

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE ABOU BAKR BELKAID- TLEMCCEN
FACULTE DES SCIENCES
DEPARTEMENT DE PYSIQUE
UNITE DE RECHERCHE MATERIAUX
ET
ÉNERGIES RENOUVELABLES(URMER)



THESE

Pour obtenir le grade de
DOCTEUR EN PHYSIQUE

Spécialité: Physique Energétique et Matériaux

Par

Mr FEROUANI Abdelmadjid

Sur le thème

Etude par Simulation et Modélisation Electriques des Cellules Photovoltaïques en Couche Mince à base de $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ (CIGS)

Devant le jury composé de MM.

- <i>Président</i>	<i>Pr. B. BENYOUCEF</i>	<i>Université de Tlemcen</i>
- <i>Encadreur</i>	<i>Pr. Ali CHEKNANE</i>	<i>Université de Laghouat</i>
- <i>Examineur</i>	<i>Pr. N-E BIBI-TRIKI</i>	<i>Université de Tlemcen</i>
- <i>Examineur</i>	<i>Pr. K. RAHMOUNE</i>	<i>Université de Tlemcen</i>
- <i>Examineur</i>	<i>Dr A. HAMIDAT</i>	<i>CDER Alger</i>
- <i>Examineur</i>	<i>Dr. Ali MALEK</i>	<i>CDER Alger</i>

Année Universitaire : 2015-2016

Dédicace :

Je dédie ce travail

A mes parents

Aucun mot ne saurait témoigner de l'étendue

Des sentiments que j'éprouve à leur égard

Je souhaite que Dieu leur octroie une longue vie

A mes frères et mes sœurs

Pour leur encouragement et leur affection

A tous mes collègues et ami(e)s

A eux tous, je souhaite un avenir plein de joie, de bonheur et de succès.

Remerciement :

Le travail présenté dans ce manuscrit a été réalisé à l'unité de recherche de matériaux et des énergies renouvelables (URMER) à l'université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen sous la direction de monsieur Boumediène BENYOUCEF professeur à l'université de Tlemcen. Je tiens à le remercier pour m'avoir accueilli dans d'excellentes conditions.

Je veux adresser tous mes remerciements à monsieur Boumediène BENYOUCEF professeur à l'université de Tlemcen, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de ce mémoire.

J'exprime également ma gratitude à monsieur Ali MALEK, professeur à CDER Alger, et à monsieur A.HAMIDATT, professeur à CDER Alger. Monsieur N.E BIBI-TRIKI professeur à l'université de Tlemcen, madame K. RAHMOUNE, Professeur à l'université de Tlemcen, qui ont accepté d'examiner ce travail et de me faire l'honneur de participer au jury.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à mon encadreur monsieur Ali CHEKNANE, professeur à l'université de Laghouat, pour la grande patience avec laquelle il a suivi ce travail jusqu'à son achèvement et monsieur professeur Michel AILLERIE, Responsable de l'Equipe Systèmes Electriques pour les Energies Renouvelables, ES2ER du laboratoire MOPS de l'Université Paul Verlaine de Metz. Je les remercie également pour leurs conseils et suggestions.

Je remercie tout particulièrement les enseignants qui ont contribué à ma formation.

Un merci doit aussi être adressé à tous les membres de l'unité de recherche de matériaux et des énergies renouvelables (URMER) à l'université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, qui de près ou de loin, ont contribué au bon déroulement de ce travail.

Enfin, je tiens à remercier vivement tous mes amis (es) et mes collègues

Nomenclature

I_L, I_{ph} = courant photonique

I_0 = courant inverse de saturation

γ = le facteur de qualité de la diode

A = les facteurs d'accomplissement de diode

R_S = la résistance en série

R_{SH} = la résistance shunt

$I_{L, REF}$ = le courant photonique sous condition de référence [ampères]

G, G_{REF} = les éclairagements réels et à la condition de référence [W/m^2]

$T, T_{C, REF}$ = température de cellules réelles et à la condition de référence [degré Kelvin]

I_{SCm} = coefficient de la température du courant de court-circuit [ampères/degré]

V = la tension de sortie [volts]

q = la constante de charge d'électron, 1.602×10^{-19} C

k = la constante de Boltzmann, 1.381×10^{-23} J/K

D = le facteur de diffusion de la diode

ε_g = l'énergie de gap 1.15 pour le CIGS)

$(V_{th})_j$ = le voltage théorique avec les valeurs de j_{th} data point

$(V_{exp})_j$ = le voltage expérimentale avec les valeurs de j_{th} data point

$(I_{th})_j$ = le voltage théorique avec les valeurs de j_{th} data point

$(I_{exp})_j$ = le voltage expérimentale avec les valeurs de j_{th} data point

V_{max} = la tension maximale

J_{max} = la densité de courant maximale

V_{oc} = la tension de circuit-ouvert

J_{sc} = la densité de courant de court-circuit

η = le rendement

FF = facteur de forme

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 : Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la convention AM.

Figure I.2 : Spectres Solaires relevés dans plusieurs conditions

Figure I.3 : Schéma de principe de la conversion photoélectrique

Figure I.4 : Caractéristiques $I(V)$ d'une cellule photovoltaïque soumise à différents Eclairagements

Figure I.5 : Schéma de principe d'une cellule à base de silicium cristallin.

Figure I.6 : Évolution de la taille des cellules silicium photovoltaïques ces dernières années

Figure I.7 : Principe de la cellule à hétérojonction

Figure I.8 : Schéma de principe d'une cellule organique

Figure I.9 : Schéma de principe d'une cellule à base de Silicium amorphe et comparaison à une cellule en Silicium cristallin.

Figure I.10 : Schéma de principe d'une cellule à base de **CIGS**

Figure I.11 : Cellule Tandem α -Si/ μ c-Si & spectre solaire et spectres d'absorption

Figure I.12 : Rendements record de cellules photovoltaïques

Figure I.13. Caractéristiques électriques simulées de cellules à simple jonction issues de différentes filières photovoltaïques

Chapitre II

Figure II.1 : Semi-conducteurs de type p et n et position du niveau de Fermi E_F . Les charges associées aux donneurs (type n) et aux accepteurs (type p)

Figure II.2 : Schéma de principe et diagramme de bande d'une jonction p-n à l'équilibre.

Figure II.3 : Caractéristique $I-V$ d'une jonction p-n à l'obscurité

Figure II.4 : Principe d'un dispositif photovoltaïque

Figure II.5 : Structure en coupe d'une cellule CIGS : (a) schéma, (b) Image au microscope à balayage (MEB)

Figure II.6 : Structure cristalline de (a) blende de zinc (ou sphalérite avec (Cu,Ga) à la place du Zn), (b) chalcopyrite $CuGaS_2$ et (c) Cu-Au ici pour $CuGaS_2$

Figure II.7 : Largeurs de bande interdite et paramètre de maille a de certaines chalcopyrites

Figure II.8 : Variation de la concentration des défauts en fonction de la bande interdite

Figure II.9 : Profils Auger en profondeur (a), et valeurs correspondantes de la bande interdite (b)

Figure II.10. Diagramme de bande dans les cellules CIS avec une surface appauvrie en cuivre

Chapitre III

Figure II.1 : Modèle à 7 paramètres

Figure III.2 Modèle a six paramètres

Figure III.3 : Modèle à 5 paramètres

Figure III.4 : Modèle a 4 paramètres

Figure III.5 : Modèle a 3 paramètres

Figure III.6 : Caractéristiques $I(V)$ d'une cellule solaire pour différents modèle

Figure III.7 : Caractéristiques $P(V)$ d'une cellule solaire pour différents modèle

Figure III.8 : modèle à quatre paramètres 4P .

Figure III.9 : Caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$

Figure III.10. Branche principale de la fonction de Lambert W_0

Figure III.11 : Comparaison entre la caractéristique $I-V$ d'une cellule solaire simulée avec la méthode de Newton et avec la fonction de Lambert W

Figure III.12 : Comparaison entre la caractéristique $I-V$ d'une cellule solaire simulée avec la méthode de newton et avec la fonction de Lambert W avec $R_s=5 [\Omega]$,

Figure III.13: Comparaison entre la caractéristique $I-V$ d'une cellule solaire simulée avec la méthode de newton et avec la fonction de Lambert W avec $R_p=100 [\Omega]$,

Figure III.14: Comparaison entre la caractéristique $I-V$ d'une cellule solaire simulée avec la méthode de newton et avec la fonction de Lambert W avec $I_{cc}=28.1e-4 A$

Figure III.15: Comparaison entre la caractéristique $I-V$ d'une cellule solaire simulée avec la méthode de newton et avec la fonction de Lambert W avec $\gamma =1.5$

Figure III.16: Comparaison entre la caractéristique $I-V$ d'une cellule solaire simulée avec la méthode de newton et avec la fonction de Lambert W avec $V_{co}=0.5V$

Figure III.17 : Organigramme du calcul des paramètres de la caractéristique $I-V$

Figure. III.18 : Influence de la température sur la caractéristique $I(V)$

Figure. III.19 : Influence de la température sur la caractéristique $P(V)$

Figure. III.20 : Influence de la résistance série sur la caractéristique $I(V)$

Figure. III.21 : Influence de la résistance série sur la caractéristique $P(V)$

Pour un $T=25^\circ C$

Figure. III.22 : Influence du facteur de qualité sur la caractéristique $I(V)$ pour un $T=25^\circ C$

Figure. III.23 : Influence du facteur de qualité sur la caractéristique $P(V)$

Figure. III.24 : Le circuit équivalent de la cellule solaire à base de CIGS décrivant modèle à une seule diode

Figure.III.25 Caractéristiques $I-V$ en utilisant les modèles d'une et deux-diodes pour la cellule expérimentale décrite dans le tableau III.6

Figure.III.26 : Effet de la température (k) sur les différentes caractéristiques de la cellule solaire CIGS pour les modèles de un et deux-diodes, a) V_{OC} , b) I_{SC} , c) FF , et d) efficacité%. Toutes les simulations ont été faites à R_s est supposée constante pour la cellule décrite dans le tableau III.6.

Figure III.27. Les résultats de simulation montrent l'effet de R_s sur V_{OC} (a), FF (b) et le rendement (c) pour des cellules basées de CIGS sur les deux modèles une et deux-diodes. Calculs effectués à $300k$ et assurant que I_{SC} est constant comme décrit dans le tableau III.6

Figure. III.28 : Les résultats de simulation montrant l'effet de l'énergie de gap sur V_{OC} (a), FF (b) et l'efficacité (c), pour les cellules solaires à base de CIGS en utilisant les modèles à une-diode et deux-diodes avec R_S constant, $T=300K$ et $I_{SC} = (0.026 \text{ mA})$.

Chapitre IV

Figure IV.1 : Micrographie MEB d'une cellule solaire à base de Cu(In,Ga)Se_2

Figure IV.2 : Caractéristique $J(V)$ sous illumination et sous obscurité

Figure IV.3 : Rendement Quantique Externe d'une cellule solaire à base de $\text{Cu(In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{)Se}_2$

Figure IV.4 : Caractéristique Courant-Voltage sous illumination et sous obscurité pour le ZnO/CdS/CIGS/Mo .

Figure IV.5. Influence de l'épaisseur de la couche absorbeur CIGS sur la caractéristique $J(V)$.

Figure IV.6 : Paramètres photovoltaïques des cellules CIGSe pour différentes épaisseurs d'absorbeur.

Figure IV.7 : Réponse Spectrale simulée par un programme de calcul pour différentes épaisseurs de CIGSe.

Figure IV.8 : Paramètres photovoltaïques des cellules CIGSe pour différentes épaisseurs de la couche tampon CdS.

Figure IV.9 : Réponses spectrales pour différentes épaisseurs du CdS

Figure IV.10 : Influence de la température sur la caractéristique $J(V)$.

Figure V.11 : Paramètres photovoltaïques des cellules CIGSe pour différentes températures ;

Figure IV.12 : L'efficacité normale pour les différentes couches tampons ZnO, CdS et ZnS en fonction du gradient de température de la cellule solaire à base de CIGS

Figure IV.13 : Rendement Quantique Externe (EQE) simulé pour les deux cellules ZnO/CdS/CIGS/Mo et $\text{ZnO/ZnS(O,OH)/CIGS/Mo}$

Table des matières

Introduction Général

Chapitre I

I.1. Introduction	1
I.2. Conversion photovoltaïque	2
I.2.1. Principe de la conversion Photoélectrique.....	2
I.3. Les différentes filières photovoltaïques	7
I.3.1. La filière à base de Silicium Cristallin	7
I.3.2. Cellules multi-jonctions à haut rendement	8
I.3.3. Nouvelles technologies photovoltaïques	9
I.3.4. Technologie couche-mince.....	11
I.5. Conclusion	15
I.6. Références.....	18

Chapitre II

II.1. Introduction	24
II.2. Les cellules solaires à base de CIGS	24
II.2.1. principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	24
II.2.2. Les cellules à base de CIGS	27
II.2.3. Le matériau CIGS au sein de la cellule solaire	28
II.3. Références	35

Chapitre III

III.1. Introduction	40
III.2. Représentation des différentes Modèles	41
III.2.1. Modèle a Sept Paramètres (7P).....	41

III.2.2. Modèle a six Paramètres (6P)	42
III.2.3. Modèle a Cinq Paramètres (5P)	43
III.2.4. Modèle a Quatre Paramètres (4P)	44
III.2.5. Modèle a Trois Paramètres (3P)	44
III.2.6. Cas générale pour le Choix du Modèle	47
III.3. Modèle a Paramètres Constants	48
III.4. Les méthodes mathématique	51
III.4. 1. Fonction de Lambert W	51
III.4.2.La methode de Newton -Raphson.....	54
III.5. Résultats de comparaison entre deux approches (la méthode et la fonction).....	55
III.6. Détails de la modélisation et simulation numérique.....	61
III.6.1 Modèle 4P+Rp.	61
III.7. Influence des Différents Paramètres sur les Caractéristiques de la Cellule Solaire	66
III.7.1.Influence de la Température	66
III.7.2. Influence de la Résistance Série.....	67
III.7.3. Influence du facteur de qualité.....	69
III.8. Application dans les Cellules Photovoltaïques à Base de CIGS	70
III.8. 1. Modèle Equivalent du Circuit de la Cellule Solaire à base CIGS	71
III.8. 2. Résultats et Discussion	73
III.9. Conclusion	79
III.10. Références	80
III.11. Annexe. Calcul des erreurs	82

Chapitre IV

IV.1.Introduction	85
IV.2. Structure d'une cellule solaire à base de Mo/Cu(In,Ga)Se ₂ /CdS/ZnO:Al.....	86
IV.2.1. Substrat de Verre	86
IV.2.2. Molybdène	87
IV.2.3. Couche absorbante de Cu(In,Ga)Se ₂	87
IV.2.4. Couche tampon de CdS	87
V.2.5. Oxydes Transparents Conducteurs (OTC) à base de ZnO	88
IV.2.6. Grille métallique à base de Ni/Al/Ni	88

IV.3. Influence de la Réduction de l'épaisseur de la couche de CIGSe.....	88
IV.3.1. Caractéristique J(V)	88
IV.3.2. Rendement Quantique Externe	89
IV.4. Détails de l'application	91
IV.4.1. L'optimisation de la couche absorbeur CIGS en fonction de l'épaisseur.....	92
IV.4.2. Optimisation de l'épaisseur de la couche tampon de CdS	95
IV.5. Influence De La Température	97
IV.6. l'effet de la couches tampon CdS et ZnS sur la cracteristique I(V).....	100
IV.7. l'effet de la couches tampon CdS et ZnS sur la caractérisation de rendement quantique externe EQE	101
IV.8. Conclusion :	102
IV.9. Références	103

Conclusion Général

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 de vie ou sur l'environnement.

