



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Filière : Electronique

Systeme Embarqués

Réf. :

Présenté et soutenu par :
Dehane mabkhout

Le : Dimanche 07juillet2019

Simulation numérique d'une cellule solaire en CdS/CIGS par le logiciel Atlas-Silvaco

Jury :

M.	Dhiabi fathi	MCB	Université de Biskra	Président
Mme.	Terghini warda	MCB	Université de Biskra	Examineur
Mme.	Tobbech souad	Pr	Université de Biskra	Rapporteur

Année universitaire : 2018 - 2019



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Filière : Electronique

Systeme Embarqués

Réf. :

Présenté et soutenu par :
Dehane mabkhout

Le : Dimanche 07juillet2019

Simulation numérique d'une cellule solaire en CdS/CIGS par le logiciel Atlas-Silvaco

Présenté par :

Dehane mabkhout

Avis favorable de l'encadreur :

Tobbeche Souad

Avis favorable du Président du Jury

Dr. Dhiabi Fathi



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Filière : Electronique

Systeme Embarqués

Réf. :

Présenté et soutenu par :
Dehane mabkhout

Le : Dimanche 07juillet2019

Simulation numérique d'une cellule solaire en CdS/CIGS par le logiciel Atlas-Silvaco

Proposé par : **Pr. Tobbeche Souad**

Dirigé par : **Pr. Tobbeche Souad**

Résumé

Le travail de ce mémoire de master est une étude au moyen de simulations numériques des propriétés électriques de la cellule solaire à couche mince et à hétérojonction à base de:

ZnO_{AL}(150nm)/ZnO:i(50 nm)/CdS(50 nm)/CIGS(3500 nm)/MO(500 nm)

La concentration de donneurs pour les couches ZnO_{AL} et CdS est respectivement de $8 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ et 10^{19} cm^{-3} , tandis que la concentration de récepteurs pour la couche CIGS est de 10^{17} cm^{-3} , ce qui a donné un rendement équivalent de 20,23%.

Nous avons ensuite étudié l'effet de la concentration et de l'épaisseur de chaque couche afin d'obtenir un rendement maximal.

Cette étude a permis d'améliorer le rendement équivalent de 21,3% pour une cellule solaire présentant les caractéristiques suivantes :

ZnO_{AL}(150nm)/ZnO :i(50 nm)/CdS(40 nm)/CIGS(3500)/MO(500 nm)

Avec la nouvelle concentration de chacun des donneurs pour les couches de ZnO_{AL} et CdS est respectivement de $8 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ et 10^{17} cm^{-3} . La concentration des récepteurs pour la couche de CIGS est de 10^{17} cm^{-3} .

Mots-clés : Solar cells, photovoltaic, thin films, Cu(In, Ga)Se₂ (CIGS), simulation, Atlas-Silvaco.

ملخص

عملنا في اطروحة الماستر هذه هو دراسة عن طريق المحاكات العددية للخصائص الكهربائية للخلايا الشمسية ذات الطبقات الرقيقة والوصلة:

ZnO_{AL}(150nm)/ZnO:i(50 nm)/CdS(50 nm)/CIGS(3500 nm)/MO(500 nm)

مع العلم ان تركيز المانحات للطبقات ZnO_{AL} و CdS هو على التوالي $8 \times 10^{17} \text{ سم}^{-3}$ و 10^{19} سم^{-3} أما فيما يخص تركيز القابلات للطبقة CIGS فهو 10^{17} سم^{-3} هذه العملية اعطت مردود مساوي لـ 20.23% .

بعدها قمنا بدراسة تأثير التركيز والسلك لكل طبقة على حدا من اجل الحصول على اكبر مردود.

هذه الدراسة أدت إلى تحسين في المردود مكافئ لـ 21.3% بالنسبة لخلايا شمسية تحمل الخصائص التالية:

ZnO_{AL}(150nm)/ZnO :i(50)/CdS(40)/CIGS(3500)/MO(500)

المانحات للطبقات ZnO_{AL} و CdS هو على التوالي $8 \times 10^{17} \text{ سم}^{-3}$ و 10^{17} سم^{-3} تركيز القابلات للطبقة CIGS هو 10^{17} سم^{-3} .

كلمات مفتاحية : الخلايا الشمسية. الكهروضوئية. الأفلام الرقيقة CIGS, المحاكاة. Atlas-silvaco.

LISTE DES SYMBOLES

α : Coefficient d'absorption

θ : Angle de diffraction.

λ : Longueur d'onde de diffraction.

ν : Fréquence associée à la longueur d'onde du photon.

ρ : Résistivité électrique.

η : Rendement d'une cellule solaire.

ε : Constante diélectrique.

μ_e et μ_h : Mobilité des électrons et des trous, respectivement.

σ_e et σ_h : Section efficace des électrons et des trous, respectivement.

Φ_m : Fonction de travail du métal.

Φ_b : Hauteur de la barrière de potentiel.

AM : Air masse.

c : Vitesse de la lumière.

d : Epaisseur d'une couche mince.

d_{hkl} : Distance interréticulaire.

D_n et D_p : Coefficient de diffusion des électrons et trous, respectivement.

E : Énergie.

E_g : Gap optique.

QE : Rendement quantique (Quantum efficiency).

FF : Facteur de forme.

h : Constante de Planck.

(hkl) : Indices de Miller.IV

I : Intensité de courant mesurée aux bornes de la cellule.

I_{cc} : courant de court-circuit.

I_{ph} : Photocourant.

L_n et L_p : Longueur de diffusion des électrons et des trous, respectivement.

M : Masse molaire d'un élément chimique.

N_c et N_v : Densité effective des états dans la bande de conduction et de valence, respectivement.

N_A et N_D : Densité des accepteurs et des donneurs, respectivement.

P : Puissance caractéristique d'une cellule.

$P_{incidente}$: Puissance incidente des photons.

P_m : Puissance maximale (crête).

q : Charge de l'électron.

R : Coefficient de reflexion.

R_s : Résistance série.

R_{sh} : Résistance parallèle (shunt).

RS : Réponse spectrale.

t : Temps de dépôt.

T : Transmittance.

T_{sub} : Température de substrat.

V : Tension mesurée aux bornes de la cellule.

V_{co} : Tension de circuit ouvert.

V_m : Tension maximale

χ : affinité électronique de semi-conducteur.

Sommaire

Dédicace..	I
Remerciement.....	II
Liste des tableaux.....	III
Liste des figures.....	IV
Introduction générale.....	01

Chapitre 1

Propriétés physiques du matériau semi-conducteur CIGS

1. 1 Introduction.....	05
1.2 Isolants, semi-conducteurs et conducteurs.....	05
1.3 Semi-conducteur intrinsèque.....	07
1.4 Semi-conducteur extrinsèque : dopage.....	07
1.4.1 Semi-conducteur de type n	07
1.4.2 Semi-conducteur de type p	08
1.5 Propriétés du CIGS	08
1.5.1 Structure cristalline.....	08
1.5.2 Propriétés électroniques	09
1.5.2. a Structure de bandes.....	09
1.5.2. b Dopage.....	10
1.5.3 Propriétés optiques de CIGS.....	10
1.6 Conclusion.....	13

References de chapitre 1.....	14
-------------------------------	----

Chapitre 2

Etude théorique des cellules solaires

2.1 Introduction.....	16
2.2 Rayonnement solaire.....	16
2.2.1 Energie photovoltaïque.....	16
• Le potentiel : énergie solaire disponible.....	16
• Spectre solaire.....	18
• Absorption du rayonnement solaire.....	19
2.2.2 Conversion du rayonnement	20
2.2.3 Applications.....	20
2.2.4 Principe de fonctionnement d'une cellule solaire.....	22
2.3 Génération de porteurs en excès par la lumière.....	25
2.4 Mécanismes de recombinaison.....	25
2.4.1 Recombinaison directe.....	26
2.4.2 Recombinaison indirecte	27
2.4.3 Recombinaison Auger	27
2.4.4 Recombinaison de surface.....	28
2.5 Caractéristique I(V)	28
2.6 Paramètres des cellules photovoltaïques.....	29
a. Courant de court-circuit I_{cc}	30
b. Tension a circuit ouvert V_{co}	30
c. Facteur de forme ff	30
d. Le rendement, η	30

e. Le rendement quantique, EQE.....	31
2.7 Cellule solaire à base de CIGS.....	31
2.7.1 Le substrat.....	32
2.7.2 Le contact métallique arrière.....	34
2.7.3 L'absorbeur.....	35
2.7.4 La couche tampon.....	35
2.7.5 La couche fenêtre.....	36
2.8 Contenu de Ga dans la cellule solaire en CIGS.....	37
2.9 Conclusion.....	38
References de chapitre 2.....	39

Chapitre 3

Simulation numérique de la cellule solaire en CIGS par Atlas-Silvaco

3. 1 Introduction.....	42
3.2 Présentation de SILVACO-ATLAS.....	42
3.3 Groupes de Commande d'ATLAS	43
3.4 Spécification de la solution.....	48
3.5 Extraction des données et traçage.....	49
3.6 Conclusion.....	49
References de chapitre 3.....	50

Chapitre 4

Les résultats du Simulation et discussions

4.1 Introduction.....	52
4.2 Structure de la cellule solaire en CIGS dans Atlas-Silvaco.....	52
4.3 Modèles et paramètres de simulation.....	53
4.4 Résultats de simulation et discussions.....	54
4.4.1 Caractéristiques I-V et P-V de la cellule en CIGS.....	55
4.4.2 Influence de la concentration des donneurs de la couche ZnO :Al sur la cellule solaire en CIGS.....	55
4.4.3 Influence de l'épaisseur de la couche ZnO : Al sur la cellule solaire.....	56
4.4.4 Influence de l'épaisseur de la couche ZnO : i sur la cellule solaire.....	58
4.4.5 Influence de la concentration des donneurs de la couche en CdS sur la cellule solaire.....	59
4.4.6 Influence de l'épaisseur de la couche en CdS sur la cellule solaire.....	61
4.4.7 Influence de la concentration des accepteurs de la couche en CIGS sur la cellule solaire.....	62
4.4.8 Influence de l'épaisseur de la couche en CIGS sur la cellule solaire.....	63
4.4.9 Cellule solaire en CIGS optimale.....	65
4.5 Conclusion.....	65
References de chapitre 4.	66
Conclusion générale.....	67

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Mes chers parents.

Ma chère femme et mes chers enfants

Mes frères et mes sœurs.

Toute ma famille.

Tous mes amis.

Tous mes collègues.

Tous les musulmans du monde

Tous ceux qui m'ont aidé pour accomplir ce mémoire.

**Tous les professeurs qui nous ont enseigné car si nous sommes là
Aujourd'hui c'est bien grâce à vous tous, donc un grand merci pour vous.**

Mabkhout Dehane

Remerciements

Dieu soit loué, avant tout, de m'avoir aidé à faire ce travail, de le remercier et de l'inviter à m'aider par la suite.

J'aimerais remercier mon professeur Tobbeche Souad, qui n'a pas perdu de temps pour m'orienter, ainsi que les membres de jury qui vont assister à la présentation de mon travail. Je remercie également tout le personnel administratif de l'université.

MABKHOUT DEHANE

Liste des tableaux

Tableau 3.1 Groupes de Commande SILVACO-ATLAS	44
Tableau 4.1 paramètres de simulation.....	54
Tableau 4.2 Paramètres photovoltaïques de la cellule solaire en CIGS.....	55
Tableau 4.3 Paramètres photovoltaïques de la cellule solaire en CIGS en fonction de la concentration de donneurs de la couche en ZnO :Al.....	55
Tableau 4.4 Paramètres photovoltaïques de la cellule solaire en CIGS en fonction de l'épaisseur de la couche ZnO : Al.....	57
Tableau 4.5 Paramètres photovoltaïques de la cellule solaire en CIGS en fonction de l'épaisseur de la couche en ZnO :i.....	58
Tableau 4.6 Paramètres photovoltaïques de la cellule solaire en CIGS en fonction de la concentration de donneurs de la couche en CdS.....	60
Tableau 4.7 Paramètres photovoltaïques de la cellule solaire en CIGS en fonction de l'épaisseur de la couche en CdS.....	61
Tableau 4.8 Paramètres photovoltaïques de la cellule solaire en CIGS en fonction de la concentration des accepteurs de la couche en CIGS.....	63
Tableau 4.9 Paramètres photovoltaïques de la cellule solaire en CIGS en fonction de l'épaisseur de la couche en CIGS.....	64
Tableau 4.10 Paramètres de la cellule solaire en CIGS optimisée.....	65
Tableau 4.11 Paramètres photovoltaïques de la cellule solaire en CIGS après optimisation....	65

Liste des figures

Chapitre I

Propriétés physiques du matériau semi-conducteur CIGS

Figure 1.1 Diagrammes d'énergie pour un atome, une molécule, un solide.....	05
Figure 1.2 Illustration de la théorie des bandes des isolants, semi-conducteurs et Conducteurs.....	06
Figure 1.3 Comparaison des mailles élémentaires des structures cristallines du Si, du CdTe et du CIGS. Structure chalcopyrite d'après.....	09
Figure 1.4 Coefficient d'absorption optique α en fonction de l'énergie E des photons Incidents dans le CIS et le Si.	11
Figure 1.5 Représentation des indices de réfraction (réelle et imaginaire) en fonction de L'énergie pour le CIGS, avec $x=0$ et $x=0.2$	12

Chapitre 2

Etude théorique de cellules solaires

Figure 2.1 Différentes constantes d'illumination	17
Figure 2.2 Spectres AM0 (extra-terrestre) et AM1.5G (référence terrestre) du rayonnement solaire. Ainsi, l'irradiance totale exploitable en surface de la Terre est réduite à environ 1000 W/m ² , sous forme de rayonnements dont la longueur d'onde s'étend de 280 nm à environ 2500 nm.	18
Figure 2.3 Spectre solaire.....	19
Figure 2.4 Présentation de l'absorption du rayonnement solaire depuis son émission jusqu'à son arrivée à la surface de la terre.....	20
Figure 2.5 Exemples d'applications du PV, des grandes aux petites dimensions.....	21
Figure 2.6 – a) Transmission d'un photon d'énergie $E_{\text{photon}} < E_g$ dans un matériau semi-conducteur.	

b) Absorption d'un photon d'énergie $E_{\text{photon}} = E_g$ et formation d'une paire électron-trou. c) Absorption d'un photon d'énergie $E_{\text{photon}} > E_g$, formation d'une paire électron-trou et thermalisation de l'électron par émission de chaleur (phonon).....23

Figure 2.7 Schéma d'une jonction p-n représentant : la zone de charge d'espace (ZCE). Les zones quasi-neutres (ZQN), les différents porteurs de charge, les sites dopants et le champ électrique E. La courbe inférieure montre la probabilité de collecte des porteurs photogénésés en fonction de la position.....24

Figure 2.8 Structure de base d'une cellule solaire PV avec un absorbeur de type p, reliée à une charge.....24

Figure 2.9 Types de recombinaison.....26

Figure 2.10 Caractéristique rectangulaire d'une photopile à l'obscurité et sous illumination....29

Figure 2.11 Structure d'une cellule solaire a base de CIGS. (a) Schéma de l'empilement des différentes couches ; (b) Image MEB de la tranche d'une cellule.....32

Figure 2.12 Réponse spectrale d'une cellule en CIGS pour différentes proportions x de Ga37

Figure 2.13 caractéristiques I-V pour trois bandes interdites différentes38

Chapitre 3

Simulation numérique de la cellule solaire en CIGS par Atlas-Silvaco

Figure 3.1 Entrées et sorties d'Atlas43

Figure 3.2 Le maillage de la cellule solaire dans Atlas.....45

Figure 3.3 Structure avec régions et matériaux définis45

Figure 3.4 Déclaration des Électrodes dans ATLAS46

Figure 3.5 Distribution du dopage dans ATLAS.....47

Figure 3.6 Affichage graphique des résultats par « TonyPlot ».....49

Chapitre 4

Résultats du simulation et discussion

Figure 4.1 Structure de la cellule solaire en couches minces en CIGS.....53

Figure 4.2 Caractéristique J-V et P-V de la cellule solaire en CIGS.....54

Figure 4.3 Variation des paramètres photovoltaïques de la cellule solaire en CIGS en fonction de la concentration de donneurs de la couche en ZnO :Al.....	56
Figure 4.4 Variation des paramètres photovoltaïques de la cellule solaire en CIGS en fonction de l'épaisseur de la couche ZnO :Al.....	57
Figure 4.5 Variation des paramètres photovoltaïques de la cellule solaire en CIGS en fonction de l'épaisseur de la couche ZnO :i.....	59
Figure 4.6 Variation des paramètres photovoltaïques de la cellule solaire en CIGS en fonction de la concentration de donneurs de la couche en CdS.....	60
Figure 4.7 Paramètres photovoltaïques de la cellule solaire en CIGS en fonction de l'épaisseur de la couche en CdS.....	62
Figure 4.8 Paramètres photovoltaïques de la cellule solaire en CIGS en fonction de la concentration des accepteurs de la couche en CIGS.....	63
Figure 4.9 Paramètres photovoltaïques de la cellule solaire en CIGS en fonction de la concentration des accepteurs de la couche en CIGS.....	64

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Depuis le début du siècle, la consommation énergétique mondiale est en très forte croissance dans toutes les régions du monde. Il semble que tendanciellement, les consommations d'énergie vont continuer à augmenter, sous l'effet de la croissance économique d'une part, et de l'augmentation de la consommation d'électricité par habitant d'autre part, quels que soient les cas de figures envisagés. On parle périodiquement de diverses solutions techniques permettant de "continuer à vivre comme maintenant" sans que cela n'aggrave nos émissions de gaz à effet de serre, en attendant tranquillement que l'efficacité énergétique permette de diminuer les émissions. Mais il est important de savoir que l'on ne peut pas filtrer l'atmosphère pour en retirer le gaz déjà émis. La technique ne peut donc rien sur ce plan, et ne nous évitera pas un réchauffement programmé et inévitable d'au moins 1°C en un siècle. souvent, la révolution des énergies renouvelables est avancée comme un dénouement à tous nos problèmes de production d'énergie électrique. Mais il serait plus raisonnable de voir ces nouvelles solutions techniques comme un simple frein au réchauffement climatique à condition que notre consommation énergétique ne continue pas d'augmenter exponentiellement. Cela éviterait ainsi de reproduire les mêmes erreurs du passé en pensant à des solutions "miracles" qui seraient inépuisables et sans impact sur notre mode vie ou sur l'environnement.

Un des principaux obstacles pour que le photovoltaïque devient plus populaire est le coût par watt d'électricité produite par module photovoltaïque qui est dans la plus part des cas non concurrentiel à celui produit par les méthodes conventionnelles. L'un des moyens proposés pour la diminution du coût par watt, est de diminuer le coût de fabrication de la cellule photovoltaïque, autrement dit diminuer considérablement la quantité des matériaux semi-conducteurs entrants dans la composition de chaque cellule et augmenter sa durée de vie.

Généralement, les systèmes de conversion d'énergie renouvelable souffrent d'un manque d'optimisation pour des systèmes très chers et présentant encore des déficiences importantes en rendement et en fiabilité. Sur la partie matériau, beaucoup d'équipe de recherche travaillent depuis de nombreuses années pour obtenir des rendements élevés associés à des prix de réalisation bas.

Notre travail est divisé en quatre chapitres comme suit :

- Dans le premier chapitre nous allons présenter Propriétés physiques du matériau semi-conducteur CIGS en particulier constituant la cellule solaire.

- Le deuxième chapitre est une étude sur la cellule solaire en générale et la cellule solaire en CIGS en particulier. Nous décrivons le principe de fonctionnement et les caractéristiques de cette cellule solaire.
- Le troisième chapitre présent le logiciel Silvaco utilise pour la simulation de la cellule solaire.
- Et enfin, Dans le dernier chapitre nous présenterons et discussion les résultats obtenus.

Chapitre 1

Propriétés physiques du matériau semi-conducteur CIGS

1. 1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est de présenter les propriétés du matériau semi-conducteur en CIGS. Au début, nous allons donner quelques définitions sur les semi-conducteurs en général ensuite nous présenterons les propriétés du matériau absorbeur de la lumière de notre cellule solaire à étudier dans ce travail telles que la structure cristalline, la structure de bandes et les propriétés électriques et optiques.

