1 \Omega\text{cm}^2$, $r_{sh} > 500 \Omega\text{cm}^2$, et $A \approx 1.5$.

Le facteur de remplissage FF est lié à la puissance maximale (P_{max}) fournie par la cellule par:

$$FF = \frac{V_{oc} J_{sc}^{max}}{J_{cc} V_{co}} \quad (I.15)$$

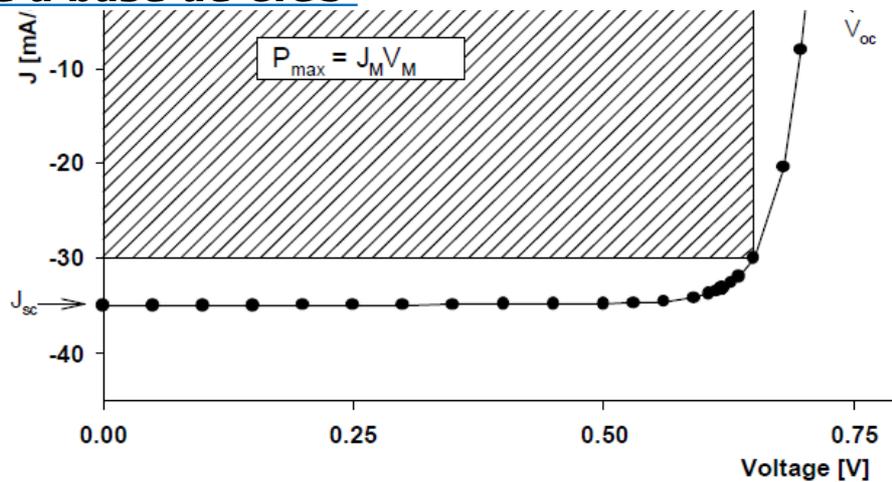


Figure I.14: Puissance électrique maximale (P_{\max}) fournie par la cellule solaire d'après la courbe J - V sous illumination [75].

I.4.8.b. Rendement quantique :

La mesure de la réponse du courant à la tension de polarisation zéro et la normalisation de ce courant par la densité de flux de la lumière incidente permet de calculer le rendement quantique [23]:

$$QE(\lambda) = \frac{J_{ph}(\lambda)}{q\phi(\lambda)} = \frac{\text{nombre des paires (electron-trou) collectées}}{\text{nombre des photons incidents}}$$

(I.16)

Le faisceau optique de la densité de flux total $\hat{\phi}$ (unités de [nombre / cm²s]) est monochromatique, mais son pic à une longueur d'onde varie dans la gamme spectrale selon l'application de la cellule solaire [23].

Conversion photovoltaïque et cellules solaires en couche mince à base de CIGS

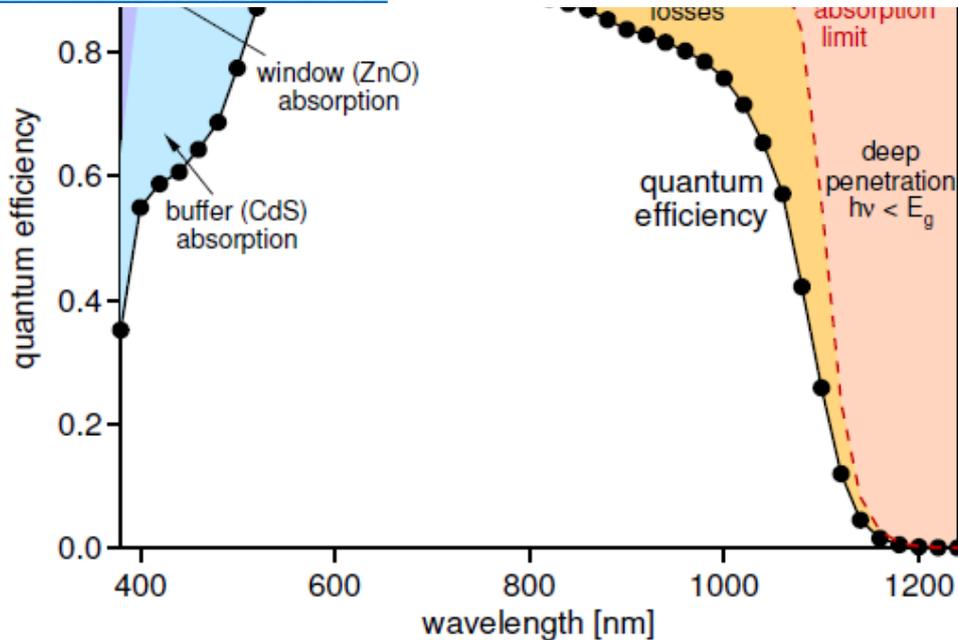


Figure I.15: Exemple d'une courbe du rendement quantique avec l'inclusion des mécanismes de perte [23].

Expérimentalement, l'intensité du faisceau lumineux varie aussi car il balaie toutes les longueurs d'onde ; dans les simulations numériques, typiquement une valeur de $\Phi = 10^{15} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ est utilisé.

Un exemple d'une courbe du rendement quantique QE avec l'inclusion des mécanismes de perte est illustré dans la figure. (I.15).

- Les pertes par "réflexion" sont introduites par un revêtement partiel de la surface frontale par des contacts non-transparents (c. doigts de contact métalliques) ou par réflexion aux interfaces du matériau. Expérimentalement, ces pertes sont minimisées par l'application d'un revêtement anti-réfléctif [23].
- L'absorption de la couche "Fenêtre" dans la région de courte longueur d'onde est négligeable en raison du gap d'énergie large du matériau de la fenêtre. L'absorption d'électrons libres dans la couche de ZnO peut diminuer le rendement quantique dans la région des longueurs d'onde

élevées, mais cet effet est typiquement faible et négligé dans les **Conversion photovoltaïque et cellules solaires en couche mince à base de CIGS**

- L'absorption dans la couche mince représente l'une des principales pertes dans les cellules solaires actuelles en couche mince de CIGS et CdTe. L'amincissement de la couche CdS ou la remplacer par un matériau à gap d'énergie plus large sont des alternatives possibles.
- Les pertes "de recombinaison" sont introduites par des rendements de collection des porteurs photo-générés moins - que - l'idéal. Plus la longueur d'onde est longue, plus la photo-génération des porteurs est profonde, et plus la probabilité de recombinaison est élevée.
- La « pénétration profonde » des porteurs. Ces pertes sont inhérentes à chaque semi-conducteur comme la lumière avec des photons d'énergie $h\nu < E_g$ n'est pas absorbé.

La courbe de QE illustrée dans la figure. (I-15) est similaire aux courbes de QE observés dans les cellules solaires de CIGS de bon rendement [72].

Le transport dans la cellule solaire en CIGS

Dans ce chapitre, nous présentons les modèles physiques appropriés pour décrire les phénomènes de transport, d'absorption, de génération et de recombinaison, se produisant dans un milieu semi-conducteur. Ces modèles constituent les éléments de base dans la conception de la simulation numérique, particulièrement dans les applications des cellules solaires.

II.2. Equations de transport:

L'ensemble des équations phénoménologiques décrivant le processus de transport dans un dispositif à base de semi-conducteur contient [76, 77,78], généralement, l'équation de Poisson (équation (II.1)), les équations de continuité des électrons et des trous libres (équations (II.2)-(II.3)), et les équations des densités de courants des électrons et des trous (équation (II.4)-(II.5)). En absence d'un champ magnétique et d'un gradient de température le long du dispositif, les équations s'écrivent comme suit:

$$\Delta\psi = -\frac{\rho}{\epsilon_r\epsilon_0} \quad (II.1)$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \text{div } J_n - U_n + G \quad (II.2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q} \text{div } J_p - U_p + G \quad (II.3)$$

$$J_n = -qn\mu_n \text{ grad } \psi + qD_n \text{ grad } n \quad (II.4)$$

$$J_p = -qp\mu_p \text{ grad } \psi - qD_p \text{ grad } p \quad (II.5)$$

Dans ces équations, t est le temps (s), $\epsilon_r\epsilon_0$ la permittivité du semi-conducteur (

F cm^{-1}), ψ est le potentiel électrique (V). ρ la densité de charge d'espace (

est le taux de génération optique ($\text{cm}^{-3}\text{s}^{-1}$). U_n et U_p sont les taux nets de recombinaison des électrons et des trous ($\text{cm}^{-3}\text{s}^{-1}$) respectivement. n et p les densités des électrons et des trous libres (cm^{-3}). μ_n et μ_p sont les mobilités des électrons et des trous ($\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$). D_n et D_p sont les coefficients de diffusion des électrons et des trous (cm^2s^{-1}). $\frac{\partial n}{\partial t}$ et $\frac{\partial p}{\partial t}$ sont les taux de variation des densités des électrons et des trous libres avec le temps ($\text{cm}^{-3}\text{s}^{-1}$).

Pour le cas stationnaire, en considérant la cellule comme un dispositif unidimensionnel, ces équations s'écrivent comme suit [76,77]:

$$\frac{d^2\psi(x)}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon_r \epsilon_0} \tag{II.6.a}$$

$$\frac{1}{q} \frac{dJ_n(x)}{dx} - U_R(x) + G(x) = 0 \tag{II.6.b}$$

$$-\frac{1}{q} \frac{dJ_p(x)}{dx} - U_R(x) + G(x) = 0 \tag{II.6.c}$$

avec

$$\rho(x) = q(p(x) - n(x) + p_t(x) - n_t(x) + N_{AD}(x)) \tag{II.7.a}$$

(II.7.b)

$$J_p(x) = -q\mu_p p(x) \frac{d\psi(x)}{dx} - k_B T \mu_p \frac{dp(x)}{dx}$$

(II.7.c)

$$J_T = \frac{1}{d} \int_0^d (J_n(x) + J_p(x)) dx$$

(II.7.d)

Ici, les coefficients de diffusion $D_{n,p}$ sont exprimés en fonction de $\mu_{n,p}$ selon la

$$D_{n,p} = \frac{k_B T}{q} \mu_{n,p}$$

relation d'Einstein. J_T est la densité du courant total (A cm^{-2}).

Dans l'équation (II.7.a), $n_t(x)$ et $p_t(x)$ sont les densités de charges (cm^{-3}) négatives et positives dans les états des défauts :

$$N_{AD}(x)$$

est la densité du dopage le long de la cellule. Pour une cellule à jonction n - p abrupte :

$$N_{AD}(x) = \begin{cases} +Nd \text{ au r é g i o n } n \\ -Na \text{ au r é g i o n } p \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

$$G(x)$$

En cas d'illumination, le taux de génération optique, $G(x)$, dans les équation (II.6.b)-(II.6.c), est donné par la loi exponentielle décroissante depuis la région de photo-génération.

Dans l'état stationnaire, le taux de recombinaison total des électrons à égale à

celui des trous. On peut définir le taux de recombinaison total $U_R(x)$; tel que

Les équations de transport, définies par les équations (II.6)-(II.7), sont des équations couplées formant un système non linéaire. Ce système ne peut être résolu analytiquement mais par des méthodes numériques avec l'approche typique : (1) discrétisation (maillage) du dispositif, (2) discrétisation des équations (II.6)-(II.7), (3) application des conditions aux limites (contacts), et (4) résolution de l'équation matricielle résultante par itération. Lors de la

résolution, le potentiel ψ , les densités n et p des électrons et des trous libres sont utilisées comme étant les variables principales (primaires) à déterminer.

Les autres quantités telles que ; le champ électrique ξ , les densités de courant

J_n et J_p

et , sont les variables dérivées ou secondaires calculées d'après la dérivation des variables principales. Les densités de charges dans les états des défauts et le taux de recombinaison dépendent aussi des densités des électrons et trous libres.

II.3. Absorption- Génération optique des paires électron-trou :

II.3.1. Absorption optique :

Le phénomène d'absorption qui se produit dépend de l'énergie (fréquence) de la lumière (photon) incidente. L'énergie minimale nécessaire au photon incident pour provoquer la transition électronique dépend de la largeur du gap d'énergie E_g du matériau constituant la cellule [79], les photons de faibles énergies, ($h\nu < E_g$), passent à travers le semi-conducteur, n'apportant alors aucune contribution à la conversion photovoltaïque. Le coefficient d'absorption est négligeable et la radiation lumineuse traverse le matériau avec une atténuation quasiment nulle. Si, les photons sont de grandes énergies ($h\nu \geq E_g$), l'absorption augmente. En outre, l'énergie au-dessus de E_g n'augmente pas

L'énergie des photons correspondant à une radiation donnée est reliée à sa longueur d'onde par la relation [13] :

$$E_{ph} = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (II-13)$$

ν : fréquence de la radiation , λ : longueur d'onde de la radiation en μm , c : vitesse de la lumière, E_{ph} : Energie du photon en eV et h : constante de Planck.

Une radiation lumineuse rencontrant un semi-conducteur est absorbée suivant la loi de Bougner-Lambert [13] :

$$I(x) = I_0 (1-R) \exp(-\alpha x) \quad (II-14)$$

$I(x)$: intensité du flux au point x , I_0 : intensité du flux incident sur une surface, $\alpha(\lambda)$: coefficient d'absorption, traduit la probabilité d'absorption d'un photon par unité de longueur. Il change selon le matériau, R : coefficient de réflexion représente la part de l'énergie lumineuse incidente I , réfléchiée à la surface du matériau et x : profondeur d'absorption du faisceau dans le matériau à partir de la surface du semi-conducteur.

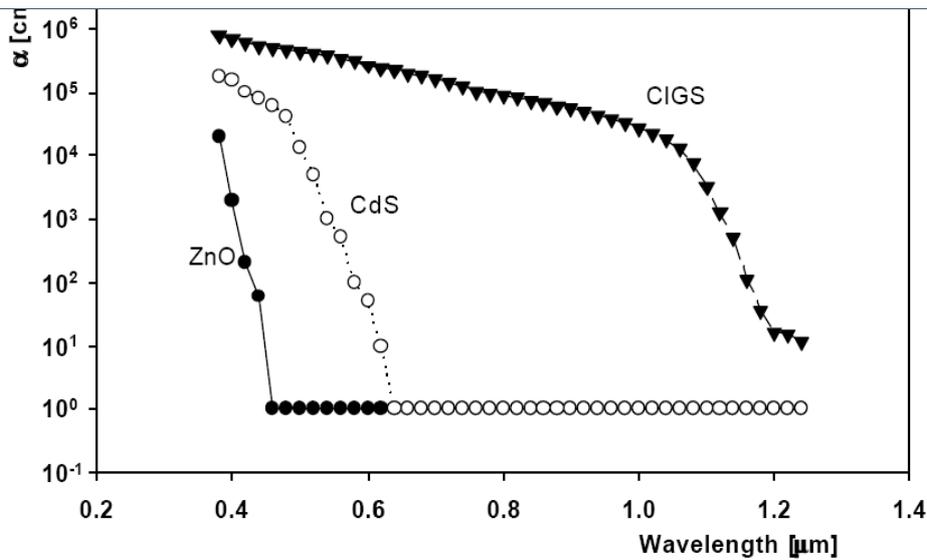


Figure II-1 : Spectre d'absorption de ZnO,CdS,CIGS [75]

Quand les photons incidents ont une énergie suffisante pour provoquer le transfert des électrons de la bande de valence vers la bande de conduction, des paires électron-trou peuvent se créer. Ce phénomène, appelé mode d'absorption intrinsèque ou fondamentale, prédomine dans les cellules solaires [13].