Un des principaux obstacles pour que le photovoltaïque devienne 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. Sur la partie système de conversion, les recherches se résument en deux points :

- 1) Le développement d'un modèle mathématique exact qui représente la cellule photovoltaïque réelle, et qui reflète l'influence des différentes conditions atmosphériques sur les paramètres de la cellule solaire.
- 2) Le développement d'une méthode d'optimisation efficace apte de déterminer le point de puissance maximale de la caractéristique $I(V)$ de la cellule pour n'importe quelle condition d'éclairement et de température, et quelque soit la nature du changement de ces conditions rapide ou lente.

Au début de ce manuscrit, nous avons donc voulu faire un bilan des différentes filières technologiques photovoltaïques afin de mieux comprendre les avancées et les perspectives à venir. Ainsi, dans le chapitre II les filières industrielles CIGS émergeant aujourd'hui dans le domaine photovoltaïque ont été divulguées.

Dans le chapitre III, on se basant sur deux parties: (1) la première concerne une étude comparative de plusieurs modèles caractérisant la cellule photovoltaïque et l'influence des paramètres intérieure et extérieure telles que la qualité de la diode et la température sur les paramètres électriques. (2) la deuxième partie concerne la description des deux types de modélisation et l'évaluation par la comparaison des résultats de simulation des deux modèles aux données expérimentales pour la cellule solaire à base du matériau CIGS.

Dans le dernier chapitre, l'influence de la réduction de l'épaisseur de la couche absorbante CIGSe sur les paramètres photovoltaïques et le rendement quantique externe de la cellule a été discutée. En effet, nous avons essayé dans ce chapitre de donner la configuration optimale qui offre le meilleur rendement et l'influence des différentes couches sur la caractéristique électrique $I(V)$ et EQE. Nous avons ensuite procéder à une comparaison entre les deux couches tampons CdS et ZnS pour améliorer la capacité de la cellule.

*Chapitre I : Développement Photovoltaïque,
Perspectives*

I.1. Introduction

Dans le contexte global d'améliorations des performances d'un système photovoltaïque (PV), il nous a semblé intéressant de commencer ce travail par des principaux axes de développement photovoltaïques afin de mieux appréhender les potentialités de chacune. Ainsi, en comprenant mieux les fondamentaux, cela nous a permis de comprendre les propriétés de conversion de chaque solution technologique mais aussi ses limites. Nous proposons de partager cette vision globale des avancées technologiques avec le lecteur afin de pouvoir anticiper les besoins futurs et ainsi que chacun puisse se forger son propre avis sur le développement photovoltaïque du futur.

Nous rappelons brièvement le principe de la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique reposant sur l'effet photoélectrique, c'est à dire sur la capacité des photons à créer des porteurs de charge (électrons et trous) dans un matériau.

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

on trouve de plus en plus de cellules multi-jonction améliorant d'autant les performances de cette filière.

I.2. Conversion photovoltaïque

I.2.1. Principe de la conversion Photoélectrique

Le rayonnement solaire est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet (0.2 μm) à l'infrarouge lointain (2.5 μm). On utilise la notion AM pour Air Mass afin de caractériser le spectre solaire en terme d'énergie émise [1, 2]. L'énergie totale transportée par le rayonnement solaire sur une distance soleil-terre est de l'ordre de 1350W/m² (AM0) dans l'espace hors atmosphère terrestre (Figure I.1). Lorsque le rayonnement solaire traverse l'atmosphère, il subit une atténuation et une modification de son spectre, à la suite de phénomènes d'absorption et de diffusion dans les gaz, l'eau et les poussières. Ainsi, la couche d'ozone absorbe une partie du spectre lumineux provenant du soleil, et en particulier une partie des ultraviolets dangereux pour la santé. Le rayonnement solaire direct reçu au niveau du sol (à 90° d'inclinaison) atteint 1000 W/m² du fait de l'absorption dans l'atmosphère (AM1). Cette valeur change en fonction de l'inclinaison des rayons lumineux par rapport au sol. Plus l'angle de pénétration θ est faible, plus l'épaisseur atmosphérique que les rayons auront à traverser sera grande, d'où une perte d'énergie conséquente. Par exemple, l'énergie directe transportée par le rayonnement solaire atteignant le sol avec un angle de 48° avoisine les 833 W/m² (AM1.5).

Pour connaître le rayonnement global reçu au sol, il faut ajouter à ce dernier le rayonnement diffus. Ce rayonnement concerne tout le rayonnement dont la trajectoire entre le soleil et le point d'observation n'est pas géométriquement rectiligne et qui est dispersé ou réfléchi par l'atmosphère ou bien le sol. En considérant ceci, on obtient une référence du spectre global notée AM1.5 avec une puissance de 1000W/m², la Figure 1-2 correspondant à nos latitudes.

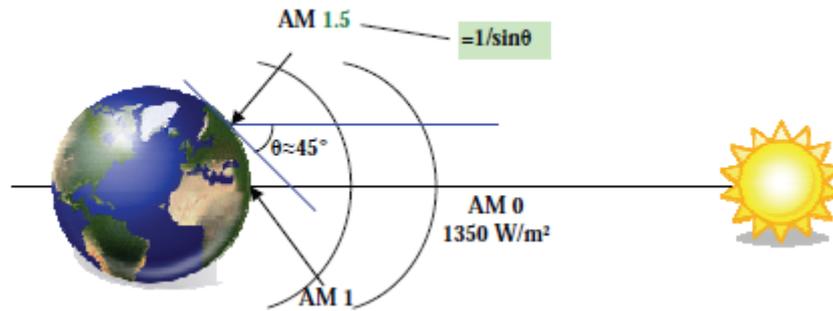


Figure I.1 : Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la convention AM.

Le scientifique français, Edmond Becquerel, fut le premier à découvrir en 1839 l'effet photoélectrique [3]. Il a trouvé que certains matériaux pouvaient produire une petite quantité de courant sous l'effet de la lumière. Par la suite, Albert Einstein a découvert, en travaillant sur l'effet photoélectrique, que la lumière n'avait pas qu'un caractère ondulatoire, mais que son énergie était portée par des particules, les photons. L'énergie d'un photon est donnée par la relation :

$$E = h.c / \lambda \quad (\text{I-1})$$

où : h est la constante de Planck,

c : Vitesse de la lumière

λ : longueur d'onde.

Ainsi, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande. Cette découverte valut à Albert Einstein le prix Nobel en 1905.

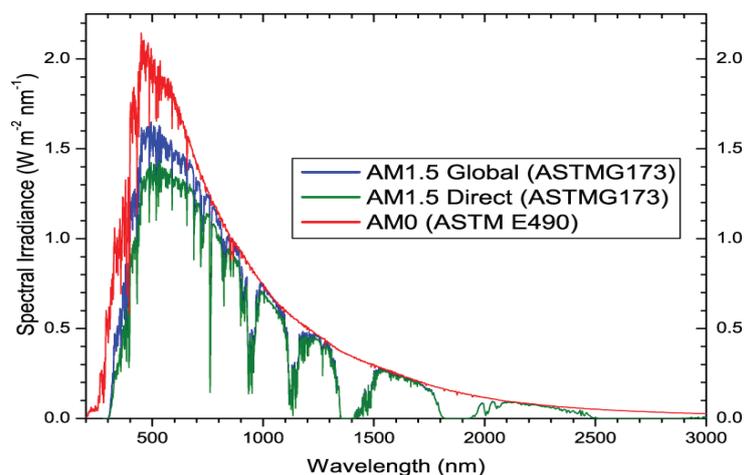


Figure I.2 : Spectres Solaires relevés dans plusieurs conditions selon la convention AM. Source NREL solar spectrum.

La conversion photovoltaïque aujourd'hui largement utilisée peut être simplement définie comme la transformation de l'énergie des photons en énergie électrique grâce au processus d'absorption de la lumière par la matière. Lorsqu'un photon est absorbé par le matériau, il passe une partie de son énergie par collision à un électron l'arrachant littéralement de la matière. Ce dernier étant précédemment à un niveau d'énergie inférieur où il était dans un état stable passe alors vers un niveau d'énergie supérieur, créant un déséquilibre électrique au sein de la matière se traduisant par une paire électron-trou, de même énergie électrique. Généralement, la paire électron-trou revient rapidement à l'équilibre en transformant son énergie électrique en énergie thermique. De même, toute l'énergie des photons n'arrivant pas à se transformer en électricité est absorbée par le matériau sous forme thermique. Le matériau constituant les capteurs PV a alors sa température interne qui augmente proportionnellement à l'énergie solaire reçue. Le taux de conversion photon-électron est faible car un certain nombre de conditions doivent être réunies pour que ce phénomène se produise. L'effet thermique est donc majoritaire sur la plupart des capteurs détériorant d'autant plus les performances de ces derniers [4].

Même si le phénomène électrique est secondaire devant le phénomène thermique, récupérer toute ou partie de l'énergie électrique est le premier objectif des capteurs photovoltaïques sous forme de cellules ou de générateurs. Cela est possible grâce par exemple à des cellules solaires réalisées en associant un matériau semi-conducteur dopé **N** à un autre semi-conducteur dopé **P** (Figure I.3). L'énergie produite par l'absorption d'un photon dans un matériau se traduit du point de vue électrique par la création d'une paire électron-trou. Cette réaction entraîne une différence de répartition des charges créant ainsi une différence de potentiel électrique, c'est l'effet photovoltaïque. Le fait d'avoir associé deux types de matériaux pour créer une jonction permet de pouvoir récupérer les charges avant que ces dernières ne se soient recombinées dans le matériau qui redevient alors neutre. La présence de la jonction **PN** permet ainsi de maintenir une circulation de courant jusqu'à ses bornes. Le nombre de photons par unité de longueur d'onde est une donnée à connaître pour les applications photovoltaïques pour estimer l'énergie totale disponible. La longueur d'onde correspondant au maximum de photons est de l'ordre de 650-670nm.

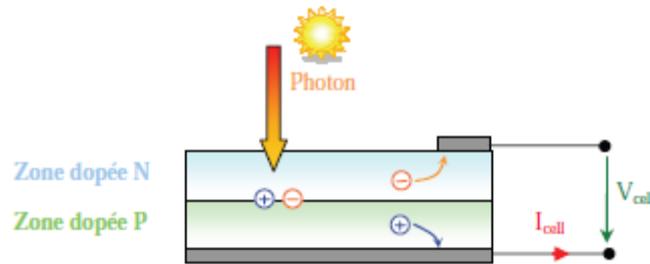


Figure I.3 : Schéma de principe de la conversion photoélectrique

La plupart des cellules photovoltaïques utilisent des semi-conducteurs pour récolter les paires électron-trou créées par la collision des photons dans le matériau. Cependant, selon le matériau utilisé, le nombre de photons utiles (qui peuvent être absorbés) diffère. En effet, chaque matériau possède son propre gap énergétique (bande d'énergie interdite). Tout photon possédant une énergie inférieure à ce gap et arrivant à la surface du matériau n'aura pas assez d'énergie pour arracher un électron au matériau même s'il entre en collision avec un. Le courant produit par un capteur **PV** est donc beaucoup plus faible que la quantité de photons arrivant sur le matériau car plusieurs conditions doivent être réunies pour que réellement l'énergie d'un photon se traduise en courant (compatibilité du matériau avec les longueurs d'ondes du spectre solaire, énergie des photons à leur arrivée sur le matériau, probabilité de rencontre d'un photon avec un électron, incidence du rayonnement, épaisseur du matériau,...). De plus, un autre compromis doit être fait par le concepteur de capteurs PV. Si le gap du matériau est grand, peu de photons auront assez d'énergie pour créer du courant mais aux bornes de la cellule, la tension en circuit ouvert sera grande et facilitera d'autant plus l'exploitation de l'énergie électrique. A l'inverse, un matériau avec un faible gap absorbe plus de photons mais présente une tension plus faible à ses bornes. Ce compromis a été quantifié par Shockley et Quessier [5]. Ainsi par exemple, avec un seul matériau, le rendement de conversion maximal théorique est de 31% pour un gap énergétique d'environ 1,4 eV. Par comparaison, le gap du silicium qui est aujourd'hui le matériau le plus utilisé pour constituer des cellules dans les capteurs PV terrestres, n'est pas très loin de cet optimum avec 1,12 eV. Ainsi, le maximum théorique pour une simple jonction Si est d'environ 29%.

La différence de potentiel présente aux bornes d'une jonction **PN** soumise à un éclairage est également mesurable entre les bornes de la cellule PV. Typiquement, la tension maximale d'une cellule (**PN**) est d'environ 0,5 à 0,8 V. Elle peut être directement mesurée à ses bornes sans charge (circuit ouvert). Cette tension est nommée tension de circuit

ouvert (V_{oc}). Lorsque les bornes d'une cellule sont court-circuitées, on peut mesurer le courant maximal produit par la cellule PV et on le nomme communément courant de court circuit (I_{cc}). Ces valeurs peuvent changer fortement en fonction du matériau utilisé, de la température et de l'ensoleillement. La Figure I.4 représente les caractéristiques typiques mesurables $I_{cell}=f(V_{cell})$ d'une jonction PN soumise à un flux lumineux constant et dans l'obscurité [6].