1.2 Isolants, semi-conducteurs et conducteurs

Rappelons l'évolution du diagramme d'énergie lors qu'on passe d'un atome à une molécule puis à un solide :

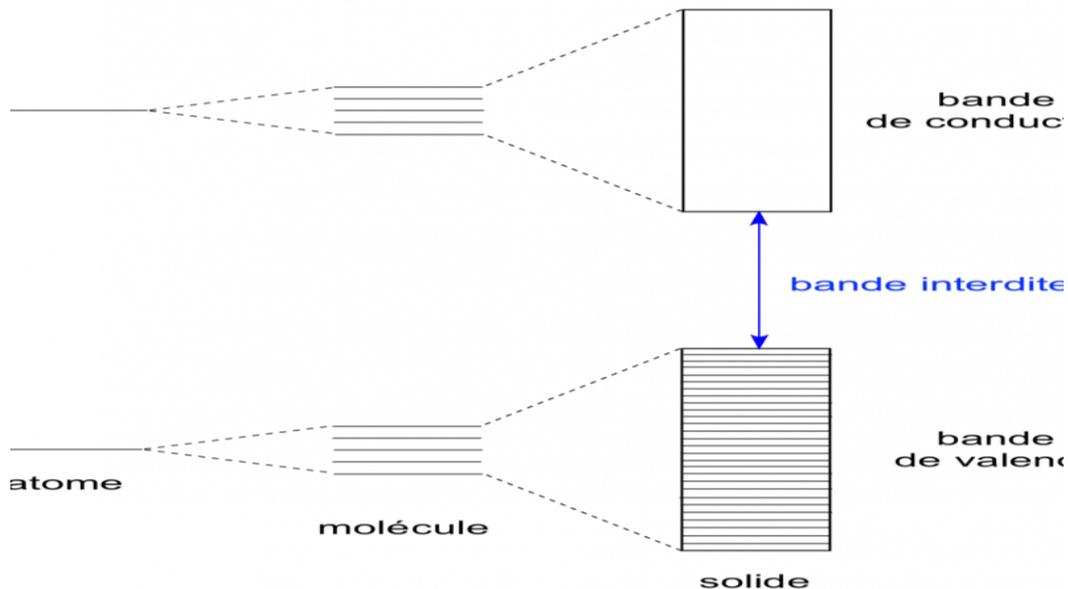


Figure 1.1: Diagrammes d'énergie pour un atome, une molécule, un solide.

On observe des niveaux discrets d'énergie au sein d'un atome ou d'une molécule ; au sein du solide, les niveaux d'énergie sont très proches, ce qui conduit à l'apparition de bandes d'énergie : une bande de valence (niveaux remplis d'électrons) et une bande de conduction (niveaux vides à 0 K).

La qualification d'un matériau d'isolant, de semi-conducteur ou de conducteur repose sur une étude approfondie de ses propriétés électriques. Par cela, nous entendons le comportement d'un matériau suite à l'application d'un champ électrique extérieur. Une telle réponse dépend

d'une propriété intrinsèque majeure du matériau : la bande interdite (*band (gap* en anglais)). Cette dernière constitue la séparation entre la bande de valence et la bande de conduction.

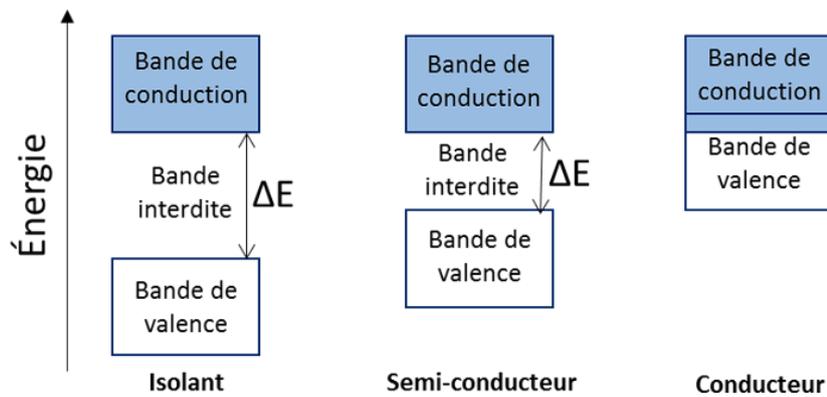


Figure 1. 2 Illustration de la théorie des bandes des isolants, semi-conducteurs et Conducteurs.

Les électrons se trouvent initialement dans la bande de valence et la capacité conductrice du matériau est conditionnée par la facilité de transit de ces électrons vers la bande de conduction. Pour les conducteurs, la bande de conduction et la bande de valence se chevauchent : les électrons transitent instantanément entre les deux bandes et peuvent circuler dans le solide : la conductivité est bonne. Plus la bande interdite est large, plus le matériau acquiert un caractère isolant (bande interdite de l'ordre de 5-6 eV). Dans le cas d'un semi-conducteur, la bande interdite est plus faible que celle d'un isolant (entre 0,5 et 4 eV) : considéré isolant au départ, il peut devenir conducteur si une énergie suffisante est apportée (sous forme de chaleur, de rayonnement...) pour faire passer des électrons de la bande de valence à la bande de conduction.

Un semi-conducteur photo-activé doit absorber un rayonnement d'énergie au moins équivalente à sa bande interdite afin de provoquer le passage d'un électron de la bande de valence vers la bande de conduction. Cela entraîne la formation d'un trou à la place de l'électron dans la bande de valence : une paire électron/trou est créée. Ces porteurs de charge peuvent se déplacer au sein du semi-conducteur et participer à une réaction chimique. Ils peuvent aussi se recombiner : plus la recombinaison est tardive, plus la paire électron/trou a une durée de vie longue et plus le semi-conducteur est actif [1].

1.3 Semi-conducteur intrinsèque

Un semi-conducteur est dit intrinsèque lorsque le cristal n'est pas pollué (volontairement ou non) par des impuretés pouvant changer la concentration en porteurs libres. Pour une température différente de 0 K, des électrons peuvent devenir libres c'est à dire passer de la bande de valence à la bande de conduction, où leur concentration est notée n . Ces électrons laissent des trous dans la BV (avec une concentration notée p) eux-aussi libres de se déplacer avec, de plus, une égalité entre les concentrations n et p . Pour ce cas particulier, on définit une concentration intrinsèque n_i (égale aux concentrations n et p).

1.4 Semi-conducteur extrinsèque : dopage

L'introduction de certaines impuretés dans un matériau semi-conducteur permet d'y modifier le nombre de porteurs libres, de choisir le type de conduction (par électrons ou par trous) et de contrôler la conductivité.

1.4.1 Semi-conducteur de type n

Pour un tel matériau, des atomes (ou impuretés) de type donneur (d'électrons) ont été introduits (en général en faible quantité) afin de privilégier la conduction par électrons plutôt que par trous. Les atomes peuvent être de la colonne V si le cristal initial est constitué d'atomes de la colonne IV.

Les quatre atomes voisins de silicium prêtent un électron chacun à l'atome de phosphore qui lui-même met en commun quatre de ses cinq électrons périphériques. Un faible apport d'énergie (0,04 eV), par exemple dû à une température différente de 0 K, peut libérer le cinquième électron de l'atome de phosphore, qui se retrouve alors ionisé positivement (charge fixe). Ce phénomène correspond à l'apparition d'un niveau d'énergie E_D dans la bande interdite (avec $E_C - E_D = 0,04$ eV).

Les atomes d'impureté s'ionisent progressivement avec l'augmentation de la température et à partir d'environ 50 K toutes les impuretés sont dégelées. La concentration n_0 en électrons (appelée concentration en porteurs majoritaires) sera alors égale à la concentration en dopant N_D ($n_0 = N_D \gg n_i \gg p_0$ concentration en trous, minoritaires).

1.4.2 Semi-conducteur de type p

Cette fois les impuretés sont de type accepteur d'électrons ce qui correspond aux atomes de la colonne III pour un cristal constitué d'atomes de la colonne IV. Un cristal de silicium dans lequel on a introduit des atomes de bore, l'association avec ses quatre voisins confère à l'atome de bore sept électrons sur la couche externe ce qui est insuffisant pour le rendre stable et il est alors tenté d'en subtiliser un à un proche voisin qui lui même peut en prendre un à un de ses voisins et ainsi de suite. Pour cela il faut un apport minimum d'énergie qui peut être fourni par les vibrations thermiques du cristal ; le bore se retrouve ionisé négativement (charge fixe) et on assiste au déplacement d'un trou (libre) d'atome en atome. La concentration p_0 en trous (porteurs majoritaires) est égale à la concentration en dopant N_A ($p_0 = N_A \gg n_i \gg n_0$) [2].

1.5 Propriétés du CIGS

Le rendement d'une cellule solaire à base de CIGS est fortement dépendant des propriétés du matériau absorbeur. Comme dans le cas d'autres semi-conducteurs, la structure cristalline du CIGS ainsi que sa composition peuvent fortement influencer sur ses propriétés optiques et électroniques. La bonne compréhension de la structure de ce matériau est donc nécessaire dans le but d'optimiser un dispositif à base de CIGS [3].

1.5.1 Structure cristalline

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

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

En d'autres termes, le CIGS est une solution solide de CuInSe_2 et de CuGaSe_2 . La figure 1.3 présente les différences de structure cristalline entre 3 matériaux semi-conducteurs utilisés dans le photovoltaïque : le Si, le CdTe et le CIGS.

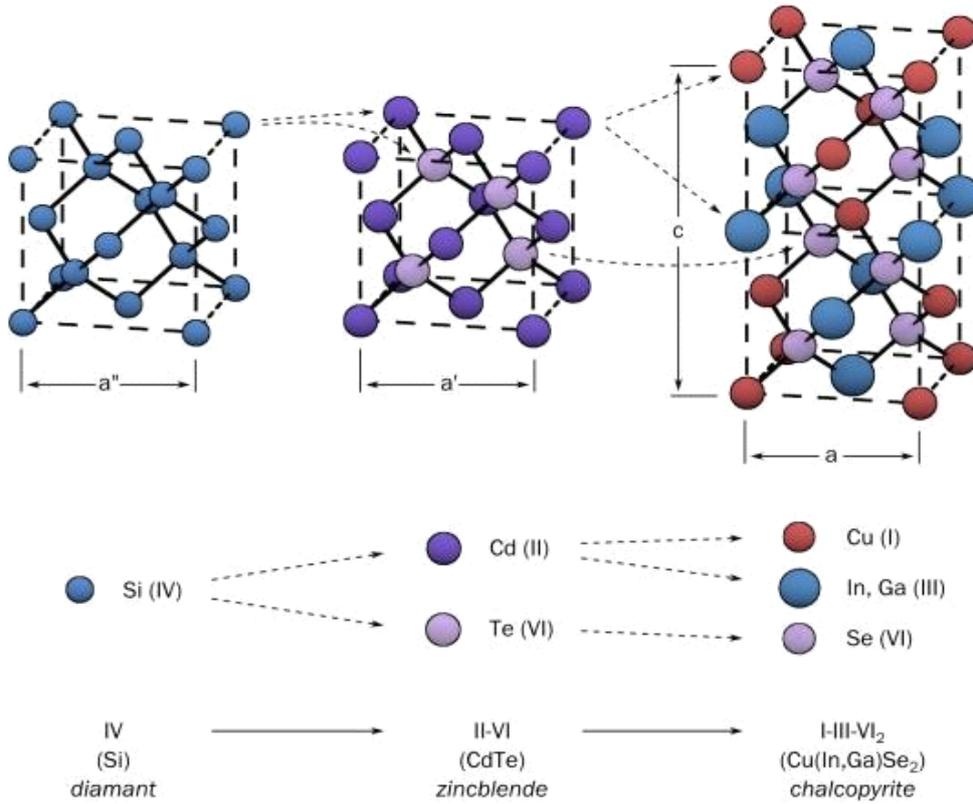


Figure 1.3 Comparaison des mailles élémentaires des structures cristallines du Si, du CdTe et du CIGS.

1.5.2 Propriétés électroniques

1.5.2.a Structure de bandes

Le CuInSe₂ et le CuGaSe₂ sont des matériaux semi-conducteurs possédant respectivement des gaps directs de 1.035eV et 1.68eV. Cette différence est majoritairement liée à une différence de minimum de la bande conduction (E_C). Comme nous l’avons vu précédemment, le CIGS est une solution solide de ces deux matériaux.

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

$$E_g = 1.035 + 0.65x - 0.264x(1-x) \dots\dots\dots \text{Eq1.1}$$

Le CIGS est donc un matériau dont E_g peut être ajusté entre 1.035eV et 1.68eV en fonction du taux de gallium. La valeur optimale d' E_g dépend de plusieurs facteurs. Du point de vue de l'absorption des photons, il est préférable d'avoir une valeur de E_g réduite, permettant d'absorber un spectre plus large (plus grandes longueurs d'onde). Il en résulte un courant plus important délivré par la cellule solaire (J_{sc}). Cependant, c'est la valeur de E_g qui détermine la tension maximale délivrée par la cellule. Afin de maximiser le rendement de conversion, il est donc nécessaire d'obtenir un compromis idéal entre courant et tension. La plupart des résultats expérimentaux publiés dans le domaine des cellules CIGS montrent que les meilleurs rendements sont obtenus avec un gap d'environ 1.2eV, ce qui correspond à un taux de Ga proche de 30% [6].

L'énergie de la bande interdite est liée à la longueur d'onde du photon par :

$$E_g (ev) = \frac{1.24}{\lambda(\mu m)} \dots\dots\dots Eq1.2$$

Où E_g est l'énergie de la bande interdite en électrons volts et λ est la longueur d'onde de la lumière en micromètres [7].

. 1.5.2.b Dopage

Le CIGS utilisé dans les cellules standard est de type p. Ce dopage est dû à la présence de défauts cristallins générant des états accepteurs (dopage intrinsèque). Dans le cas du CIGS, ces valeurs varient dans de faibles proportions en fonction du taux de Ga.

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

1.5.3 Propriétés optiques de CIGS

Si le CIGS est utilisable dans des dispositifs photovoltaïques en couches minces, c'est parce qu'il possède un gap direct. De ce fait, l'absorption des photons ayant une énergie proche du gap ne nécessite pas l'intervention de phonons et il en résulte un coefficient d'absorption optique α élevé (comparé à un semi-conducteur à gap indirect comme le

silicium). Pour une énergie de photon $h\nu$ donnée, le coefficient d'absorption vaut approximativement [8] :

$$\alpha(h\nu) = \frac{A}{h\nu} \sqrt{h\nu + E_g} \dots\dots\dots Eq1.3$$

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

La figure 1.4 compare le coefficient d'absorption optique du CIS (ce qui correspond au plus petit gap possible pour le CIGS, et donc la plage d'absorption maximale) à celui du Si en fonction de l'énergie des photons incidents. On remarque qu'il existe un écart d'un ordre de grandeur entre le Si et le CIS, ce qui montre l'intérêt de ce dernier pour une utilisation en couches minces. Ainsi, une couche de CIGS d'une épaisseur de 1 μm suffit à absorber 95% du spectre solaire pour les photons dont l'énergie est supérieure à E_g .

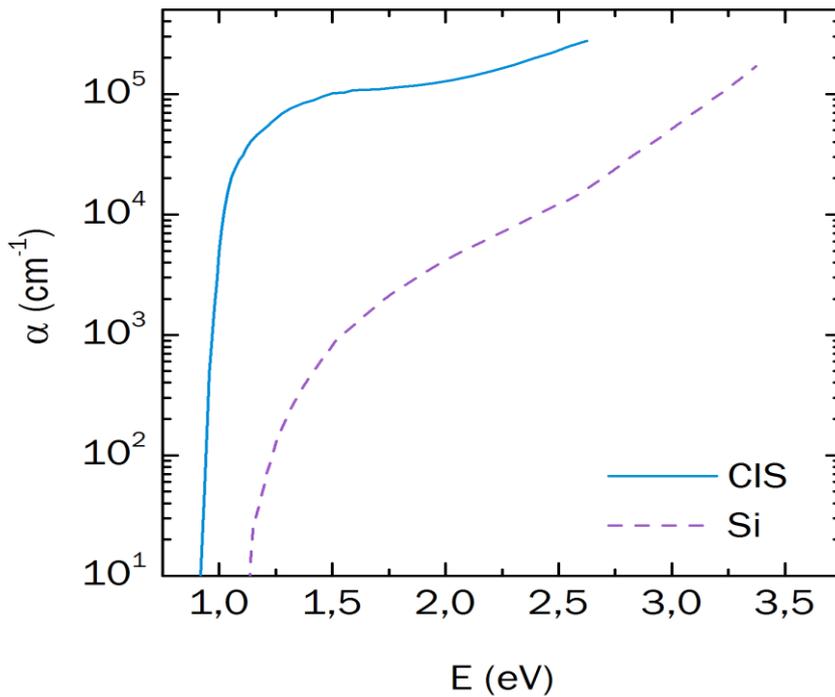


Figure 1.4 Coefficient d'absorption optique α en fonction de l'énergie E des photons incidents dans le CIS et le Si.

- **Constante optique (indice de réfraction)**

Les courbes de la figure (1.5) représentent l'indice de réfraction complexe, $\eta = n + ik$ (n : Indice réel), pour des échantillons pour $x = 0$ et $0,2$ (x étant la concentration en Ga dans le CIGS). L'indice de réfraction complexe (k) peut être utilisé pour calculer d'autres paramètres optiques comme le coefficient d'absorption [9] :

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda} \dots\dots\dots Eq1.4$$

Avec k : Indice imaginaire, λ : Longueur d'onde du photon.

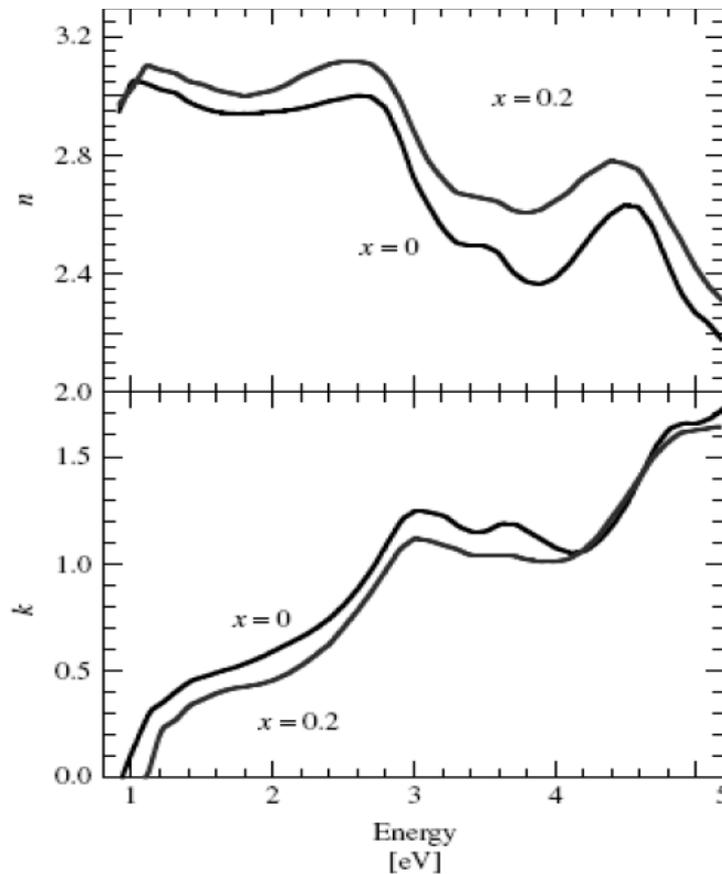


Figure 1.5 Représentation des indices de réfraction (réelle et imaginaire) en fonction de L'énergie pour le CIGS, avec $x=0$ et $x=0.2$ [10].

1.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté quelques généralités de base sur la physique des semi-conducteurs et quelques propriétés physiques du matériau CIGS utilisé dans la conception de la cellule solaire à étudier dans ce travail. Ces propriétés concernent les propriétés structurales, électroniques, électriques et optiques.

Cette étude nécessaire pour optimiser un dispositif à base de CIGS

Références de chapitre 1 :

- [1] <http://culturesciences.chimie.ens.fr/print/1764?print=yes&nid=1764>
- [2] Beghdadi souaad, *Etude des performances d'une cellule solaire de type Cu(In,Ga)Se₂ (CIGS)*, Université Abou Baker Belkaid Tlemcen, Année universitaire : 2015/2016
- [3] Boukaraba Mohamed et Zorrig Heythem, Effet de la couche buffer dans les cellules solaires Tandem à base de CIGS, Université Mohamed boudiaf M'sila, Année universitaire : 2016 /2017.
- [4] William N. Shafarman, Susanne Siebentritt, and Lars Stolt. Cu(InGa)Se₂ Solar Cells. In *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, année 2011.
- [5] M. Turcu, I. M. Kotschau, and U. Rau. Composition dependence of defect energies and band alignments in the Cu (In, Ga)(Se,S)₂ alloy system. *Journal of Applied Physics*, 91(3) :1391, 2002.
- [6] Charles Roger, développement de cellules photovoltaïques a base de CIGS sur substrats métalliques, thèse pour obtenir le grade de docteur de l'université de grenble , Submitted on 25 Mar 2014.
- [7] Kalache Salim, Etude par simulation numérique d'une cellule solaire en CIGS, Université Mohamed Khider Biskra, Année universitaire : 2016 / 2017.
- [8] Sunghun Jung, SeJin Ahn, Jae Ho Yun, Jihye Gwak, Donghwan Kim, and Kyunghoon Yoon. Effects of Ga contents on properties of CIGS thin films and solar cells fabricated by co-evaporation technique. *Current Applied Physics*, 10(4) :990–996, July 2010.
- [9] Boukarara Mohamed et Zorrig Heythem Effet de la couche buffer dans les cellules solaires Tandem à base de CIGS, Université Mohamed Boudiaf M'sila, Année universitaire : 2016 /2017.
- [10] A. Luque, S. Hegedus, *Handbook of photovoltaïque science and engineering*, Second Edition, John Wiley & Sons, Ltd, 2011.