II.3.2. Génération optique des porteurs :

La génération des porteurs est un processus pour reconstituer l'équilibre d'un semi-conducteur qui a été perturbé [80]. Dans un semi-conducteur homogène, l'intensité de radiation incidente diminue dans le matériau en vertu d'une loi exponentielle avec la profondeur x . On définit la densité de flux $\phi(x)$ à la profondeur x de la surface x_0 [23] :

$$\phi(x) = \phi(x_0) \cdot \exp(-\alpha_m(x-x_0)) \quad (\text{II-15})$$

$\phi(x_0)$: la densité du flux de photons à la surface x_0 (photons/cm²s). $\alpha_m(\lambda)$: le coefficient d'absorption et m un indice reflétant le matériau ou la région (ZnO, CdS ou CIGS) dont le coefficient d'absorption est α_m .

Le taux de génération $G(x)$ est [23] :

Chapitr **Le transport dans la cellule solaire en CIGS**

$$G(x) = \frac{-d\Phi}{dx} = \alpha_m \phi(x_0) \exp(-\alpha_m(x - x_0))$$

(II-16)

Cette équation s'applique dans toutes les régions de la cellule en considérant les $\Phi(x_0)$ et x_0 donnés dans le tableau (II-1). La réflexion arrière implique qu'une fraction de la lumière qui atteint le contact arrière, $R_B < 1$, inverse sa direction de propagation au niveau du contact arrière et devient incidente sur le dispositif "depuis l'arrière." Si l'épaisseur de la couche absorbante CIGS est W_{CIGS} , l'intensité de la lumière réfléchie est [23].

$$\phi_{\text{reflected}} = R_B \cdot \phi(W_{CIGS}) \tag{II-17}$$

L'équation (II-16) décrit la génération due à une source de lumière monochromatique. Dans la pratique, la lumière incidente à tout un spectre et la simulation suppose une illumination standard "one-sun", également désignée par "AM1.5" [81]. Le taux de génération totale est la somme de tous les taux de génération fonction de λ . La figure : II-2 (a) illustre la génération aux longueurs d'onde longues et courtes de la lumière, ainsi que le taux de génération total due à l'illumination (AM1.5 ou one-sun). La lumière aux longueurs d'onde courtes ($\lambda = 0.56 \mu\text{m}$) est fortement absorbée et, par conséquent, il n'ya pas de génération significative au-delà de la profondeur $0.5 \mu\text{m}$. La lumière aux longueurs d'onde longues ($\lambda = 1.06 \mu\text{m}$), qui a un coefficient d'absorption α significativement plus petit, montre une absorption plus profonde dans le dispositif, et une certaine fraction non négligeable peut être réfléchie depuis la surface arrière (voir figure: II-2 (a)). Cela devient de plus en plus intéressant lorsque les dispositifs sont plus minces afin de réduire les temps de développement et usage des matériaux. La génération intégrée (figure II-2 (b)), montre que 95% de lumière du soleil est absorbée dans les premiers micromètres du matériau CIGS [23].

Région	Φ	x
ZnO	$\Phi_0(1 - R_F)$	$-0.25 \mu\text{m}$
CdS	$\Phi_0(1 - R_F) \cdot \exp(-\alpha_{ZnO} \cdot 0.2 \mu\text{m})$	$-0.05 \mu\text{m}$
CIGS	$\Phi_0(1 - R_F) \cdot \exp(-\alpha_{ZnO} \cdot 0.2 \mu\text{m}) \cdot \exp(-\alpha_{CdS} \cdot 0.05 \mu\text{m})$	$0 \mu\text{m}$

Tableau II-1 : Paramètres décrivant la photo-génération dans une cellule solaire ZnO/CdS/CIGS en supposant que la position de la surface du contact frontal est à $x = -0.25 \mu\text{m}$, l'interface ZnO/CdS est à $x = -0.05 \mu\text{m}$, et l'interface CdS/CIGS est à $x = 0$ [23].

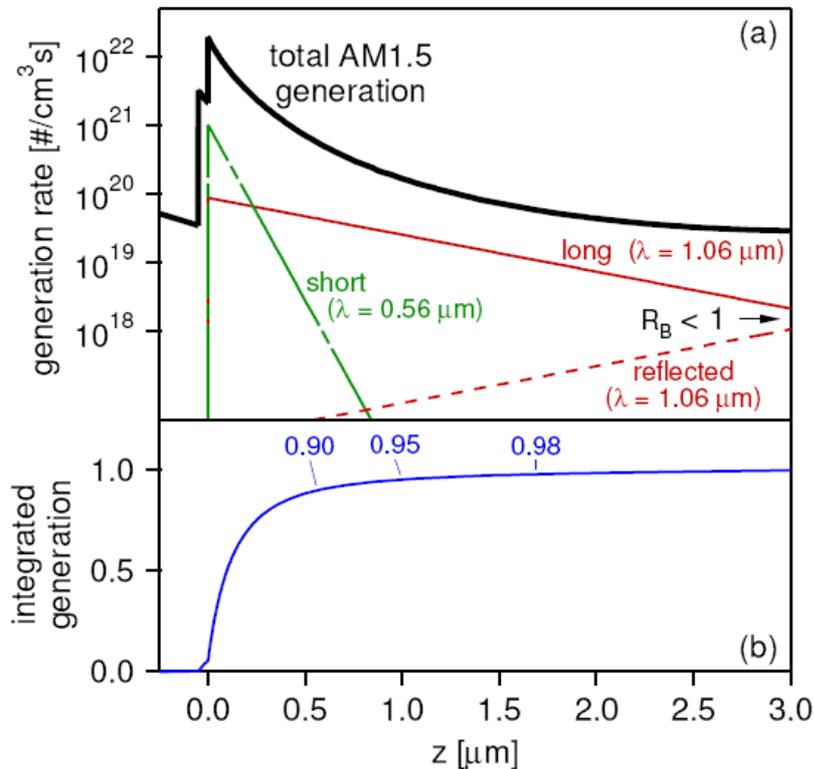


Figure II-2: (a) Taux de génération total calculé dans la cellule solaire ZnO/CdS/CIGS. Les longueurs d'onde courtes éprouvent une forte absorption. Pour les énergies des photons proches du gap d'énergie du CIGS, le taux de génération est plus faible et plus uniforme dans le dispositif. Seulement la lumière faiblement absorbée éprouve une réflexion arrière. (b) Le taux de génération intégré et normalisé [23].

II.4. Recombinaison :

Quand un semi-conducteur est ramené hors d'équilibre, par une illumination instantanée ou par une polarisation électrique, les concentrations des électrons et des trous libres tendent à relaxer vers leurs valeurs de l'équilibre par un processus appelé **recombinaison** dans lequel un électron de la bande de conduction tombe dans la bande de valence en éliminant un trou. Il existe plusieurs types de recombinaison. La recombinaison à travers les pièges dans le gap interdit, la recombinaison **radiative** directe (bande de conduction-bande

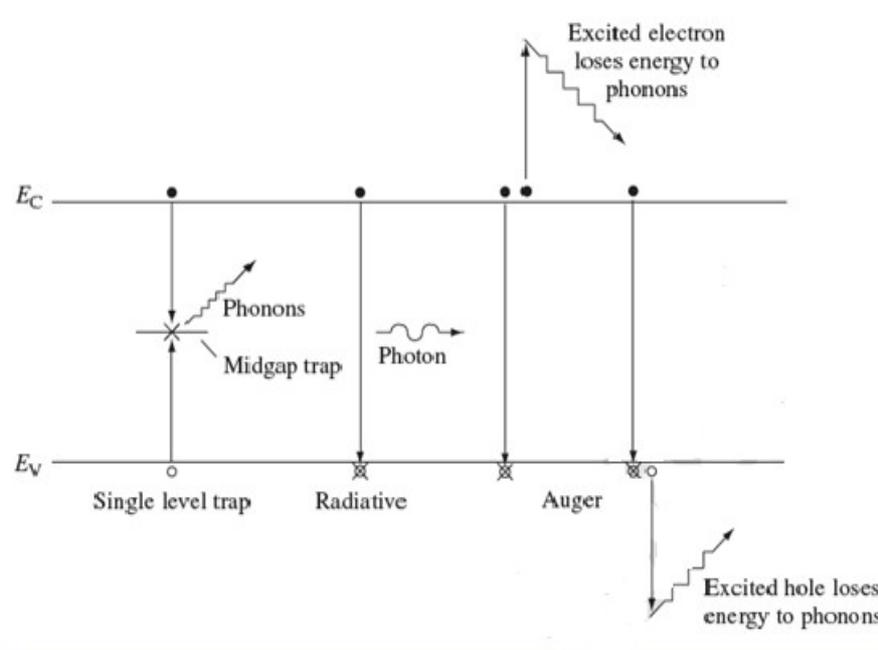


Figure II-3 : Les processus des recombinaisons dans un semi-conducteur [82].

Le taux de recombinaison net à travers un piège $E = E_T$ dans le gap d'énergie, appelé également la recombinaison Shockley -Read -Hall est donnée par [83]:

$$R_{srh} = \frac{n + n_i e^{\frac{E_T - E_i}{kT}}}{\tau_{srh,p} + \tau_{srh,n} \frac{p + n_i e^{\frac{E_i - E_T}{kT}}}{n}}$$
(II-19)

Ou la durée de vie des porteurs est donnée par [83]:

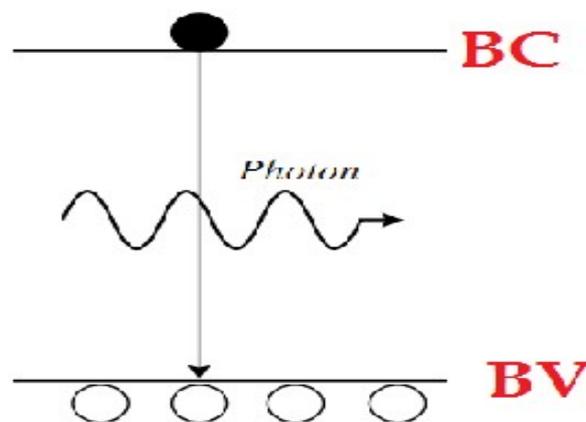
Ou σ est la section efficace de capture, ϑ_{th} est la vitesse thermique des porteurs libres, et N_T la densité des pièges.

La probabilité des pièges augmente quand la concentration des pièges augmente, par conséquent la durée de vie des porteurs libres est inversement proportionnelle à la concentration des pièges [83].

Quelques simplifications raisonnables permettent de simplifier l'équation (II-19). Si le matériau est de type $-p$, $p \approx p_0 \gg n$ et si le niveau d'énergie du piège est près du milieu du gap, le taux de recombinaison peut s'écrire [83]:

$$R_{srh} = \frac{n-n_0}{\tau_{srh}} \quad (\text{II-21})$$

La recombinaison radiative bande vers bande est simplement l'inverse du processus de génération optique. Il est plus important dans les semi-conducteurs à gap direct. Quand la recombinaison directe se produit l'énergie de l'électron recombiné se transforme en un photon, c'est le principe de fonctionnement des diodes lasers et des diodes électroluminescentes (LED). Dans les semi conducteurs à gap indirect une partie de l'énergie de recombinaison peut être sous forme de phonons.



Le taux net de recombinaison radiative est donné par [83]:

$$R_d = B(n \cdot p - n_i^2) \quad (\text{II-22})$$

Si nous avons un semi-conducteur de type n ($n \approx n_0 \gg p$), le taux de recombinaison radiative peut s'écrire en terme de la durée de vie effective $\tau_{d,p}$ [83]:

$$R_d = \frac{p - p_0}{\tau_{d,p}} \quad (\text{II-23})$$

Ou [83]:

$$\tau_{d,p} = \frac{1}{B \cdot n_0} \quad (\text{II-24})$$

Une expression similaire peut être déduite pour un semi-conducteur de type p.

La recombinaison Auger un peu à la recombinaison directe sauf que l'énergie de l'électron recombinaison est transmise à un autre électron dans la bande de conduction (ou à un trou de la bande de valence). L'électron va occuper un niveau d'énergie plus haut dans la bande de conduction ensuite il se désexcite vers le minimum de la bande de conduction en émettant un phonon (voir la figure (II-3) ou la figure (II-5)).

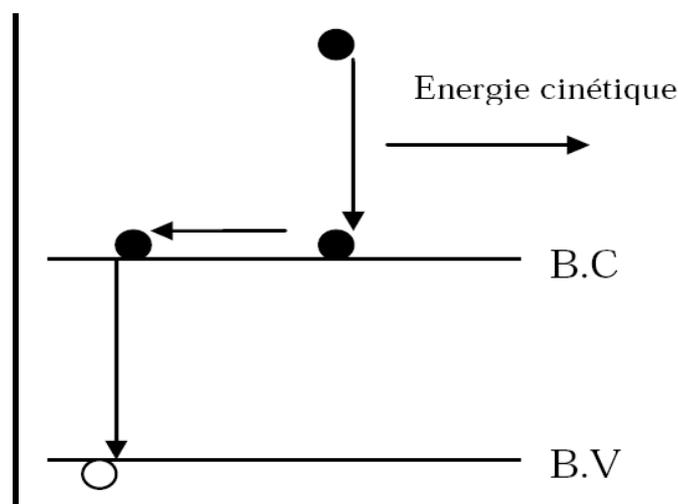


Figure II.5 : Schéma descriptif du processus de recombinaison de type Auger [20].

Le taux net de la recombinaison Auger est donné par [83]:

Chapitr ***Le transport dans la cellule solaire en CIGS***

$$R_{Auger} = (\Delta_n n + \Delta_p p) (n.p - n_i^2) \quad (II-25)$$

Dans un semiconducteur de type n , le taux de recombainaison Auger peut etre simplifié à[20] :

$$R_{Auger} = \frac{p - p_0}{\tau_{Auger, p}} \quad (II-$$

avec :

$$\tau_{Auger, p} = \frac{1}{\Delta_n n_0^2} \quad (II-27)$$

Une expression similaire peut etre déduite pour la durée de vie des électrons minoritaire dans un matériau de type p .

Ces processus de recombinaison peuvent se dérouler en même temps, par conséquent le taux de recombinaison total est donné par[84]:

$$R = \sum_i R_{srh,i} + R_d + R_{Auger} \quad (II-28)$$

Une durée de vie effective de porteurs minoritaires est donnée par [84]:

$$\frac{1}{\tau} = \sum_i \frac{1}{\tau_{srh,i}} + \frac{1}{\tau_d} + \frac{1}{\tau_{Auger}} \quad (II-29)$$

Les états de surface sont différentes du volume à cause de la fin abrupte du réseau cristallin. Ceci est le cas d'un contact semiconducteur –métal ou le contact entre deux semiconducteurs différents [83].

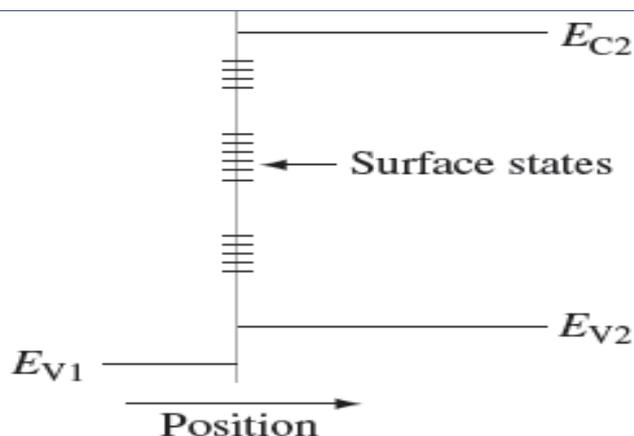


Figure II-6 : Illustration des états de surface dans une surface semi-conductrice ou une interface entre deux matériaux différents tels que deux semi-conducteurs différents (hétérojonction) ou un métal et un semi-conducteur (contact Schottky) [82].