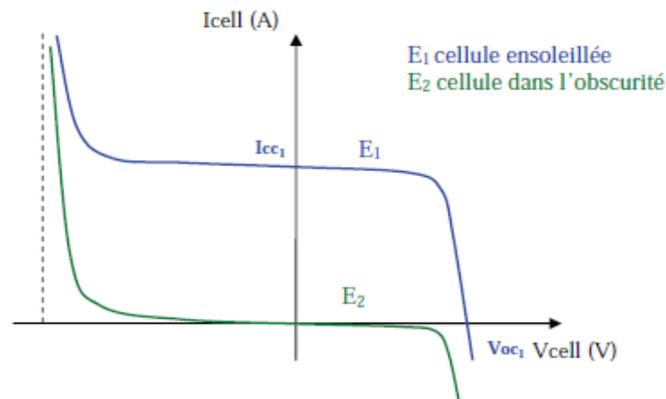


Figure 1.4 : Caractéristiques I(V) d'une cellule photovoltaïque soumise à différents éclairagements

On parle souvent de rendement de conversion pour des cellules photovoltaïques, ce terme correspond à la capacité de la cellule à transformer l'énergie des photons qui la percutent. Ces mesures sont aujourd'hui normalisées. Les cellules solaires sont donc testées par les constructeurs sous un spectre lumineux artificiel correspondant à un spectre solaire typique AM1.5 (soit à l'irradiance totale reçue sur le sol terrestre à une altitude de 0° avec un angle de 48°) sous une température fixe de 25°C . Pour simplifier, cette convention a permis de normaliser les rendements donnés dans les notices des capteurs afin de pouvoir les comparer. La puissance moyenne totale reçue lors des tests par les cellules assemblées en module PV est de 1000 W/m^2 sous 25°C .

De nombreux scientifiques travaillent sur l'augmentation des rendements de conversion des cellules photovoltaïques. Actuellement, les panneaux commerciaux ont pour la plupart d'entre eux, un rendement d'environ 14%. Ceci peut se traduire par la production de 140 Watts crêtes pour un module PV qui reçoit 1000 W/m^2 . Les recherches sur les matériaux qui constituent les cellules sont en plein essor de même que celles sur l'optimisation de fabrication de cellules et de panneaux PV. Pour mieux situer nos travaux sur les systèmes de conversion juste à la sortie des cellules et des panneaux, il nous a semblé important de faire une synthèse des avancées actuelles accomplies sur la production de l'énergie PV. Les

sections suivantes de ce chapitre exposent ainsi les avancés et les innovations majeures apportées aux matériaux photovoltaïques dans la course au rendement énergétique. Auparavant, nous rappelons brièvement les modélisations électriques que nous utilisons et les principales définitions en vigueur.

I.3. Les différentes filières photovoltaïques

I.3.1. La filière à base de Silicium Cristallin

Les modules photovoltaïques basés sur silicium cristallin dominent depuis toujours le marché avec plus de 90% des ventes. Les cellules à partir de plaquettes de silicium cristallisé (c-Si) (figure I.5) se divisent en deux catégories distinctes, celles à partir de silicium monocristallin (mc-Si) et celles à partir de silicium poly-cristallin (pc-Si). Le silicium monocristallin est plus cher que le silicium multi-cristallin mais permet d'obtenir un rendement plus élevé, avec près de 24,7% contre 19,8% de rendement record sur petite cellule en laboratoire [7, 8].

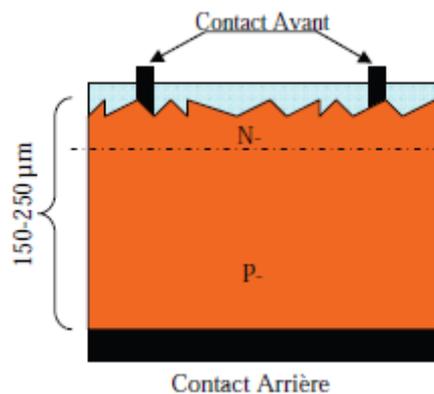


Figure I.5 : Schéma de principe d'une cellule à base de silicium cristallin.

La filière silicium a connu initialement un grand essor grâce à l'expérience des industries du semi-conducteur qui utilisent depuis longtemps déjà les propriétés électriques du silicium. Il est également intéressant de noter que l'industrie photovoltaïque, qui utilisait comme source de silicium les rejets de l'industrie électronique, doit maintenant faire face à une pénurie croissante de matière première de silicium de qualité solaire du fait de l'accroissement de la demande. Cette situation entraîne donc une mutation industrielle avec la mise en place progressive de nouvelles filières spécifiques de production de silicium photovoltaïque marquant une nouvelle phase de développement. Les modules photovoltaïques

du commerce revendiquent aujourd'hui un rendement de 15 à 19,6 % pour les cellules les plus performantes (SunPower).

La technologie silicium a encore un grand rôle à jouer dans le développement photovoltaïque. Cependant, elle ne sera pas la seule technologie employée. En effet, pour baisser les prix et rendre abordable cette énergie, plusieurs tentatives de nouveaux développements technologiques existent actuellement. Nous présentons dans la suite ceux qui nous semblent les plus prometteurs.



Figure I.6 : Évolution de la taille des cellules silicium photovoltaïques ces dernières années

I.3.2. Cellules multi-jonctions à haut rendement

Aujourd'hui, la plupart des cellules photovoltaïques inorganiques sont constituées d'une simple jonction PN. La réponse photovoltaïque d'une cellule simple jonction est limitée. Seule la proportion du spectre solaire dont l'énergie des photons est supérieure au gap d'absorption du matériau est utile, l'énergie des photons plus faible n'est donc pas utilisable. D'autre part, même si l'énergie des photons est suffisante, la probabilité de rencontrer un électron est faible. Ainsi, la plupart des photons traversent le matériau sans avoir transféré leur énergie. Une première réponse pour limiter les pertes est connue de longue date du point de vue technologique, il suffit d'utiliser des systèmes à plusieurs niveaux, en empilant des jonctions possédant des gaps décroissants (Figure I.7). Ainsi il est possible d'exploiter le spectre solaire dans sa quasi-totalité avec des rendements de conversion très importants.

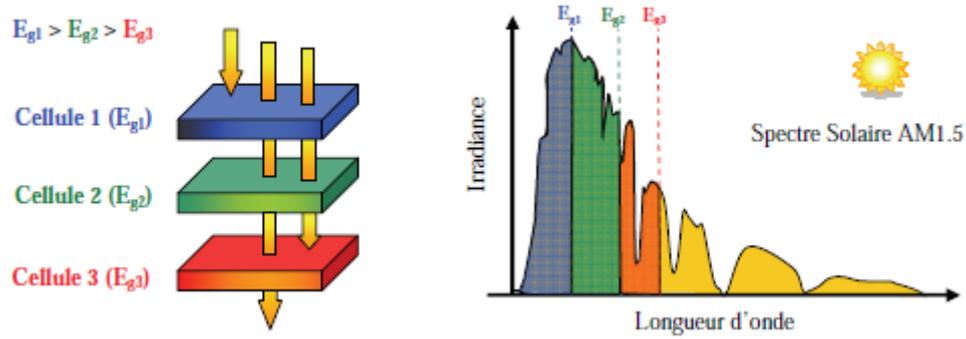


Figure I.7 : Principe de la cellule à hétérojonction.

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

I.3.3. Nouvelles technologies photovoltaïques

On utilise de plus en plus de matériaux organiques dans le domaine de l'optoélectronique, avec des perspectives d'électronique organique voire moléculaire, pour l'éclairage à l'aide de diodes électroluminescentes organiques (OLED : Organic Light-Emitting Diode). Bien que les optimisations des matériaux à mettre en œuvre ne soient pas les mêmes, le domaine du photovoltaïque bénéficie depuis quelques années des avancées technologiques de l'optoélectronique. Ainsi, bien que cette filière soit vraiment récente, les progrès annuels sont spectaculaires. Les matériaux organiques, moléculaires ou polymériques, à base de carbone, d'hydrogène et d'azote, sont particulièrement intéressants en termes d'abondance, de coût, de poids et de mise en œuvre. Comme les semi-conducteurs, ils possèdent des niveaux d'énergies susceptibles d'absorber les photons en créant des paires électron-trou utilisables grâce à des transitions entre les niveaux dits HOMO (Highest Occupied Molecular Orbital) et des niveaux dits LUMO (Lowest Unoccupied Molecular Orbital). En l'absence de séparation, les paires électron-trou peuvent se recombiner en émettant des photons de la longueur d'onde correspondante (fluorescence, luminescence) plutôt que se convertir en chaleur comme vu précédemment pour les filières inorganiques. La séparation des charges reste encore aujourd'hui un des points bloquants pour être effectuée efficacement. Si elles peuvent être séparées et transportées vers un circuit extérieur grâce à

deux phases adjacentes, on obtient alors des cellules photovoltaïques d'un nouveau type tel que celle présentée en figure I.8.

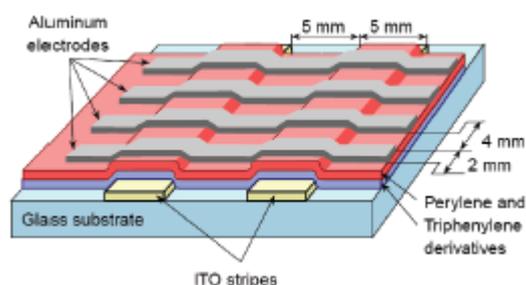


Figure I.8 : Schéma de principe d'une cellule organique

Pour en faire des cellules organiques PV à part entière dans le futur, il faut améliorer les propriétés de création de paires électron-trou dans des molécules organiques ou des polymères mais également développer des méthodes de séparation des paires en associant un matériau accepteur et un matériau donneur, grâce à des positions différentes des bandes énergétiques. On parle dans ce contexte de matériaux LUMO et HOMO. Un des points les plus difficiles est la séparation de ces deux phases qui ont tendance à se mélanger car les matériaux sont solubles l'un avec l'autre. Cependant une avancée importante a permis de séparer spontanément les donneurs et les accepteurs en rendant les matériaux non solubles [21, 22]. Dans le cas des polymères, tout se passe comme si on avait deux catégories de fibres intimement mélangées, l'une conduisant les électrons et l'autre les trous [23].

Le rendement de ces cellules solaires organiques est encore inférieur à 3% à cause justement de la nature du mélange et des problèmes de recombinaisons électroniques [26]. L'oxydation de la cellule est encore un autre problème auquel il faut se pencher en recherche pour trouver des solutions viables à long terme. Malgré tous ces inconvénients, le développement de ces cellules risque de persister à l'avenir car elles présentent une grande facilité de fabrication. En effet, les matériaux actifs peuvent s'étaler sur de grandes surfaces. Comme ces cellules peuvent facilement se développer sur matériaux souples, leur flexibilité quasi naturelle est également un atout. Le coût de ces cellules organiques est inférieur à celui des cellules à colorants et elles peuvent même être biodégradables. Les cellules solaires organiques avec leurs faibles coûts de matière première, leurs faibles besoins énergétiques de

production et leurs capacités à être fabriquées à grande échelle sont des candidates sérieuses à fort potentiel de développement photovoltaïque à long terme.

I.3.4. Technologie couche-mince

Les cellules PV dites couche mince constituent ce que certains appellent les cellules de seconde génération car elles font historiquement suite aux cellules en silicium cristallin relativement épaisses. L'intérêt de la technologie couche mince vient de la faible quantité de matériaux nécessaire à la fabrication d'une cellule comparativement aux cellules classiques. Contrairement aux cellules silicium cristallin de première génération, on ne dépose que la quantité de matériau photosensible efficace pour absorber l'essentiel du rayonnement solaire (quelques microns d'épaisseurs suffisent). Par ailleurs, on utilise des méthodes de fabrication moins coûteuses des cellules qui permettent une intégration totale. Les trois technologies émergentes sont aujourd'hui :

- le Silicium amorphe et microcristallin noté TFSi (*Thin-Film Silicon*).
- Le Semi-conducteur Poly-cristallin CdTe.
- L'alliage Cu(In, Ga)Se_2 (*Cuivre-Indium/Gallium-Sélénium*) noté dans la littérature CIGS.

I.3.4.1. Silicium couche-mince

Dans la technologie TFSi basée sur le silicium non cristallisé, le silicium amorphe (noté a-Si) peut être directement déposé sur un substrat de verre à basse température par un procédé de dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma (PECVD : Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition) (Figure I.9) [27]. On dépose d'abord, sur le verre, une couche d'oxyde transparente conductrice d'une épaisseur de $0,5 \mu\text{m}$ (TCO : Transparent Conductive Oxide). Cette étape est suivie par les étapes de dépôt suivantes :

- Une couche de a-Si de type N
- Une couche a-Si semi-isolante ($1 \mu\text{m}$ au total)
- Une couche de a-Si dopée P
- Une dernière couche métallique arrière à base d'Argent assure la connectique

Le processus de fabrication de ces cellules permet d'abaisser significativement les coûts de productions. En effet, le cycle de production ne nécessite que très peu d'énergie et le processus peut générer de grandes surfaces unitaires, de l'ordre du mètre carré, en un seul tenant. Pour fabriquer un module, il suffit d'ajouter au processus une déposition de matériau conducteur entre les cellules servant d'interconnexion entre elles (Figure I.9). Ainsi, grâce à

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

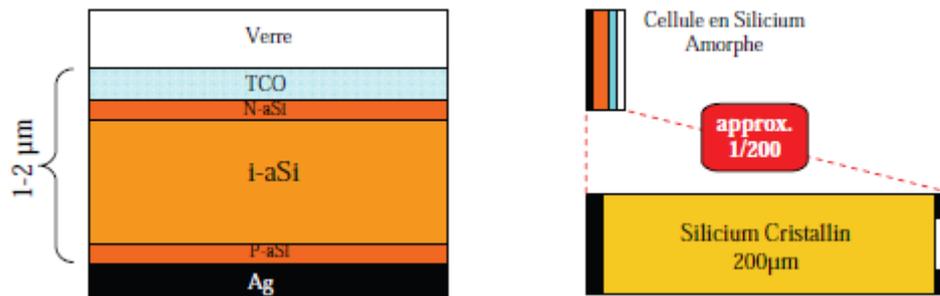


Figure I.9 : Schéma de principe d'une cellule à base de Silicium amorphe et comparaison à une cellule en Silicium cristallin.

I.3.4.2. Filières non silicium

Les recherches actuelles sur les matériaux PV portent également sur d'autres matériaux que le silicium, mieux adaptés à une utilisation en couches minces et délivrant de hauts rendements à des coûts relativement bas. Deux filières semblent s'imposer progressivement, l'une basée sur le CdTe et l'autre sur les alliages CIGS.