Chapitre 2

Etude théorique des cellules solaires

2.1 Introduction

La conversion photovoltaïque est la transformation direct d'une énergie électromagnétique (rayonnement) en énergie électrique au moyen d'une cellule solaire, l'effet photovoltaïque a été utilisé au début des années cinquante dans les applications pour l'espace (alimentation des satellites) et ses premières utilisations au niveau de la terre est dans les années soixante-dix.

L'élément de base dans la conversion du rayonnement de la lumière est la cellule photovoltaïque. Plusieurs cellules sont associées dans un module.

Un ensemble de modules sont groupés en panneaux eux même associés pour former le champ photovoltaïque.

Les cellules solaires font actuellement l'objet de multiples recherches dans le but de réaliser le meilleur rapport entre le rendement énergétique et le prix de revient.

Dans ce chapitre, nous débuterons par donner les caractéristiques du rayonnement solaire et la description de la conversion photovoltaïque tout en étudiant les phénomènes physiques ayant lieu tels la génération des photoporteurs et leur recombinaison dans un semi-conducteur. Ensuite, nous décrivons le principe de fonctionnement et les caractéristiques des cellules solaires en général et les cellules solaires en CIGS en particulier.

2.2 Rayonnement solaire

2.2.1 Energie photovoltaïque

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

- **Le potentiel : énergie solaire disponible**

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

appelée masse d'air, est fonction de l'angle d'incidence θ du rayonnement par rapport au zénith. La masse d'air vaut :

$$AM = \frac{1}{\cos\theta} \quad \text{Eq2.1}$$

Avec θ est représenté dans la figure ci-dessous.

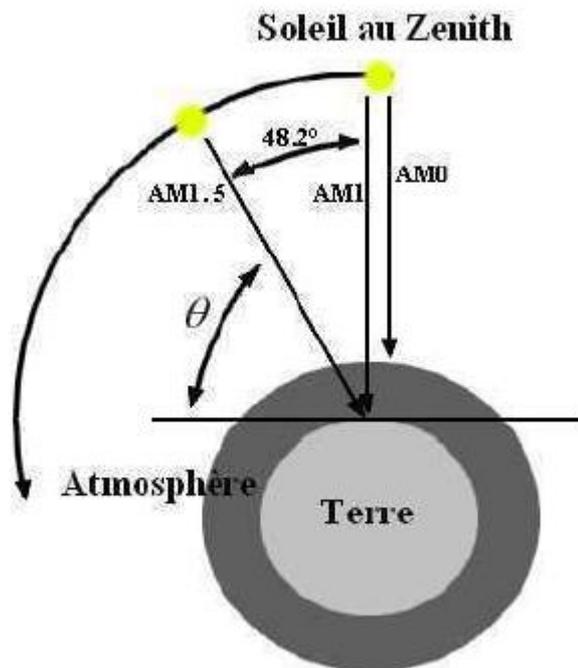


Figure 2.1 Différentes constantes d'illumination

Afin de standardiser les méthodes de mesure, un spectre a été défini comme référence Internationale. Il s'agit du spectre AM1.5G (Global), correspondant à une masse d'air de 1.5 et un angle θ de 48.2. Global signifie que le spectre tient compte du rayonnement direct ainsi que du rayonnement diffus. Les spectres extra-terrestres (AM0) et de référence avec masse d'air (AM1.5G) sont comparés dans la figure 2.2.

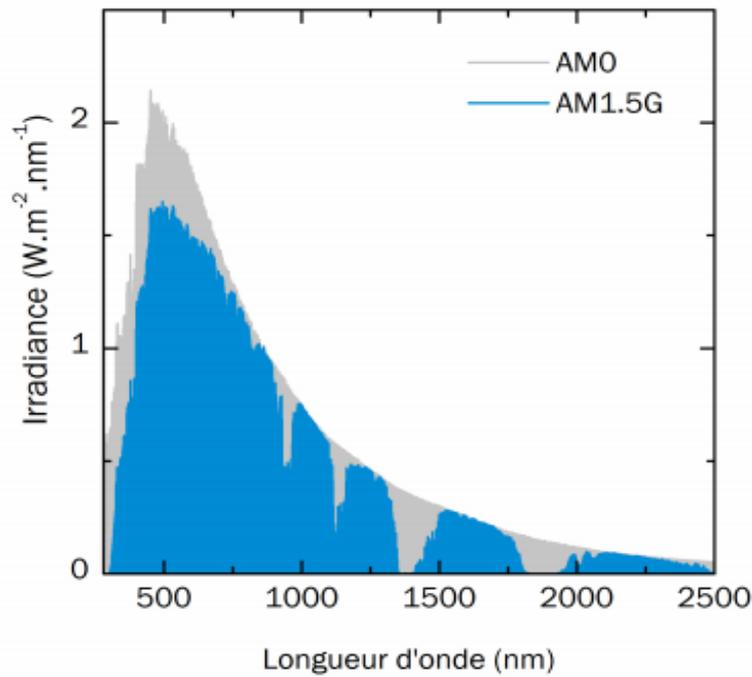


Figure 2.2 Spectres AM0 (extra-terrestre) et AM1.5G (référence terrestre) du rayonnement solaire. Ainsi, l’irradiance totale exploitable en surface de la Terre est réduite à environ 1000 W/m², sous forme de rayonnements dont la longueur d’onde s’étend de 280 nm à environ 2500 nm. [1]

- **Spectre solaire**

Le spectre solaire est la décomposition du rayonnement solaire en longueurs d'onde ou "couleurs". La lumière solaire est en effet composée de toutes sortes de rayonnement de couleurs différentes, caractérisées par leur gamme de longueur d'onde. Les photons, grains de lumière qui composent le rayonnement électromagnétique, sont porteurs d'une énergie qui est reliée à leur longueur d'onde par la relation [2] :

$$E = hv = \frac{hc}{\lambda} \dots\dots\dots Eq2.2$$

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 (2.3) [3].

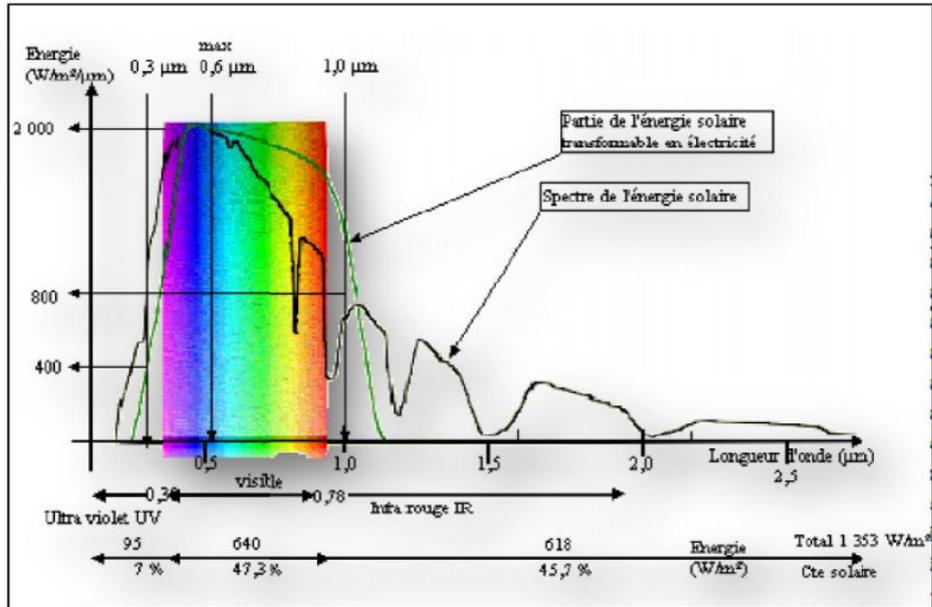


Figure 2.3 Spectre solaire [3].

- **Absorption du rayonnement solaire**

L'optimisation de l'efficacité de la conversion photovoltaïque se base sur le spectre solaire. En traversant les différentes couches de notre atmosphère, certaines longueurs d'onde sont atténuées, voire absorbées par certains composants tels que l'ozone (absorption des UV) ou les vapeurs d'eau (absorption des rayons infrarouges). La répartition du rayonnement solaire est représentée sur la figure (2.4).

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

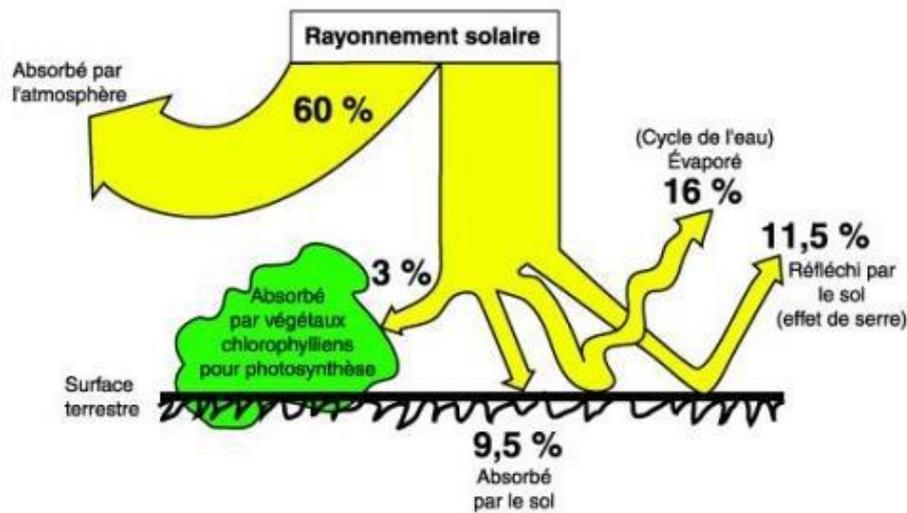


Figure 2.4 Présentation de l'absorption du rayonnement solaire depuis son émission jusqu'à son arrivée à la surface de la terre.

2.2.2 Conversion du rayonnement

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

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

2.2.3 Applications

En plus de son caractère renouvelable et écologique, l'énergie solaire photovoltaïque (PV) a pour intérêt d'être extrêmement modulable. En effet, il est possible de concevoir des centrales électriques PV de plusieurs centaines de MWc (méga-watts crête), tout comme des alimentations pour dispositifs autonomes en énergie, dont la surface peut descendre jusqu'à quelques cm^2 . Quelques exemples sont présentés dans la figure 2.5.

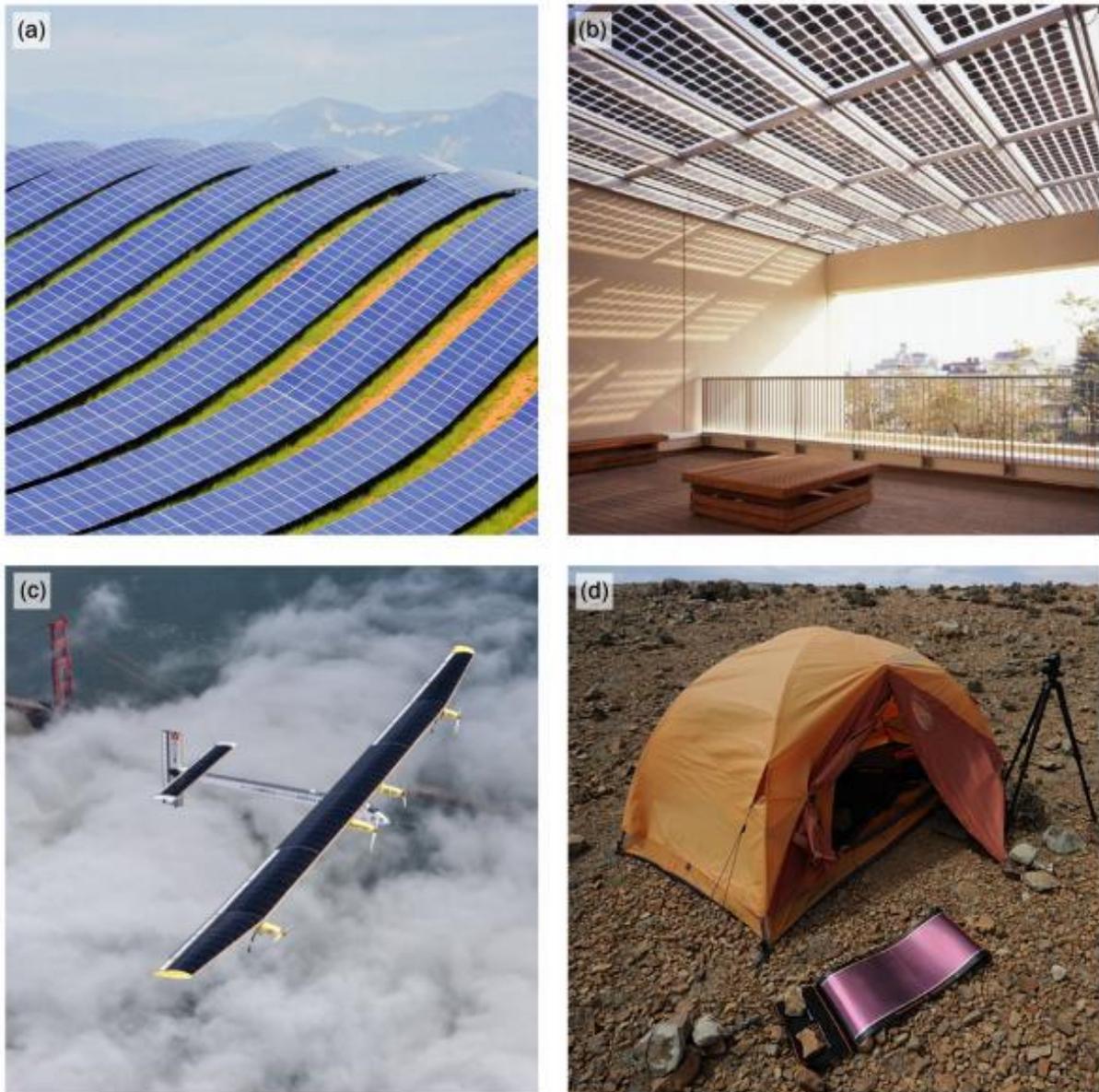


Figure 2.5 Exemples d'applications du PV, des grandes aux petites dimensions. a) Ferme solaire du plateau des Mées en France. Capacité de production : 31MWc. b) Exemple d'intégration au bâtiment (BIPV) avec des panneaux suntech. c) Avion 100% solaire du projet Solar Impulse. d) Chargeur solaire flexible d'appareils électroniques nomades.

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

source d'énergie autonome sont aujourd'hui fortement diversifiées. Cela inclut des objets de petite dimension ayant une faible consommation, tels que les chargeurs d'appareils électroniques nomades, les alarmes et autres capteurs, ou encore l'éclairage [5].

Mais le PV est aussi de plus en plus utilisé comme source d'énergie pour des objets plus grands, tels que les véhicules. Initialement utilisé comme énergie complémentaire pour les équipements électriques d'automobiles, de bateaux ou d'avions, son utilisation comme source principale a aussi été démontrée sur ces mêmes types d'appareils équipés de moteurs électriques. L'exemple le plus remarquable est le projet suisse Solar Impulse, au sein duquel un prototype d'avion solaire a pu voler durant un cycle complet jour/nuit sans autre source d'énergie. Le PV a aussi pour avantage de pouvoir être intégré directement aux bâtiments (Building integrated PhotoVoltaics, BIPV) afin de générer l'électricité directement sur place. Ainsi, il ne nécessite pas de surface supplémentaire. Enfin, l'utilisation du PV ne se limite pas au domaine terrestre. Son application initiale concernait l'alimentation de satellites et autres équipements du domaine spatial. Le photovoltaïque est particulièrement adapté à ce champ d'applications, aumône à l'encombrement et au poids limité et à la disponibilité de l'énergie solaire en dehors de l'atmosphère terrestre.

2.2.4 Principe de fonctionnement d'une cellule solaire

La production d'énergie photovoltaïque est basée sur les propriétés des matériaux semi-conducteurs. En effet, ces derniers sont capables d'absorber des photons dont l'énergie $E_{\text{photon}} = h\nu$ est supérieure à la largeur de bande interdite

$$E_g = E_c - E_v \dots \dots \dots \text{Eq2.3}$$

L'énergie du photon est absorbée par un électron de la bande de valence, qui est transféré dans la bande de conduction. Son absence dans la bande valence est modélisée par un trou, porteur de charge positive. L'absorption du photon génère ainsi une paire électron-trou.

La figure 2.6 montre les différentes interactions entre un photon et un semi-conducteur. Dans le cas où l'énergie du photon est supérieure à celle de la bande interdite du matériau, l'excès d'énergie est libéré par l'électron sous forme de phonons et donc de chaleur (thermalisation). Cependant, un matériau semi-conducteur seul ne permet pas de générer de courant électrique.

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

Afin de générer un courant, une jonction p-n est utilisée à la place d'un simple semi-conducteur.

Le champ électrique formé par cette jonction et présent dans la zone de déplétion (ou zone de charge d'espace, ZCE) sépare les électrons et les trous. Celui-ci conduit chaque type de porteur vers la zone où il est le porteur majoritaire (les électrons vers la zone n et les trous vers la zone p). La figure 2.7 présente un schéma d'une jonction p-n, ainsi que la courbe de la probabilité de collecte des porteurs en fonction de la position. On peut noter que la probabilité de collecte est maximale dans la zone de déplétion car le champ électrique sépare efficacement les paires électron-trou.

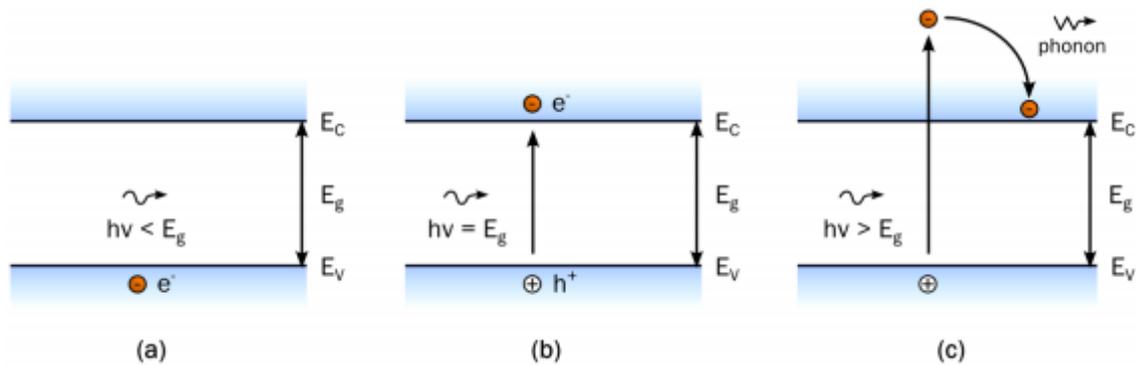


Figure 2.6 – a) Transmission d'un photon d'énergie $E_{\text{photon}} < E_g$ dans un matériau semi-conducteur.

b) Absorption d'un photon d'énergie $E_{\text{photon}} = E_g$ et formation d'une paire électron-trou. c) Absorption d'un photon d'énergie $E_{\text{photon}} > E_g$, formation d'une paire électron-trou et thermalisation de l'électron par émission de chaleur (phonon).

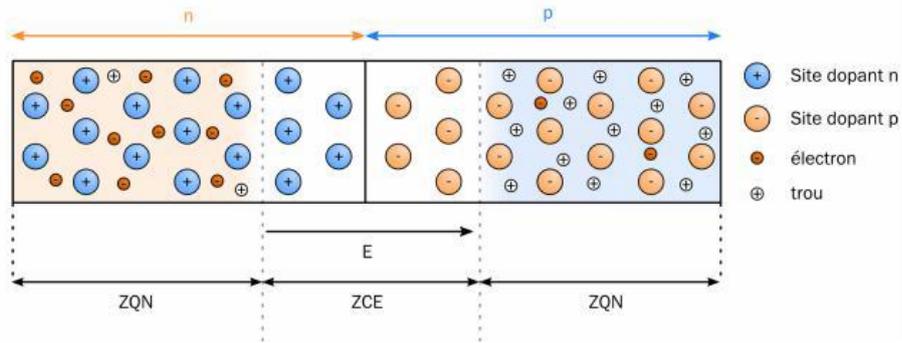


Figure 2.7 Schéma d'une jonction p-n représentant : la zone de charge d'espace (ZCE). Les zones quasi-neutres (ZQN), les différents porteurs de charge, les sites dopants et le champ électrique E.