Les pièges des surfaces donnent un taux de recombinaison par unité de surface et par unité de temps qui est exprimé par la relation suivante pour un semiconducteur de type- n [83]:

$$R_s = S_p (p - p_0) \quad (\text{II-30})$$

et par la relation suivante pour un semiconducteur de type- p [83]:

$$R_s = S_n (n - n_0) \quad (\text{II-31})$$

S_n , S_p sont, respectivement, les vitesses de recombinaison surfacique des électrons et des trous.

Dans la figure II-7, sont présentées les différentes recombinaisons pouvant se produire dans une cellule solaire ZnO/CdS/CIGS. La recombinaison dans le volume du CIGS est indiquée par (A), à la surface arrière de l'absorbeur CIGS est indiquée par (A'). La recombinaison dans la région de charge d'espace (SCR) est indiquée par (B), et la recombinaison à l'interface couche tampon (CdS)/absorbeur (CIGS) est indiquée par (C) [85].

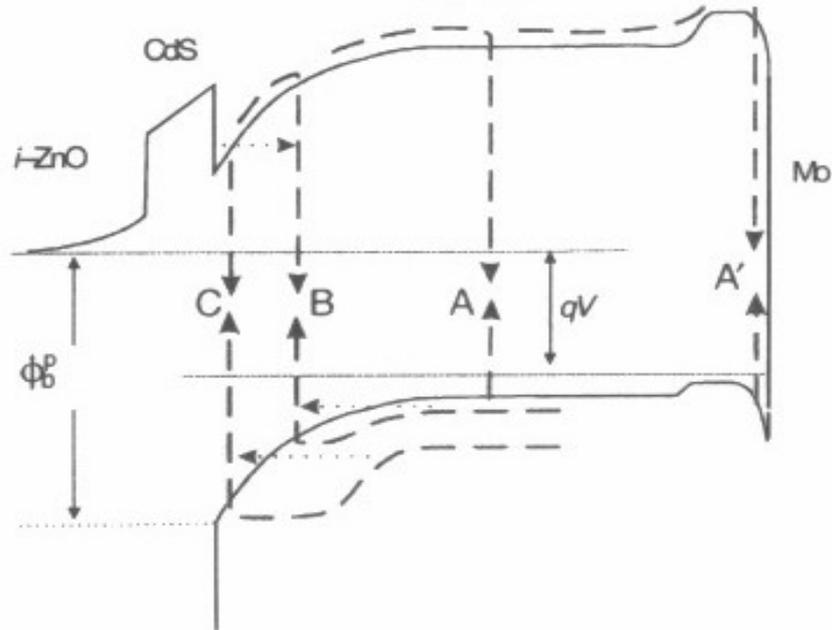


Figure II-7: Présentation des différentes recombinaisons se produisant dans une cellule solaire ZnO/CdS/CIGS. La recombinaison dans le volume du CIGS est indiquée par (A), à la surface arrière de l'absorbeur CIGS est indiquée par (A'). La recombinaison dans la région de charge d'espace (SCR) est indiquée par (B), et la recombinaison à l'interface couche tampon (CdS)/absorbeur (CIGS) est indiquée par (C) [85].

Logiciel de modélisation AMPS-1D

III.1. Introduction :

Logiciel de modélisation AMPS 1-D

L'étude théorique de la cellule solaire est réalisée généralement par deux approches :

III.1.a. Approche analytique :

Ici nous considérons des simplifications et des approximations permettant de résoudre les équations de transport qui décrivent le comportement de la cellule analytiquement.

III.1.b. Approche numérique :

Renoncer à toutes les simplifications et les hypothèses conduisant à la solution analytique nécessite des approches numériques pour résoudre les équations de transport.

Dans ce chapitre nous définissons le logiciel **AMPS-1D** et les étapes de son utilisation qui permettent de calculer numériquement les caractéristiques électriques de la cellule solaire à hétérojonction (CdS/CIGS) (cadmium-sulfide/cuivre-indium-gallium-sélénium) :

- La caractéristique densité de courant - tension ($J-V$).
- La caractéristique rendement quantique - longueur d'onde ($QE - \lambda$).

Ainsi que la densité de courant de court circuit (J_{cc}), la tension de circuit ouvert (V_{co}), le facteur de remplissage (FF), et le rendement de conversion photovoltaïque (η).

III.2. Généralités sur le programme :

III.2.1. Définition du logiciel :

AMPS-1D est une abréviation de la phrase anglaise : **A**nalysis of **M**icroelectronic and **P**hotonic **S**tructures-**O**ne **D**imensional (analyse unidimensionnelle des structures micro-électroniques et photoniques) [86]. Il a été conçu pour être un outil informatique très général et polyvalent pour la

conception, la simulation et l'analyse physique unidimensionnelle des dispositifs **Logiciel de modélisation AMPS 1-D** les et les dispositifs photovoltaïques [86].

III.2.2. Bref historique :

AMPS a été développé par le professeur *Stephen Fonash* et un certain nombre de chercheurs et post-doctorants à l'institut « Electric Power Research Institute (EPRI) » de l'université de Pennsylvanie. Le projet **AMPS-1D** a été initié et développé pour le système d'exploitation UNIX. Quelques années plus tard, il y avait une demande d'AMPS-1D sur PC. Par conséquent, une version PC a été développée pour le système d'exploitation OS / 2.

A l'origine, les versions PC étaient avec des interfaces textuelles UNIX et OS / 2. Avec la popularité croissante de Windows 95, 98 et NT, la version **AMPS-1D** pour Windows 95/98/NT a été développée et c'est cette version qui va être utilisée dans ce travail [86].

III.2.3. L'objectif d'AMPS :

Il permet de définir les propriétés du matériau (par exemple : la largeur de sa bande interdite (gap d'énergie), l'affinité, le dopage, les mobilités ;... etc.), et la conception du dispositif ; structure contrôlant l'ensemble de la physique du dispositif et sa réponse à la lumière, à la tension appliquée et à la température [86].

L'utilisation d'**AMPS** permet d'obtenir la réponse du dispositif à une situation donnée, par exemple à la polarisation par la lumière, par la tension électrique ou le changement de la température. Et l'exploration des changements que subissent les paramètres internes du dispositif tels que le diagramme de bande, la composante du courant, le taux de recombinaison et le champ électrique en fonction de la position, de l'intensité lumineuse, de la tension électrique et de la température. [86].

III.2.4. Capacités d'AMPS :

Générer les caractéristiques ($I-V$) sous illumination et sans éclairage.

Logiciel de modélisation AMPS 1-D

Générer le rendement quantique (quantum efficiency) (QE) pour des cellules solaires et des photodiodes sous tension de polarisation et lumière.

Traiter avec des dispositifs composés d'un matériau monocristallin, polycristallin, amorphe, ou toute une combinaison de ceux-ci [86].

III.3. Description du cas de base:

Trois types de paramètres sont nécessaires avant le lancement de la simulation par **AMPS** :

- A) Les conditions environnementales.
- B) Les propriétés du matériau de chaque couche.
- C) Les paramètres de modélisation: le type du modèle, l'espacement de la grille pour les calculs numériques, les tensions de polarisation pour lesquelles la sortie ($J-V$) et (QE) doit être générée [75].

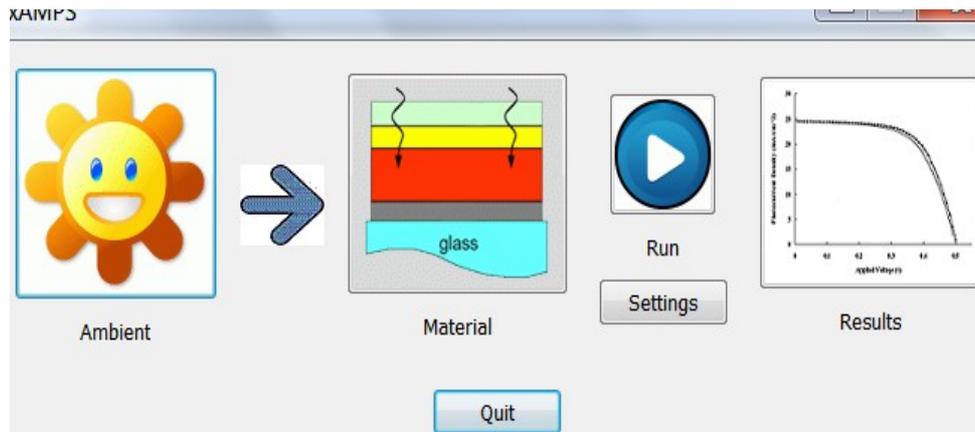


Figure III-1 : L'interface d'AMPS

A) Conditions environnementales :

Nous contrôlons la température à 300 °K (température ambiante). Si on augmente ou on diminue la température nous entrons le facteur de température dans la simulation.

Si on simule en présence de la lumière on coche dans la case correspondante.

Si on définit l'éclairage au spectre FullAM1.5.spe : ici l'angle 41.8° correspond à la position **Logiciel de modélisation AMPS 1-D**;

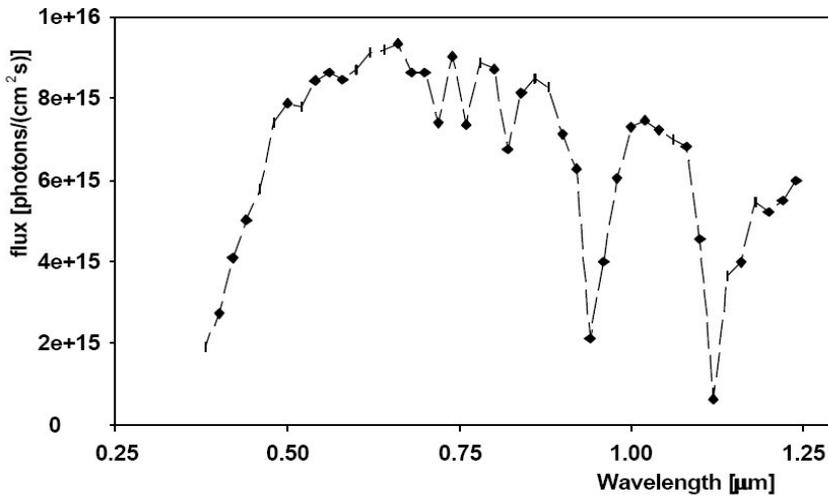


Figure III-2: Spectre d'illumination AM1.5 [75].

$I_{dis}(\lambda_i)$ est donnée par [75]:

$$I_{dis}(\lambda_i) = \int_{\lambda_i - 0.01 \mu m}^{\lambda_i + 0.01 \mu m} I_{AM1.5}(\lambda) d\lambda \quad (3-1)$$

Avec $I_{dis}(\lambda_i)$ le spectre discret. λ la longueur d'onde (μm). $I_{AM1.5}(\lambda)$ le flux des photons (nombre des photons par unité de surface de temps et de longueur d'onde [(photons/ (cm²·s)/ μm)).

Si on coche dans la case de QE , le calcul comprendra aussi le calcul du rendement quantique $QE(\lambda)$:

$$QE(\lambda) = \frac{I_{ph}(\lambda)}{q\Phi(\lambda)}$$

(3-2)

Définir la polarisation appliquée par la case « **Bias voltages** », en cliquant sur « **load** » on choisit la tension voulue, par exemple le choix (Light0_0.4_1.vol) (figure III-3) signifie une gamme de tension de 0 volt à 1 volt avec un pas de 0.4 volt.

Enfin, nous appuyons sur le bouton « **ok** ».

Logiciel de modélisation AMPS 1-D

La figure III-3 présente l'interface des conditions environnementales :

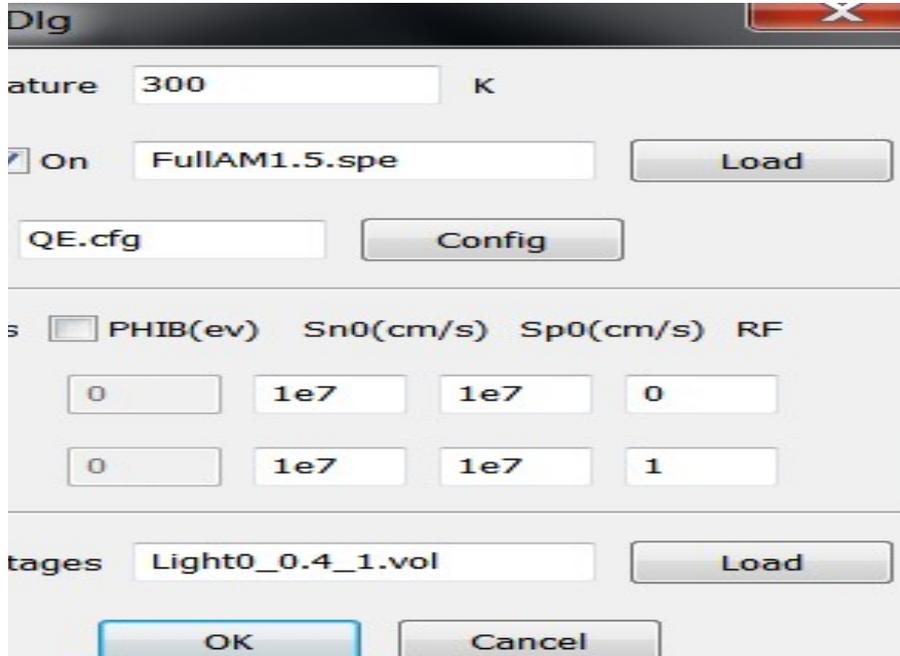


Figure III-3 : L'interface des conditions environnementales

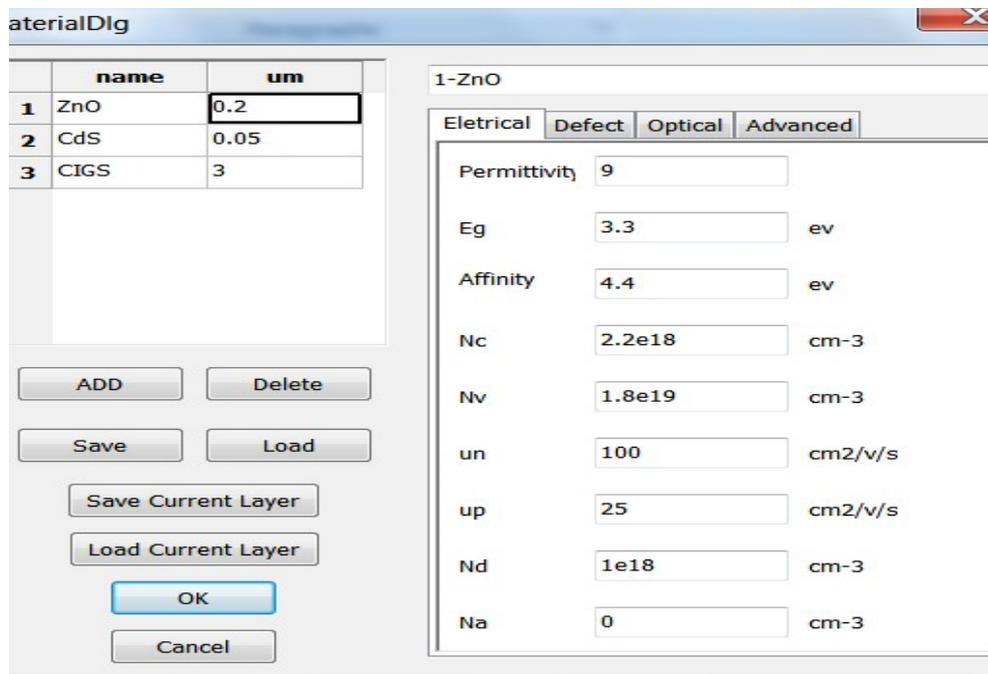
Observations :

Propriétés générales de la structure

		Surface avant (x = 0µm)	Surface arrière (x = 3.1µm)
$\phi_{b0/L} = E_C - E_F$		0 eV	0 eV
Vitesse de recombinaison surfacique des électrons	de	10^7 cm/s	10^7 cm/s
Vitesse de recombinaison		10^7 cm/s	10^7 cm/s

Tableau III-1 : Propriétés générales de la structure [75].**B) Propriétés du matériau de chaque couche:**

En cliquant sur (load) (figure III-4) on peut choisir la structure à simuler, par exemple : (CIGS_M.G.dev) présente une cellule solaire à hétérojonction (ZnO/CdS/CIGS) constituée de trois couches : ZnO d'épaisseur $0.2 \mu\text{m}$, CdS d'épaisseur $0.05 \mu\text{m}$ et CIGS d'épaisseur $3 \mu\text{m}$. En cliquant sur la case de ZnO on peut apprendre ses caractéristiques (figures III-4, III-5).