Les cellules CGIS (figure I.10) sont constituées par empilement. Tout d'abord, une couche métallique de molybdène de $0,5 \mu\text{m}$ d'épaisseur est déposée sur du verre de vitre pour réaliser le contact arrière. Puis on vient déposer une couche CIGS de type P, d'environ $1,5 \mu\text{m}$. Suit une couche de CdS ou de ZnS (Sulfure de Cadmium et Zinc Sulfuré) d'environ 50 nm , et enfin une couche de ZnO (Oxyde de Zinc) de type N, de $1 \mu\text{m}$, servant de contact avant conducteur et transparent. Finalement, la cellule est encapsulée par couverture par une vitre [33, 34]. Dans le cas du CdTe, une couche de CdS de type N est déposée sur du verre, puis une couche de CdTe de type P, d'environ $2 \mu\text{m}$, et une couche conductrice de carbone servant de deuxième contact.

La technologie CIGS exhibe actuellement le meilleur rendement de production pour une cellule et pour des modules par rapport à toutes les technologies couches minces inorganiques avec des cellules pouvant atteindre 19.9% en laboratoire [35, 36] et des modules commerciaux de 12%. Cependant, il reste un grand nombre de points à améliorer afin de réduire le prix de ces cellules. Le principal challenge de la technologie CIGS couche mince est la réduction du prix des matériaux. Diverses pistes existent pour essayer de remplacer les

matériaux chers comme l'InGa par de l'Al. De plus, il est nécessaire également de trouver des solutions pour moins gaspiller la matière première active pendant la fabrication. Une dernière piste consiste à réduire tout simplement l'épaisseur de la couche active.

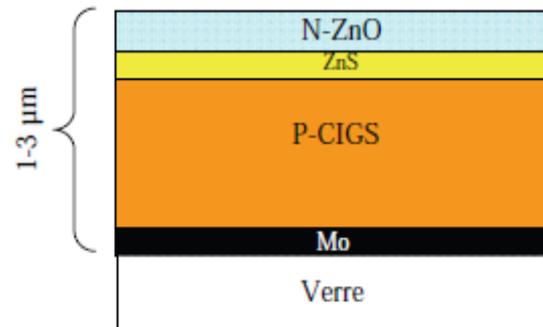


Figure I.10 : Schéma de principe d'une cellule à base de CIGS

La simplicité chimique du matériau à base de Tellure de Cadmium (**CdTe**) et sa stabilité en font un matériau attractif. Ses propriétés thermo-physiques et ses caractéristiques chimiques permettent de fabriquer des cellules simplement et à faible coût. Le rendement des cellules en CdTe dépend fortement de la manière dont les couches actives sont déposées (température de dépôt, vitesse et nature du substrat). Comparé aux autres technologies couche mince, le CdTe est plus facile à déposer et donc plus approprié à la production de module PV de surface importante. L'inconvénient majeur actuel repose sur la toxicité reconnue du Cadmium bien qu'il a été démontré que les risques environnementaux liés aux cellules PV en CdTe sont minimes [37]. En effet, les modules en CdTe ne présenteraient pas de risques sanitaires et environnementaux, et un simple recyclage des modules en fin de vie résoudrait définitivement le problème de pollution. L'utilisation de CdTe dans les modules photovoltaïques est en fait beaucoup moins inquiétante que d'autres utilisations du cadmium, comme par exemple dans les batteries Ni-Cd. Le fabricant américain de panneaux CdTe First Solar est l'un des premiers industriels à proposer un recyclage de ses propres produits. En effet, l'entreprise est soucieuse de récupérer le cadmium pour des raisons environnementales et de coûts. Contrairement aux wafers de silicium, les cellules ne peuvent pas être extraites et réutilisées presque telles quelles. Elles doivent impérativement repasser par une étape métallurgique. First Solar estime que ce traitement pourrait également convenir aux cellules de type CIS (Cuivre-Indium-Sélénium). D'autres fabricants, comme Würth Solar, travaillent plus spécifiquement sur cette question.

D'un point de vue rendement énergétique, la filière CdTe, présente des rendements de cellules record de 16.5% en laboratoire [38] et des modules commerciaux à près de 10.7% [39]. L'Europe et les USA produisent déjà des panneaux en couches minces CdTe. Leurs rendements avoisinent les 9% et les coûts de fabrication semblent être compétitifs avec la filière c-Si. Les recherches montrent que le CdTe pourrait atteindre un rendement de 15% pour un prix de 0.5 €/Wc à moyen terme.

I.3.4.3. Multi-jonctions en couche mince

Pour améliorer les performances des cellules couche-mince, des architectures double et triple jonctions ont été développées. Elles sont inspirées des cellules multi-jonction développées initialement pour le spatial pour bénéficier au maximum du spectre solaire. Elles présentent néanmoins une mise en œuvre plus simple et mieux maîtrisée aujourd'hui pour le marché terrestre. Nous pouvons citer par exemple les cellules tandem à base de silicium à la fois amorphe et polycristallin (a-Si/ μ c-Si) (figure I.11) [40, 41]. Les meilleurs rendements stabilisés en laboratoire sont de l'ordre de 12% pour ces cellules. Il s'agit comme pour les multi-jonctions d'empiler deux cellules photovoltaïques qui absorbent des photons de longueurs d'onde différentes. Par ce mécanisme, l'ensemble tandem composé de l'association de deux cellules, permet d'absorber un plus large spectre lumineux et ainsi produire plus d'énergie qu'une cellule simple jonction. La première couche en Silicium amorphe absorbe une partie du spectre alors que l'autre partie, qui la traverse, est absorbée par la seconde couche en Silicium microcristallin. Le procédé de fabrication est le même que pour les couches minces, les différentes couches qui composent la cellule sont déposées par PECVD sur un substrat de verre.

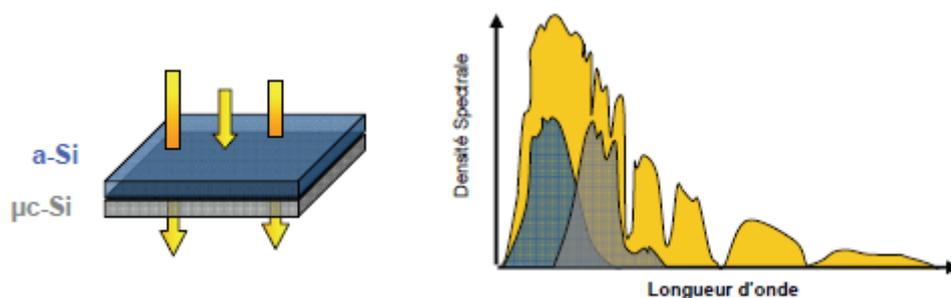


Figure I.11 : Cellule Tandem a-Si/ μ c-Si & spectre solaire et spectres d'absorption

I.5. Conclusion

Le monde de la conversion photovoltaïque, aussi bien au niveau de la recherche qu'au niveau industriel, connaît depuis quelques années une mutation profonde associée à l'intérêt croissant pour l'énergie photovoltaïque. Ce chapitre nous a permis d'explorer le principe de la conversion photovoltaïque ainsi que les différentes technologies utilisées pour y parvenir. Des aspects aussi bien technologiques qu'électriques ont été abordés afin de mieux comprendre l'ensemble du mécanisme de conversion photovoltaïque. Les possibilités d'innovation sont très grandes et sont portées par le bouillonnement des recherches en vue d'améliorer les filières existantes mais surtout d'en trouver des nouvelles et de préparer les prochaines ruptures, autant technologiques notamment dans les matériaux et les rendements que conceptuelles par des approches conjointes matériaux-système.

Un élément clé dans ces recherches est la capacité de conversion photovoltaïque, il nous faut donc parler du « graal » des recherches dans le domaine du photovoltaïque qui est l'obtention de rendements très élevés. Ces recherches s'appuient sur l'analyse théorique de la conversion photon-électron adaptée à l'ensemble du spectre solaire. Celles-ci montrent que le rendement maximum théorique serait alors d'environ 85% [47]. On est loin de ces rendements. Le chemin à parcourir par rapport aux valeurs actuelles laisse un potentiel d'au moins 30% d'amélioration par rapport à des cellules classiques. La Figure I.12 montre l'évolution des rendements record des principales filières photovoltaïques actuelles. On y retrouve les différentes cellules au silicium monocristallin et poly-cristallin, les cellules au silicium amorphe, les cellules en alliage de diSélénium de Cuivre Indium Galium (noté CIGS), au tellure de cadmium (CdTe), mais aussi les cellules à base de composés III-V qui appartiennent à la catégorie des cellules multi-jonctions. À côté des filières bien établies, sont apparues de nouvelles filières, basées sur l'utilisation de colorants ou de matériaux organiques, qui n'en sont qu'à leurs balbutiements.

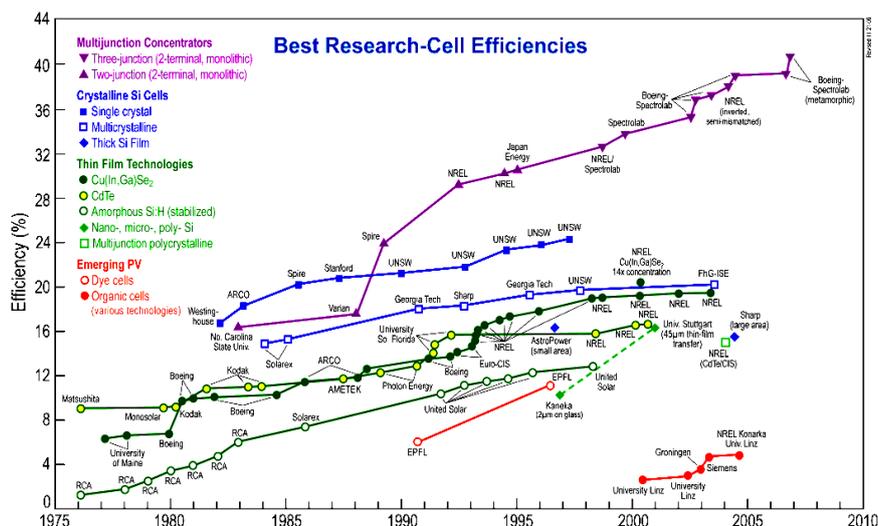


Figure 1.12 : Rendements record de cellules photovoltaïques obtenus en laboratoire.

Source NREL.

Dans chacun de ces domaines, nous avons montré les problèmes de chaque filière et les voies de développement actuellement suivies. Par exemple, pour la filière silicium cristallin, qui représente 90% du marché du photovoltaïque, la diminution des pertes liée à la découpe des cellules est un grand challenge en soi qui est en plus assortie d'un souhait en même temps de réduire l'épaisseur de chaque cellule pour économiser la matière première. Cependant, le rendement de cette filière simple jonction est théoriquement limité à 29%. Pour trouver des cellules à haut rendement, on doit maintenant se tourner vers les cellules multi-jonctions dont le développement a été motivé en priorité par les applications spatiales. Toutefois, ces cellules sont encore trop chères pour concurrencer le marché photovoltaïque terrestre mais certains pensent pouvoir réduire ce prix en utilisant des concentrateurs solaires. A côté, on trouve actuellement une filière en pleine essor basée sur les technologies « couche mince ». Le principe est de convertir le plus de photons possibles en électricité en utilisant le moins de matériau réactif possible. L'intérêt de cette filière est la réduction du coût de fabrication grâce à une réduction de matière première et à une méthode d'intégration des cellules totale. Contrairement aux filières de silicium cristallins, cette technologie ne nécessite ni de découpes ni de post-assemblage des cellules pour aboutir à un module. Ici, les matériaux photovoltaïques sont directement déposés sur substrat par le biais de plasma sous différents processus, ce qui permet de produire directement un module.

Dans notre parcours à travers les différentes filières photovoltaïques, nous nous sommes attachés à développer des modèles électriques simplifiés de chaque type de cellule photovoltaïque. Cette démarche permet de visualiser rapidement l'évolution des caractéristiques électriques des cellules photovoltaïques en fonction de leur composition, Figure I.13.

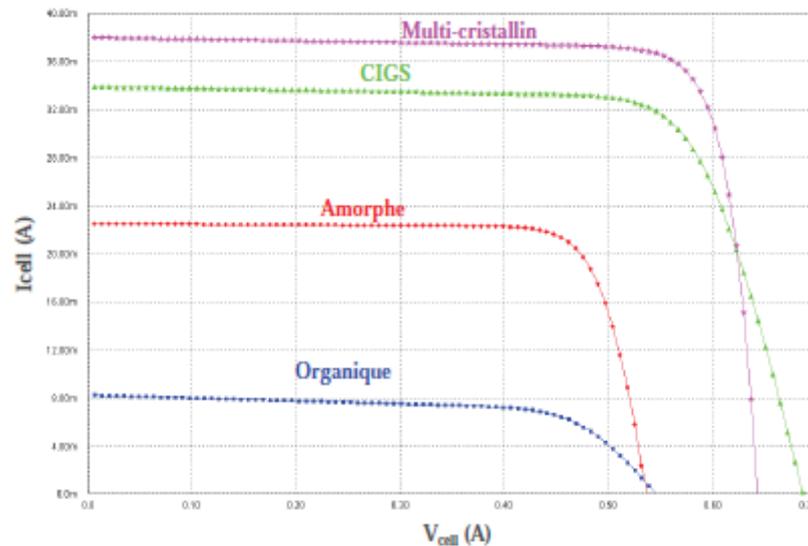


Figure I.13. Caractéristiques électriques simulées de cellules à simple jonction issues de différentes filières photovoltaïques