Dans les zones quasi-neutres, c'est la diffusion qui permet aux porteurs de se déplacer. Ainsi, dans ces zones seuls les porteurs générés à une distance par rapport à la zone de charge d'espace qui est inférieure à leur longueur de diffusion pourront être collectés. Généralement, dans une cellule solaire seul l'un des deux composants de la jonction (p ou n) est utilisé comme matériau absorbeur de lumière. Les cellules photovoltaïques sont donc conçues avec une couche absorbeur beaucoup plus épaisse que l'autre couche formant la jonction. La structure de base d'une cellule solaire photovoltaïque est représentée dans la figure 2.8.

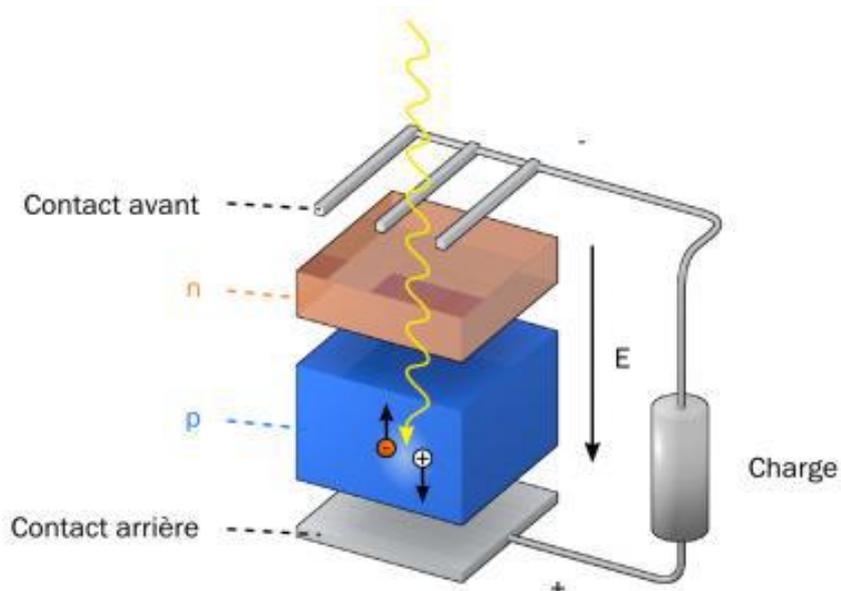


Figure 2.8 Structure de base d'une cellule solaire PV avec un absorbeur de type p, reliée à une charge

Afin de récolter les charges efficacement en minimisant le masquage, le contact avant est réalisé avec une grille métallique. Le contact arrière, quant à lui, occupe la totalité de la face arrière de la cellule. Selon les technologies employées, d'autres couches sont ajoutées à cette structure de base [6].

2.3 Génération de porteurs en excès par la lumière

Une radiation lumineuse rencontrant un semi-conducteur est absorbée suivant la loi de Lambert-Bouguer:

$$I(x) = I(1 - R)\exp(-\alpha x) = I_0 \exp(-\alpha x) \dots\dots\dots Eq2.4$$

Où I: le flux de photons (cm⁻²s⁻¹), x: profondeur d'absorption du faisceau dans le matériau à partir de la surface du semi-conducteur, R: coefficient de réflexion, représente la part de l'énergie lumineuse incidente I, réfléchi à la surface du matériau, α: coefficient d'absorption, traduit la probabilité d'absorption d'un photon par unité de longueur.

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.

Le calcul du taux de génération de paires électron-trou, G (x) (cm⁻³s⁻¹) s'effectue de la façon suivante. Appellant I₀, le flux de photons (cm⁻²s⁻¹) incidents sur la face éclairée du matériau et α (cm⁻¹) le coefficient d'absorption de la lumière par le matériau.

A la profondeur x, ce taux de generation vaut [7].

$$G(x) = \alpha(1 - R)I_0.\exp(-\alpha x)\dots\dots\dots Eq2.5$$

2.4 Mécanismes de recombinaison

La recombinaison est à l'opposé de la génération. Elle correspond aux mécanismes conduisant à la perte de paires électron-trou, avec l'énergie excédentaire émise sous forme de phonons ou de photons. Expérimentalement, elle correspond à une durée de vie des porteurs minoritaires incapable d'être mesurée. Celle-ci correspond au temps moyen au bout duquel un pair électron -trou générée se recombine. La valeur de ce paramètre peut être déterminée, permettant de définir les taux de recombinaison R_n pour les électrons, R_p pour les trous par :

$$R_{n,p} = \frac{\Delta_{n,p}}{\tau_{n,p}} \dots \dots \dots \text{Eq2.6}$$

Avec :

$\Delta n, p$: Densité des porteurs générés.

$\tau_{n,p}$: Durée de vie de ces porteurs.

L'interprétation de la durée de vie n'est pas simple car il existe différents mécanismes de recombinaison intervenant simultanément en surface et en volume d'un échantillon. On définit donc une durée de vie effective, qui tient compte de l'ensemble de ces mécanismes. En générale, la recombinaison peut être caractérisée comme suit :

- Recombinaison directe (de bande à bande).
- Recombinaison indirecte (de bande aux impuretés, avec l'aide de piège).
- Recombinaison Auger.
- Recombinaison de surface.

Ces processus sont présentés dans la figure (2.9).

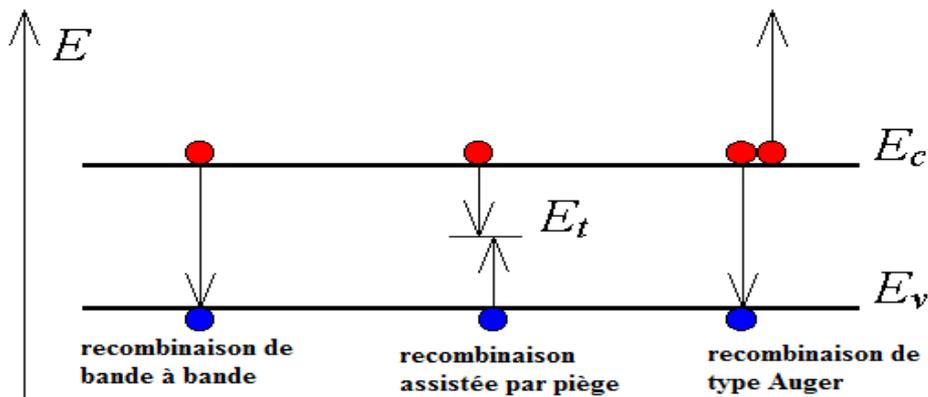


Figure 2.9 Types de recombinaison.

2.4.1 Recombinaison directe

La recombinaison directe est quand un électron dans la bande de conduction se combine avec un trou dans la bande de valence, sans variation d'énergie cinétique de l'électron. Ce type de recombinaison se produit dans les matériaux directs tels que le GaAs. Étant donné qu'aucune quantité de mouvement n'est nécessaire, le taux de recombinaison est le plus élevés. La durée de vie d'un porteur est l'inverse de son taux de recombinaison, par conséquent, cette durée de vie est très courtes [8].

2.4.2 Recombinaison indirecte

Recombinaison en volume de type RSH c'est une recombinaison assistée par un piège se produit lorsqu'un électron tombe dans un « piège », ou un niveau d'énergie au sein de la bande interdite résultant d'un défaut structural ou impuretés. Une fois que le piège est rempli, il ne peut accepter un autre électron. Les électrons occupant le piège, dans un deuxième temps, s'installent dans des états de la bande de valence vides, complétant ainsi le processus de recombinaison. On peut envisager ce processus comme une transition en deux étapes d'un électron de la bande de conduction à la bande de valence ou l'anéantissement de l'électron et le trou, qui se rencontrent dans le piège. Le modèle physique décrivant les recombinaisons en volume est basé sur le modèle de Read-Shokley-Hall à un seul niveau piège. Le taux de recombinaison par piège est donné par la relation :

$$R_{RSH} = \frac{pn - n_i^2}{\tau_n \left(p + n_{ie} e^{\frac{-E_T}{KT}} \right) + \tau_p \left(n + n_{ie} e^{\frac{-E_T}{KT}} \right)} \dots \dots \dots \text{Eq2.6}$$

Où :

E_T : L'énergie du niveau piège proche du milieu de la bande interdite.

τ_n et τ_p ont une valeur égale à 103 μ s.

n_{ie} : Concentration intrinsèque effective donnée par la relation suivante :

$$n_{ie}^2 = pn \cdot \exp\left(\frac{\Delta E_{g_n} + \Delta E_{g_p}}{KT}\right) \dots \dots \dots \text{Eq2.7}$$

Elle est due au rétrécissement de la bande interdite pour un semi-conducteur fortement dopé et $\Delta E_{g_n}, \Delta E_{g_p}$ présentent le rétrécissement de la bande interdite.

2.4.3 Recombinaison Auger

Nous avons une recombinaison de type Auger, lorsque l'énergie de l'électron qui se recombine dans la bande de valence est transférée sous forme d'énergie cinétique à un autre électron libre.

L'énergie transférée est libérée ensuite sous forme de phonons. ce mécanisme est prédominant pour les régions fortement dopées. Cette recombinaison nécessite trois particules : au moins un trou et un électron et la troisième peut être un trou ou un électron. Ce type de recombinaison est similaire à la recombinaison de bande à bande, mais la troisième particule reçoit l'énergie à partir de la recombinaison.

Le taux de recombinaison est donné par la relation :

$$R = (C_n n + C_p P)(pn - n_i^2) \dots\dots\dots \text{Eq2.8}$$

Avec C_n et C_p sont des coefficients d'Auger.

2.4.4 Recombinaison de surface

Recombinaison au niveau des surfaces et des interfaces peuvent avoir un impact significatif sur le comportement des dispositifs semi-conducteur. C'est parce que les surfaces est interface contient généralement un grand nombre de centres de recombinaison en raison de l'interruption soudaine du cristal semi-conducteur, ce qui laisse un grand nombre d'états électrique actives. en outre, les surfaces et les interfaces sont plus susceptibles de contenir des impuretés car elles sont exposées pendant le processus de fabrication du dispositif.

La recombinaison en surfaces avant et arrière inhérentes aux densités de dopages selon la relation suivant :

$$S = S_0 \left(\frac{N}{N_{set}} \right)^\alpha \dots\dots\dots \text{Eq2.9}$$

S_0 , N_{set} et α dépendent du traitement de la surface et de la passivation. Pour une oxydation thermique d'une couche de silicium de type N, α est de 1 et N_{set} est de 10^{18} cm^{-3} [8].

2.5 Caractéristique J(V)

La caractéristique J(V) de la cellule à l'obscurité et sous illumination est présentée sur la figure 2.10. On peut déduire les ordres de grandeur de la résistance série et de la résistance shunt. R_s est l'inverse de la pente de la partie linéaire passant par V_{co} et R_{sh} est l'inverse de la pente de la partie linéaire passant par J_{cc} . Le phénomène de transport des porteurs à travers une jonction p – n est assuré par deux courants : un courant de dérive qui doit son origine au champ électrique qui règne dans la zone de charge d'espace et le courant de diffusion, de sens contraire, qui provient du gradient de concentration des porteurs tout le long de la jonction. Sans aucune perturbation ou excitation extérieure, chaque courant annule en fait l'autre.

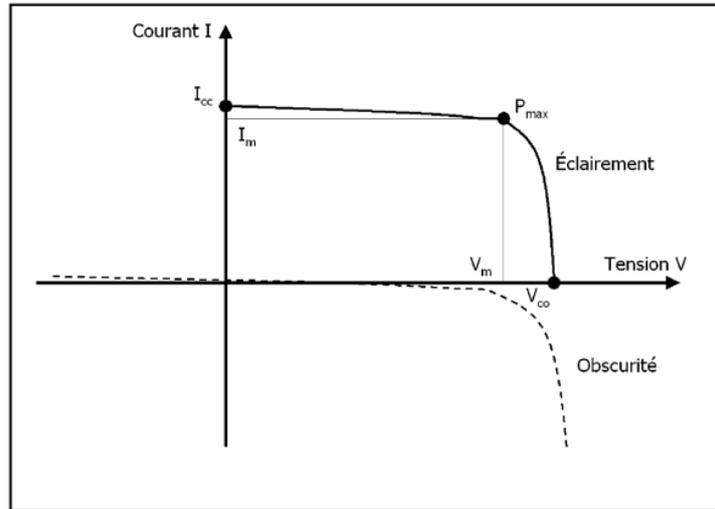


Figure2.10 Caractéristique rectangulaire d’une photopile à l’obscurité et sous illumination.

Sous une polarisation extérieure, la caractéristique $J(V)$ de la jonction est décrite par une solution analytique donnée par Shockley en 1949, connue comme étant l’équation de la diode idéale [11] :

$$J(V) = J_{set} \left[\exp\left(\frac{qV}{KT}\right) - 1 \right] \dots\dots\dots Eq2.10$$

J_{set} désigné la densité du courant de saturation qui dépend directement des propriétés des matériaux en questions, c'est-à-dire, des concentrations de porteurs minoritaires n_p et p_n et des coefficients de diffusion des électrons (D_n) et des trous (D_p).

$$J_{set} = \left(\frac{qD_p}{L_p} P_n + \frac{qD_n}{L_n} n_p \right) \dots\dots\dots Eq2.11$$

Dans le cas d’une jonction idéale, la résistance série R_s et la résistance shunt R_{sh} ne sont pas prises en considération.

Dans le cas réel, l’expression de densité de courant s’écrit :

$$j(v) = j_{set} \left[\exp\left(\frac{q(v + R_s I)}{nKT}\right) - 1 \right] + \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \dots\dots\dots Eq2.12$$

2.6 Paramètres des cellules photovoltaïques

Une cellule photovoltaïque est caractérisée par un rendement de conversion η , une tension a circuit ouvert V_{co} , un courant de court-circuit J_{cc} et un facteur de forme FF . Les caractéristiques courant-tension sont utilisées pour déterminer ces paramètres.

2.6.a Courant de court-circuit J_{cc}

Le courant de court-circuit exprime en mA, est le courant qui circule dans la cellule sous éclairage et sans application de tension (en prenant $V=0$ dans le schéma équivalent). Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et il dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs de charges et de la température.

2.6.b Tension à circuit ouvert V_{co}

La tension de circuit ouvert exprimée en millivolts, est mesurée lorsqu'aucun courant ne circule dans la cellule. Elle dépend de la différence des travaux de sortie des électrodes et de la résistance Shunt. Elle décroît avec la température et varie avec l'intensité lumineuse.

2.6.c Facteur de forme FF

Les valeurs V_{max} et I_{max} sont définies de telle sorte que le produit $|V_{max} \cdot I_{max}|$ soit maximal. Ce produit correspond à la puissance maximale P_{max} pouvant être délivrée par la cellule photovoltaïque. Ce point P_{max} est obtenu en modifiant la valeur de la résistance externe, quand l'aire du rectangle défini par les axes Ox , Oy et les droites $x=I_m$ et $y=V_m$ passe par un maximum.

Le nom facteur de forme (fill factor) dérive de la représentation graphique. Il est égal au rapport de la surface du rectangle P_{max} sur celle du rectangle dont les cotés mesurent V_{co} et I_{cc} . Il est défini par la relation suivante:

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{CO} \cdot J_{CC}} = \frac{V_m \cdot J_m}{V_{CO} \cdot J_{cc}} \dots \dots \dots Eq2.13$$

Plus ce paramètre n'est élevé, l'efficacité de conversion est meilleure. En dehors de ce point de fonctionnement P_m particulier, la diminution du courant par recombinaison intervient à des points de fonctionnement ayant V_x supérieur à V_m et des pertes par chauffage (effet joule) des résistances séries apparaissent dans le cas $I > I_m$.

2.6. d Le rendement η

Le rendement de conversion (efficiency) exprimé en pourcentage, désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente P_{inc}

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{FF \cdot J_{cc} \cdot V_{co}}{P_{inc}} \dots \dots \dots Eq2.14$$

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert.

2.6.e Le rendement quantique EQE

Le rendement quantique, noté EQE (external quantum efficiency), appelé aussi IPCE (incident photon to current conversion efficiency), est le rapport entre le nombre d'électrons dans le circuit externe et le nombre de photons incidents. Ce rendement ne prend pas en considération les photons réfléchis et transmis. Il est donné par la relation suivante :

$$EQE = \frac{J_{cc}(\lambda)}{\phi(\lambda)} \cdot \frac{E_{ph}(\lambda)}{e} = \frac{bc}{e} \cdot \frac{J_{cc}}{\phi(\lambda) \cdot \lambda} = 1.24 \cdot \frac{J_{cc}(\lambda)}{\phi(\lambda) \cdot \lambda} \dots \dots \dots Eq2.15$$

Où J_{cc} est la densité de courant de Court-circuit ($A \cdot cm^{-2}$), ϕ est l'éclairement reçu par l'échantillon ($w \cdot cm^{-2}$), λ est la longueur d'onde monochromatique (nm), h est la constante de Planck (J.s), c est la vitesse de la lumière (Jms^{-1}), e la charge électronique et E_{ph} l'énergie du photon.

Le rapport $J_{cc}(\lambda)/\phi(\lambda)$ est appelé réponse spectrale, noté $SR(\lambda)$. Cette dernière représente la sensibilité de la cellule pour chaque longueur d'onde. Elle est souvent utilisée dans le marché de l'électronique comme caractéristique des photodiodes. EQE peut s'écrire selon l'expression :

$$EQE = SR(\lambda) \cdot \frac{bc}{e\lambda} \dots \dots \dots Eq2.16$$

Le rendement quantique dépend du coefficient d'absorption des matériaux utilisés, de l'énergie d'ionisation, de la largeur de la zone de déplétion et de l'efficacité de collecte. Il est mesuré en fonction de la longueur d'onde émise par une source monochromatique. Le rendement de 100% dans le cas idéal (sans pertes) correspond à la récolte par les électrodes d'une paire électron-trou par photon incident. Des valeurs de 50% et 80% ont été reportées pour les matériaux organiques et inorganiques respectivement [12].

2.7 Cellule solaire à base de CIGS

Les cellules solaires en couche mince à base de CIGS sont constituées de plusieurs couches. L'empilement le plus couramment rencontré est représenté sur la Figure 2.11. Le substrat est une plaque de verre d'environ 3 mm d'épaisseur, sur lequel est déposée un contact métallique en molybdène (Mo) (de quelques centaines de nm à 1 μm). Sur ce substrat est déposée une

couche de 1,5 à 2,5 μm de Cu(In, Ga)Se_2 . Il s'agit du semi-conducteur de type P, appelé absorbeur, dans lequel les photons vont être absorbés et vont créer des paires électrons-trous. Cet absorbeur est recouvert d'un semi-conducteur de type N, une couche de 50 nm de sulfure de cadmium (CdS), qui assure la formation de l'hétérojonction. La couche fenêtre est constituée d'une couche de 80 nm d'oxyde de zinc intrinsèque (note ZnO (i)) et d'une couche de 400 nm d'oxyde de zinc dopé à l'aluminium (note ZnO : Al).

Les propriétés requises pour ces couches, les alternatives existantes, et les différents moyens de dépôt sont décrits dans les paragraphes suivants :

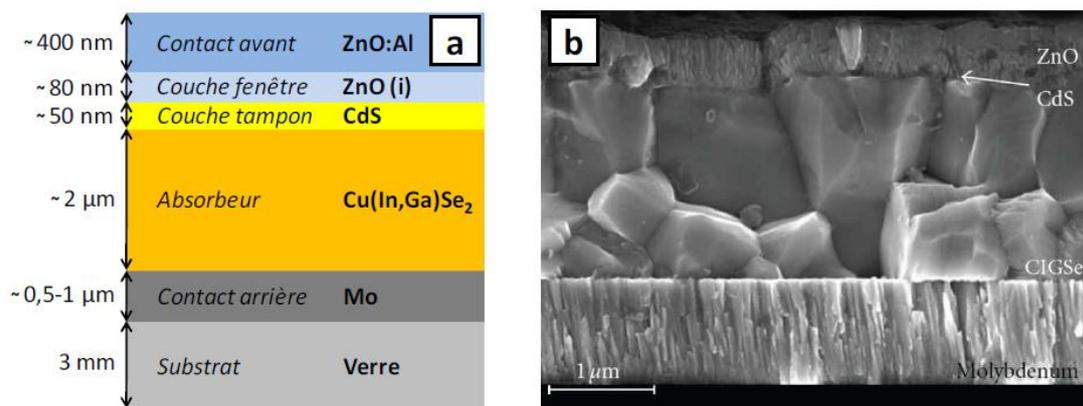


Figure 2.11 Structure d'une cellule solaire à base de CIGS. (a) Schéma de l'empilement des différentes couches ; (b) Image MEB de la tranche d'une cellule (modifiée à partir de [13]).