**Figure III-4** : L'interface des propriétés électriques de la couche ZnO

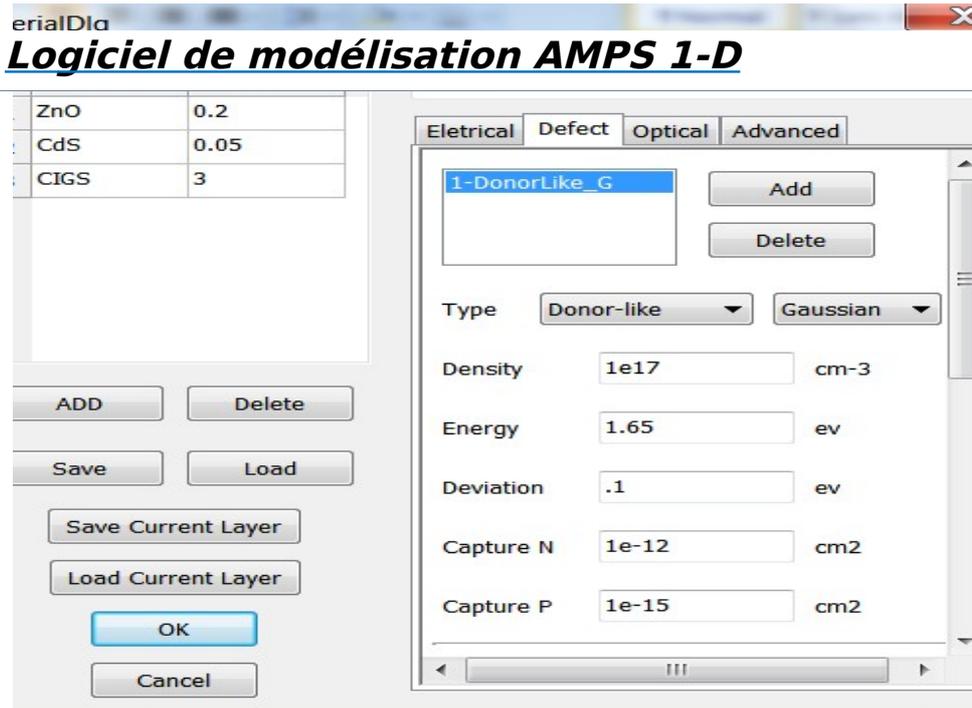


Figure III-5 : L'interface des défauts de la couche ZnO

De même pour les couches (CdS) et (CIGS) (figures III-6, III-7, III-8, III-9).

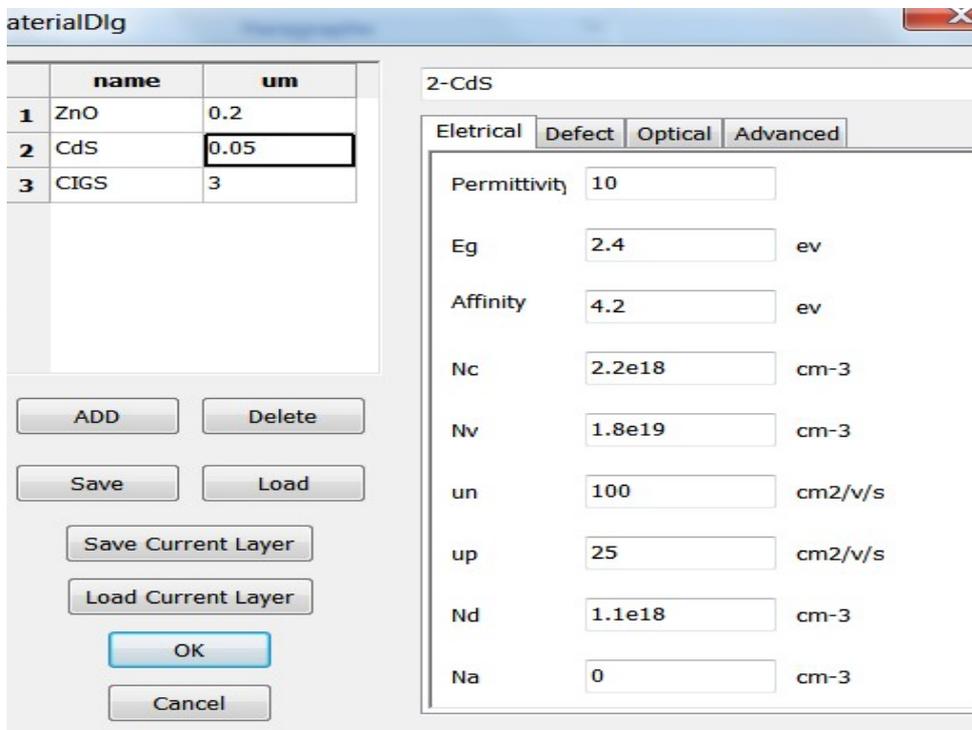


Figure III-6 : L'interface des propriétés électriques de la couche CdS.

Logiciel de modélisation AMPS 1-D

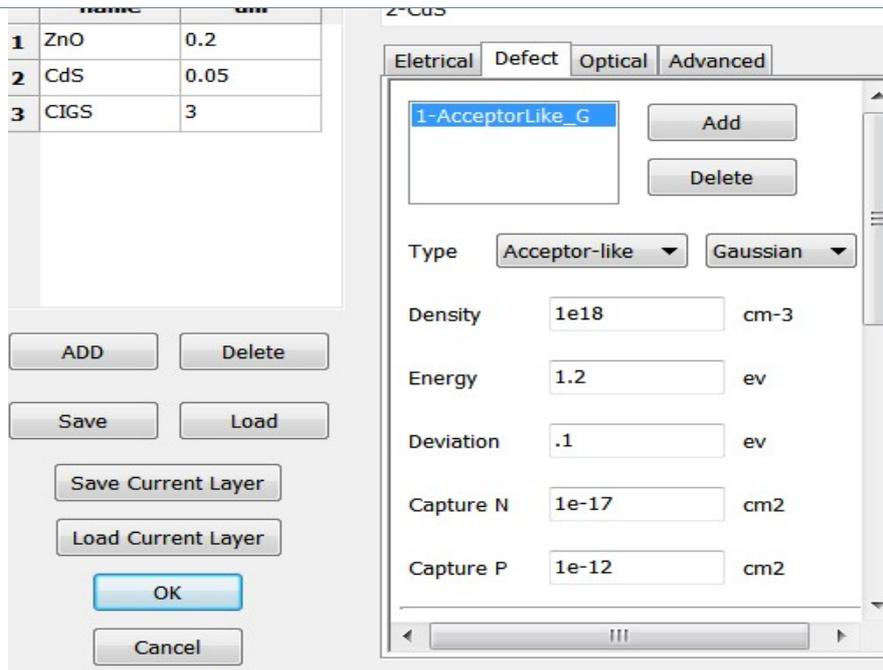


Figure III-7 :L'interface des défauts de la couche CdS.

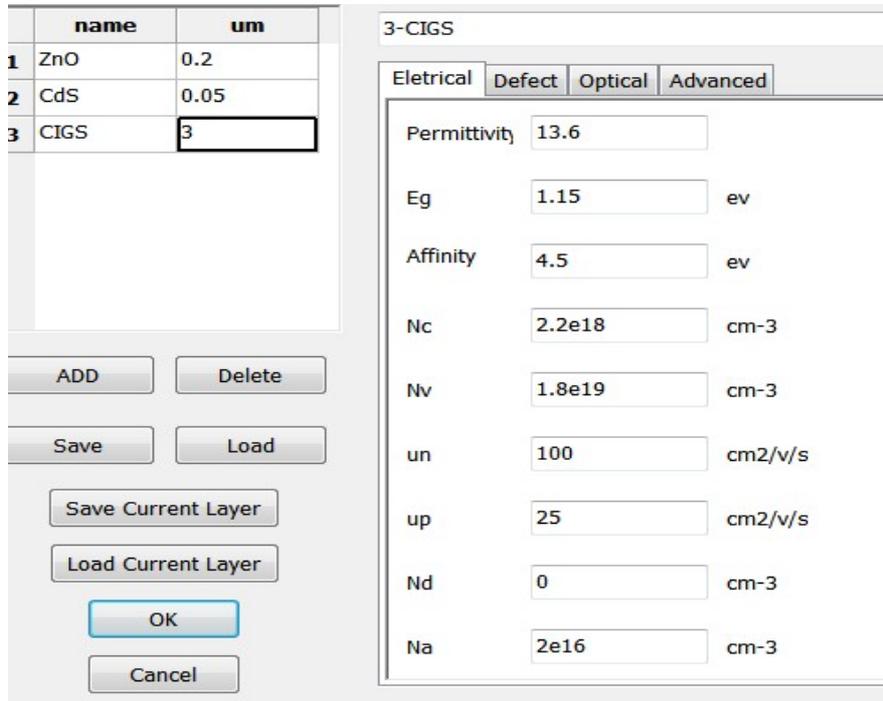


Figure III-8 : L'interface des propriétés électriques de la couche CIGS.

Logiciel de modélisation AMPS 1-D

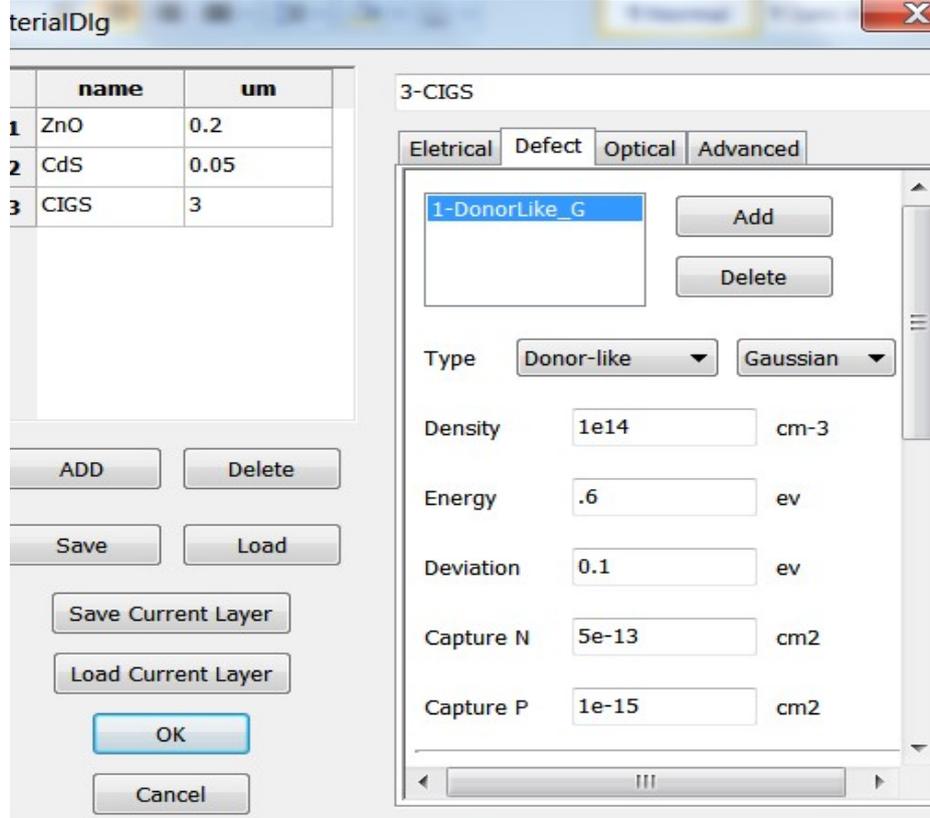
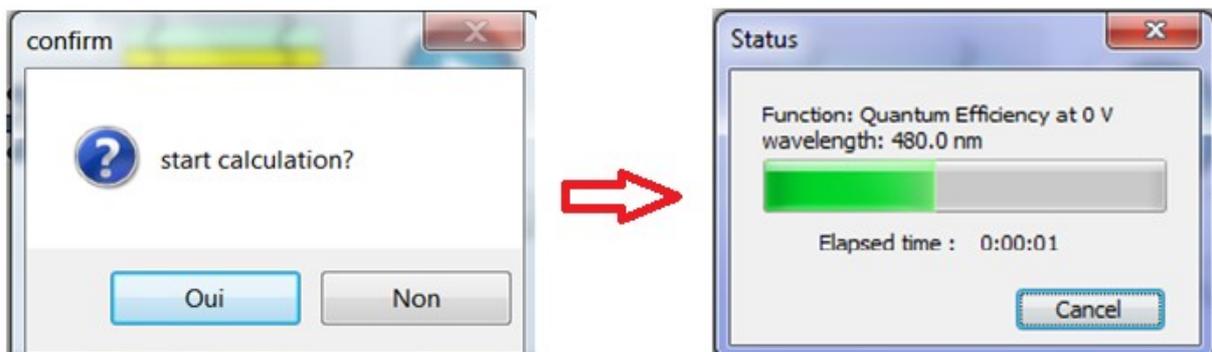


Figure III-9 : L'interface des défauts de la couche CIGS.

Enfin nous appuyons sur le bouton « ok ».

C) Les paramètres de modélisation:

Pour la simulation, nous cochons sur la case « **oui** » et ainsi le logiciel commence l'exécution de l'exemple (CIGS_M.G.dev) correspondant à la structure à hétérojonction (CdS/CIGS) (figure III-10).