I.6. Références

- [1] American Society for Testing and Materials (ASTM) Terrestrial Reference Spectra for Photovoltaic Performance Evaluation, ASTM G173-03 Tables: Extraterrestrial Spectrum, Terrestrial Global 37 deg South Facing Tilt & Direct Normal + Circumsolar. Disponible sur : <http://tredc.nrel.gov/solar/spectra/am1.5/>
- [2] Riordan, C.; Hulstron, R.; « **What is an air mass 1.5 spectrum? [solar cell performance calculations]** »; Photovoltaic Specialists Conference, 1990, Conference Record of the Twenty First IEEE; 21-25 May 1990 Page(s):1085 - 1088 vol.2, Digital Object Identifier 10.1109/PVSC.1990.111784
- [3] Edmond Becquerrel ; « **Mémoire sur les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires** » ; C.R. Acad. Sci., 9 :561-567, 1839.
- [4] Emery, K.; Burdick, J.; Caiyem, Y.; Dunlavy, D.; Field, H.; Kroposki, B.; Moriarty, T.; Ottoson, L.; Rummel, S.; Strand, T.; Wanlass, M.W.; **Temperature dependence of photovoltaic cells, modules and systems** Photovoltaic Specialists Conference, 1996, Conference Record of the Twenty Fifth IEEE, 13-17 May 1996 Page(s) : 1275 - 1278
- [5] William Shockley AND Hans J. Queisser ; « **Detailed Balance Limit Of Efficiency Of P-N Junction Solar Cells** » ; J. APPL. PHYS. 32, 510 (1961); DOI:10.1063/1.1736034.
- [6] Zaouk, D.; Zaatat, Y.; Khoury, A.; Llinares, C.; Charles, J.-P.; Bechara, J.; Ajaka, M.; « **Electrical and optical characteristics of NAPS solar cells of Si (PiN) structure** », Environment and Solar, 2000 Mediterranean Conference for 16-17 Nov. 2000 Page(s):93 - 95
- [7] Jianhua Zhao; Aihua Wang; Campbell, P.; Green, M.A.; « **A 19.8% efficient honeycomb multicrystalline silicon solar cell with improved light trapping** », Electron Devices, IEEE Transactions on Volume 46, Issue10, Oct.1999, Page(s):1978–1983
- [8] Jianhua Zhao; Aihua Wang; Altermatt, P.P.; Wenham, S.R.; Green, M.A.; « **24% efficient silicon solar cells** », Photovoltaic Energy Conversion, 1994. Conference Record of the Twenty Fourth ; IEEE Photovoltaic Specialists Conference - 1994, 1994 IEEE First World Conference on, Volume 2, 5-9 Dec. 1994 Page(s) : 1477-1480 vol.2
- [9] Chenlei Wang, Hui Zhang, Tihu Wang, Lili Zheng, « **Solidification interface shape control in a continuous Czochralski silicon growth system** », Journal of Crystal Growth, Volume 287, Issue 2, 25 January 2006, Pages 252-257
- [10] Theresa L. Jester, « **Crystalline Silicon Manufacturing Progress** », Progress In Photovoltaics: Research AND Applications , Prog. Photovolt: Res. Appl. 2002; 10:99-106 (DOI: 10.1002/pip.414)

- [11] Kray, D.; Schumann, M.; Eyer, A.; Willeke, G.P.; Kubler, R.; Beinert, J.; Kleer, G.; “**Solar Wafer Slicing with Loose and Fixed Grains**”; Photovoltaic Energy Conversion Page(s) : 948–951, Digital Object Identifier 10.1109/WCPEC.2006.279613
- [12] Muller, A.; Reinecke, M.; Bachmann, A.; Seifert, C.; Trommer, T.; Schindler, R.; « **Towards larger and thinner wafers used in photovoltaic** »; Photovoltaic Specialists Conference, 2005. Conference Record of the Thirty-first IEEE, 3-7 Jan. 2005 Page(s) : 1019 - 1022.
- [13] Hahn, G.; Seren, S.; Kaes, M.; Schonecker, A.; Kalejs, J.P.; Dube, C.; Grenko, C.; Belouet, C.; **Review on Ribbon Silicon Techniques for Cost Reduction in PV Photovoltaic Energy Conversion, Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference on** Volume 1, May 2006 Page(s) : 972 - 975 Digital Object Identifier 10.1109/WCPEC.2006.279280
- [14] Laure Marandet, « **La deuxième vie des modules** », Systèmes Solaires, le journal des énergies renouvelables, Mars-Avril 2008, n°184.
- [15] Working group Science, Technology and Applications of the EU PV Technology Platform ; « **A Strategic Research Agenda (SRA) for Photovoltaic Solar Energy Technology** », June 2007.disponible sur : www.solarserver.de/solarmagazin/solarreport_1107_e.html
- [16] King, R. R.; Law, D. C.; Edmondson, K. M.; Fetzer, C. M.; Kinsey, G. S.; Yoon, H.; Sherif, R. A.; Karam, N. H., « **40% efficient metamorphic GaInP/GaInAs/Ge multijunction solar cells** », Spectrolab, Inc., 12500 Gladstone Ave., Sylmar, California 91342 Applied Physics Letters, Volume 90, Issue 18, id. 183516 (3 pages) (2007)
- [17] King, R.R.; Fetzer, C.M.; Law, D.C.; Edmondson, K.M.; Hojun Yoon; Kinsey, G.S.; Krut, D.D.; Ermer, J.H.; Hebert, P.; Cavicchi, B.T.; Karam, N.H.; « **Advanced III-V Multijunction Cells for Space** » ; Photovoltaic Energy Conversion, Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference on, Volume 2, May 2006 Page(s):1757 - 1762
- [18] Barnett, A.; Honsberg, C.; Kirkpatrick, D.; Kurtz, S.; Moore, D.; Salzman, D.; Schwartz, R.; Gray, J.; Bowden, S.; Goossen, K.; Haney, M.; Aiken, D.; Wanlass, M.; Emery, K.; « **50% Efficient Solar Cell Architectures and Designs** » ;Photovoltaic Energy Conversion, Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference on Volume 2, May 2006 Page(s):2560 – 2564
- [19] Entreprises **Concentrix Solar** et **SolFocus** projet de 3MW CPV en Espagne. Déjà 500kW installé sur les sites de Puertollano et Almoguera, disponible sur : www.concentrixsolar.de & www.solarfocus.com

- [20] Entreprise **Spectrolab** spécialiste des concentrateurs solaires photovoltaïques terrestres – voir la rubrique très enrichissante « **Frequently Asked Questions** » disponible sur : www.spectrolab.com
- [21] M. Oukachmih, P. Destruel, I. Seguy, G. Ablart, P. Jolinat, S. Archambeau, M. Mabilia, S. Fouet, H. Bock ; « **New organic discotic materials for photovoltaic conversion** », *Solar Energy Materials and Solar Cells, Volume 85, Issue 4, 1 February 2005, Pages 535-543*,
- [22] Kippelen, B.; « **Organic Photovoltaics** », *Lasers and Electro-Optics, 2007. CLEO 2007. Conference on 6-11 May 2007* Page(s):1-2 Digital Object Identifier 10.1109/CLEO.2007.4453168
- [23] Puigdollers, J.; Voz, C.; Sporer, C.; Laukhina, E.; Martin, I.; Orpella, A.; Vetter, M.; Rovira, C.; Alcubilla, R.; « **Organic photovoltaic solar cells based on MEH-PPV / PCBM blend** », *Electron Devices, 2005 Spanish Conference on 2-4 Feb. 2005* Page(s):279 – 281 Digital Object Identifier 10.1109/SCED.2005.1504379
- [24] Naoki Koide, Ashraful Islam, Yasuo Chiba, Liyuan Han ; « **Improvement of efficiency of dye-sensitized solar cells based on analysis of equivalent circuit** », *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, Volume 182, Issue 3, 10 September 2006*, Pages : 296-30.
- [25] Seigo Ito, Takuro N. Murakami, Pascal Comte, Paul Liska, Carole Grätzel, Mohammad K. Nazeeruddin, Michael Grätzel ; « **Fabrication of thin film dye sensitized solar cells with solar to electric power conversion efficiency over 10%** », *Thin Solid Films, Volume 516, Issue 14, 30 May 2008*, Pages 4613-461.
- [26] disponible sur : www.konarka.com
- [27] Stephan, U.; Kuske, J.; Frammelsberger, W.; Lechner, P.; Psyk, W.; Schade, H.; « **Large area deposition technique for PECVD of amorphous silicon [solar cells]** », *Photovoltaic Specialists Conference, 1997., Conference Record of the Twenty-Sixth IEEE 29 Sept.-3 Oct. 1997* Page(s):647 – 650, Digital Object Identifier 10.1109/PVSC.1997.654172
- [28] Jansen, K.W.; Kadam, S.B.; Groelinger, J.F.; « **The Advantages of Amorphous Silicon Photovoltaic Modules in Grid-Tied Systems Photovoltaic Energy Conversion** », *Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference on Volume 2, May 2006* Page(s) : 2363 - 2366
- [29] del Cueto, J.A.; « **Comparison of energy production and performance from flatplate photovoltaic module technologies deployed at fixed tilt** », *Photovoltaic Specialists Conference, 2002. Conference Record of the Twenty-Ninth IEEE, 19-24 May 2002* Page(s) : 1523 - 1526

- [30] Tina, G.M.; Abate, R.; « **Experimental verification of thermal behaviour of photovoltaic modules** », Electrotechnical Conference, 2008. MELECON 2008. The 14th IEEE Mediterranean, 5-7 May 2008 Page(s):579 – 584, Digital Object Identifier 10.1109/MELCON.2008.4618497
- [31] Osterwald, C.R.; Adelstein, J.; Cueto, J.A.D.; Kroposki, B.; Trudell, D.; Moriarty, T.; « **Comparison of Degradation Rates of Individual Modules Held at Maximum Power** » Photovoltaic Energy Conversion, Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference on, Volume2, May 2006 Page(s):2085-2088 Digital Object Identifier 10.1109/WCPEC.2006.279914
- [32] Pivac, B.; Kovacevic, I.; Zulim, I.; Gradisnik, V.; « **Effects of light soaking on amorphous silicon** », Photovoltaic Specialists Conference, 2000. Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE, 15-22 Sept. 2000 Page(s):884 – 887.
- [33] Ki Hwan Kim; Min Sik Kim; Byung Tae Ahn; Jae Ho Yun; Kyung Hoon Yoon; « **Improvement of CIGS microstructure and its effect on the conversion efficiency of CIGS solar cells** »; Photovoltaic Energy Conversion, Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference on Volume1, May 2006 Page(s):575–578, Digital Object Identifier 10.1109/WCPEC.2006.279521
- [34] Abushama, J.A.; Wax, J.; Berens, T.; Tuttle, J.; « **Progress Toward Improved Device Performance in Large-Area Cu(In,Ga)Se₂ Thin Film Solar Cells** »; Photovoltaic Energy Conversion, Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference on Volume 1, May 2006, Page(s):487–490 Digital Object Identifier 10.1109/WCPEC.2006.279497
- [35] Takatsuka, H.; Yamauchi, Y.; Takeuchi, Y.; Fukagawa, M.; Kawamura, K.; Goya, S.; Takano, A.; « **The World's Largest High Efficiency Thin Film Silicon Solar Cell Module** » ; Photovoltaic Energy Conversion, Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference on Volume2, May 2006 Page(s):202833.
- [36] Communiqué de presse du NREL, 24 mars 2008, **Record Makes Thin-Film Solar Cell Competitive with Silicon Efficiency.** www.nrel.gov/news/press/2008/574.html
- [37] **Life cycle impact analysis of cadmium in CdTe PV production**, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 8, Issue 4, August 2004, Pages 303-334, Vasilis M. Fthenakis.
- [38] Liyuan Han; Fukui, A.; Fuke, N.; Koide, N.; Yamanaka, R.; « **High Efficiency of Dye-Sensitized Solar Cell and Module** », Photovoltaic Energy Conversion, Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference on Volume 1, May 2006 Page(s) : 179 – 182 Digital Object Identifier 10.1109/WCPEC.2006.279411

- [39] Cunningham, D.; Davies, K.; Grammond, L.; Mopas, E.; O'Connor, N.; Rubcich, M.; Sadeghi, M.; Skinner, D.; Trumbly, T.; « **Large area Apollo(R) module performance and reliability** », Photovoltaic Specialists Conference, 2000. Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE, 15-22 Sept. 2000, Page(s):1318, Digital Object Identifier 10.1109/PVSC.2000.915743
- [40] Platz, R.; Vaucher, N.P.; Fischer, D.; Meier, J.; Shah, A.; « **Improved micromorph tandem cell performance through enhanced top cell currents** », Photovoltaic Specialists Conference, 1997., Conference Record of the Twenty-Sixth IEEE, 29 Sept.-3 Oct. 1997, Page(s) : 691 – 694, Digital Object Identifier 10.1109/PVSC.1997.654183
- [41] Goya, S.; Nakano, Y.; Yamashita, N.; Morita, S.; Yonekura, Y.; « **Development of amorphous silicon/microcrystalline silicon tandem solar cells** », Photovoltaic Energy Conversion, 2003. Proceedings of 3rd World Conference on, Volume 2, 12-16 May 2003 Page(s):1570 - 1573 Vol.2, Digital Object Identifier 10.1109/WCPEC.2003.1306227
- [42] Yoshida, T.; Tabuchi, K.; Takano, A.; Tanda, M.; Sasaki, T.; Sato, H.; Fujikake, S.; Ichikawa, Y.; Harashima, K.; « **Fabrication technology of a-Si/a-SiGe/a-SiGe triplejunction plastic film substrate solar cells** », Photovoltaic Specialists Conference, 2000. Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE, 15-22 Sept. 2000 Page(s):762 – 765, Digital Object Identifier 10.1109/PVSC.2000.915995
- [43] Xunming Deng; Xinmin Cao; Yasuaki Ishikawa; Wenhui Du; Xiesen Yang; Chandan Das; Vijn, A.; « **Fabrication and Characterization of Triple-junction Amorphous Silicon Based Solar Cell with Nanocrystalline Silicon Bottom Cell** » Photovoltaic Energy Conversion, Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference on Volume 2, May 2006 Page(s):1461 – 1464 Digital Object Identifier 10.1109/WCPEC.2006.279744
- [44] Y.M. Soro, A. Abramov, M.E. Gueunier-Farret, E.V. Johnson, C. Longeaud, P. Roca I Cabarrocas, J.P. Kleider ; « **Device grade hydrogenated polymorphous silicon deposited at high rates** » ; Journal of Non-Crystalline Solids, Volume 354, Issues 19-25, 1 May 2008, Pages 2092-2095.
- [45] Y.M. Soro, A. Abramov, M.E. Gueunier-Farret, E.V. Johnson, C. Longeaud, P. Roca I Cabarrocas, J.P. Kleider, « **Polymorphous silicon thin films deposited at high rate: Transport properties and density of states** », Thin Solid Films, Volume 516, Issue 20, 30 August 2008, Pages 6888-6891.
- [46] Ma, W.; Horiuchi, T.; Lim, C.C.; Goda, K.; Okamoto, I.I.; Hamakawa, Y.; « **An optimum design of a a-Si//poly-Si tandem solar cell** », Photovoltaic Specialists Conference,

1993., Conference Record of the Twenty Third IEEE, 10-14 May 1993 Page(s) : 833 – 838,

Digital Object Identifier 10.1109/PVSC.1993.347113

[47] Article « **PHOTOVOLTAICS: Research targets more-efficient photovoltaics** ».