2.7.1 Le substrat

Le substrat est le support permettant la tenue mécanique des différentes couches, dont l'empilement ne dépasse pas quelques micromètres d'épaisseur. Il doit répondre à différents critères chimiques et mécaniques, qui le rendent apte à suivre toutes les étapes de fabrication de la cellule, sans en détériorer la qualité, tout en ayant un coût limité. Parmi les critères retenus, on citera notamment les suivants : sa rigidité, son coefficient de dilatation (qui doit être proche de celui du CIGS), sa température maximale d'utilisation (qui doit être adaptée au procédé), son inertie chimique, son état de surface qui doit être parfaitement lisse. Il existe trois catégories de substrat : le verre, les métaux, et les polymères.

Le substrat le plus couramment utilisé est le verre sodocalcique, qui présente toutes les propriétés requises. Il contient notamment du sodium, qui diffuse vers le CIGS lors de l'étape de recuit. Son effet bénéfique sur le fonctionnement de la cellule a été démontré par de nombreux auteurs. Les inconvénients rencontrés avec ce substrat sont liés à sa fragilité et sa

tenue en température limitée par sa faible température de transition vitreuse (entre 550 et $600^{\circ}C$), mais également son coût et son poids élevés. L'utilisation d'un verre borosilicate permet de travailler à des températures plus élevées, mais son coefficient de dilatation plus faible est moins adapté au CIGS, et l'effet bénéfique du sodium est perdu. Celui-ci peut néanmoins être introduit par d'autres méthodes.

De nombreux substrats métalliques sont également utilisés. Ils ont l'avantage de bien résister aux températures rencontrées lors de la synthèse du CIGS, sont plus légers que le verre, et leur caractère souple permet de les utiliser dans des procédés « **roll-to-roll** » durant lequel le substrat est déroulé au fur et à mesure du procédé de fabrication et les différentes étapes sont réalisées en continu.

Les substrats métalliques utilisés peuvent être l'acier inoxydable, l'aluminium Al, le titane Ti, ou le cuivre Cu. Les meilleurs rendements obtenus pour ces substrats sont de 17,7 % sur de l'acier inoxydable et 16,2 % sur du titane pour un procédé de Co évaporation, 17,1% sur de l'aluminium pour un procédé d'impression. L'utilisation de tels substrats nécessite le plus souvent le dépôt d'une couche barrière de façon à éviter la diffusion des atomes métalliques dans le CIGS lors de l'étape de traitement thermique, ce qui peut détériorer le rendement des cellules.

Les couches barrières les plus couramment utilisées sont l'alumine Al_2O_3 , la silice SiO_2 , et le nitrure de silicium Si_3N_4 , mais elles peuvent aussi être à base de ZnO. Notons que cette couche barrière peut également être utilisée sur du verre sodocalcique afin de contrôler exactement la quantité de sodium dans le CIGS, en empêchant sa diffusion du verre et en l'introduisant lors de la synthèse du CIGS par un autre intermédiaire, tel que NaF.

Une alternative aux substrats métalliques réside dans certains polymères résistants à la température, comme les polyamides. Ils ont l'avantage d'être légers et flexibles, et ne nécessitent pas le dépôt de couche barrière.

Néanmoins, la température maximale pouvant être appliquée sur ce type de substrat n'excède pas ($450^{\circ}C$ et $550^{\circ}C$) pour un procédé normal de synthèse du CIGS. Le dépôt de la couche de Mo, qui induit des contraintes mécaniques sur les substrats, tend à couvrir ces substrats souples, mais ce problème peut être contourné en déposant une couche de matériau (Comme du titane ou du molybdène) sur la face arrière.

La limitation de la température de procédé a longtemps été considérée comme un frein pour une croissance optimale du CIGS, étant notamment à l'origine de la formation de petits grains,

mais un rendement de 18,7 % obtenu par Chirilă *et AL.* a démontré que ce facteur n'était pas limitant.

2.7.2 Le contact métallique arrière

Le contact métallique arrière doit, comme le substrat, répondre à différents critères chimiques, mécaniques et économiques. Il doit notamment être un bon conducteur électrique, ne pas réagir avec le CIGS ou y diffuser, résister aux températures élevées rencontrées lors du procédé de fabrication du CIGS (de l'ordre de 550 à 600⁰c). De nombreux métaux ont été étudiés, comme le tungstène W, le molybdène Mo, le chrome Cr, le tantale Ta, le niobium Nb, le vanadium V, le manganèse Mn dans la référence, l'or Au, l'aluminium Al et l'argent Ag et le cuivre Cu dans la référence. Ti, Mn, Cr et V réagissent très fortement avec le sélénium, tandis que Ag diffuse dans le CIGS, Al s'oxyde et ne conduit pas assez, Cu réagit partiellement avec le CIGS et ne produit pas un contact ohmique dans la référence. L'or produit un contact satisfaisant, mais n'est pas économiquement intéressant. Les piles incluant des contacts arrière en Mo, W, Ta, Nb ont donné des rendements comparables et ces métaux pourraient être utilisés comme contact arrière.

Finalement, le matériau communément utilisé par les laboratoires de recherche et en industrie est le Mo.

Le molybdène est déposé par pulvérisation cathodique sur le verre. Les deux modes de dépôts les plus couramment utilisés sont le dépôt par radiofréquence (RF) et par magnétron (DC) sous atmosphère d'argon. À l'IRDEP, le Mo est déposé par magnétron. Afin d'allier adhérence et conductivité, une procédure de dépôt en deux étapes est appliquée. Une première couche adhésive est d'abord déposée sous haute pression d'argon, puis une deuxième couche peu résistive est déposée à basse pression.

Le molybdène est le siège de diffusion d'éléments qui proviennent à la fois du substrat : sodium Na lorsque le substrat est du verre sodo-calcique et de l'absorbeur CIGS : sélénium Se et gallium Ga. La concentration en Na dans le molybdène est plus importante dans la partie arrière du molybdène (partie en contact avec le verre), mais il est également présent dans l'absorbeur, montrant ainsi sa diffusion sur toute l'épaisseur du molybdène [14].

Le sodium se trouve principalement au niveau des joints de grains et ne diffuse pas de façon significative dans les grains eux-mêmes.

De plus, il a été montré que les oxydes de molybdène présents au niveau des joints de grains sont responsables de la diffusion du sodium dans le Mo. Le gallium diffuse de façon

importante dans le molybdène, mais l'éventuel composé formé lors de cette diffusion reste à déterminer.

La diffusion du sélénium, quant à elle, ne se fait pas sur toute l'épaisseur du molybdène : ces deux composés forment une couche de MoSe_2 limitée à l'interface Mo/CIGS.

La couche de MoSe_2 qui se forme à l'arrière de la cellule permettrait une meilleure adhésion de la couche de Mo sur le verre. Elle serait également responsable d'un bon contact ohmique (faible résistivité) à l'interface Mo/CIGS. Dans le cas d'une couche de CIGS déposée par coévaporation, l'épaisseur de MoSe_2 est de 10 nm, mais elle peut atteindre plusieurs centaines de nanomètres d'épaisseur dans des conditions de recuit mal contrôlées. Le gap du MoSe_2 est de 1,4 eV, il est plus élevé que celui du CIGS et permet de diminuer les recombinaisons à l'interface de ces deux couches.

2.7.3 L'absorbeur

L'absorbeur est la partie de la cellule dans laquelle les photons vont être convertis en paire électrons-trous. Dans le cas présent, il s'agit d'un semi-conducteur de type P de la famille I-III-VI, dont les différentes variantes déjà étudiées conduisent à la formule générale suivante : $(\text{Cu,Ag})(\text{In,Ga,Al})(\text{Se,S,Te})_2$.

La substitution du Cu par de l'argent, de l'indium par du gallium ou de l'aluminium, du sélénium par du soufre ou du tellure, permet de modifier les propriétés du matériau comme sa largeur de bande interdite. Les composés les plus développés en recherche et en industrie sont le $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ et le $\text{Cu}(\text{In,Ga})(\text{Se,S})_2$.

2.7.4 La couche tampon

La couche tampon est un semi-conducteur de type N, dont le gap doit être supérieur à celui de l'absorbeur.

Son épaisseur avoisine les 50 nm. Deux rôles lui sont majoritairement attribués : un rôle électrique, et un rôle de couche protectrice. Du point de vue électrique, la couche tampon permet entre autre d'optimiser l'alignement des bandes entre le CIGS et la couche fenêtre et de limiter les recombinaisons des porteurs à l'interface de ces deux couches. Elle permet également de protéger la surface de l'absorbeur lors du dépôt par pulvérisation cathodique de la couche de ZnO , qui peut engendrer la formation de défauts à la surface du CIGS.

Plusieurs semi-conducteurs de type N ont été utilisés comme couche tampon, mais le plus couramment utilisé est le CdS déposé par bain chimique (CBD), qui a conduit jusqu'ici aux meilleurs rendements.

Néanmoins, sa faible largeur de bande interdite, égale à 2,4 eV, engendre des pertes optiques pour les longueurs d'ondes inférieures à 500 nm. Pour cette raison, et en plus des contraintes liées à son utilisation (le Cd est un métal lourd, très polluant et dont l'utilisation est très réglementée), de nombreuses études sont menées pour substituer le CdS par d'autres matériaux.

Parmi eux, on peut citer In_2S_3 , In(OH,S), Zn(O,OH), ZnS, ou ZnSe.

Plusieurs procédés sont possibles pour déposer ces couches. Ceux-ci sont adaptés au procédé utilisé pour la synthèse du CIGS. Les techniques sous vide sont préférées pour les dépôts de Cu(In,Ga)Se₂ réalisés sous vide, ce qui permet de réaliser toutes les étapes successivement sans interrompre la chaîne du vide.

Néanmoins, il semblerait que les meilleurs rendements soient obtenus pour les méthodes de dépôt chimiques (Chemical Bath Deposition (CBD), Atomic Layer Deposition (ALD), Ion Layer Reaction (ILGAR)), comparées aux méthodes de dépôt physiques (évaporation, pulvérisation cathodique).

2.7.5 La couche fenêtre

La couche fenêtre doit être à la fois conductrice et transparente, de façon à collecter les électrons tout en laissant passer la lumière. Cette couche est constituée d'oxyde transparent conducteur (TCO), sur lequel une fine grille métallique (Ni-Al) est déposée, de façon à réduire la résistance série de la couche fenêtre.

Le TCO généralement utilisé est l'oxyde de zinc (ZnO), mais l'oxyde d'indium dopé à l'étain (ITO) peut également être rencontré.

Cette couche fenêtre est constituée de deux couches, l'une fine (50 à 100 nm) et très résistive, l'autre épaisse (100 à 1500 nm) et peu résistive.

La première couche est le plus souvent constituée de ZnO intrinsèque, dont la haute résistivité permettrait de réduire les courants de courts-circuits entre les deux électrodes de la cellule (le molybdène et la couche de TCO de faible résistivité). La couche conductrice est fréquemment du ZnO dopé à l'aluminium (ZnO : Al), mais d'autres dopants comme le bore (ZnO : B) ou le gallium (ZnO : Ga) existent aussi.

L'épaisseur et le dopage de cette couche sont ajustés de façon à combiner transparence et conductivité.

La pulvérisation cathodique (ou sputtering) est très courante dans l'élaboration des cellules solaires, en raison de la maîtrise et la rapidité de cette technique.

D'autres alternatives existent comme les dépôts par CBD, MOCVD, ALD ou ILGAR. Ces techniques ont l'avantage d'être moins agressives, et sont adaptées à la fabrication de cellules sans couche tampon. L'IRDEP a également développé un procédé de dépôt de ZnO dopé au chlore par électrolyse, montrant des résultats similaires au dépôt par pulvérisation cathodique [15].

2.8 Contenu de Ga dans la cellule solaire en CIGS

Le rendement d'une cellule solaire est déterminé à partir de la caractéristique J-V de la cellule solaire ainsi la tension en circuit ouvert, le courant de court-circuit et le facteur de forme qui constituent les facteurs de qualité de la cellule solaire. Une augmentation de la bande interdite de l'absorbeur en augmentant ainsi le contenu de Ga dans $x = \text{Ga} / (\text{In} + \text{Ga})$, conduit à une augmentation proportionnelle de V_{co} . L'accroissement de la bande interdite entraîne une augmentation de la tension en circuit ouvert et du facteur de forme.

La réponse spectrale d'une cellule solaire en CIGS avec la variation de la composition Ga est montrée sur la figure 2.12. La réduction des performances avec une augmentation de la composition de Ga peut se justifier du fait de l'augmentation de la bande interdite de l'absorbeur et il y'aura moins de la contribution de photons, qui pénètrent plus profondément et générant le photo-courant.

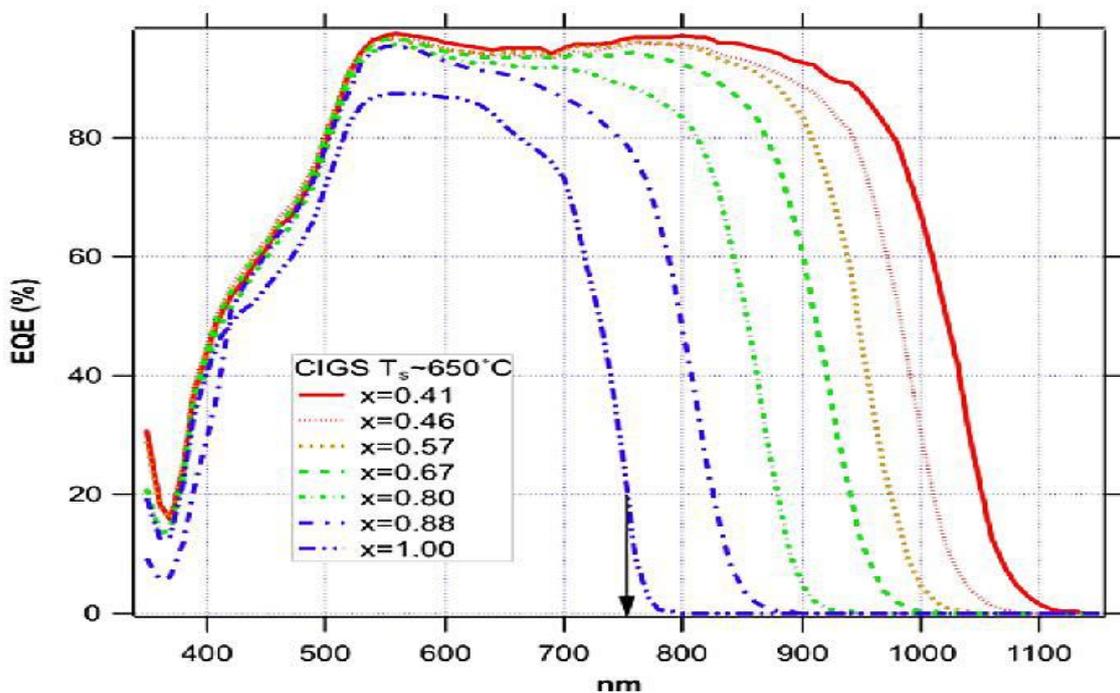


Figure 2.12 Réponse spectrale d'une cellule en CIGS pour différentes proportions x de Ga.

Des exemples de caractéristiques J-V pour trois bandes interdites différentes sont représentés sur la figure 2.13. On remarque que plus la bande interdite augmente, la tension en circuit ouvert augmente aussi contrairement au courant de court-circuit qui diminue.

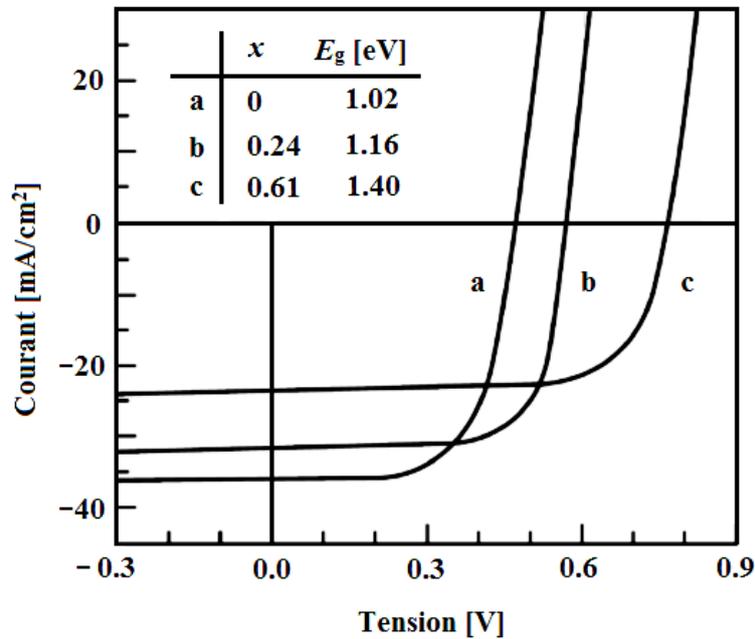


Figure 2.13 caractéristiques J-V pour trois bandes interdites différentes [7]

2.9 Conclusion

Dans le présent chapitre, nous avons présenté les bases fondamentales à la compréhension de la cellule solaire. Nous avons rappelé quelques notions sur le rayonnement solaire, et son application dans le domaine photovoltaïque.

Nous avons ensuite expliqué le fonctionnement des cellules photovoltaïques et leurs caractéristiques principales ainsi que les paramètres qui influent sur leurs caractéristiques. Puis nous avons présenté la structure et quelques notions sur les cellules solaires à base de CIGS.

Références de chapitre2

- [1] Martin A Green, Keith Emery, Yoshihiro Hishikawa, Wilhelm Warta, and Ewan D Dunlop. Solar cell efficiency tables (version 41). Progress in Photovoltaics : Research and Applications, 21(1) :1–11, January 2013.
- [2] William N. Shafarman, Susanne Siebentritt, and Lars Stolt. Cu(InGa)Se₂ SolarCells. In Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, page 546. 2011.
- [3] Solar Energy Perspectives. International Energy Agency, 2011.
- [4] M. Agrawal, C. Bolman, S. Carnahan, B. Merewitz, G. Phipps, M. Rogol, S. Willhaus, and T. Xu, “Solar Annual 2012: The Next Wave.” Photon Consulting, 2012.
- [5] M. Bouafia & L.Deblaoui, « Modélisation et simulation d’une cellule solaire en couche mince à base de diséléniure de Cuivre, d’Indium et de Gallium (CIGS) », diplôme de Master professionnel, 2012, Université de Ouargla.
- [6] Beghdadi souaad Etude des performances d’une cellule solaire de type Cu(In,Ga)Se₂ (CIGS) Université Abou Baker Belkaid Tlemcen Année universitaire : 2015/2016.
- [7] Kalache Salim étude par simulation numérique d'une cellule solaire en CIGS, Université Mohamed Khider Biskra Année universitaire : 2016 / 2017.GS
- [8] Hasni Hadjèr Caractérisation Automatisée d’une cellule solaire. Université Med Khider Biskra, Année Universitaire : 2013/2014
- [9] M.Grau, ”Réalisation des nouvelles structures cellules solaire photovoltaïque à partir de couche minces de silicium cristallin sur substrat de silicium préparé par frittage de poudres”, Thèse Doctorat, L’institut national des sciences appliquées-Lyon, 2012.
- [10] D .Kohen,“Etude des nanofils de silicium et de leur intégration dans des systèmes de récupération d’énergie photovoltaïques’ ’Thèse Doctorat, Université Gratian-politane,2012.

[11] M. Bouchama Idris Contribution à l'amélioration des performances des cellules solaires $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$. Université Ferhat abbas Setif. Soutenue le 02/01/2012.

[12] Mme DIB Wassila modelition des structure photovoltaïque : aspects fondamentaux et appliqués. Université Abou Baker Belkaid Tlemcen Année Universitaire : 2010/2011.

[13] U. P. Singh and S. P. Patra, "Progress in Polycrystalline Thin-Film $\text{Cu}(\text{In},\text{Ga})\text{Se}_2$ Solar Cells," 2010.

[14] L. Weinhardt, M. Blum, M. Bar, C. Heske, O. Fuchs, E. Umbach, J. D. Denlinger, K. Ramanathan, and R. Noufi, "Chemical properties of the $\text{Cu}(\text{In},\text{Ga})\text{Se}_2/\text{Mo}/\text{glass}$ interfaces in thin film solar cells," *Thin Solid Films*, vol. 515, no. 15, pp. 6119–6122, Mai 2007.

[15] Aurelien ducharlet Synthèse de couches minces de $\text{Cu}(\text{In},\text{Ga})\text{Se}_2$ pour cellules solaires par électrodépôt d'oxydes mixtes de cuivre-indium-gallium. Université des Sciences et Technologies de Lille.