**Figure III-10 : L'interface de l'exécution
Logiciel de modélisation AMPS 1-D**

Une fois le calcul est terminés, les résultats sont stockée et présentés par des courbes comme il est illustré sur la figure III-11. Connaître les résultats de la simulation de l'image suivante :

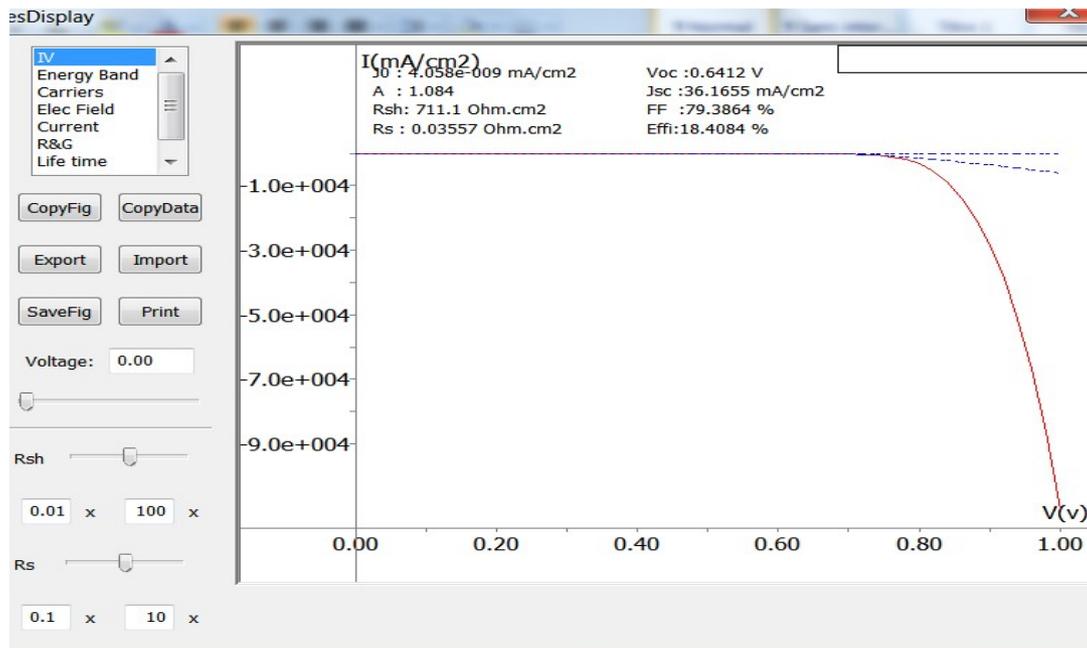


Figure III-11 : L'interface des résultats.

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

On peut sauvegarder tous les résultats comme des fichiers de données (fichier.c **Logiciel de modélisation AMPS 1-D**) logiciel des graphes comme Origine.

Résultats et discussions

Résultats et discussions

**IV.1. Introduction ·
Résultats et discussions**

Nous présentons dans ce chapitre les résultats de l'étude des caractéristiques électriques d'une cellule solaire (n-p) à hétérojonction CdS/CIGS (cadmium sulfide/ cuivre- indium - gallium- sélénium) en utilisant comme outil de simulation numérique le logiciel **AMPS-1D**. Les caractéristiques de la cellule telles que:

- La caractéristique densité de courant - tension ($J-V$).
- La caractéristique rendement quantique -longueur d'onde ($QE-\lambda$).

Ainsi que la densité de courant de court circuit (J_{cc}), la tension de circuit ouvert (V_{co}), le facteur de remplissage (FF), et le rendement de conversion photovoltaïque (η) sont étudiées et analysées sous la variations des grandeurs des paramètres : épaisseur de la couche (n) et (p) , densité des défauts et dopage dans les deux régions de la cellule.

IV.2. Structure de la cellule étudiée :

La cellule solaire étudiée dans ce travail est une hétérojonction (n-p) contenant les couches suivantes (figure IV.1) :

- La couche (1) → ZnO un oxyde conducteur transparent.
 - La couche (2) → CdS de type n.
 - La couche (3) → CIGS de type p.
- →

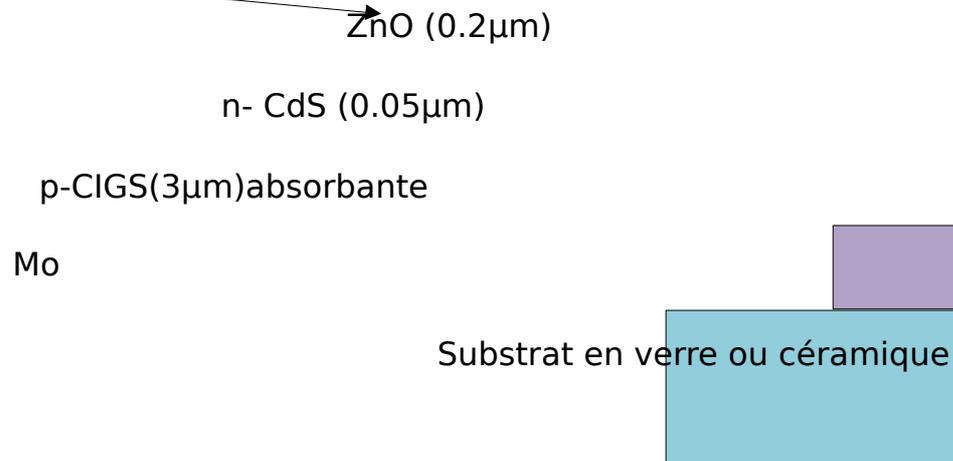
Résultats et discussions

Figure IV.1 : Structure de la cellule solaire à hétérojonction (ZnO/CdS/CIGS)

La cellule étudiée est éclairée par le spectre AM1.5

Les propriétés de la couche ZnO sont présentées dans le tableau IV.1, les propriétés de la couche CdS et CIGS sont présentées respectivement dans les tableaux IV.2 et IV.3

Permittivité	9	
E_g	3.3	eV
Affinité	4.4	eV
N_c	2.2×10^{18}	cm^{-3}
N_v	1.8×10^{19}	cm^{-3}
μ_n	100	cm^2/V /s
μ_p	25	cm^2/V /s
N_d	1×10^{18}	cm^{-3}
N_a	0	cm^{-3}
Densité de défauts	1×10^{17}	cm^{-3}

Tableau IV.1 : Les propriétés de la couche ZnO
Résultats et discussions

Permittivité	10	
E_g	2.4	eV
Affinité	4.2	eV
N_c	2.2×10^{18}	cm^{-3}
N_v	1.8×10^{19}	cm^{-3}
μ_n	100	$\text{cm}^2/\text{V}/\text{s}$
μ_p	25	$\text{cm}^2/\text{V}/\text{s}$
N_d	1.1×10^{18}	cm^{-3}
N_a	0	cm^{-3}
Densité de défauts	1×10^{18}	cm^{-3}

Tableau IV.2 : Les propriétés de la couche CdS

Permittivité	13.6	
E_g	1.15	eV
Affinité	4.5	eV
N_c	2.2×10^{18}	cm^{-3}
N_v	1.8×10^{19}	cm^{-3}
μ_n	100	$\text{cm}^2/\text{V}/\text{s}$
μ_p	25	$\text{cm}^2/\text{V}/\text{s}$
N_d	0	cm^{-3}
N_a	2×10^{16}	cm^{-3}
Densité de défauts	1×10^{14}	cm^{-3}

Tableau IV.3 : Les propriétés de la couche CIGS

IV.3. Résultats et discussion : Résultats et discussions

IV.3 .1 Effet de l'épaisseur sur les caractéristiques électriques de la cellule :

Les épaisseurs des différentes couches de la cellule étudiée sont groupées dans le tableau IV.4

	Région	Epaisseur (μm)
1	n-ZnO	0.2
2	n-CdS	0.05
3	p-CIGS	3

Tableau IV.4 : L'épaisseur de chaque couche de la cellule étudiée

Pour étudier l'effet de l'épaisseur de chacune des couches (CdS et CIGS), on commence par changer l'épaisseur de la couche CIGS (x_p) et fixer l'épaisseur de la couche CdS (x_n) de la manière suivante : x_p (CIGS) variable dans la gamme (0.1 μm à 3 μm), x_n (CdS) fixée à (0.05 μm).

Les résultats sont groupés dans le tableau IV.5.

Les caractéristiques électriques x_p (μm)	J_{cc} (mA/cm^2)	V_{co} (volt)	FF (%)	η (%)
0.1	22.2802	0.5216	80.1038	9.3092
0.2	32.7820	0.5683	75.8204	14.1247
0.3	34.0671	0.5964	75.4045	15.3202
0.4	34.2997	0.6089	76.9081	16.0635
0.5	34.5479	0.6185	77.5437	16.5688
0.6	34.8102	0.6234	78.3455	17.0006
0.7	35.0619	0.6269	78.7753	17.3159
0.8	35.2833	0.6300	78.9771	17.554
0.9	35.4689	0.6325	79.0627	17.736
1	35.6217	0.6345	79.0886	17.8767

1.1	35.7458	0.6362	79.0850	17.9854
1.2	Résultats et discussions			
1.3	35.9255	0.6380	79.1844	18.1058
1.4	35.9853	0.6394	79.2130	18.2275
1.5	36.0331	0.6401	79.2367	18.2744
1.6	36.0696	0.6403	79.2778	18.3100
1.7	36.0972	0.6405	79.3078	18.3368
1.8	36.1175	0.6407	79.3297	18.3567
1.9	36.1321	0.6408	79.3458	18.3714
2	36.1423	0.6409	79.3577	18.3820
2.1	36.1489	0.6410	79.3664	18.3894
2.2	36.1529	0.6410	79.3729	18.3945
2.3	36.1547	0.6411	79.3777	18.3977
2.4	36.1549	0.6411	79.3812	18.3995
2.5	36.1541	0.6411	79.3838	18.4004
2.6	36.1523	0.6411	79.3856	18.4004
2.7	36.1500	0.6411	79.3869	18.3999
2.8	36.1473	0.6412	79.3878	18.3990
2.9	36.1442	0.6412	79.3884	18.3977
3	36.1411	0.6412	79.3888	18.3963

Tableau IV.5 : Effet de l'épaisseur x_p de la couche (CIGS) sur les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire à hétérojonction (CdS/CIGS)

Nous choisissons quelques valeurs de l'épaisseur x_p de la couche (CIGS) pour tracer :

- ✓ La caractéristique densité de courant - voltage ($J-V$).
- ✓ La caractéristique rendement quantique - longueur d'onde ($QE-\lambda$).
- ✓ Le rendement de conversion la cellule solaire étudiée (η_c).

La caractéristique $J-V$ pour l'épaisseur $x_p = 0.1 \mu\text{m}$ (CIGS) est illustrée dans la figure IV.2.

Résultats et discussions

Figure IV.2 :Caractéristique J - V pour $x_p = 0.1 \mu\text{m}$ (CIGS)

La caractéristique $QE -\lambda$ pour l'épaisseur $x_p = 0.1 \mu\text{m}$ est montrée dans la figure IV.3.

Figure IV.3:Caractéristique $QE-\lambda$ pour l'épaisseur $x_p = 0.1 \mu\text{m}$

Les valeurs des caractéristiques électriques de la cellule pour l'épaisseur $x_p = 0.1 \mu\text{m}$ sont groupées dans le tableau IV.6.

J_p (mA/cm ²)	V_p (volt)	FF (%)	η (%)
Résultats et discussions			
22.2002	0.1210	0.1200	0.1002

Tableau IV.6 : Valeurs des caractéristiques électriques pour l'épaisseur $x_p = 0.1 \mu\text{m}$

On note que le rendement de conversion est légèrement faible ; ceci est dû à la petite valeur de l'épaisseur (**0.1 μm**).

La caractéristique $J-V$ pour l'épaisseur $x_p = 1.7 \mu\text{m}$ est illustrée dans la figure IV.4.

Figure IV.4 : Caractéristique $J-V$ pour l'épaisseur $x_p = 1.7 \mu\text{m}$

La caractéristique $QE-\lambda$ pour l'épaisseur $x_p = 1.7 \mu\text{m}$ est illustrée dans la figure IV.5.

Résultats et discussions

Figure IV.5: Caractéristique $QE-\lambda$ pour l'épaisseur $x_p = 1.7 \mu\text{m}$

Les valeurs des caractéristiques électriques de la cellule pour $x_p = 1.7 \mu\text{m}$ sont illustrées dans le tableau IV.7.

$J_{cc}(\text{mA/cm}^2)$	$V_{co}(\text{volt})$	$FF (\%)$	$\eta (\%)$
36.0972	0.6405	79.3078	18.3368

Tableau IV.7 : Valeurs des caractéristiques électriques pour l'épaisseur $x_p = 1.7 \mu\text{m}$

La caractéristique $J-V$ pour $x_p = 2.5 \mu\text{m}$ est montrée dans la figure IV.6.

Résultats et discussions

Figure IV.6 : Caractéristique $J-V$ pour $x_p = 2.5 \mu\text{m}$

La caractéristique $QE - \lambda$ pour l'épaisseur $x_p = 2.5 \mu\text{m}$ est montrée dans la figure IV.7.

Figure IV.7: Caractéristique $QE - \lambda$ pour $x_p = 2.5 \mu\text{m}$

Les valeurs des caractéristiques électriques de la cellule pour $x_p = 2.5 \mu\text{m}$ sont groupées dans le tableau IV.8.

$J_{cc}(\text{mA/cm}^2)$	$V_{co}(\text{volt})$	$FF (\%)$	$\eta (\%)$
36.1541	0.6411	79.3838	18.4004

Figure IV.8 : Caractéristique $J-V$ pour $x_p = 3 \mu\text{m}$

La caractéristique $J-V$ pour $x_p = 3 \mu\text{m}$ est montrée dans la figure IV.8.

La caractéristique $QE-\lambda$ pour $x_p = 3 \mu\text{m}$ est montrée dans la figure IV.9.

Figure IV.9: Caractéristique $QE-\lambda$ pour $x_p = 3 \mu\text{m}$

Les valeurs des caractéristiques électriques de la cellule pour $x_p = 3 \mu\text{m}$ sont groupées dans le tableau IV.9.

J_c (mA/cm ²)	V_{oc} (volt)	FF (%)	η (%)
Résultats et discussions			
50.1411	0.0412	79.5888	18.5905

Tableau IV.9 : Valeurs des caractéristiques électriques pour $x_p = 3 \mu\text{m}$

D'après le tableau IV.9 et les différentes courbes nous remarquons :

- ✓ Une générale augmentation de J_c , V_{oc} , FF et η lorsque l'épaisseur x_p de la couche p-CIGS augmente.
- ✓ Une faible diminution de FF est notifiée lorsque x_p augmente de $0.1 \mu\text{m}$ à $0.2 \mu\text{m}$ puis FF reprend son augmentation au fur et à mesure que x_p augmente, son augmentation devient de plus en plus lente (valeur autour de 79.38 %) lorsque x_p atteint $2.4 \mu\text{m}$ à $3 \mu\text{m}$.
- ✓ Meilleur rendement est obtenu ($\eta = 18.40\%$) pour les épaisseurs $2.5 \mu\text{m}$, $2.6 \mu\text{m}$.

Dans la figure IV.10 sont regroupées les caractéristiques (J - V) correspondantes aux différentes valeurs de l'épaisseur x_p .

Figure IV.10 : Caractéristiques J - V pour différentes valeurs de l'épaisseur x_p .

Dans la figure IV.11 sont regroupées les caractéristiques $(QE-\lambda)$ correspondant à différentes valeurs de l'épaisseur x_p . **Résultats et discussions**

Figure IV.11 : Caractéristiques $QE-\lambda$ pour différentes valeurs de l'épaisseur x_p .

Une notable augmentation est remarquée dans les caractéristiques soit $(J-V)$ ou $(QE-\lambda)$ lorsque x_p augmente de 0.1 μm à 0.4 μm . Après 1.7 μm , les courbes tendent presque à se superposer.

Les meilleurs résultats obtenus pour les paramètres photovoltaïques de la cellule J_{cc} , V_{co} , FF et η sont autour de la valeur 2.5 μm pour l'épaisseur x_p .

Rappelons que la puissance maximale P_{max} (Watt/cm²) fournie par la cellule est

$$P_{max} = J_m \cdot V_m = FF \cdot J_{cc} \cdot V_{co}$$

Le rendement de conversion photovoltaïque η

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_i}$$

P_i est la puissance incidente fournie par l'éclairement.

Le rendement quantique externe (external quantum efficiency) $QE(\lambda)$

$$QE(\lambda) = \frac{J_{ph}(\lambda)}{q\Phi(\lambda)}$$

$J_{ph}(\lambda)$ le photo-courant en fonction de (λ) à la charge élémentaire et $\phi(\lambda)$ le

Résultats et discussions

flux des photons incidents. Ainsi toute augmentation ou amélioration du photo-courant signifie une amélioration du rendement quantique.