Laser Focus World June, 2006 par Yvonne Carts-Powell

***Chapitre II : Généralités – Absorbeurs CIGS
pour Cellules Solaires***

II.1. Introduction

La filière industrielle CIGS émerge aujourd'hui dans le domaine photovoltaïque. Cependant des améliorations significatives sont possibles, qui permettraient d'en améliorer encore les performances.

Premièrement, les technologies présentes sur le marché utilisent en général des procédés sous vide, très énergivores et nécessitant des investissements importants en matériel. Ces techniques sont la co-évaporation ou la pulvérisation cathodique. Des procédés atmosphériques, tels que l'électro dépôt ou l'impression, se développent mais les rendements sont encore inférieurs. Il faut optimiser le rapport rendement/coût pour développer une technologie atmosphérique efficace.

Deuxièmement, un des inconvénients de la filière CIGS reste l'utilisation de métaux rares, tels l'In ou le Ga [1]. Actuellement une filière similaire, basée sur la substitution de l'In et du Ga par de l'étain et du zinc, pour former le composé kesterite $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S},\text{Se})_4$ (CZTS), se développe [2]. Cette technologie pourrait utiliser les mêmes lignes de production que le CIGS, ce qui peut accélérer son développement. D'autres perspectives, telles que le CIGS ultrafin [3] ou en microcellules sous lumière concentrée [4], permettront également de faire des gains de matière significatifs. Enfin, le recyclage des matériaux se développe [5, 6].

La recherche de méthodes de synthèse à bas-coût du matériau CIGS est donc encore amplement justifiée actuellement. Cette première partie présente le contexte précis de l'étude, avec dans un premier temps des principes généraux sur les cellules solaires, puis sur le matériau CIGS et sa synthèse. Enfin une bibliographie approfondie est effectuée sur la méthode d'électro dépôt, ici développée pour l'alliage Cu-In-Ga, puis sur la sélénisation de ce dépôt de manière à former un absorbeur CIGS efficace.

II.2. Les cellules solaires à base de CIGS

II.2.1. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

La conversion de la lumière en électricité, appelée effet photovoltaïque, a été découvert par E. Becquerel en 1839 [7], mais il faudra attendre près d'un siècle pour que ce phénomène physique soit utilisé. Les premiers panneaux photovoltaïques ont été réalisés dans les années 1950 pour équiper les satellites.

Les cellules solaires inorganiques sont basées sur la technologie des semiconducteurs et la jonction p-n. Un semi-conducteur (SC) est un matériau présentant une bande interdite

(E_g) de quelques eV entre la bande de valence et la bande de conduction, avec le niveau de Fermi dans la bande interdite. La position du niveau de Fermi est fonction de la concentration des porteurs de charges. Le semi-conducteur est de type n lorsque les électrons sont les porteurs de charge majoritaires, dans ce cas, le niveau de Fermi se situe près de la bande de conduction. Il est de type p lorsque ce sont les trous, dans ce cas le niveau de Fermi est proche de la bande de valence. La figure II.1 présente la position du niveau de Fermi E_F pour les deux types de semi-conducteurs.

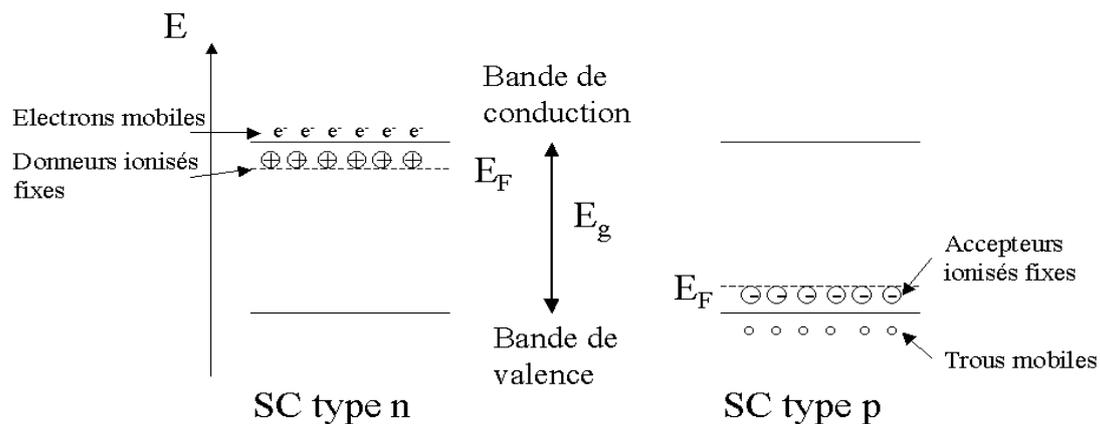


Figure II.1 : Semi-conducteurs de type p et n et position du niveau de Fermi E_F . Les charges associées aux donneurs (type n) et aux accepteurs (type p)

L'assemblage de deux semi-conducteurs de types différents forme la jonction p-n. Il existe deux types de jonctions : lorsque les deux semi-conducteurs sont issus de deux matériaux différents, on parle d'hétérojonction, lorsque la jonction p-n est formée d'un seul matériau comportant des zones avec des dopages différents p et n, on parle alors d'homojonction (ex : homojonction Si).

Lors du contact entre zones p et n, les porteurs majoritaires de chacune diffusent à travers la surface de contact, il se crée une zone chargée positivement du côté du semi-conducteur n et une zone chargée négativement du côté du semi-conducteur de type p. Cette zone de transition est appelée zone de charge d'espace (ZCE). Le gradient de concentration des porteurs majoritaires induit la présence d'un champ électrique permanent dans cette ZCE à l'équilibre. Les niveaux de Fermi des deux zones s'égalisent, ce qui provoque une courbure du diagramme de bande, introduisant une barrière de potentiel V_e à l'interface. Le principe de la jonction p-n est présenté en figure II.2.

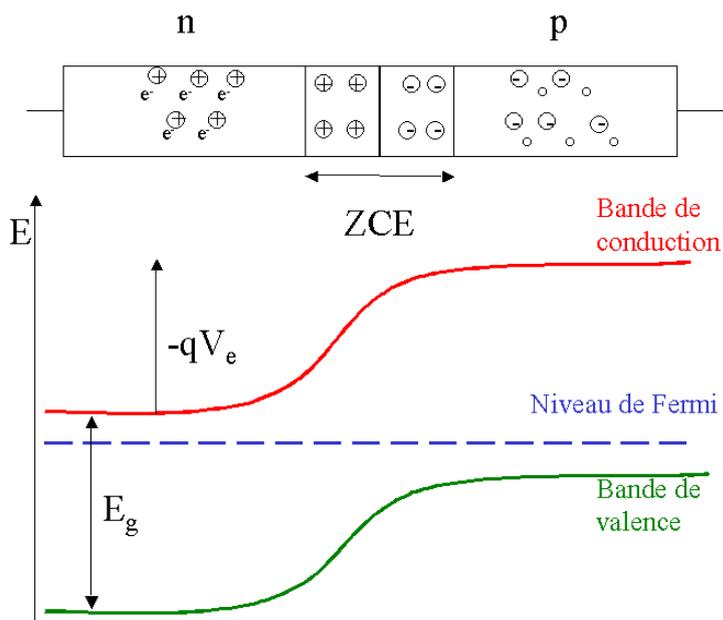


Figure II.2 : Schéma de principe et diagramme de bande d'une jonction p-n à l'équilibre.

Lorsque la jonction est en polarisation directe, la barrière de potentiel diminue jusqu'à une valeur à laquelle les électrons dans la bande de conduction peuvent transiter du semi-conducteur de type n vers le semi-conducteur de type p. Lorsque la jonction est polarisée en inverse, la barrière de potentiel augmente et inhibe le passage des électrons. La caractéristique courant-tension (I-V) d'une jonction p-n à l'obscurité est donc celle d'une diode (Figure II.3).

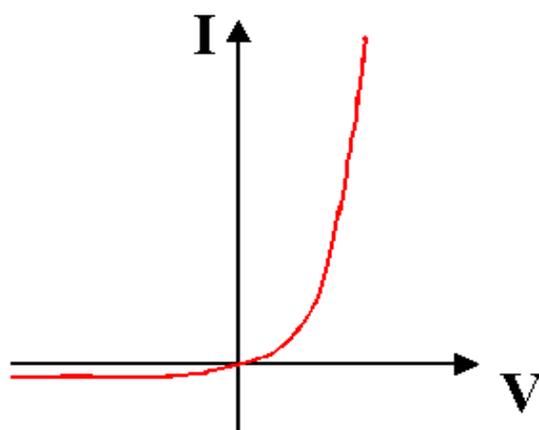


Figure II.3 : Caractéristique I-V d'une jonction p-n à l'obscurité

Sous illumination, un semi-conducteur absorbe les photons incidents lorsque leur énergie est plus grande que celle de la bande interdite (E_g). Il y a formation de paires électrons-trous. Sans jonction p-n, ces électrons-trous se recombinent. La présence du champ

électrique E dans la ZCE permet aux charges de se séparer : l'excès d'électrons diffuse vers le côté n, et l'excès de trous diffuse vers le côté p. Un photocourant de porteurs minoritaires apparaît donc, opposé au courant de porteurs majoritaires déjà présent à l'obscurité (figure II.4). La ZCE est assez fine, de 100 à 300 nm. Cependant, comme l'électron peut se déplacer sur une longueur de diffusion L_n pendant sa durée de vie, les électrons collectés correspondent à ceux qui ont pu diffuser jusqu'à la ZCE. Ainsi les absorbeurs des cellules solaires ont souvent une épaisseur proche ou inférieure à la longueur de diffusion de leurs porteurs.

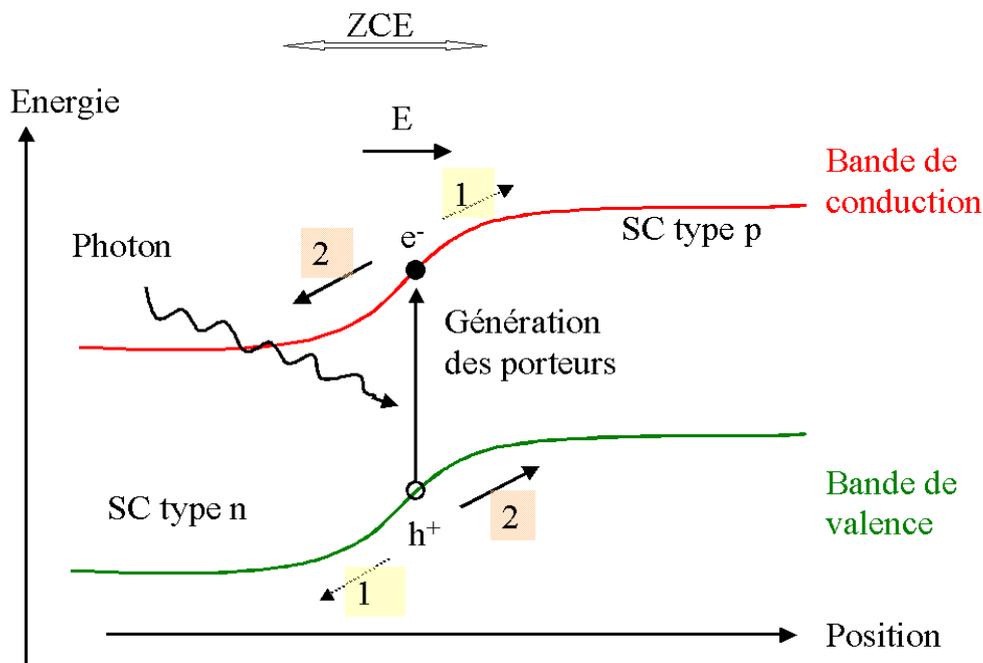


Figure II.4 : Principe d'un dispositif photovoltaïque : 1 : courant d'obscurité, 2 : photocourant.

II.2.2. Les cellules à base de CIGS

Les cellules solaires en couches minces à base de CIGS sont des cellules à hétérojonction, où le semi-conducteur de type p, le CIGS, est l'absorbeur de la cellule (c'est-à-dire la zone où les paires électrons trous sont générées sous illumination). La jonction est formée avec le CdS/ZnO, des semi-conducteurs de type n. Le ZnO est appelé couche fenêtre, car il doit laisser passer le rayonnement jusqu'à l'absorbeur. Le CIGS présente un gap direct et donc un grand coefficient d'absorption : 2 μm d'épaisseur sont suffisants par rapport à 200 μm pour l'homojonction Si.

La structure d'une telle cellule solaire est présentée dans la figure II.6. A l'arrière de la jonction, le substrat est ici du verre sodocalcique et le molybdène forme le contact ohmique

arrière recueillant les trous. La couche de $2 \mu\text{m}$ de CIGS permet d'absorber la lumière. Sur cet absorbeur, une couche de 50 nm de CdS (appelée couche tampon, faiblement dopée n) réalise la jonction. Une couche de ZnO intrinsèque de $50\text{-}100 \text{ nm}$ de haute résistivité s'intercale en général entre le CdS et le ZnO dopé. Selon Rau *et al.* [9], elle permet une limitation des pertes électriques dues aux inhomogénéités dans l'absorbeur, en empêchant les défauts du CIGS de dominer la V_{oc} . Puis une couche d'oxyde de zinc dopé aluminium, donc fortement dopée n, forme la fenêtre avant, conductrice, et transparente, pour récupérer les électrons. Un contact ohmique, comme par exemple une grille de Ni/Al, peut être ajouté pour collecter le courant de manière plus efficace.

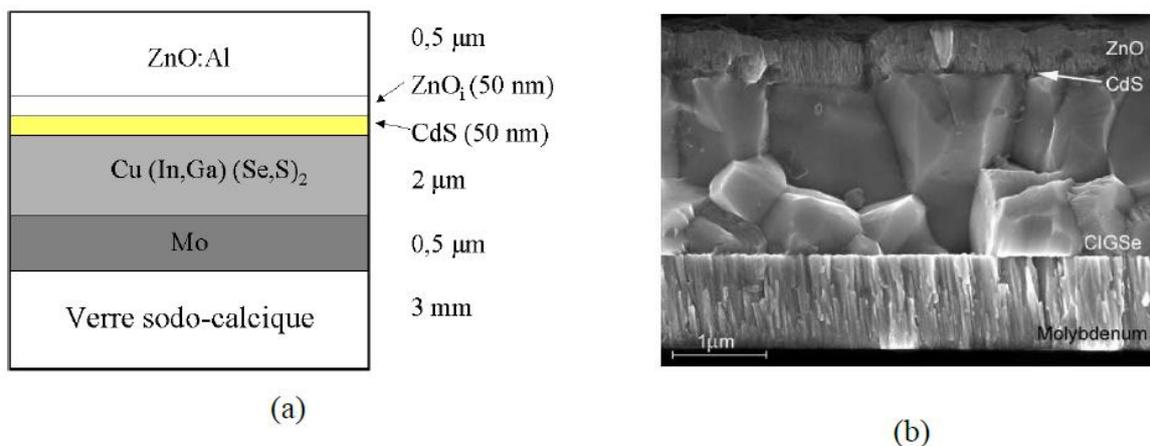


Figure II.5 : Structure en coupe d'une cellule CIGS : (a) schéma, (b) Image au microscope à balayage (MEB) [10]

II.2.3. Le matériau CIGS au sein de la cellule solaire

Le CIGS est le matériau clé dans les cellules CIGS dont il convient d'étudier les propriétés structurales.