Chapitre 3

Simulation numérique de la cellule solaire en CIGS par Atlas-Silvaco

3. 1 Introduction

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

3.2 Présentation de SILVACO-ATLAS

La capacité à simuler avec précision un dispositif semi-conducteur est cruciale pour l'industrie et milieux de recherche. L'outil de simulation ATLAS est spécialement conçu pour la modélisation 2D et 3D de composants basés sur la physique des semi-conducteurs, en incluant les propriétés électriques, optiques et thermiques. Il possède une bibliothèque regroupant des matériaux prédéfinis comme il permet à l'utilisateur de définir d'autres matériaux propre à leur choix. Il est capable de prédire les caractéristiques électriques de la plupart des composants semi-conducteurs en régime (DC), (AC), transitoire ou fréquentiel. En plus du comportement électrique "externe", il fournit des informations sur la distribution interne de variables telles que les concentrations des porteurs, les lignes de courant, le champ électrique ou le potentiel, et des données importantes pour la conception et l'optimisation des procédés technologiques. Ceci est réalisé en résolvant numériquement l'équation de Poisson et les équations de continuité des électrons et des trous en deux dimensions en un nombre fini de points formant le maillage de la structure définie par l'utilisateur ou par le programme[1].

Ce simulateur est composé de deux parties :

- Une partie de traitement numérique (méthode d'intégration, de discrétisation...),
- Une partie formée des modèles physiques des composants semi-conducteurs les plus récents : Modèles de recombinaisons, d'ionisation par impact, de mobilités, en température et statistiques de Fermi-Dirac et de Boltzmann notamment.

ATLAS a été conçu de façon à pouvoir utiliser d'autres outils qui facilitent son utilisation. Ces Outils sont les suivants :

- DEVEDIT: environnement où sont dessinés la structure (dimension, dopage, ...) et son maillage.
- DECKBUILD: environnement où est défini le programme de simulation. La structure et son maillage peuvent également être définis dans Deckbuild.

- TONYPLOT: environnement où sont visualisés les résultats des simulations (structure du composant, distributions de grandeurs diverses dans celui-ci, caractéristiques électriques...) [2].
- MASKVIEW: éditeur de layout.
- OPTIMIZER : optimise les paramètres de la structure de façon à obtenir en final la valeur du paramètre que nous lui avons défini au préalable [3]. La figure 3.1 groupe les entrées et sorties de Silvaco-Atlas.

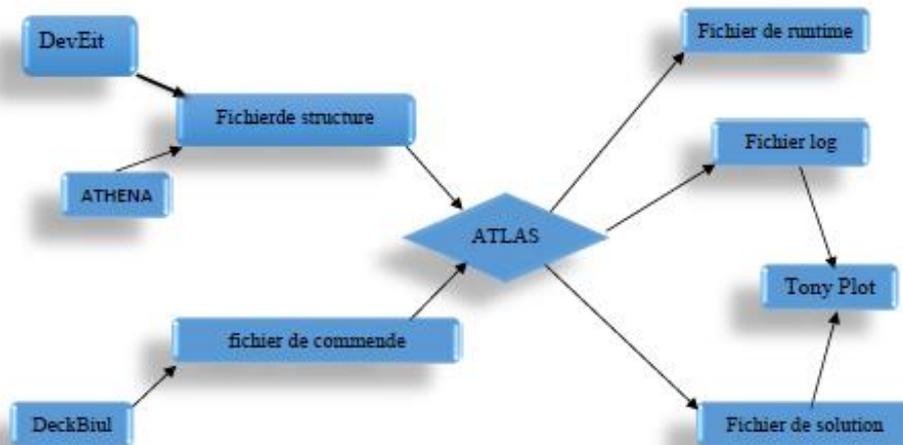


Figure 3.1 : Entrées et sorties d'Atlas [4].

La plupart des simulations sur ATLAS utilisent deux entrées : un fichier texte qui contient des commandes pour ATLAS à exécuter et un fichier de structure qui définit la structure qui sera simulée. ATLAS produit trois types de fichiers de sortie. La sortie d'exécution (Runtime) fournit un guide pour le progrès des simulations en cours d'exécution, et c'est là que les messages d'erreur et les messages d'avertissement apparaissent. Les fichiers Log (Log-files) stockent toutes les tensions et courants calculés de l'analyse de dispositif, et les fichiers de solution (Solution files) stockent les données relatives aux variables de solution à l'intérieur du dispositif.

3.3 Groupes de Commande d'ATLAS

L'ordre dans lequel les déclarations se produisent dans un fichier d'entrée d'ATLAS est important. Il y a cinq groupes de déclarations, et ceux-ci doivent se produire dans l'ordre correct. Ces groupes sont indiqués dans le tableau 3.1.

Chaque fichier d'entrée doit contenir ces cinq groupes en ordre. Sinon, cela entraînera généralement un message d'erreur et la fin du programme, mais il pourrait également conduire à un mauvais fonctionnement du programme. Par exemple, les paramètres matériels ou modèles

figurant dans le mauvais ordre ne peuvent pas être utilisés dans les calculs. L'ordre des déclarations dans la définition du maillage, la définition structurelle, et les groupes de la solution est également important.

Group	Statements
1. Structure spécification	MESH REGION ELECTRODE DOPING
2. Material models spécification	MATERIAL MODELS CONTACT INTERFACE
3. Numerical méthode selction	METHOD
4. Solution spécification	LOG SOLVE LOAD SAVE
5. Résultats analysis	EXTRACT TONYPLOT

Tableau 3.1 Groupes de Commande SILVACO-ATLAS [3].

Pour définir la cellule solaire à étudier par le logiciel Atlas Silvaco, nous avons suivi les étapes suivantes :

"Mesh" (maillage)

Le maillage est une grille qui recouvre la zone physique dans lequel le dispositif est construit et simulé. Le maillage est simplement réalisé par une série de lignes horizontales et verticales définies par l'utilisateur avec un espacement entre eux.

Le maillage joue un rôle important pour l'obtention de bons résultats de simulation. Celui-ci doit être fait avec la plus grande attention pour garantir la fiabilité des résultats. Le choix de maillage doit être fait de façon à avoir un compromis entre la vitesse d'exécution et l'exactitude des résultats.

Le maillage créé dans ATLAS de notre cellule solaire est illustré dans la figure 3.2.

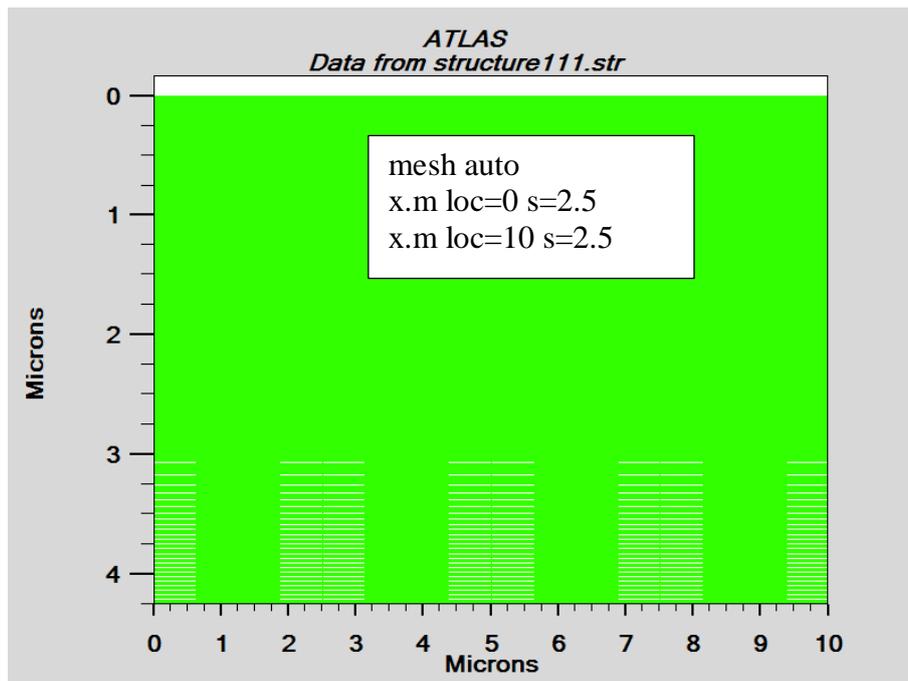


Figure 3.2 Le maillage de la cellule solaire dans Atlas.

"Régions"

Tous les domaines maillés d'une structure doivent être assignés à une région et les régions doivent être ordonnées de la plus basse vers la plus élevée. Par exemple, la région 5 ne peut pas être définie avant la région 4.

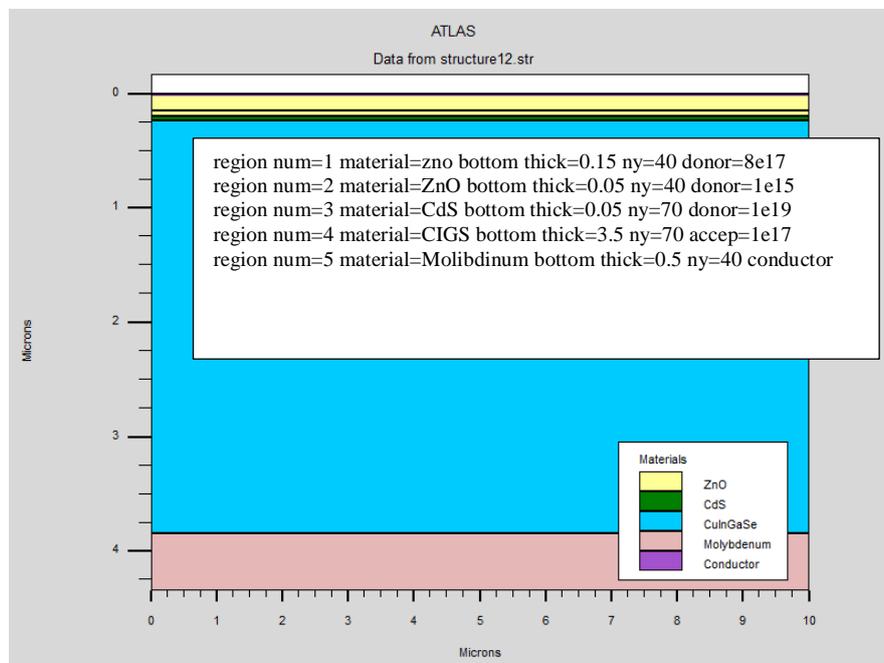


Figure 3.3 Structure avec régions et matériaux définis.

"Electrode"

Dans la figure 3.4, la déclaration des électrodes est définie pour l'anode et la cathode. A noter que la cathode est définie par le matériau ZnO avec la localisation par y.min et y.max. L'anode est définie avec le matériau molybdène localisé par y.min et y.max.

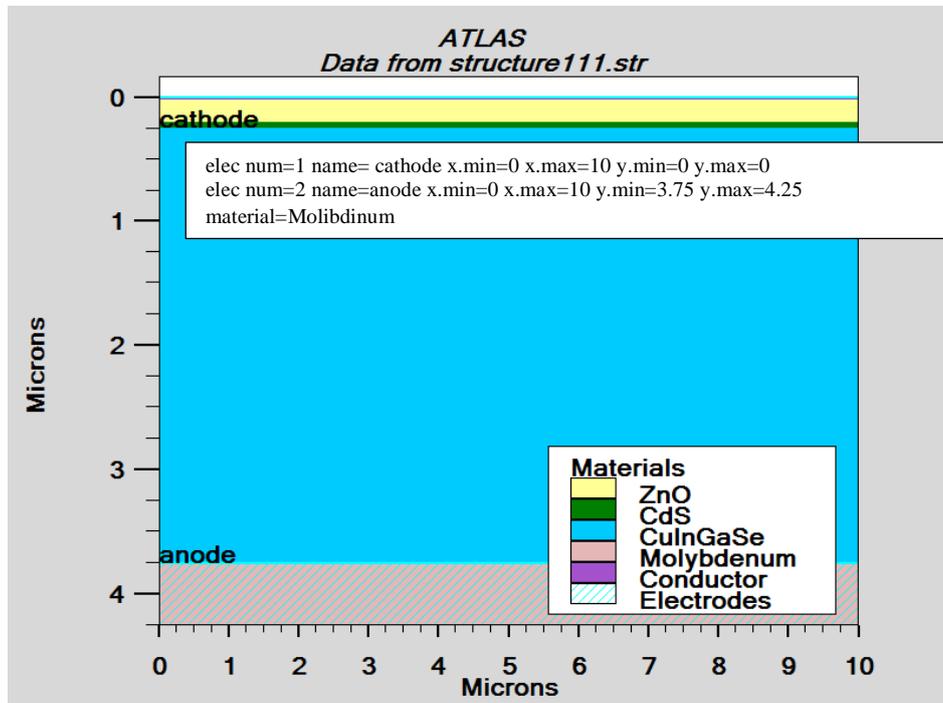


Figure 3.4 Déclaration des Électrodes dans ATLAS.

"Dopage"

La dernière étape de la construction de la structure est le dopage. Le dopage peut être de type n ou p. Dans la figure 3.5, les types et les niveaux de dopage sont définis [5].

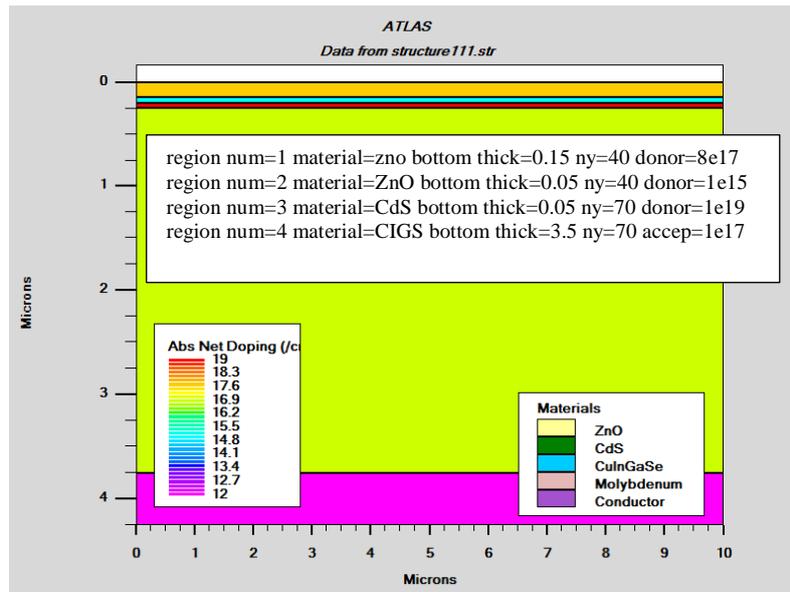


Figure 3.5 Distribution du dopage dans ATLAS.

"Matériel"

- Une fois que la structure est complètement assemblée, les matériaux utilisés pour construire le dispositif doivent eux-mêmes être définis. La déclaration matérielle permet la spécification de certains paramètres de base. Ces valeurs peuvent s'appliquer à un matériau ou à une région. Le format de la déclaration du matériau est le suivant :

MATERIAL < localisation >< définition du matériau >

Exemple :

Matériel région=4 EG300=1.15 PERMITTIVITY=13.6 AFFINITY=4.8 MUN=140 MUP=25
\ NC300=2.2e18 NV300=1.8e19

"Modèles physiques"

Le choix du modèle dépend des matériaux choisis pour la simulation. L'exemple ci-dessous active plusieurs modèles.

MODELS CONMOB FLDMOB SRH

CONMOB est le modèle de mobilité dépendant de la concentration du dopage. FLDMOB est le modèle de mobilité dépendant du champ électrique parallèle. SRH est le modèle Shockley-Read-Hall pour le calcul du taux de recombinaison des porteurs de charge.

"Contacts"

Indique les attributs physiques d'une électrode soit contact ohmique qui est défini par défaut et le contact redresseur (contact de Schottky).

Comme exemple :

```
Contact name =anode workfun= 3.74
```

"Interface"

Indique les paramètres d'interface aux frontières des semi-conducteurs ou des isolants. Tous les paramètres s'appliquent seulement aux nœuds de frontière exceptés là où ils sont déjà indiqués. Comme exemple :

```
Interface y.min=0.1996 y.max=0.2005 s.n=1e5 s.p=1e5
```

"Lumière"

Lorsque l'éclairage est important pour un dispositif (comme dans les cellules solaires), il y a la possibilité d'utiliser un certain nombre de sources lumineuses et d'ajuster leur emplacement, l'orientation et l'intensité.

La lumière est modélisée dans ATLAS par la déclaration [6] :

```
BEAM <paramétrés>
```

```
Beam num=1 x.origin=5 y.origin=-1 angle=90 power.file=solarex10.spec front.refl back.refl
```

"Méthode de la solution"

ATLAS contient plusieurs méthodes numériques pour calculer les solutions aux problèmes de dispositif à semi-conducteur.

Il existe trois principaux types de méthodes numériques : GUMMEL, NEWTON et méthode des blocs [7].

3.4 Spécification de la solution

Elle est divisée en quatre parties : Log, Solve, Load, et Save.

L'instruction Log crée le fichier de sauvegarde de l'état d'équilibre, transitoires ou DC, données déterminées par une déclaration Solve après la déclaration Log.

La déclaration Solve suit une instruction Log et calcule les informations relatives à un ou plusieurs points de polarisation.

L'instruction Save sert à stocker toutes les informations sur les points de polarisation, et l'instruction Load est utilisée pour récupérer ces informations [5].

3.5 Extraction des données et traçage

Une fois qu'une solution est trouvée pour le problème du dispositif, l'information peut être visualisée graphiquement avec TONYPLOT. En plus, les paramètres des dispositifs peuvent être extraits par la déclaration EXTRACT [8].

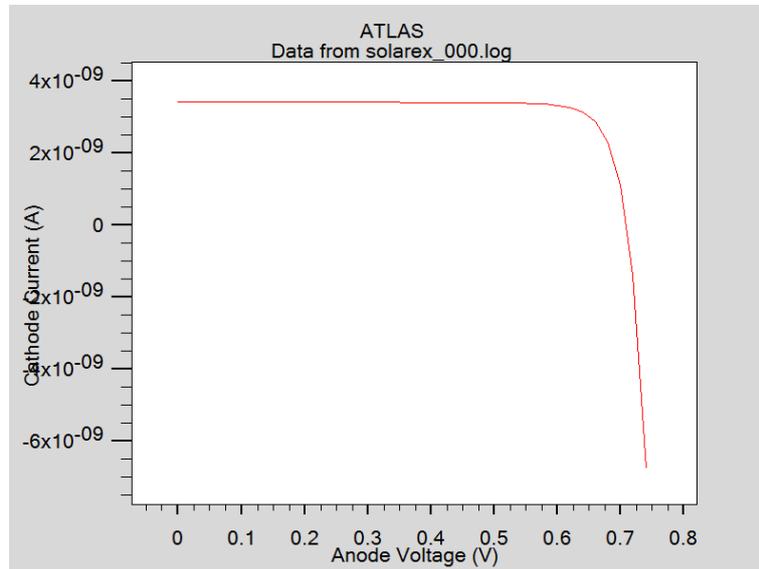


Figure 3.6 : Affichage graphique des résultats par « TonyPlot »

3.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une description relativement détaillée sur le logiciel de simulation **SILVACO-ATLAS**. Nous avons défini sa structure, ses outils et ses capacités permettant de calculer tous les paramètres internes et externes liés à la cellule solaire et générer ainsi ses caractéristiques électriques comme la caractéristique densité de courant – tension (**I-V**) et puissance-tension (**P-V**) et la réponse spectrale (**QE**); une étude qui fera en détail l'objet du prochain chapitre pour les cellules solaires à base de CIGS.

Reference de chapitre3 :

- [1] Benouadfel Yacine Caractérisation et simulation des diodes à Barrière Schottky sous environnement Silvaco Université A.Mira Béjaia Année Universitaire 2014/2015.
- 2] Boukaraba Mohamed et Zorrig Heythem Effet de la couche buffer dans les cellules Solaires Tandem à base de CIGS. Université Mohamed Boudiaf - M'SILA. Année universitaire : 2016 /2017.
- [3] Houda chabane, Etude d'une cellule solaire a base de structure PIN Université Hadj Lakhdar de Batna. Année universitaire : 2014 /2015.
- [4] Ziani Zakarya, Etude des Propriétés Physiques et Optiques des Couches Minces et des Nanomatériaux pour les Matériaux IV-IV. Application aux Cellules Solaires de Troisième Génération, Université Abou-Bakr Belkaid Tlemcen Année universitaire : 2012 /2013.
- [5] Boukarara mohamed et Zorrig Heythem Effet de la couche buffer dans les cellules solaires Tandem à base de CIGS, Université Mohamed Boudiaf M'sila, Année universitaire : 2016 /2017
- [6] Kalache Salim, Etude par simulation numérique d'une cellule solaire en CIGS, Université Mohamed Khider Biskra, Année universitaire : 2016 / 2017.
- [7] Melouki Dilmin, Etude des performances de la cellule InGaP/GaAs/Ge par simulation universitaire Mohammed Boudiaf de m'sila. Année universitaire: 2015 /2016.
- [8] B.Garcia, "Indium gallium nitride multi-junction solar cell simulation using silvaco atlas", Thèse PhD., Naval post-graduate school, Monterey California, 2007.