Dans la figure IV.12 est présenté le rendement de conversion photovoltaïque (η) pour différentes épaisseurs x_p .

Figure IV.12 :Variation du rendement de conversion photovoltaïque (η) avec l'épaisseur x_p .

Le tableau IV.10 regroupe les valeurs du rendement correspondantes à la figure IV.12.

$x_p(\mu\text{m})$	η (%)
0.1	9.3092
0.5	16.5688
0.9	17.7363
1.3	18.1658
1.7	18.3368
2.5	18.4004
2.6	18.4004
2.7	18.3999
2.8	18.3990

Résultats et discussions

Tableau IV.10 : Valeurs du rendement de conversion (η) correspondantes aux différentes épaisseurs x_p .

L'augmentation du rendement de la cellule solaire est due à l'absorption supplémentaire des photons incidents correspondant à l'augmentation de l'épaisseur. Au delà de $2\mu\text{m}$, les variations du rendement (η) deviennent de plus en plus lentes. Le meilleur rendement est obtenu pour les épaisseurs $2.5\mu\text{m}$, $2.6\mu\text{m}$ ($\eta = 18.40\%$). A partir de $2.7\mu\text{m}$, (η) commence à diminuer lentement. Pour mieux bénéficier du maximum du spectre solaire, il est donc préférablement d'augmenter l'épaisseur jusqu'à la valeur qui assure une bonne absorption et par la suite un bon rendement. Au-delà de cette épaisseur, il est probable que les longueurs de diffusion commencent à devenir plus courtes relativement à l'épaisseur et les phénomènes de recombinaison deviennent plus considérables ce qui entraîne la diminution du rendement.

Nous passons maintenant à l'étude de l'effet de l'épaisseur (x_n) de la couche frontale n-CdS. x_n (CdS) est variable dans la gamme ($0.01\mu\text{m}$ à $0.07\mu\text{m}$), x_p (CIGS) est fixée à ($3\mu\text{m}$).

Les résultats sont groupés dans le tableau IV.11.

Les caractéristiques électriques	$J_{cc}(\text{mA}/\text{cm}^2)$	$V_{co}(\text{volt})$	$FF(\%)$	$\eta(\%)$
$x_n(\mu\text{m})$				
0.01	37.9434	0.6423	79.5919	19.3965

0.02	37.3801	0.6419	79.5309	19.0836
0.03	<i>Résultats et discussions</i>			
0.04	36.5346	0.6414	79.4312	18.6134
0.05	36.1655	0.6412	79.3864	18.4084
0.06	35.8265	0.6410	79.3443	18.2202
0.07	35.5147	0.6408	79.3043	18.0471

Tableau IV.11 :Effet de l'épaisseur x_n de la couche(CdS) sur les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire à hétérojonction(CdS/CIGS)

La caractéristique $J-V$ pour l'épaisseur $x_n = 0.01 \mu\text{m}$ (CdS) est illustrée dans la figure IV.13.

Figure IV.13 :Caractéristique $J-V$ pour $x_n = 0.01 \mu\text{m}$ (CdS)

La caractéristique $QE -\lambda$ pour $x_n = 0.01 \mu\text{m}$ (CdS) est montrée dans la figure IV.14.

Résultats et discussions

Figure IV.14: Caractéristique $QE-\lambda$ pour $x_n = 0.01 \mu\text{m}$ (CdS)

Les valeurs des caractéristiques électriques de la cellule pour $x_n = 0.01 \mu\text{m}$ sont groupées dans le tableau IV.12.

$J_{cc} (\text{mA/cm}^2)$	$V_{co} (\text{volt})$	$FF (\%)$	$\eta (\%)$
37.9434	0.6423	79.5919	19.3965

Tableau IV.12: Valeurs des caractéristiques électriques pour l'épaisseur $x_n = 0.01 \mu\text{m}$ (CdS)

On note un bon rendement de la conversion photovoltaïque.

La caractéristique $J-V$ pour $x_n = 0.05 \mu\text{m}$ est montrée dans la figure IV.15.

Résultats et discussions

Figure IV.15 :Caractéristique J - V pour $x_n = 0.05 \mu\text{m}$

La caractéristique QE - λ pour $x_n = 0.05 \mu\text{m}$ est montrée dans la figure IV.16.

Figure IV.16:Caractéristique QE - λ pour $x_n = 0.05 \mu\text{m}$

Les valeursdescaractéristiques électriques de lacellulepour $x_n = 0.05 \mu\text{m}$ sont groupées dans le tableau IV.13.

$J_{cc}(\text{mA}/\text{cm}^2)$	$V_{co}(\text{volt})$	FF (%)	η (%)
---------------------------------	-----------------------	----------	------------

Résultats et discussions

Tableau IV.13: Valeurs des caractéristiques électriques pour $x_n = 0.05 \mu\text{m}$

Ici on note une diminution de J_{cc} , V_{co} , FF et η en comparaison avec les valeurs correspondantes à $x_n = 0.01 \mu\text{m}$.

La caractéristique $J-V$ pour $x_n = 0.07 \mu\text{m}$ est montrée dans la figure IV.17.

Figure IV.17 : Caractéristique $J-V$ pour $x_n = 0.07 \mu\text{m}$

La caractéristique $QE - \lambda$ pour $x_n = 0.07 \mu\text{m}$ est montrée dans la figure IV.18.

Résultats et discussions

Figure IV.18: Caractéristique $QE-\lambda$ pour $x_n = 0.07 \mu\text{m}$

Les valeurs des caractéristiques électriques de la cellule pour $x_n = 0.07 \mu\text{m}$ sont groupées dans le tableau IV.14.

$J_{cc}(\text{mA/cm}^2)$	$V_{co}(\text{volt})$	$FF(\%)$	$\eta(\%)$
35.5147	0.6408	79.3043	18.0471

Tableau IV.14: Valeurs des caractéristiques électriques pour $x_n = 0.07 \mu\text{m}$

Ici on note aussi une faible diminution de J_{cc} , V_{co} , FF et η , donc il y a une valeur spécifique de l'épaisseur x_n de la couche frontale (CdS) qui donne de bonnes caractéristiques photovoltaïques et un bon rendement. D'après les résultats, la couche (n-CdS) doit être très mince pour assurer un bon rendement. Ceci est vérifié pour $x_n = 0.01 \mu\text{m}$.

Dans la figure IV.19 sont présentées les caractéristiques ($J-V$) correspondantes aux différentes valeurs de l'épaisseur x_n .

Résultats et discussions

Figure IV.19 : Caractéristiques J - V pour différentes valeurs de l'épaisseur x_n

Dans la figure IV.20 sont présentées les caractéristiques QE - λ correspondantes aux différentes valeurs de l'épaisseur x_n .

Figure IV.20 : Caractéristiques QE - λ pour différentes valeurs de l'épaisseur x_n

Avec l'augmentation de l'épaisseur x_n de la couche (n-CdS) nous remarquons une générale diminution des paramètres photovoltaïques. La diminution de J_{cc} et le rendement de conversion η est plus remarquable que celle de V_{co} et FF . Ces derniers présentent des variations plus lentes autour des valeurs 0.64 volt pour le V_{co} et 79% pour le FF (voir tableau IV.11).

La diminution du rendement quantique externe $QE(\lambda)$ avec l'augmentation de x_n est plus **Résultats et discussions**) nm)

puisque'il s'agit de varier l'épaisseur de la couche (n-CdS) frontale. Le meilleur $QE(\lambda)$ et le meilleur rendement de conversion η sont obtenus pour $x_n = 0.01 \mu\text{m}$ ($\eta = 19.3965\%$) (tableau IV.12, figure IV.14). Le fait que la couche frontale (n-CdS) soit très mince ($0.01 \mu\text{m}$), cela permet d'éviter la recombinaison d'une proportion considérable des porteurs photo-générés et assurer leur collection (longueurs de diffusion et durées de vie suffisantes). L'augmentation de l'épaisseur de couche (n-CdS) risque d'affecter la qualité de la cellule par les pertes dans le photo-courant à cause des recombinaisons.

Dans la figure IV.21 est présenté le rendement de conversion photovoltaïque (η) pour différentes épaisseurs x_n .

Figure IV.21 : Variation du rendement de conversion photovoltaïque (η) avec l'épaisseur x_n .

Les valeurs du rendement de conversion (η) correspondantes aux différentes valeurs de l'épaisseur x_n sont présentées dans le tableau IV.15.

Résultats et discussions

$x_n(\mu\text{m})$	η (%)
0.01	19.3965
0.02	19.0836
0.03	18.8370
0.04	18.6134
0.05	18.4084
0.06	18.2202
0.07	18.0471

Tableau IV.15 : Valeurs du rendement de conversion (η) correspondantes aux différentes épaisseurs x_n .

IV.3.2 : Effet de la densité des défauts sur les caractéristiques électriques de la cellule :

Nous choisissons les valeurs des épaisseurs (x_n) et (x_p) qui ont donné un bon rendement,

	Région	Epaisseur (μm)	Densité de défauts (cm^{-3})
1	n-ZnO	0.2	10^{17}
2	n-CdS	0.01	10^{18}
3	p-CIGS	2.5	10^{14}

Tableau IV.16 : Valeurs des épaisseurs et densité de défauts dans chaque couche de la cellule

Les caractéristiques photovoltaïques obtenues avec ces paramètres sont :

$J_{cc}(\text{mA}/\text{cm}^2)$	$V_{co}(\text{volt})$	FF (%)	η (%)
37.9681	0.6422	79.5871	19.4065

Tableau IV.17 : Valeurs des caractéristiques photovoltaïques correspondantes aux paramètres du tableau IV.16.

On commence par changer la densité de défauts (D_p) de la couche (p-CIGS) dans la gamme (10^{13} cm⁻³ à 10^{15} cm⁻³) et noter celle de la couche (n-CdS) (D_n) à 10^{18} cm⁻³

Résultats et discussions

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau IV.18.

Les caractéristiques électriques D_p (cm ⁻³)	J_{cc} (mA/cm ²)	V_{co} (volt)	FF (%)	η (%)
10^{13}	39.3431	0.6687	82.3611	21.6673
10^{14}	37.9681	0.6422	79.5871	19.4065
10^{15}	35.2688	0.5943	73.7757	15.4631

Tableau IV.18 :Effet de la densité de défauts (D_p) de la couche (p-CIGS) sur les paramètres photovoltaïques de la cellule (CdS/CIGS).

Les caractéristiques ($J-V$) pour différentes valeurs de la densité de défauts (D_p) sont présentées dans la figure IV.22.

Figure IV.22 :Caractéristiques ($J-V$) pour différentes valeurs de la densité de défauts (D_p).

Les caractéristiques ($QE-\lambda$) pour différentes valeurs de la densité de défauts (D_p) sont présentées dans la figure IV.23.

Résultats et discussions

Figure IV.23 :Caractéristiques ($QE-\lambda$) pour différentes valeurs de la densité de défauts (D_p).

Pour une densité de défauts $D_p = 10^{13} \text{cm}^{-3}$, le rendement de conversion (η) atteint 21.6673 % (voir tableau IV.19). L'augmentation de la densité des défauts entraîne une diminution remarquable des caractéristiques électriques. Le rendement quantique $QE(\lambda)$ diminue avec l'augmentation de la densité des défauts D_p dans la gamme des longueurs d'ondes (600 nm - 1100 nm) puisque les variations concernent la couche arrière (p-CIGS).

Résultats et discussions

Figure IV.24 : Effet de la densité des défauts (D_p) sur le rendement de conversion (η).

Les défauts de la couche (p-CIGS) ont une distribution gaussienne dans le gap d'énergie avec une largeur de 0.2 eV autour du maximum situé à 0.6 eV, le gap d'énergie E_g étant égale à 1.15 eV, ces défauts se localisent presque au milieu du gap et agissent de ce fait comme des centres de recombinaison. L'augmentation de leur densité rend les phénomènes de recombinaisons plus considérables (durées de vie plus courtes) et entraîne la diminution du nombre des porteurs collectés et par la suite la diminution du rendement de conversion.

On passe maintenant à faire varier la densité de défauts (D_n) de la couche (n-CdS) dans la gamme (10^{17} cm^{-3} à 10^{19} cm^{-3}) et fixer celle la couche (p-CIGS) (D_p) à (10^{14} cm^{-3}).

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau IV.19 et les figures IV.25-26.

Les caractéristiques électriques	$J_{cc} (\text{mA/cm}^2)$	$V_{co} (\text{volt})$	$FF (\%)$	$\eta (\%)$
----------------------------------	---------------------------	------------------------	-----------	-------------

ques				
<u>Résultats et discussions</u>				
$D_n(\text{cm}^{-3})$				
10^{17}	38.3593	0.6425	79.6906	19.6398
10^{18}	37.9681	0.6422	79.5871	19.4065
10^{19}	37.7821	0.6421	79.1636	19.2042

Tableau IV.19 :Effet de la densité de défauts (D_n) de la couche (n-CdS) sur les paramètres photovoltaïques de la cellule (CdS/CIGS).

Figure IV.25 :Caractéristiques ($J-V$) pour différentes valeurs de la densité de défauts (D_n).

Figure IV.26 : Caractéristiques ($OE-\lambda$) pour différentes valeurs de la densité de défauts (D_n). Résultats et discussions

Figure IV.27 : Effet de la densité des défauts (D_n) sur le rendement de conversion (η).

L'augmentation de la densité des défauts de la couche (n-CdS) influe faiblement sur la diminution du courant de court circuit J_{cc} et plus faiblement sur le V_{co} . Une très faible diminution est aussi notifiée pour le FF et par la suite pour le rendement de conversion η . On peut expliquer cela par le fait que la région (n-CdS) soit d'une épaisseur très mince ($x_n = 0.01 \mu\text{m}$). La densité des défauts de la couche frontale (n-CdS) ne peut pas donc avoir un effet significatif sur les paramètres photovoltaïques en comparaison avec l'effet remarquable de la densité des défauts de la couche arrière plus épaisse (p-CIGS). Cependant une brusque réduction est remarquée dans le $QE(\lambda)$ pour les longueurs d'onde λ supérieures à 600 nm lorsque D_n atteint 10^{19} cm^{-3} (figure IV.26).

Les défauts de la couche (n-CdS) ont aussi une distribution gaussienne dans le gap d'énergie avec une largeur de 0.2 eV autour du maximum situé à 1.2 eV, le

gap d'énergie E_g étant égale à 2.4 eV, ces défauts se localisent presque au milieu du gap et agissent aussi comme des centres de recombinaison.

Résultats et discussions

IV. 3 .3: Effet du dopage sur les caractéristiques électriques de la cellule :

Rappelons que pour les paramètres suivants (tableau IV.20)

	1	2	3
Région	ZnO	CdS	CIGS
Epaisseur (µm)	0.2	0.05	3
$N_d(\text{cm}^{-3})$	1×10^{18}	1.1×10^{18}	0
$N_a(\text{cm}^{-3})$	0	0	2×10^{16}
Densité de défauts (cm⁻³)	10^{17}	10^{18}	10^{14}

Tableau IV.20 : Paramètres principaux de chaque couche de la cellule étudiés

Les résultats obtenus sont (tableau IV.21)

$J_{cc}(\text{mA/cm}^2)$	$V_{co}(\text{volt})$	$FF (\%)$	$\eta (\%)$
36.1655	0.6412	79.3864	18.4084

Tableau IV.21 : Valeurs des caractéristiques photovoltaïques correspondantes aux paramètres du tableau IV.20

On commence par changer le dopage de la couche (n-CdS) N_d dans la gamme ($1.1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ à $1.1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$) et fixer le dopage de la couche (p-CIGS) N_a à ($2 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$).