II.2.3.1. Structure du matériau

Les composés $\text{Cu}(\text{In,Ga})(\text{Se,S})_2$ adoptent différentes structures. Ces structures se caractérisent par une distribution d'atomes, avec quatre atomes de valence par site atomique. Ces structures sont dérivées de celle de ZnS (blende de zinc) type diamant, qui présente deux sous-réseaux interpénétrés (anions et cations) cubiques à faces centrées, décalés d'un vecteur $(1/4, 1/4, 1/4)$. Dans le cas du CIGS, le sous-réseau cationique se partage entre cations de valences inférieure et supérieure. La structure est de type sphalérite s'il y a distribution aléatoire des sites cationiques. Sinon, suivant la répartition des cations (I) (ici le Cu) et (III) (ici l'In ou le Ga), les composés adoptent une structure soit chalcopyrite soit « Cu-Au ». Dans

ce cas, des déformations dues aux deux cations de taille différentes surviennent : la structure n'est plus cubique mais quadratique (aussi appelée tétragonale). Par conséquent le rapport c/a des paramètres de maille (figure II.7) est différent de 2. La figure II.7 présente les différentes structures cristallines mentionnées ci-dessus.

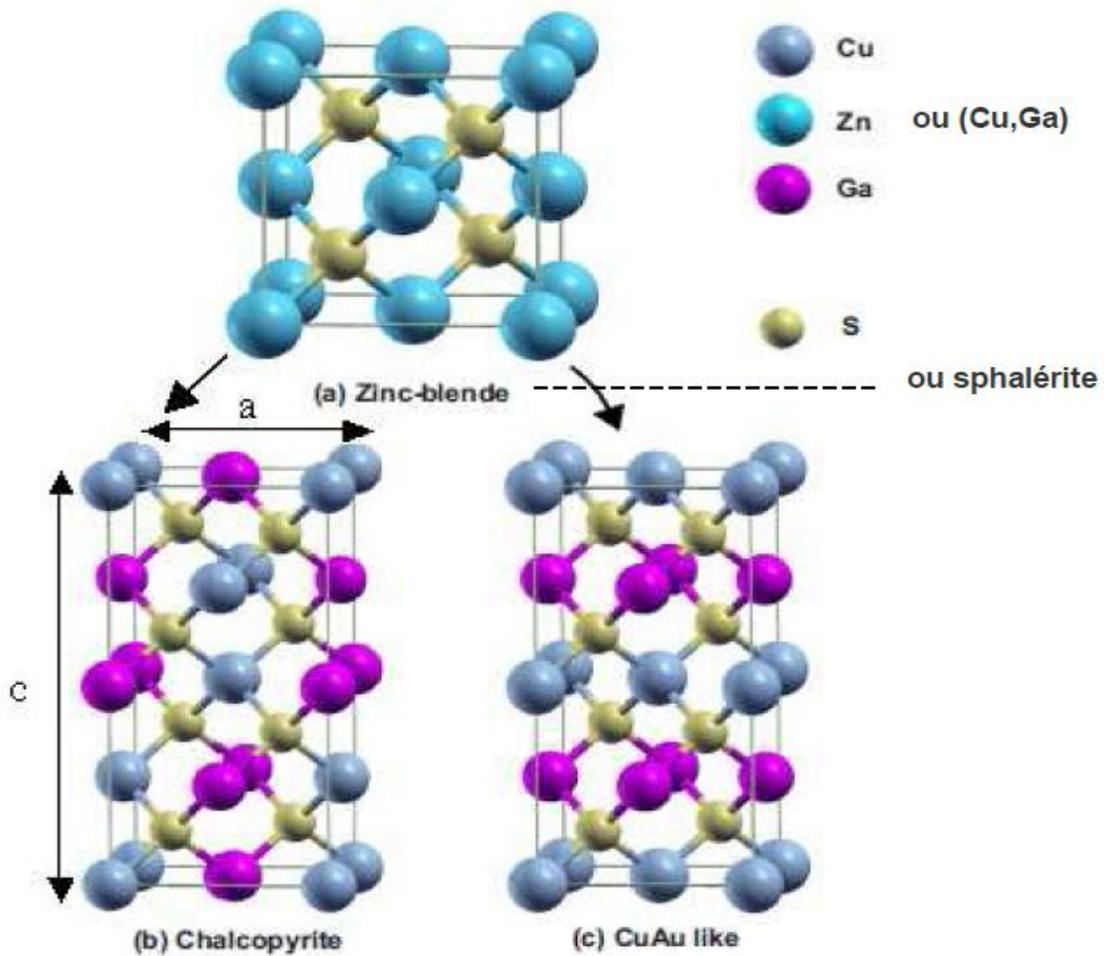


Figure II.6 : Structure cristalline de (a) blende de zinc (ou sphalérite avec (Cu,Ga) à la place du Zn), (b) chalcopyrite CuGaS_2 et (c) Cu-Au ici pour CuGaS_2 [11]

La phase Cu-Au se distingue de la phase chalcopyrite par la position des cations (III), qui sont alignés sur un plan, alors que la phase chalcopyrite présente les deux types de cations (I) et (III) ordonnés dans chaque plan. La structure chalcopyrite est la phase thermodynamique stable pour des températures inférieures à 600°C . C'est celle qui possède les caractéristiques optoélectroniques requises : c'est donc cette phase qui doit être présente dans les dispositifs photovoltaïques.

Les paramètres de maille sont contrôlés par la composition du ternaire (CuInSe_2 , CuGaSe_2 , CuInS_2 , CuGaS_2 ...). Ils suivent la loi de Vegard [12, 13]. Pour les chalcopyrites intégrant les atomes les plus petits (Ga au lieu de In, S au lieu de Se), la maille cristalline se contracte, donc le paramètre de maille a diminué et inversement pour les atomes plus gros.

Les variations de composition ont également une influence sur les valeurs de bande interdite. Les énergies des bandes interdites varient entre 1,0 eV pour CuInSe_2 et 2,40 eV pour CuGaS_2 [14]. De façon tout à fait qualitative, on peut dire que pour des atomes plus lourds avec une polarisabilité plus grande (In par rapport au Ga ou Se par rapport au S), les bandes de valence/conduction s'élargissent, et la valeur de la bande interdite de la chalcopyrite diminue. La figure II.8 représente la valeur de la bande interdite en fonction de la valeur du paramètre de maille a, pour différentes chalcopyrites

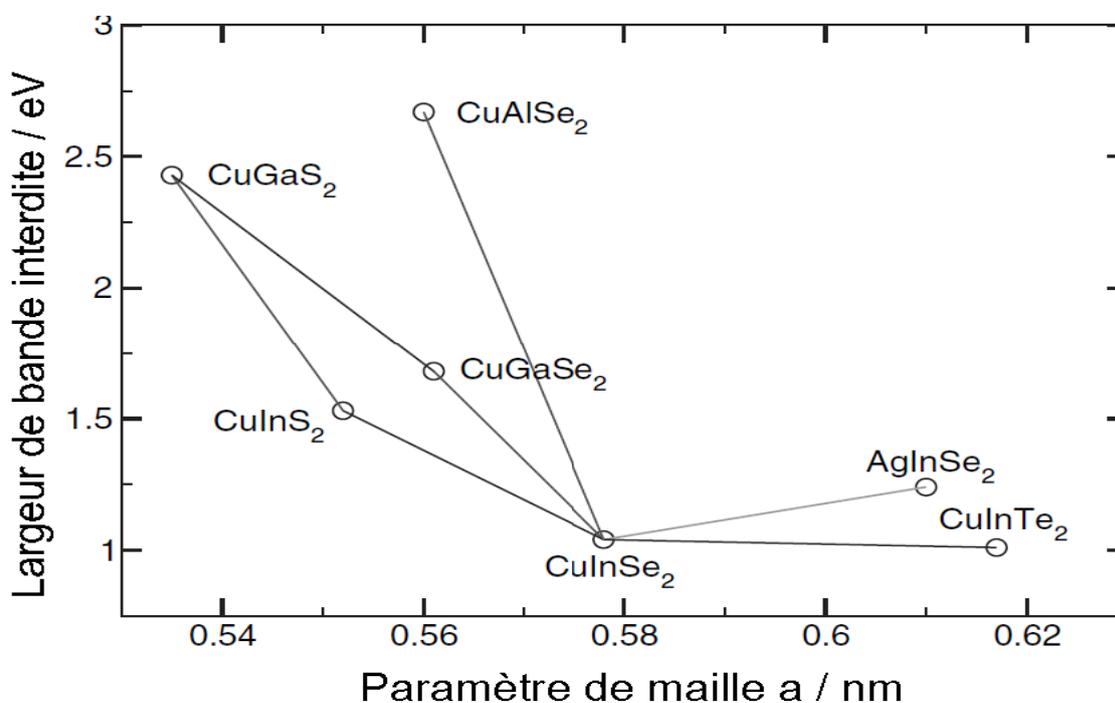


Figure II.7 : Largeurs de bande interdite et paramètre de maille a de certaines chalcopyrites d'après [10, 14]

II.2.3.2. Dopage : le rôle des défauts

Le dopage du CIGS est dû à des défauts intrinsèques : la lacune de cuivre est en général l'accepteur dominant pour le matériau de type p, alors que la lacune de sélénium est considérée comme le donneur dominant du matériau de type n. Une assez forte tolérance du matériau aux écarts de stoechiométrie, ainsi que la nature électriquement neutre des défauts intrinsèques, en font un matériau performant. Par exemple, le défaut $2V_{\text{Cu}} + \text{In}_{\text{Cu}}$, deux

lacunes de cuivre et une substitution d'un atome de cuivre par un atome d'indium, de basse énergie de formation, ne présente pas de transition dans la bande interdite et permet un excès d'indium, sans altérer les performances de la cellule [15]. En particulier, c'est un assemblage périodique de ces lacunes qui crée le composé dit OVC (Ordered Vacancy Compound), de composition proche de CuIn_3Se_5 . Néanmoins, tous les défauts ne sont pas favorables : des défauts de substitution, tels que Cu_{In} et In_{Cu} , peuvent être présents, et agir comme centres de recombinaison [15].

Les cellules à base de CIGS sont stables dans le temps grâce à leur qualité de résistance aux rayonnements, due essentiellement à la mobilité du cuivre et à la grande densité de défauts, qui se réarrangent et permettent d'assurer une stabilité électrique [16].

II.2.3.3. Influence du Ga

L'insertion de Ga dans le CuInSe_2 permet d'obtenir un composé dont la valeur de la bande interdite est comprise entre 1,0 et 1,7 eV. Jusqu'à présent, ce sont les matériaux $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ avec un rapport $\text{Ga}/(\text{In}+\text{Ga})$ de 25 à 35% (bande interdite de 1,1 à 1,2 eV) qui ont obtenu les meilleurs rendements [17, 18]. Certains lient ces performances à la présence de la couche d'OVC à l'interface, qui est plus difficile ou impossible à obtenir avec CuGaSe_2 ou CuInS_2 ([19]), de même que les lacunes ($2V_{\text{Cu}}+\text{Ga}_{\text{Cu}}$) sont moins stables que celles impliquant l'indium, et donc participent moins à neutraliser les défauts d'un point de vue électronique dans CuGaSe_2 .

On observe une diminution de la densité de défauts pour une quantité optimale de Ga ($\text{Ga}/(\text{In}+\text{Ga})=0,3$) pour un composé $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ homogène en épaisseur [20] (Figure II.9). La présence d'un nombre plus faible de défauts implique moins de pertes par recombinaison dans le volume de l'absorbeur

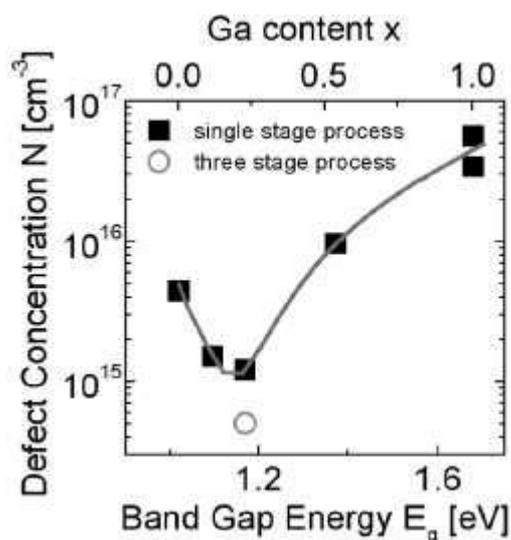


Figure II.8 : Variation de la concentration des défauts en fonction de la bande interdite [20].

Pour les cellules de plus hauts rendements, la teneur en **Ga** est ajustée en fonction de la profondeur de la couche de CIGS (Figure II.10). En effet, une concentration plus riche en Ga au niveau du contact arrière et de la surface permet d'améliorer la séparation des porteurs de charge photo générés et de réduire les phénomènes de recombinaison au niveau de l'interface CIGS/Mo. Cela permet d'optimiser à la fois la V_{oc} , qui augmente pour une bande interdite plus large au niveau de la jonction, et la J_{sc} qui augmente pour une bande interdite plus faible, grâce à une absorption plus importante au sein de l'absorbeur.