Chapitre 4

Résultats du simulation et discussion

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons simuler une cellule solaire en CIGS, nous allons optimiser les performances de sortie de cette cellule solaire en essayant de trouver les paramètres optimaux de chaque région constituant la cellule et donnant les meilleures caractéristiques de sortie. A partir des caractéristiques (I-V) fournies par Atlas-Silvaco, nous allons calculer les valeurs des paramètres photovoltaïques de la cellule solaire tels que le courant de court-circuit, la tension en circuit-ouvert, le facteur de forme et le rendement. L'optimisation de la cellule solaire comprend l'étude de l'influence des concentrations des donneurs et des accepteurs et les épaisseurs des couches sur le rendement afin d'obtenir une structure conduisant au rendement maximum.

4.2 Structure de la cellule solaire en CIGS

La structure de base d'une cellule solaire en couche mince en CIGS est réalisée par plusieurs couches représentée (Figure 4 .1). Le substrat le plus utilisé est un verre de silicate sodocalcique qui est recouvert sur un côté de molybdène (Mo) servant de contact arrière métallique (anode). L'hétérojonction est formée entre les semi-conducteurs CIGS et ZnO dopé en aluminium (ZnO :Al), avec une double couche d'interface constituée de CdS et de ZnO intrinsèque (ZnO-i) Le CIGS a un dopage de type p provenant de défauts intrinsèques, alors que le ZnO est de type n grâce à l'incorporation d'aluminium (Al). La couche de CIGS sert d'absorbeur avec une énergie de bande interdite allant de 1.15 eV.

La construction de cette structure dans le simulateur Atlas consiste en quatre étapes : définitions du maillage, des régions, des électrodes et du dopage. Les couches en CIGS de type p, CdS et ZnO :Al de type n sont dopées avec des concentrations des accepteurs et des donneurs de l'ordre de $(10^{17}, 10^{19}$ et $8 \times 10^{17}) \text{ cm}^{-3}$ respectivement. La structure est ensuite mise sous un éclairage AM1.5 qui correspond à une puissance lumineuse incidente de 0.1 W/cm^2 .

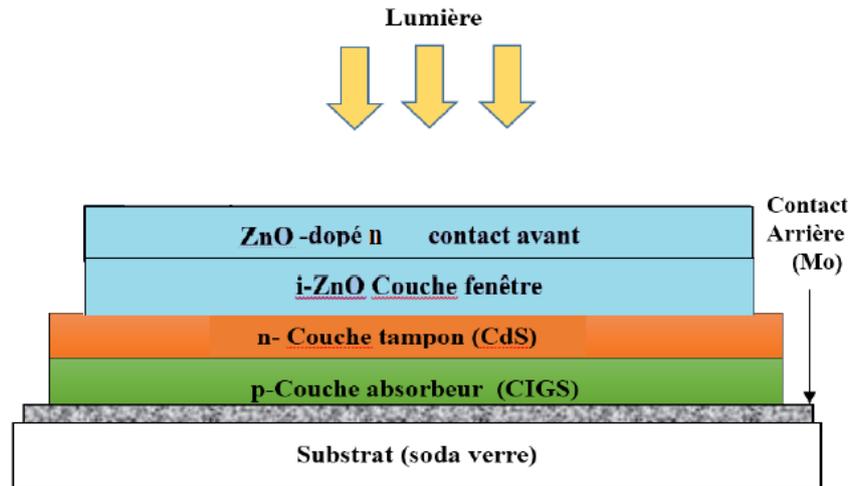


Figure 4.1 Structure de la cellule solaire en couches minces en CIGS.

4.3 Modèles et paramètres de simulation

Les propriétés des semi-conducteurs de ZnO, CdS et CIGS comme paramètres d'entrée dans la simulation sont donnés dans le tableau 4.1. Les paramètres des matériaux en ZnO, CdS et CIGS utilisés dans la simulation de la cellule solaire sont issus de la littérature et des études expérimentales [1, 2].

Nous avons considéré le modèle Shockley-Read-Hall (**SRH**) pour le calcul du taux de recombinaison par les pièges qui dépend des densités et des sections de capture des défauts. Le point de départ de la simulation consiste à l'introduction des paramètres de chaque couche de la cellule solaire.

Paramètres	ZnO :Al	ZnO :i	CdS	CIGS
Epaisseur (nm)	150	50	50	3500
Energie du gap (eV)	3.3	3.3	2.4	1.15
Affinité (eV)	4.7	4.7	4.5	4.8
Permittivité	9	9	10	13.6
Densités des états dans la BC, N_c (cm ⁻³)	2.2×10^{18}	2.2×10^{18}	2.2×10^{18}	2.2×10^{18}
Densités des états dans la BV, N_v (cm ⁻³)	1.8×10^{19}	1.8×10^{19}	1.8×10^{19}	1.8×10^{19}
Mobilité des électrons, μ_n (cm ² /V.s)	100	100	140	140

Mobilité des trous, μ_p ($\text{cm}^2/\text{V.s}$)	25	25	25	25
Concentrations de dopage (cm^{-3})	8×10^{17}	10^{15}	10^{19}	10^{17}
Densité des défauts (cm^{-3})	D : 10^{17}	D : 10^{17}	A : 10^{15}	D : 10^{15}
E_A, E_D (eV)	Milieu gap	Milieu gap	Milieu gap	Milieu gap
W_G (eV)	0.1	0.1	0.1	0.1
Section de capture des électrons (cm^2)	10^{-12}	10^{-12}	10^{-13}	5×10^{-17}
Section de capture des trous (cm^2)	10^{-15}	10^{-15}	5×10^{-17}	10^{-13}

Tableau 4.1 paramètres de simulation

Les coefficients d'absorption de CIGS et de CdS sont dans l'outil Atlas-Silvaco et ceux de ZnO:Al et ZnO-i sont tirés de la référence [3].

4.4 Résultats de simulation et discussions

4.4.1 Caractéristiques J-V et P-V de la cellule en CIGS

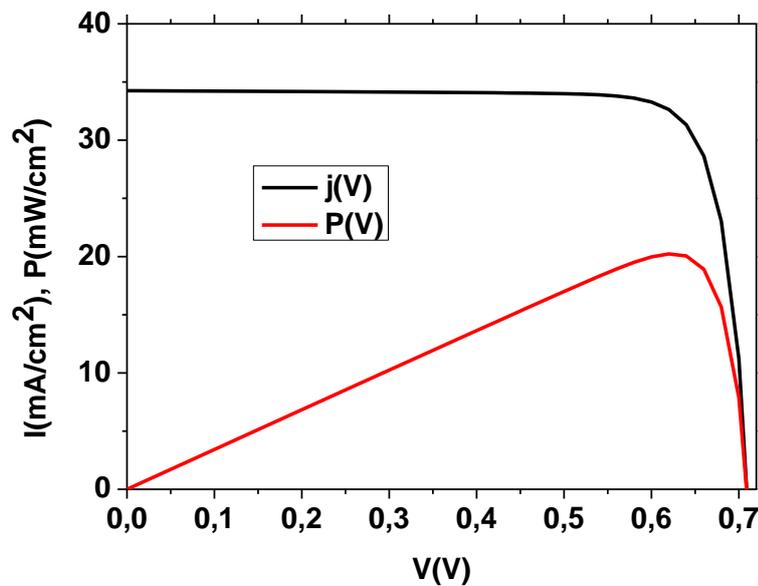


Figure 4.2 Caractéristique J-V et P-V de la cellule solaire en CIGS.

Les caractéristiques courant-tension J-V et puissance-tension P-V de la cellule en CIGS sont représentées dans la figure 4.2. D'après ces deux caractéristiques, nous avons calculé les paramètres de la cellule solaire qui sont groupés dans le tableau 4.2. Le rendement obtenu par simulation (20,23%) est en très bon accord avec le rendement obtenu expérimentalement (20%) [2].

Paramètres	J _{cc} (mA/cm ²)	V _{co} (V)	J _m (mA/cm ²)	V _m (V)	P _m (mW/cm ²)	FF (%)	η (%)
Valeurs	34.26	0.708	32.6	0.62	20.23	83.31	20.23

Tableau 4.2 Paramètres photovoltaïques de la cellule solaire en CIGS

Nous avons ensuite optimisé les paramètres des couches (ZnO :Al, ZnO :i, CdS, CIGS) de la structure. L'optimisation est faite couche par couche dans le but d'améliorer le rendement de la cellule solaire.

4.4.2 Influence de la concentration des donneurs de la couche ZnO :Al sur la cellule solaire en CIGS

Afin d'étudier l'effet de la concentration des donneurs de la couche en ZnO :Al sur les paramètres photovoltaïques : J_{cc} (mAcm⁻²), V_{co} (V), FF (%) et η (%). Les valeurs de concentrations de donneurs sont comprises entre (10¹² et 10¹⁸) cm⁻³ de cette couche tout en maintenant constante la concentration des accepteurs et des épaisseurs des autres couches. Les résultats obtenus sont groupés dans le tableau 4.2.

Concentration des donneurs ZnO :Al (cm ⁻³)	J _{cc} (mAcm ⁻²)	V _{co} (V)	FF%	η%
10 ¹²	34.24	0.709	82.84	20.11
10 ¹³	34.24	0.709	83.24	20.21
10 ¹⁴	34.24	0.708	83.29	20.22
10 ¹⁵	34.24	0.708	83.30	20.22
10 ¹⁶	34.24	0.708	83.30	20.22
10 ¹⁷	34.24	0.708	83.30	20.22
10 ¹⁸	34.25	0.708	83.31	20.23

Tableau 4.3 Paramètres photovoltaïques de la cellule solaire en CIGS en fonction de la concentration de donneurs de la couche en ZnO :Al.

Fig. 4.3 représente la variation des paramètres photovoltaïques : J_{cc} , V_{co} , FF et η de la cellule solaire en fonction de la concentrations des donneurs de la couche en ZnO :Al. J_{cc} est pratiquement constante (34.24 mA/cm^2), de même pour V_{oc} (0.708 V). FF augmente de 82.84 à 83.31% et η augmente de 20.11 et atteint 20,23 % pour la concentration des donneurs de 10^{18} cm^{-3} . La raison est que l'augmentation du dopage de la couche en ZnO :Al peut améliorer la collection des porteurs photo-générées et donc une augmentation du rendement de conversion. D'après ces résultats nous avons choisi la concentration des donneurs optimale de 10^{18} cm^{-3} .

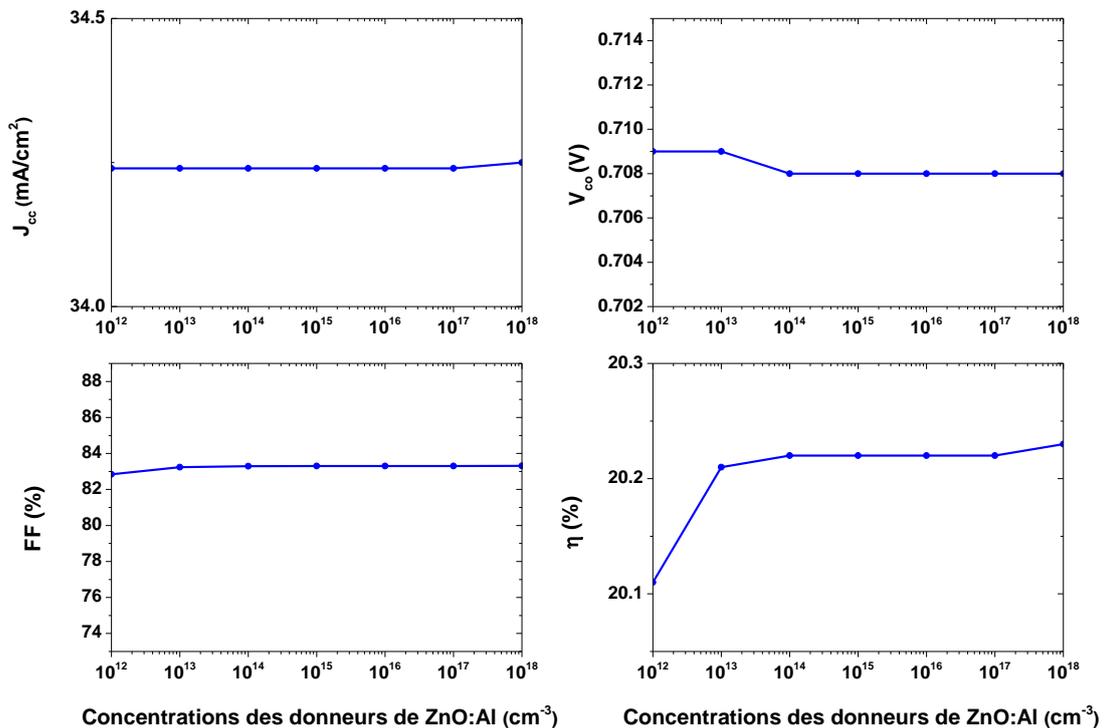


Figure 4.3 Variation des paramètres photovoltaïques de la cellule solaire en CIGS en fonction de la concentration de donneurs de la couche en ZnO :Al.

4.4.3 Influence de l'épaisseur de la couche ZnO : Al sur la cellule solaire

Nous allons maintenant examiner l'effet de l'épaisseur de la couche en ZnO :Al sur les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire en CIGS pour une concentration de donneur de 10^{18} cm^{-3} . Le tableau 4.4 groupe les résultats obtenus par simulation.

Figure 4.4 représente la variation des paramètres photovoltaïques : J_{cc} , V_{co} , FF et η de la cellule solaire en fonction de l'épaisseur de la couche en ZnO :Al. J_{cc} décroît légèrement avec l'épaisseur tandis que V_{co} et FF sont constants. η décroît légèrement avec l'épaisseur. La valeur élevée du rendement est atteinte pour une épaisseur de 150 nm. Du fait que le premier

contact entre les photons et la cellule solaire est réalisé par la couche ZnO :Al. Par conséquent, l'épaisseur de cette couche affecte la création de paires électron-trou. Alors la valeur la plus élevée du rendement correspond à l'épaisseur égale à 150 nm.

Epaisseur de ZnO :Al (μm)	J_{cc} (mAcm^{-2})	V_{co} (V)	FF%	$\eta\%$
0.15	34.26	0.708	83.31	20.23
0.155	34.24	0.708	83.30	20.22
0.16	34.23	0.708	83.30	20.21
0.165	34.22	0.708	83.30	20.21
0.17	34.22	0.708	83.30	20.21
0.175	34.21	0.708	83.30	20.20
0.18	34.21	0.708	83.30	20.20
0.185	34.20	0.708	83.30	20.2
0.19	34.20	0.708	83.30	20.20
0.195	34.20	0.708	83.30	20.19
0.2	34.19	0.708	83.30	20.19

Tableau 4.4 Paramètres photovoltaïques de la cellule solaire en CIGS en fonction de l'épaisseur de la couche de ZnO :Al.

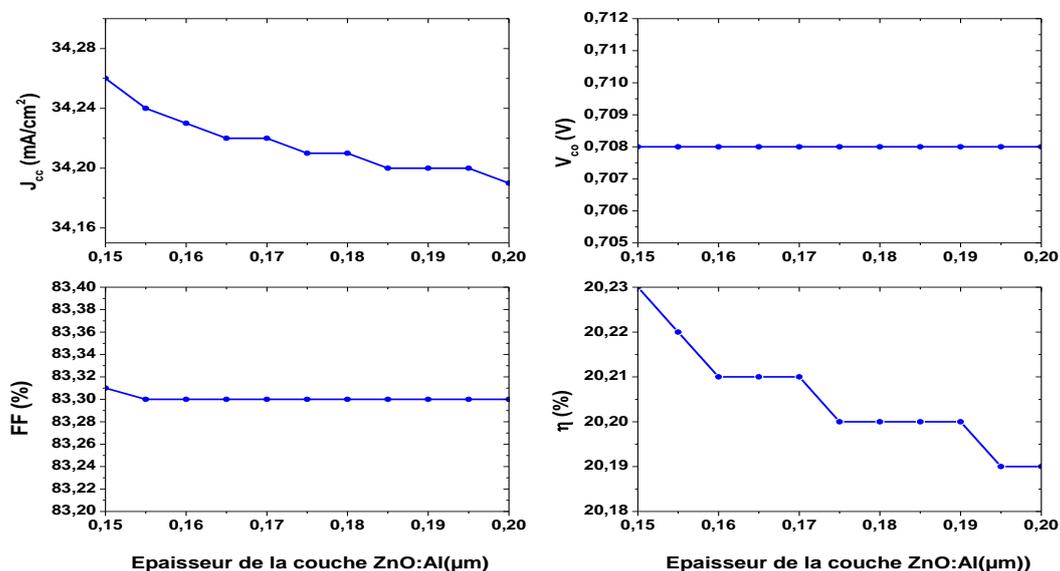


Figure 4.4 Variation des paramètres photovoltaïques de la cellule solaire en CIGS en fonction de l'épaisseur de la couche ZnO :Al.

4.4.4 Influence de l'épaisseur de la couche ZnO : i sur la cellule solaire

Nous avons varié l'épaisseur de ZnO non dopé (ZnO-i) de 50 nm à 100 nm pour montrer son effet sur les paramètres de la cellule solaire, Les résultats sont illustrés dans le tableau 4.5 et dans la figure 4.5. On remarque pour l'épaisseur comprise entre 50 nm et 100 nm qu'il y a une diminution lente du courant de court-circuit et par conséquent le rendement de la cellule solaire (la tension en circuit ouvert et le facteur de forme sont constants). Cette diminution est de 20.23% à 20,03%. Comme indiqué sur la figure 4.5, la valeur optimale de l'épaisseur est de 50 nm montrant le meilleur rendement de 20,23%.

Epaisseur de ZnO :i (nm)	J_{cc} (mAcm ⁻²)	V_{co} (V)	FF%	$\eta\%$
50	34.26	0.709	83.308	20.23
55	34.22	0.708	83.308	20.21
60	34.19	0.708	83.307	20.195
65	34.168	0.708	83.306	20.17
70	34.14	0.708	83.306	20.16
75	34.09	0.708	83.306	20.13
80	34.061	0.708	83.305	20.10
85	34.036	0.708	83.303	20.085
90	34.002	0.708	83.301	20.069
95	33.98	0.708	83.30	20.05
100	33.99	0.708	83.30	20.03

Tableau 4.5 Paramètres photovoltaïques de la cellule solaire en CIGS en fonction de l'épaisseur de la couche en ZnO :i

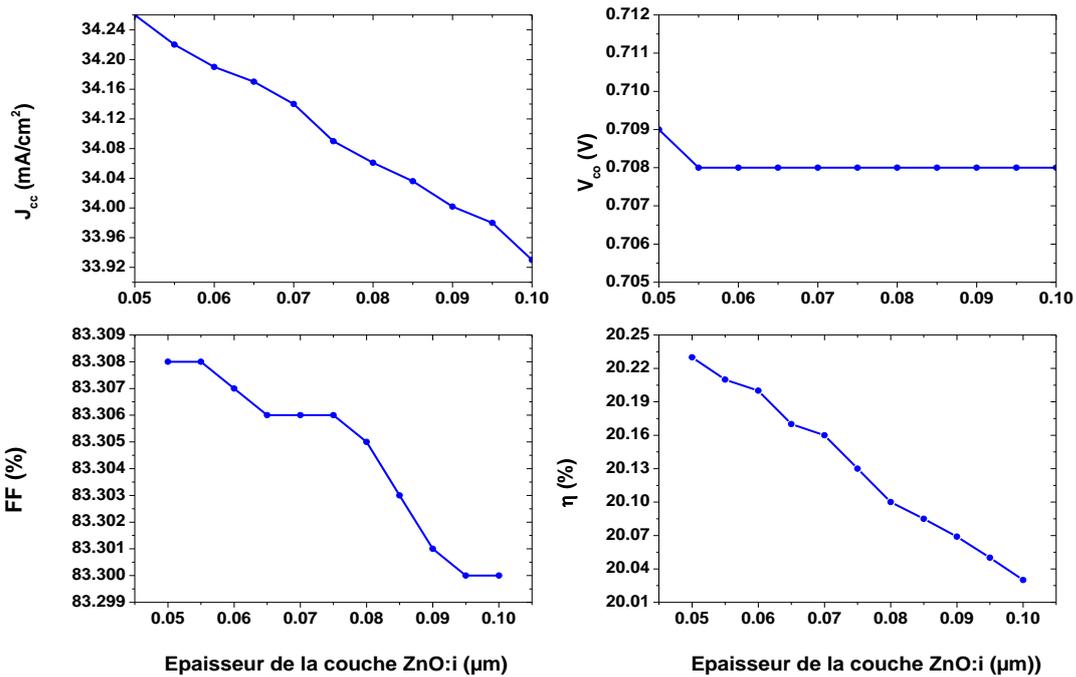


Figure 4.5 Variation des paramètres photovoltaïques de la cellule solaire en CIGS en fonction de l'épaisseur de la couche ZnO :i

4.4.5 Influence de la concentration des donneurs de la couche en CdS sur la cellule solaire

Pour l'étude des paramètres photovoltaïques en fonction de la concentration des donneurs de la couche en CdS, nous avons utilisé une épaisseur de CdS de 50 nm. Nous montrons dans le tableau 4.6 et sur la Figure 4.6, les paramètres photovoltaïques en fonction de la concentration des donneurs de la couche en CdS. Comme le montre la figure, la densité de porteurs de la couche en CdS influe significativement sur le rendement qui augmente avec l'augmentation de la concentration de la couche en CdS de 10^{17} cm^{-3} à $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ puis il diminue à partir de la concentration de $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. Lorsque la concentration des donneurs de la couche en CdS augmente la barrière de potentiel dans CdS / CIGS et ZnO/CdS diminue, d'où une amélioration de la collection des porteurs photo générés et donc une augmentation du rendement de conversion. La valeur optimale de la concentration des donneurs est de $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ pour laquelle le rendement atteint la valeur de 20.82%.