Les caractéristiques ($J-V$) pour différents dopages N_d sont présentées dans la figure IV.28.

Résultats et discussions

Figure IV.28 :Caractéristiques ($J-V$) pour différents dopages N_d

Les caractéristiques ($QE-\lambda$) pour différents dopages N_d sont présentées dans la figure IV.29.

Figure IV.29 :Caractéristiques($QE-\lambda$) pour différentes dopages N_d

Le rendement de conversion (η) pour différentes valeurs du dopage N_d est présenté dans la figure IV.30.

Résultats et discussions

Figure IV.30 : Rendement de conversion (η) pour différentes valeurs du dopage N_d de la couche (n-CdS).

Les valeurs des caractéristiques photovoltaïques de la cellule pour différents dopages N_d sont présentées dans le tableau IV.22.

Les caractéristiques électriques N_d (cm^{-3})	J_{cc} (mA/cm^2)	V_{co} (volt)	FF (%)	η (%)
1.1×10^{16}	37.6471	0.6430	73.4178	17.7728
1.1×10^{17}	37.0762	0.6415	78.1309	18.5843
1.1×10^{18}	36.1655	0.6412	79.3864	18.4084

Tableau IV.22: Valeurs des caractéristiques photovoltaïques pour différents dopages N_d

L'augmentation du dopage N_d de $1.1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ à $1.1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ entraîne une faible diminution de J_{cc} et plus faible pour le V_{co} , cependant une augmentation est remarquable pour le FF et η . Le meilleur rendement de

conversion: **Résultats et discussions** $1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$. Cependant la valeur 18.5843 % n'est pas trop loin de la valeur $\eta = 18.4084\%$ obtenue pour $N_d = 1.1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ qui donne la meilleure valeur de FF (79.3864%). Donc on peut conclure que la valeur du dopage $N_d = 1.1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ est l'optimale dans ces conditions.

D'après la figure IV.29 on constate que $QE(\lambda)$ connaît une brusque et indésirable réduction au delà de $\lambda = 600 \text{ nm}$ pour $N_d = 1.1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ et $1.1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$. Cette réduction n'est pas compensée par l'accroissement de $QE(\lambda)$ notifié dans la gamme (400nm-500nm) lorsque N_d diminue. Donc $N_d = 1.1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ reste la valeur optimale pour $QE(\lambda)$.

On passe maintenant à changer le dopage (N_a) de la couche (p-CIGS) dans la gamme ($2 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ - $2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$) et fixer le dopage (N_d) de la couche (n-CdS) à $1.1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$.

Les caractéristiques (J - V) pour différents dopages N_a sont présentées dans la figure IV.31.

Résultats et discussions

Figure IV.31: Caractéristiques (J - V) pour différents dopages N_a

Les valeurs des caractéristiques photovoltaïques de la cellule pour différents dopages N_a sont présentées dans le tableau IV.23.

Les caractéristiques électriques N_a (cm^{-3})	J_{cc} (mA/cm^2)	V_{co} (volt)	FF (%)	η (%)
2×10^{16}	36.1655	0.6412	79.3864	18.4084
2×10^{17}	33.7840	0.6979	81.0828	19.1162
2×10^{18}	32.4448	0.7578	66.9343	16.4574

Tableau IV.23: Valeurs des caractéristiques photovoltaïques pour différents dopages N_a

Les caractéristiques ($QE - \lambda$) pour différents dopages N_a sont illustrées dans la figure IV.32.

Résultats et discussions

Figure IV.32 :Caractéristiques ($QE - \lambda$) pour différents dopages N_a

Le rendement de conversion (η) pour différentes valeurs du dopage N_a est présenté dans la figure IV.33.

Figure IV.33 : Rendement de conversion (η) pour différentes valeurs du dopage N_a

Résultats et discussions

Une augmentation du dopage N_a de la couche (p-CIGS) entraîne une remarquable diminution du courant de court circuit J_{CC} . Le FF passe par une valeur plus élevée (81.0828%) pour $N_a = 2 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ ainsi que le rendement de conversion ($\eta = 19.1162\%$), puis ils diminuent respectivement à $FF = 66.9343\%$, $\eta = 16.4574\%$ pour $N_a = 2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ (tableau IV.23). Le V_{co} connaît cependant une augmentation avec l'augmentation du dopage N_a . Le $QE(\lambda)$ (figure IV.32) connaît généralement une réduction dans la gamme des longueurs d'onde (500nm- 1200nm) lorsque le dopage N_a augmente.

Le fait que la couche (p-CIGS) soit plus épaisse (3 μm) et son absorption est plus significatif que celle de la couche tampon (n-CdS) limitée par son gap d'énergie large ($E_g = 2.4 \text{ eV}$), donc les modifications apportées aux paramètres de la région (p-CIGS) ont des effets plus remarquables sur les caractéristiques électriques de la cellule.

La valeur du dopage $N_a = 2 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ est l'optimale pour un meilleur rendement (19.1162%) dans ces conditions. D'un côté, il est préférable d'augmenter la concentration du dopage, car cette augmentation permet une amélioration de la collection des porteurs photo-générés dans la couche tampon (CdS). Cependant, au niveau de l'absorbeur CIGS, un dopage de l'ordre de $2 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ est suffisant pour donner un bon rendement. La couche tampon (CdS) étant d'un gap d'énergie large, elle laisse passer le rayonnement visible qui est ensuite absorbé dans la couche (CIGS). Donc une concentration de dopage très élevée dans le CIGS peut affecter le transport des porteurs à ce niveau, ce qui provoque une diminution du rendement.

IV. 4. Conclusion :

Dans ce travail, nous avons présenté l'étude des caractéristiques électriques de la cellule solaire à hétérojonction, ZnO/CdS/CIGS, de structure (n-p). Où la couche ZnO de type-n est utilisée comme une couche fenêtre, la couche CdS de type-n comme une couche tampon et la couche CIGS

de type- p est la couche de l'absorbeur. Les épaisseurs typiques de ces couches sont respectivement autour de 0. **Résultats et discussions** Elle est

soumise à l'éclairement AM1.5, et en utilisant le logiciel de simulation numérique **AMPS-1D**, nous avons pu générer les caractéristiques électriques de la cellule telles que : la caractéristique densité de courant - tension ($J-V$), la caractéristique rendement quantique -longueur d'onde ($QE -\lambda$), ainsi que la densité de courant de court circuit (J_{cc}), la tension de circuit ouvert (V_{co}), le facteur de remplissage (FF), et le rendement de conversion photovoltaïque (η). Ces caractéristiques sont étudiées et analysées sous la variation des grandeurs des paramètres : épaisseur de la couche (n-CdS) et (p-CIGS), densité des défauts et dopage dans les deux régions de la cellule.

Il s'est avéré que les changements apportés aux propriétés de la couche frontale (n-CdS) ont généralement des effets moins significatifs sur les caractéristiques électriques de la cellule en comparaison aux changements effectués sur les propriétés de la couche absorbante (p-CIGS). Cela est justifié par le fait que la couche frontale (n-CdS) est généralement d'une épaisseur (x_n) très fine en comparaison avec l'épaisseur (x_p) de la couche absorbante (p-CIGS). De plus, l'absorption dans le CdS est limitée du fait qu'il possède d'un gap d'énergie large ($E_g = 2.4$ eV).

En faisant varier l'épaisseur (x_p), le meilleur rendement de conversion est obtenu pour des valeurs de (x_p) autour de 2.5 μm - 2.6 μm ($\eta = 18.40\%$). Plus l'épaisseur (x_n) est fine, plus le rendement est élevé ($\eta = 19.3965\%$ pour $x_n = 0.01$ μm). Donc les épaisseurs 0.01 μm pour la couche (n-CdS), et 2.5 μm à 2.6 μm pour la couche (p-CIGS) sont optimales pour un bon rendement de conversion. Pour une densité de défauts D_p réduite dans la couche (p-CIGS) à (10^{13} cm^{-3}), le rendement de conversion (η) atteint 21.6673 % reflétant ainsi le meilleur rendement obtenu pour des cellules CIGS de bonne qualité [63-65]. Concernant le dopage, la valeur ($N_d = 1.1 \times 10^{17}$ cm^{-3}) du dopage de la région (n-CdS) donne un bon rendement de conversion ($\eta = 18.5843\%$). Le dopage $N_a = 2 \times 10^{17}$ cm^{-3} de la

région (p-CIGS) donne un rendement $\eta = 19.1162\%$. D'un côté, il est préférable d'augmenter ***Résultats et discussions*** de la

collection des porteurs photo-générés dans la couche tampon (CdS). Cependant, au niveau de l'absorbeur CIGS, un dopage de l'ordre de $2 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ est suffisant pour donner un bon rendement. La couche tampon (CdS) étant d'un gap d'énergie large, elle laisse passer le rayonnement visible qui est ensuite absorbé dans la couche (CIGS). Donc une concentration de dopage très élevée dans le CIGS peut affecter le transport des porteurs à ce niveau, ce qui provoque une diminution du rendement.

Généralement, les résultats obtenus sont dans la gamme de ce qu'a été trouvé par les travaux expérimentaux et théoriques menés sur les cellules solaires à hétérojonction (CdS/CIGS).

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce travail, nous avons étudié les caractéristiques électriques de la cellule solaire à hétérojonction, ZnO/CdS/CIGS, de structure (n-p). Où la couche ZnO de type-*n* est utilisée comme une couche fenêtre, la couche CdS de type-*n* comme une couche tampon et la couche CIGS de type-*p* est la couche de l'absorbeur. Les paramètres de la couche tampon CdS jouent un rôle très important dans l'amélioration du rendement des cellules solaires à base des matériaux chalcopyrites Cu (In, Ga) Se₂ (CIGS). Effectivement, une jonction n-p 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) et les dommages mécaniques. De même, les paramètres de la couche absorbante CIGS ont une influence significative sur les performances de la cellule solaire. La couche de ZnO établie avec la couche CdS, ainsi que la jonction n-p, permettent une meilleure collection des porteurs photo-générés même aux courtes longueurs d'onde et une réduction considérable des pertes électriques associées aux mécanismes de recombinaison à l'interface. Du fait de leur gap d'énergie large, la couche de ZnO et la couche tampon de CdS, laissent passer le rayonnement visible (d'où leur nom de couches fenêtre), qui est ensuite absorbé dans la couche de CIGS. Les épaisseurs typiques de ces couches sont respectivement autour de 0.2 μm (pour le ZnO), 0.05 μm (pour le CdS) et 3 μm (pour le CIGS).

La cellule est soumise à l'éclairement AM1.5, et en utilisant le logiciel de simulation numérique **AMPS-1D**, nous avons pu générer les caractéristiques électriques de la cellule telles que : la caractéristique densité de courant - tension ($J-V$), la caractéristique rendement quantique -longueur d'onde ($QE - \lambda$), ainsi que la densité de courant de court circuit (J_{cc}), la tension de circuit ouvert (V_{co}), le facteur de remplissage (FF), et le rendement de conversion photovoltaïque (η). Ces caractéristiques sont étudiées et analysées sous la variation des grandeurs des paramètres : épaisseur de la couche (n-CdS) et (p-CIGS), densité des défauts et dopage dans les deux régions de la cellule.

Il s'est avéré que les changements apportés aux propriétés de la couche frontale (n-CdS) ont généralement des effets moins significatifs sur les caractéristiques électriques de la cellule en comparaison aux changements

Conclusion

effectuées sur les propriétés de la couche absorbante (p-CIGS). Cela est justifié par le fait que la couche frontale (n-CdS) est généralement d'une épaisseur (x_n) très fine en comparaison avec l'épaisseur (x_p) de la couche absorbante (p-CIGS). De plus, l'absorption dans le CdS est limitée du fait qu'il possède d'un gap d'énergie large ($E_g = 2.4$ eV).

En faisant varier l'épaisseur (x_p), le meilleur rendement de conversion est obtenu pour des valeurs de (x_p) autour de 2.5 μm - 2.6 μm ($\eta = 18.40\%$). Plus l'épaisseur (x_n) est fine, plus le rendement est élevé ($\eta = 19.3965\%$ pour $x_n = 0.01$ μm). Donc les épaisseurs 0.01 μm pour la couche (n-CdS), et 2.5 μm à 2.6 μm pour la couche (p-CIGS) sont optimales pour un bon rendement de conversion. Pour une densité de défauts D_p réduite dans la couche (p-CIGS) à (10^{13} cm^{-3}), le rendement de conversion (η) atteint 21.6673 % reflétant ainsi le meilleur rendement obtenu pour des cellules CIGS de bonne qualité [63,65]. Concernant le dopage, la valeur ($N_d = 1.1 \times 10^{17}$ cm^{-3}) du dopage de la région (n-CdS) donne un bon rendement de conversion ($\eta = 18.5843\%$). Le dopage $N_a = 2 \times 10^{17}$ cm^{-3} de la région (p-CIGS) donne un rendement $\eta = 19.1162\%$. D'un coté, il est préférable d'augmenter la concentration du dopage, car cette augmentation permet une amélioration de la collection des porteurs photo-générés dans la couche tampon (CdS). Cependant, au niveau de l'absorbeur CIGS, un dopage de l'ordre de $2 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ est suffisant pour donner un bon rendement. La couche tampon (CdS) étant d'un gap d'énergie large, elle laisse passer le rayonnement visible qui est ensuite absorbé dans la couche (CIGS). Donc une concentration de dopage très élevée dans le CIGS peut affecter le transport des porteurs à ce niveau, ce qui provoque une diminution du rendement.

En conclusion, nous pouvons dire que les caractéristiques de la cellule solaire de CIGS dépendent étroitement de celles des couches individuelles constituant la cellule, et de ses interfaces. Généralement, les résultats obtenus sont dans la gamme de ce qu'a été trouvé par les travaux expérimentaux et théoriques menés sur les cellules solaires à hétérojonction (CdS/CIGS).

Bibliographie

Bibliographies

- [1] Fthenakis, V., *Sustainability of photovoltaics: The case for thin-film solar cells*. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2009. **13**(9): p. 2746-2750.
- [2] Mitzi, D.B., O. Gunawan, T. Todorov, K. Wang, and S. Guha, *The path towards a high-performance solution-processed kesterite solar cell*. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2011. **95**: p. 1421-1436.
- [3] Jehl, Z., F. Erfurth, N. Naghavi, L. Lombez, I. Gerard, M. Bouttemy, P. Tran-Van, A. Etcheberry, G. Voorwinden, B. Dimmler, W. Wischmann, M. Powalla, J.F. Guillemoles, and D. Lincot, *Thinning of CIGS solar cells: Part II: Cell characterizations*. Thin Solid Films, 2011. doi:10.1016/j.tsf.2010.12.224.
- [4] Paire, M., L. Lombez, J.F. Guillemoles, and D. Lincot, *Toward microscale Cu(In, Ga)Se₂ solar cells for efficient conversion and optimized material usage: Theoretical evaluation*. Journal of Applied Physics, 2010. **108**(3): p. 034907.
- [5] Fthenakis, V.M., *End-of-life management and recycling of PV modules*. Energy Policy, 2000. **28**(14): p. 1051-1058.
- [6] Miles, R.W., K.M. Hynes, and I. Forbes, *Photovoltaic solar cells: An overview of state-of-the-art cell development and environmental issues*. Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials, 2005. **51**(1-3): p. 1-42.
- [7] Becquerel, E., *Mémoire sur les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires*. Comptes Rendus des Séances Hebdomadaires de l'Académie des Sciences, 1839. **9**: p. 561-567.
- [8] *Reference AM 1.5 Solar Spectral Irradiance (ASTM G173-03)*, 2003, American Society for Testing and Materials.
- [9] Rau, U. and M. Schmidt, *Electronic properties of ZnO/CdS/Cu(In,Ga)Se₂ solar cells aspects of heterojunction formation*. Thin Solid Films, 2001. **387**(1-2): p. 141-146.
- [10] Klenk, M. and M.C. Lux-Steiner, *Chalcopyrite Based Solar Cells*, in *Thin Film Solar Cells Fabrication, Characterization and Applications*, J. Poortmans and V. Arkhipov, Editors. 2006, Wiley: Chichester. p. 237-275.

- [11] Wenham S. R., Green M. A. and Watt M. E, «Applied Photovoltaic», Bridge Printer, Sidney, (1994).
- [12] Pierre Bessemoulin et Jean Olivieri, « Le rayonnement solaire et sa composante ultraviolet », La Météorologie 8^e série -n°31 - septembre 2000.
- [13] M. Orgeret, "les piles solaires le composant et ses applications", Masson,, paris, 1985.
- [14] M. Mancer, «Simulation Numérique des Caractéristiques Électriques d'une Cellule Solaire à double jonction en (AlGaAs /GaAs) », thèse de magister, 2012, Université de Biskra.
- [15] M. Bouafia & L.Deblaoui, « Modélisation et simulation d'une cellule solaire en couche mince à base de diséléniure de Cuivre, d'Indium et de Gallium (CIGS) », diplôme de Master professionnel, 2012, Université de Ouargla.
- [16] M. Adaïka, « 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.
- [17] Anne Labouret & Pascal Cumuenel & Jean-Paul Braun & Benjamin Faraggi: « Cellules Solaires Les bases de l'énergie photovoltaïque », Dunod 5^{eme} édition, 2005.
- [18] Anne Labouret & Michel Viloz, « Energie Solaire Photovoltaïque »; Dunod 2^e édition, 2003.
- [19] 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.
- [20] 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.

- [21] A. Ricaud, "photopiles solaires de la physique de la conversion photovoltaïque aux filières, matériaux et procédés", ©1997. presses polytechniques et universitaires romandes.
- [22] A. Ricaud, "Gisement solaire et transferts énergétiques ", Master Energies Renouvelables, Université de Cergy-Pontoise. Jan 2011.
- [23] M. Gloeckler, « Device Physics of Cu (In, Ga) Se₂ Thin-Film Solar Cells», thesis of Doctor of Philosophy, 2005, Colorado State University.
- [24] S. M. Sze, Physics of Semiconductor Devices (John Wiley & Sons, 1981), 2nd ed.
- [25] M. A. Green, Solar Cells (Prentice Hall, Englewood Cliff, NJ, 1982).
- [26] A. Luque and S. Hegedus, eds., Handbook of Photovoltaic Energy Conversion and Engineering (John Wiley & Sons Ltd, Chichester, West Sussex, England, 2003).
- [27] I. Repins, M.A. Contreras, B. Egaas, C. DeHart, J. Scharf, C.L. Perkins, B. To, R. Noufi, Prog. Photovolt.: Res. Appl. 16 (2008) 235-239.
- [28] MyoungGuk Parka, Sejin Ahna, Jae Ho Yuna, Jihye Gwaka, Ara Choa, SeoungKyu Ahna, Keeshik Shina, Dahyun Namb, Hyeonsik Cheongb, Kyunghoon Yoona, Journal of Alloys and Compounds 513 (2012) 68- 74].
- [29] Y. Hamakawa, Thin Film Solar Cells, 28-31, 163-209 2004.
- [30] Chen, S.Y., X.G. Gong, A. Walsh, and S.H. Wei, Electronic structure and stability of quaternary chalcogenide semiconductors derived from cation cross-substitution of IIVI and I-III-VI₂ compounds. Physical Review B, 2009. 79(16).
- [31] Lydie 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 ,Paris, 2011.
- [32] S. Chen, X. G. Gong: Physical Review B **75**, 205- 209, 2007.

- [33] Repins, I., M.A. Contreras, B. Egaas, C. DeHart, J. Scharf, C.L. Perkins, B. To, and R. Noufi, 19.9%-efficient ZnO/CdS/CuInGaSe₂ solar cell with 81.2% fill factor. *Progress in Photovoltaics*, 2008. 16(3): p. 235-239.
- [34] Jackson, P., D. Hariskos, E. Lotter, S. Paetel, R. Wuerz, R. Menner, W. Wischmann, and M. Powalla, New world record efficiency for Cu(In,Ga)Se₂ thin-film solar cells beyond 20%. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2011. 19(3): p. DOI:10.1002/pip.1078.
- [35] Hanna, G., A. Jasenek, U. Rau, and H.W. Schock, Influence of the Ga-content on the bulk defect densities of Cu(In,Ga)Se₂. *Thin Solid Films*, 2001. 387(1-2): p. 71-73.
- [36] Würfel, P., *Physics of Solar Cells: From Principles to New Concepts* 2005: Wiley-VCH.
- [37] Noufi, R., J.R. Tuttle, A.L. Tennant, M. Contreras, D.S. Albin, and J.J. Carapella, *Method of fabricating high efficiency Cu(In,Ga)(Se,S)₂ thin films for solar cells*, 1995, Midwest Research Institute (Kansas City, MO): United States
- [38] Kodigala, S.R., *Cu(In,Ga)Se₂ Based Thin Film Solar Cells*. *Thin Films and Nanostructures* 2010: Elsevier. 700.
- [39] Romero, E., C. Calderon, P. Bartolo-Perez, and G. Gordillo, *Phase identification and AES depth profile analysis of Cu(In,Ga)Se₂ thin films*. *Brazilian Journal of Physics*, 2006. **36**(3B): p. 1050-1053.
- [40] Dimmler, B. and R. Wachter, *Manufacturing and application of CIS solar modules*. *Thin Solid Films*, 2007. **515**(15): p. 5973-5978.
- [41] Powalla, M., G. Voorwinden, D. Hariskos, P. Jackson, and R. Kniese, *Highly efficient CIS solar cells and modules made by the co-evaporation process*. *Thin Solid Films*, 2009. **517**(7): p. 2111-2114.
- [42] Kushiya, K., M. Tachiyuki, Y. Nagoya, A. Fujimaki, B.S. Sang, D. Okumura, M. Satoh, and O. Yamase, *Progress in large-area Cu(InGa)Se₂-based thin-film modules with a Zn(O,S,OH)_x buffer layer*. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2001. **67**(1-4): p. 11-20.
- [43] Palm, J., V. Probst, and F.H. Karg, *Second generation CIS solar modules*. *Solar*

Energy, 2004. **77**(6): p. 757-765.

- [44] Caballero, R., C. Maffiotte, and C. Guillen, *Preparation and characterization of $CuIn_{1-x}Ga_xSe_2$ thin films obtained by sequential evaporations and different selenization processes*. Thin Solid Films, 2005. **474**(1-2): p. 70-76.
- [45] Bekker, J., V. Alberts, and M.J. Witcomb, *Influence of selenization techniques on the reaction kinetics of chalcopyrite thin films*. Thin Solid Films, 2001. **387**(1-2): p. 40-43.
- [46] Alberts, V., *A comparison of the material and device properties of homogeneous and compositional-graded $Cu(In,Ga)(Se,S)_2$ chalcopyrite thin films*. Semiconductor Science and Technology, 2007. **22**(6): p. 585-592.
- [47] Sugimoto, H., T. Yagioka, M. Nagahashi, Y. Yasaki, Y. Kawaguchi, T. Morimoto, Y. Chiba, T. Aramoto, Y. Tanaka, H. Hakuma, S. Kuriyagawa, and K. Kushiya. *Achievement of over 17% efficiency with $30 \times 30 \text{cm}^2$ -sized $Cu(InGa)(SeS)_2$ submodules*. in *37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*. 2011. Seattle.
- [48] X. Wu, J. C. Keane, R. G. Dhere, C. DeHart, D. S. Albin, A. Duda, T. A. Gessert, S. Asher, D. H. Levi, and P. Sheldon, in Proc. 17th European Photovoltaic Sol. Energy Conf. (2001), pp. 995-1000.
- [49] W. N. Shafarman and L. Stolt, Handbook of Photovoltaic Science and Engineering (Wiley Chichester, 2003), chap. $Cu(In,Ga)Se_2$ Solar Cells, pp. 567-616.
- [50] L. J. Simpson, J. S. Britt, S. Wiedeman, M. E. Beck, B. S. Joshi, T. L. Vincent, J. P. Delplanque, R. J. Kee, N. B. Gomez, K. M. Williams, et al., in Proc. NCPV and Solar Program Review Meeting (2003), p. 604.
- [51] G. Jensen, J. Schaefer, G. M. Hanket, E. Eser, and S. Wiedeman, in Proc. NCPV and Solar Program Review Meeting (2003), p. 877.
- [52] R. Birkmire, E. Eser, S. Fields, and W. Shafarman, Prog. Photovoltaics 13, 141 (2005).
- [53] National Renewable Energy Laboratory, What is the energy payback for PV?, URL <http://www.nrel.gov/docs/fy04osti/35489.pdf>.
- [54] M. S. Keshner and R. Arya, Tech. Rep., National Renewable Energy Laboratory, <http://www.nrel.gov/docs/fy05osti/36846.pdf> (2004).

- [55] K. Ramanathan, M. A. Contreras, C. L. Perkins, S. Asher, F. S. Hasoon, J. Keane, D. Young, M. Romero, W. Metzger, R. Noufi, et al., *Prog. Photovoltaics* 11, 225 (2003).
- [56] M. A. Contreras, K. Ramanathan, J. AbuShama, F. Hasoon, D. L. Young, B. Egaas, and R. Noufi, *Prog. Photovoltaics* 13, 209 (2005).
- [57] U. Rau and H. W. Schock, *Appl. Phys. A* 69, 131 (1999).
- [58] S. B. Zhang, S.-H. Wei, A. Zunger, and H. Katayama-Yoshida, *Phys. Rev. B* 57, 9642 (1998).
- [59] D. Rudmann, A. F. da Cunha, M. Kaelin, F. Kurdesau, H. Zogg, and A. N. Tiwari, *Appl. Phys. Lett.* 84, 1129 (2004).
- [60] C. R. Corwine, A. O. Pudov, M. Gloeckler, S. H. Demtsu, and J. R. Sites, *Sol. Energy Mat. Sol. Cells* 82, 481 (2004).
- [61] Contreras, M.A., M.J. Romero, B.T.E. Hasoon, R. Noufi, S. Ward, and K. Ramanathan, *Optimization of CBD CdS process in high-efficiency Cu(In,Ga)Se₂-based solar cells*. *Thin Solid Films*, 2002. **403**: p. 204-211.
- [62] Naghavi, N., D. Abou-Ras, N. Allsop, N. Barreau, S. Bucheler, A. Ennaoui, C.H. Fischer, C. Guillen, D. Hariskos, J. Herrero, R. Klenk, K. Kushiya, D. Lincot, R. Menner, T. Nakada, C. Platzer-Bjorkman, S. Spiering, A.N. Tiwari, and T. Torndahl, *Buffer layers and transparent conducting oxides for chalcopyrite Cu(In,Ga)(S,Se)₂ based thin film photovoltaics: present status and current developments*. *Progress in Photovoltaics*, 2010. **18**(6): p. 411-433.
- [63] Hubert, C., N. Naghavi, B. Canava, A. Etcheberry, and D. Lincot, *Thermodynamic and experimental study of chemical bath deposition of Zn(S,O,OH) buffer layers in basic aqueous ammonia solutions. Cell results with electrodeposited CuIn(S,Se)₂ absorbers*. *Thin Solid Films*, 2007. **515**(15): p. 6032-6035.
- [64] Nakada, T. and M. Mizutani, *18% efficiency Cd-free Cu(In, Ga)Se₂ thin-film solar cells fabricated using chemical bath deposition (CBD)-ZnS buffer layers*. *Japanese Journal of Applied Physics Part 2-Letters*, 2002. **41**(2B): p. L165-L167.
- [65] Naghavi, N., S. Spiering, M. Powalla, B. Cavana, and D. Lincot, *High-efficiency copper indium gallium diselenide (CIGS) solar cells with indium*

- sulfide buffer layers deposited by atomic layer chemical vapor deposition (ALCVD)*. Progress in Photovoltaics, 2003. **11**(7): p. 437-443.
- [66] K. Ramanathan, G. Teeter, J. C. Keane, and R. Noufi, Thin Solid Films 480-481, 499 (2005).
- [67] J. R. Sites, H. Tavakolian, and R. A. Sasala, Solar Cells 29, 39 (1990).
- [68] M. Gloeckler and J. R. Sites, J. Appl. Phys. 95, 4438 (2004).
- [69] J. T. Heath, J. D. Cohen, and W. N. Shafarman, J. Appl. Phys. 95, 1000 (2004).
- [70] M. Burgelman, P. Nollet, and S. Degrave, Thin Solid Films 361-362, 527 (2000).
- [71] K. Emery, Handbook of Photovoltaic Science and Engineering (Wiley Chichester, A. Luque and S. Hegedus (Ed.), 2003), pp. 702-711 (Based on R. Bird, R. Hulstrom, and C. Riordan, Solar Cells 14, 193 [1985]).
- [72] P. K. Johnson, Ph.D. thesis, Colorado State University (2003).
- [73] A. Pudov, Ph.D. thesis, Colorado State University (2005).
- [74] S. S. Hegedus and W. N. Shafarman, Prog. Photovoltaics 12, 155 (2004).
- [75] M. Gloeckler, « Numerical Modeling of CIGS Solar Cells», thesis of master, 2003, Colorado State University.
- [76] Selberherr, S. (1984) "*Analysis and Simulation of Semiconductor Devices*" (Berlin: Springer).
- [77] Kurata, M. (1982) "*Numerical Analysis for Semiconductor Devices*" (Lexington, MA Heath).
- [78] Zeman, M., Kroon, M., and Heuvel, J. (1999) "*Amorphous Semiconductor Devices*", User's Manual of Optoelectronic Simulator for Amorphous Semiconductor Devices, Delft University of Technology, Netherlands 1999.

- [79] L. Zighed, “ Etude de l'influence de nouveaux films antiréfléchissants sur la conversion photovoltaïque”, Thèse doctorat, Université de Mentori Constantine.2007.
- [80] M.Benaïcha, “ Etude des matériaux semiconducteur III-V Application à la conversion photovoltaïque”, mémoire Magister, Université de Batna ,2007.
- [81] K. Emery, Handbook of Photovoltaic Science and Engineering (Wiley Chichester, A. Luque and S. Hegedus (Ed.), 2003), pp. 702–711 (Based on R. Bird, R. Hulstrom, and C. Riordan, Solar Cells 14, 193 [1985]).
- [82] Jeffery L. Gray “The Physics of the Solar Cel” Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA.
- [83] Pierret R, in Pierret R, Neudeck G (Eds), *Modular Series on Solid State Devices, Volume VI:Advanced Semiconductor Fundamentals*, Chap. 5, Addison-Wesley, Reading, MA, 139–179 (1987).
- [84] Pierret R, in Pierret R, Neudeck G (Eds), *Modular Series on Solid State Devices, Volume VI: Advanced Semiconductor Fundamentals*, Addison-Wesley, Reading, MA (1987).
- [85] Series on Photovoltaic of Solar Energy. Vol.1. Editors: Mary. D. Archer. 2001.
- [86] S.J. Fonash et al., A manual for AMPS-1D for Windows 95/ NT; A one-dimensional device simulation program for the analysis of microelectronic and photonic structures, Pennsylvania State University, 1997. See also <http://www.ampsmodeling.org>.