Concentration des donneurs de CdS (cm^{-3})	J_{cc} (mA.cm^{-2})	V_{co} (V)	FF%	$\eta\%$
10^{17}	36.45	0.71	74.58	19.37
2×10^{17}	36.32	0.709	80.76	20.82
5×10^{17}	34.39	0.709	83.2	20.29
10^{18}	34.30	0.709	83.28	20.25
10^{19}	34.26	0.708	83.31	20.23
2×10^{19}	34.26	0.708	83.31	20.23

Tableau 4.6 Paramètres photovoltaïques de la cellule solaire en CIGS en fonction de la concentration de donneurs de la couche en CdS.

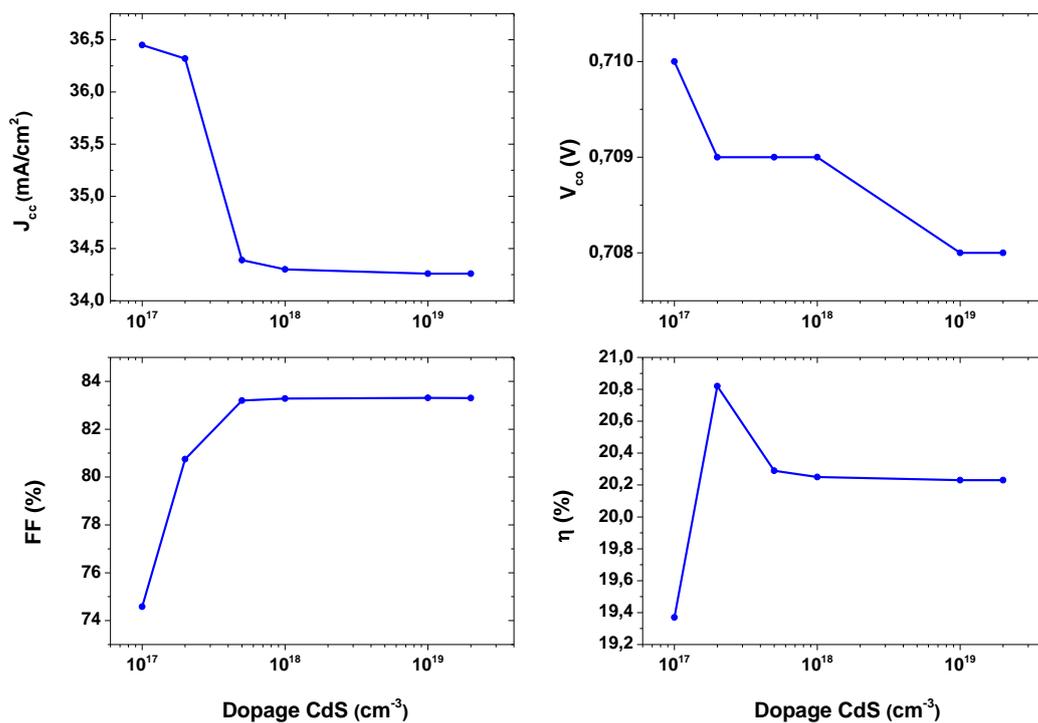


Figure 4.6 Variation des paramètres photovoltaïques de la cellule solaire en CIGS en fonction de la concentration de donneurs de la couche en CdS.

4.4.6 Influence de l'épaisseur de la couche en CdS sur la cellule solaire

Nous allons maintenant montrer l'influence de l'épaisseur de CdS sur les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire. Nous présentons la variation des paramètres photovoltaïques avec une épaisseur de CdS allant de 40 nm à 50 nm pour une concentration des donneurs de $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. Les résultats sont illustrés dans le tableau 4.7 et sur la figure 4.7, où les valeurs du rendement diminuent avec l'augmentation de l'épaisseur de CdS. Ceci est dû au fait qu'avec une couche de CdS plus fine, la plupart des porteurs photogénérés sont collectés. Lorsque l'épaisseur augmente, les photons de courtes longueurs d'onde sont absorbés à une distance supplémentaire comprise entre ZnO et CIGS dans la jonction et, par conséquent, les porteurs photogénérés créés sur CIGS se recombinaient avant d'atteindre ZnO. Par conséquent, le rendement diminue avec l'augmentation de l'épaisseur du CdS. Sur la figure 4.7, l'épaisseur de la couche en CdS de 40 nm correspond à la valeur optimale pour laquelle le rendement atteint la valeur la plus élevée de 21.31%.

Epaisseur de CdS (nm)	J_{cc} (mAcm ⁻²)	V_{co} (V)	FF%	η %
40	36.46	0.771	82.22	21.31
42	36.45	0.771	82.01	21.24
44	36.43	0.771	81.75	21.15
46	36.41	0.771	81.44	21.05
48	36.36	0.709	81.10	20.94
50	36.32	0.709	80.76	20.82

Tableau 4.7 Paramètres photovoltaïques de la cellule solaire en CIGS en fonction de l'épaisseur de la couche en CdS.

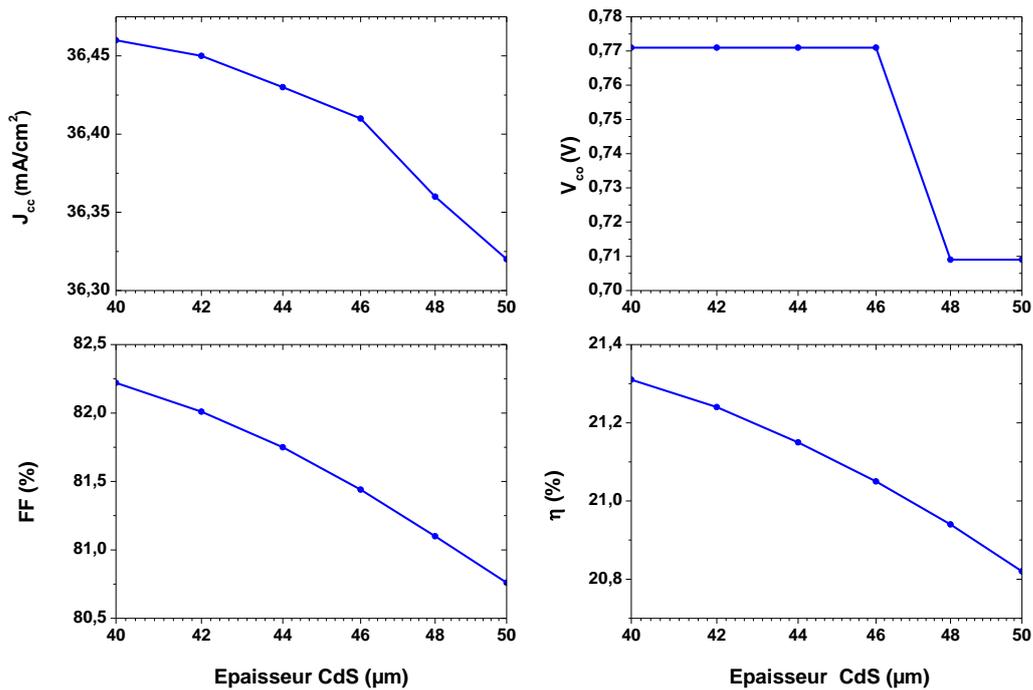


Figure 4.7 Paramètres photovoltaïques de la cellule solaire en CIGS en fonction de l'épaisseur de la couche en CdS.

4.4.7 Influence de la concentration des accepteurs de la couche en CIGS sur la cellule solaire

La variation des paramètres photovoltaïques de la cellule solaire en fonction de la concentration des accepteurs de la couche en CIGS d'épaisseur 3500 nm sont montrés dans le tableau 4.8 et sur la Figure 4.8, On peut observer que l'augmentation de la concentration des accepteurs de la couche de CIGS de 10^{12} cm^{-3} à 10^{17} cm^{-3} , induit une augmentation rapide du rendement de 5,82% à 21,31%. Au-delà 10^{17} cm^{-3} , les valeurs de rendement diminuent. La concentration des accepteurs de la couche de CIGS de 10^{17} cm^{-3} est utilisée comme valeur optimale pour laquelle le rendement atteint la valeur la plus élevée de 21.31%.

Concentration des accepteurs de CIGS (cm^{-3})	J_{cc} ($\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$)	V_{co} (V)	FF%	$\eta\%$
10^{12}	32.25	0.308	58.47	5.82
10^{13}	33.14	0.368	67.70	8.28
10^{14}	34.93	0.461	64.86	10.83
10^{15}	36.6	0.58	79.63	17.47
10^{16}	36.32	0.649	81.55	19.4
9×10^{16}	36.49	0.707	82.15	21.22
10^{17}	36.47	0.71	82.22	21.31
2×10^{17}	29.18	0.839	79.40	21.03
10^{18}	26.51	0.785	30.88	6.43

Tableau 4.8 Paramètres photovoltaïques de la cellule solaire en CIGS en fonction de la concentration des accepteurs de la couche en CIGS.

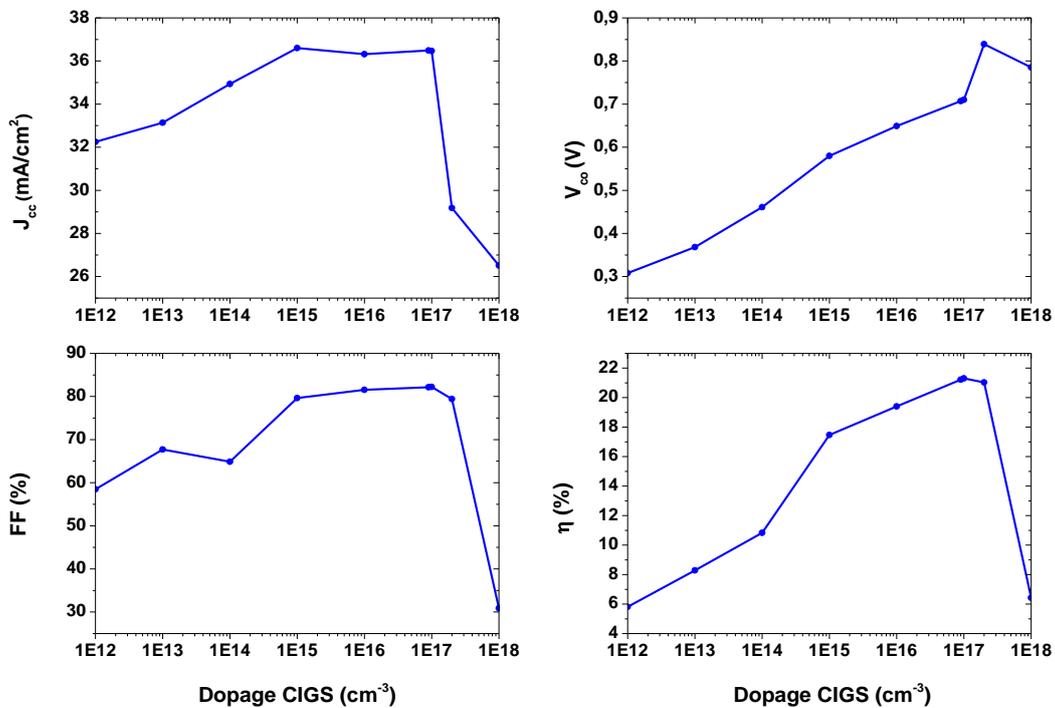


Figure 4.8 Paramètres photovoltaïques de la cellule solaire en CIGS en fonction de la concentration des accepteurs de la couche en CIGS.

4.4.8 Influence de l'épaisseur de la couche en CIGS sur la cellule solaire

L'effet de l'épaisseur du CIGS avec une concentration de porteurs fixe à 10^{17} cm^{-3} sur les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire sont illustrés dans le tableau 4.9 et sur Figure 4.9. Nous notons que lorsque l'épaisseur du CIGS augmente, le rendement augmente. Du fait que l'épaisseur du CIGS augmente, plus de porteurs sont photo générés qui entraînent un courant plus élevé. De plus, sur la figure 4.9, l'épaisseur optimale de la couche absorbante est d'environ 3500 nm pour laquelle le rendement atteint la valeur la plus élevée de 21.3%.

Epaisseur de CIGS (nm)	J_{cc} (mA.cm ⁻²)	V_{co} (V)	FF%	$\eta\%$
2500	35.43	0.703	81.97	20.42
2600	35.56	0.704	82.03	20.53
2700	35.58	0.705	82.08	20.64
2800	35.8	0.705	82.2	20.74
2900	35.91	0.706	82.16	20.84
3000	36.01	0.707	82.18	20.93
3100	36.11	0.707	82.20	21.01
3200	36.21	0.708	82.21	21.09
3300	36.30	0.709	82.22	21.16
3400	36.37	0.71	82.25	21.28
3500	36.39	0.71	82.22	21.30

Tableau 4.9 Paramètres photovoltaïques de la cellule solaire en CIGS en fonction de l'épaisseur de la couche en CIGS.

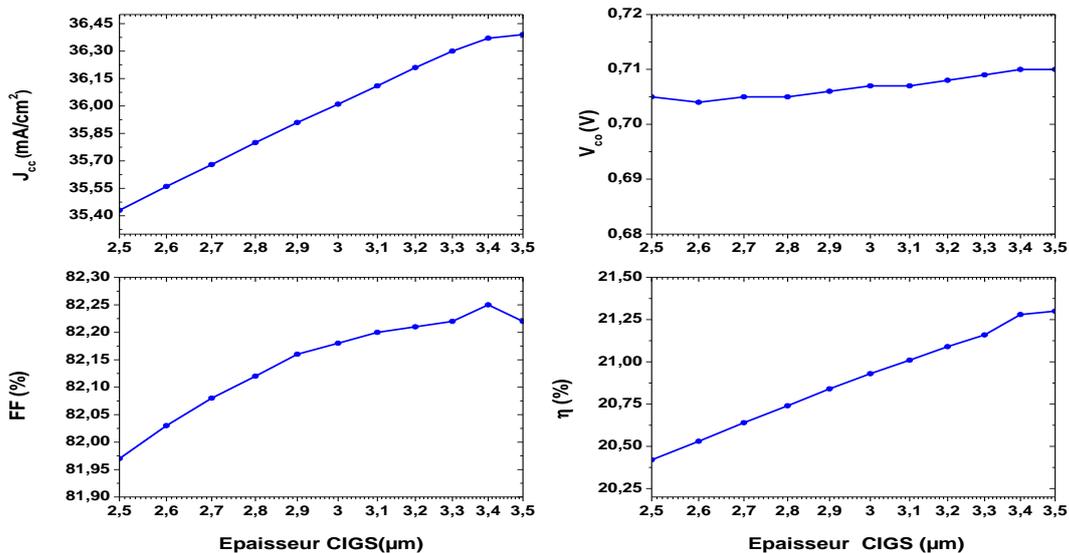


Figure 4.9 Paramètres photovoltaïques de la cellule solaire en CIGS en fonction de la concentration des accepteurs de la couche en CIGS.

4.4.9 Cellule solaire en CIGS optimale

Les paramètres physiques de la cellule solaire optimisée sont donnés dans le tableau 4.10.

Paramètres optimaux	ZnO :Al	ZnO :i	CdS	CIGS
Concentration des porteurs (cm ⁻³)	10 ¹⁸ cm ⁻³		2x10 ¹⁷	10 ¹⁷
Epaisseur (nm)	150	50	40	3500

Tableau 4.10 Paramètres de la cellule solaire en CIGS optimisée

Les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire optimisée sont groupés dans le tableau 4.11.

Paramètres	J _{cc} (mA/cm ²)	V _{co} (V)	FF (%)	η (%)
Valeurs	36.39	0.71	82.22	21.3

Tableau 4.11 Paramètres photovoltaïques de la cellule solaire en CIGS après optimisation.

Si nous faisons une comparaison des résultats de simulation pour la cellule solaire avant optimisation et groupés dans le tableau 4.10 avec ceux obtenus pour notre cellule solaire optimisée du tableau 4.11, nous constatons qu'il y'a amélioration dans le courant de court-circuit qui a augmenté de 34.26 à 36.39 mA.cm⁻² et le rendement de 20.23 à 21.3%.

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats de la simulation numérique par Atlas d'une cellule solaire en CIGS. Nous avons effectué la simulation numérique de cette cellule solaire pour calculer les paramètres photovoltaïques tels que le rendement. Nous avons aussi optimisé la cellule solaire en CIGS par l'étude de l'influence de l'épaisseur et la concentration des donneurs et des accepteurs des couches ZnO :Al, ZnO :i, CdS et CIGS pour obtenir le plus haut rendement de la cellules solaire en CIGS étudiée.

References de chapitre4

- [1] Elbar, M., Tobbeche, S., et Merazga, A. Effect of top-cell CGS thickness on the performance of CGS/CIGS tandem solar cell. *solar energy*, 2015, vol. 122, p. 104-112.
- [2] Jackson, P., Hariskos, D., Lotter, E., Paetel, S., Wuerz, R., Menner, R., ... & Powalla, M. (2011). New world record efficiency for Cu (In, Ga) Se₂ thin-film solar cells beyond 20%. *Progress in Photovoltaic: Research and Applications*, 19(7), 894-897.
- [3] Richter, M., Schubbert, C., Eraerds, P., Riedel, I., Keller, J., Parisi, J., ... & Avellán-Hampe, A. (2013). Optical characterization and modeling of Cu (In, Ga)(Se, S) ₂ solar cells with spectroscopic ellipsometry and coherent numerical simulation. *Thin Solid Films*, 535, 331-335.

Conclusion générale

Conclusion générale

Actuellement, existent des filières en plein essor basées sur des technologies dites des couches minces. Elles permettent de convertir le plus de photons possibles en électricité en utilisant le minimum de matériaux réactifs possibles. La réduction du coût de fabrication grâce à une réduction de matières premières et à une méthode d'intégration totale sont deux points aujourd'hui à fort potentiel de développement. Contrairement aux filières de silicium cristallin, ces technologies ne nécessitent ni découpe ni post-assemblage de cellules pour aboutir à un module commercial réduisant les coûts de fabrication. Trois grandes familles de matériaux sont actuellement en plein essor: l'alliage Cu(In,Ga)Se_2 noté CIGS qui revendique un rendement record en laboratoire de plus de 22%.

Nous avons pris la structure de la cellule solaire en CIGS, nous avons effectué une étude prédictive faisant appel à la simulation numérique sur la base du logiciel Silvaco-Atlas pour aboutir à des solutions qui apportent l'augmentation des performances des cellules solaires en CIGS.

Nous avons procédé à une étude de l'influence de l'épaisseur et la concentration des donneurs et des accepteurs des couches de la cellule sur ses propriétés photovoltaïques.

Les résultats obtenus du rendement de conversion de 20.3 % sont en très bon accord avec l'expérience. Nous avons déterminé les paramètres optimaux pour chaque couche. Il a été constaté que les couches d'épaisseur et la concentration de porteurs des cellules solaires CIGS jouent un rôle important dans la détermination de la performance de la cellule. En particulier, l'efficacité de la cellule solaire a été trouvée être influencé par l'épaisseur et la concentration en porteurs de CIGS couche absorbante. La combinaison des paramètres optimaux nous permet d'optimiser une meilleure structure de la cellule : $\text{ZnO: Al / ZnO-i / CdS / CIGS}$ d'où nous avons montré que le rendement est amélioré avec une valeur de 21.3%. Tous ces résultats simulés permettent de conclure que l'optimisation des propriétés des matériaux est prometteuse et peut améliorer le rendement de la cellule solaire en CIGS.