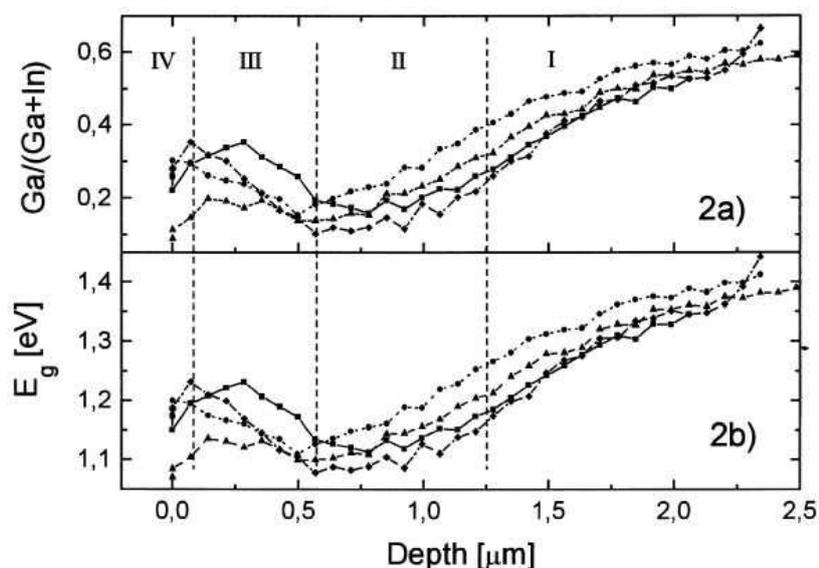


Figure II.9 : Profils Auger en profondeur (a), et valeurs correspondantes de la bande interdite (b) [21]

II.2.3.4. Hétérojonction : surface du CIGS et interface avec le CdS

II.2.3.4.1. Surface du CIGS

Lorsqu'il y a un excès de cuivre dans le matériau, le semi-conducteur dégénéré $\text{Cu}_{2x}(\text{Se},\text{S})$, conducteur, se forme, ce qui est défavorable pour la cellule car cela favorise les court-circuits. C'est pourquoi il est préférable que le CIGS soit de composition pauvre en cuivre (de rapport $\text{Cu}/(\text{In}+\text{Ga})$ inférieur à 1), ce d'autant plus en surface, proche de la jonction. Dans ce cas, le composé $\text{Cu}(\text{In},\text{Ga})_3(\text{Se},\text{S})_5$ (OVC) peut se former. Cette couche est faiblement dopée de type n avec un grand gap (1,3 eV) et une bande de valence plus basse (Figure II.11). Lorsque présente en surface, cette phase permet de limiter les recombinaisons à l'interface avec le CdS. Néanmoins, cette couche peu conductrice doit rester mince (typiquement entre 5 et 100 nm) pour ne pas engendrer une résistance supplémentaire [22].

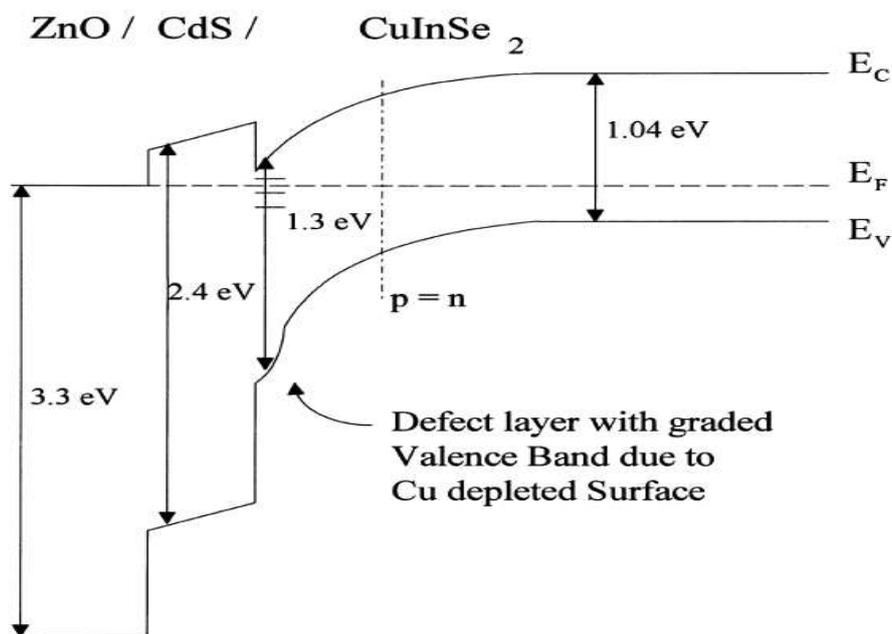


Figure II.10. Diagramme de bande dans les cellules CIS avec une surface appauvrie en cuivre [21]

II.2.3.4.1. Rôle du CdS

Le CdS est un matériau présentant un bon compromis entre largeur de bande interdite (2,4 eV), qui doit être grande pour limiter l'absorption, et bon alignement de bande, permettant la meilleure collecte des porteurs. Une couche de quelques nanomètres de CdS, réalisée par dépôt en bain chimique (CBD ou « chemical bath deposition »), permet une couverture complète de la surface rugueuse de CIGS, la protégeant ainsi pour les étapes suivantes de pulvérisation cathodique, qui, sans couche tampon de CdS, endommagent le

CIGS [23]. Néanmoins, le cadmium est toxique, c'est pourquoi son remplacement fait l'objet de nombreuses recherches [24]. Les matériaux Zn(S,O,OH) [25, 26] et In₂S₃ [27]

II.3. Références

- [1] Fthenakis, V., « **Sustainability of photovoltaics: The case for thin-film solar cells** ». Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2009. **13**(9): p. 2746-2750.
- [2] Mitzi, D.B., O. Gunawan, T. Todorov, K. Wang, and S. Guha, « **The path towards a high-performance solution-processed kesterite solar cell** » Solar Energy Materials & Solar Cells, 2011. **95**: p. 1421-1436.
- [3] Jehl, Z., F. Erfurth, N. Naghavi, L. Lombez, I. Gerard, M. Bouttemy, P. Tran-Van, A. Etcheberry, G. Voorwinden, B. Dimmler, W. Wischmann, M. Powalla, J.F. Guillemoles, and D. Lincot, « **Thinning of CIGS solar cells: Part II: Cell characterizations** ». Thin Solid Films, 2011. doi:10.1016/j.tsf.2010.12.224.
- [4] Paire, M., L. Lombez, J.F. Guillemoles, and D. Lincot, « **Toward microscale Cu(In, Ga)Se₂ solar cells for efficient conversion and optimized material usage: Theoretical evaluation** ». Journal of Applied Physics, 2010. **108**(3): p. 034907.
- [5] Fthenakis, V.M., « **End-of-life management and recycling of PV modules** ». Energy Policy, 2000. **28**(14): p. 1051-1058.
- [6] Miles, R.W., K.M. Hynes, and I. Forbes, « **Photovoltaic solar cells: An overview of state-of-the-art cell development and environmental issues** ». Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials, 2005. **51**(1-3): p. 1-42.
- [7] Becquerel, E, « **Mémoire sur les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires** ». Comptes Rendus des Séances Hebdomadaires de l'Académie des Sciences, 1839. **9**: p. 561-567.
- [8] Reference AM 1.5 Solar Spectral Irradiance (ASTM G173-03), 2003, American Society for Testing and Materials.
- [9] Rau, U. and M. Schmidt, « **Electronic properties of ZnO/CdS/Cu(In,Ga)Se₂ solar cells aspects of heterojunction formation** ». Thin Solid Films, 2001. **387**(1-2): p. 141-146.
- [10] Klenk, M. and M.C. Lux-Steiner, « **Chalcopyrite Based Solar Cells, in Thin Film Solar Cells Fabrication** », Characterization and Applications, J. Poortmans and V. Arkhipov, Editors. 2006, Wiley: Chichester. p. 237-275.
- [11] Chen, S.Y., X.G. Gong, A. Walsh, and S.H. Wei, « **Electronic structure and stability of quaternary chalcogenide semiconductors derived from cation cross-substitution of IIVI and I-III-VI₂ compounds** ». Physical Review B, 2009. **79**(16).

- [12] Zeaiter, K., Y. Llinares, and C. Llinares, « **Structural and photoluminescence study of the quaternary alloys system $\text{CuIn}(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})_2$** ». Solar Energy Materials and Solar Cells, 2000. **61**(3): p. 313-329.
- [13] Yamamoto, N. and T. Miyauchi, « **Growth of Single-Crystals of CuGaS_2 and $\text{CuGa}_{1-x}\text{In}_x\text{S}_2$ in Solution** ». Japanese Journal of Applied Physics, 1972. **11**(9): p. 1383-
- [14] Jaffe, J.E. and A. Zunger, « **Theory of the Band-Gap Anomaly in ABC₂ Chalcopyrite Semiconductors** ». Physical Review B, 1984. **29**(4): p. 1882-1906.
- [15] Zhang, S.B., S.H. Wei, A. Zunger, and H. Katayama-Yoshida, « **Defect physics of the CuInSe_2 chalcopyrite semiconductor** ». Physical Review B, 1998. **57**(16): p. 9642-9656.
- [16] Guillemoles, J.F., U. Rau, L. Kronik, H.W. Schock, and D. Cahen, « **$\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ solar cells: Device stability based on chemical flexibility** ». Advanced Materials, 1999. **11**(11): p. 957-961.
- [17] Repins, I., M.A. Contreras, B. Egaas, C. DeHart, J. Scharf, C.L. Perkins, B. To, and R. Noufi, « **19.9%-efficient $\text{ZnO}/\text{CdS}/\text{CuInGaSe}_2$ solar cell with 81.2% fill factor** ». Progress in Photovoltaics, 2008. **16**(3): p. 235-239.
- [18] Jackson, P., D. Hariskos, E. Lotter, S. Paetel, R. Wuerz, R. Menner, W. Wischmann, and M. Powalla, « **New world record efficiency for $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ thin-film solar cells beyond 20%** ». Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2011. **19**(3): p. DOI:10.1002/pip.1078.
- [19] Kemell, M., M. Ritala, and M. Leskela, « **Thin film deposition methods for CuInSe_2 solar cells** ». Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences, 2005. **30**(1): p. 1-31.
- [20] Hanna, G., A. Jasenek, U. Rau, and H.W. Schock, Influence of the Ga-content on the bulk defect densities of $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$. Thin Solid Films, 2001. **387**(1-2): p. 71-73.
- [21] Dullweber, T., G. Hanna, U. Rau, and H.W. Schock, « **A new approach to highefficiency solar cells by band gap grading in $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ chalcopyrite semiconductors** ». Solar Energy Materials and Solar Cells, 2001. **67**(1-4): p. 145-150.
- [22] Kwon, S.H., S.C. Park, B.T. Ahn, K.H. Yoon, and J.S. Song, « **Effect of CuIn_3Se_5 layer thickness on CuInSe_2 thin films and devices** ». Solar Energy, 1998. **64**(1-3): p. 55-60.
- [23] Contreras, M.A., M.J. Romero, B.T.E. Hasoon, R. Noufi, S. Ward, and K. Ramanathan, « **Optimization of CBD CdS process in high-efficiency $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ -based solar cells** ». Thin Solid Films, 2002. **403**: p. 204-211.
- [24] Naghavi, N., D. Abou-Ras, N. Allsop, N. Barreau, S. Bucheler, A. Ennaoui, C.H. Fischer, C. Guillen, D. Hariskos, J. Herrero, R. Klenk, K. Kushiya, D. Lincot, R. Menner, T. Nakada, C. Platzer-Bjorkman, S. Spiering, A.N. Tiwari, and T. Torndahl, « **Buffer layers and**

transparent conducting oxides for chalcopyrite Cu(In,Ga)(S,Se)_2 based thin film photovoltaics: present status and current developments ». Progress in Photovoltaics, 2010. **18**(6): p. 411-433.

[25] Hubert, C., N. Naghavi, B. Canava, A. Etcheberry, and D. Lincot, « **Thermodynamic and experimental study of chemical bath deposition of Zn(S,O,OH) buffer layers in basic aqueous ammonia solutions. Cell results with electrodeposited CuIn(S,Se)_2 absorbers** ». Thin Solid Films, 2007. **515**(15): p. 6032-6035.

[26] Nakada, T. and M. Mizutani, « **18% efficiency Cd-free Cu(In, Ga)Se_2 thin-film solar cells fabricated using chemical bath deposition (CBD)- ZnS buffer layers** ». Japanese Journal of Applied Physics Part 2-Letters, 2002. **41**(2B): p. L165-L167.

[27] Naghavi, N., S. Spiering, M. Powalla, B. Cavana, and D. Lincot, « **High-efficiency copper indium gallium diselenide (CIGS) solar cells with indium sulfide buffer layers deposited by atomic layer chemical vapor deposition (ALCVD)** ». Progress in Photovoltaics, 2003. **11**(7): p. 437-443.

***Chapitre III : Modélisation et Simulation
Des Cellules Photovoltaïques***

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, deux méthodes de modélisation de la cellule photovoltaïque basées sur les données fournies par les fabricants des cellules solaires, seront présentées. Le circuit traditionnel équivalent de 4P d'une cellule photovoltaïque est donné dans la figure III.4. Dans la plupart des cas, il est difficile mathématiquement de déterminer les 5 paramètres dans le modèle à une diode et les 6 paramètres dans le modèle à double diodes, en raison de la présence du terme exponentielle dans l'équation de la jonction PN de la diode. Dans les travaux effectués par S. Liu and R. A. Dougal [1], le modèle solaire a été développé par les processus multi-physiques couplés à la conversion d'énergie photovoltaïque. Dans l'approche étudiée par A. Cow and C.D. Manning [2], la méthode de Levenberg-Marquardt a été choisie pour résoudre le modèle de l'équation à exponentielle double. Pour éviter la sophistication de la modélisation, d'autres approches basées sur les données des fabricants des panneaux solaires ont été présentées. Certains chercheurs [3], [4] utilisent des paramètres constants (c.à.d le facteur de qualité γ et la résistance séries R_s), alors que d'autres prennent en considération l'effet de la température sur ces paramètres.

Dans notre étude nous employons l'optimisation de la puissance maximale à l'aide de la méthode de Newton –Raphson pour améliorer le rendement en fonction de I_{sc} , V_{CO} , FF, R_s , I_{max} , V_{max} et γ :

- 1) Etude comparative de plusieurs modèles caractérisant la cellule photovoltaïque et l'influence des paramètres intérieures et extérieures telles que la qualité de la diode et la température sur le rendement global.
- 2) Le choix du modèle.
- 3) La détermination des deux types de modélisations est évaluée par la comparaison des résultats de simulation pour les deux modèles aux données expérimentales pour la cellule solaire à base de matériaux CIGS .

III.2. Représentation des différents modèles

Pour développer un circuit équivalent et précis d'une cellule PV, il est nécessaire de comprendre la configuration physique des éléments de la cellule aussi bien que les caractéristiques électriques de chaque élément. Selon cette philosophie plusieurs modèles électriques ont été proposés pour représenter la cellule photovoltaïque. Parmi ces modèles on peut citer les modèles suivants :

III.2.1. Modèle à sept paramètres

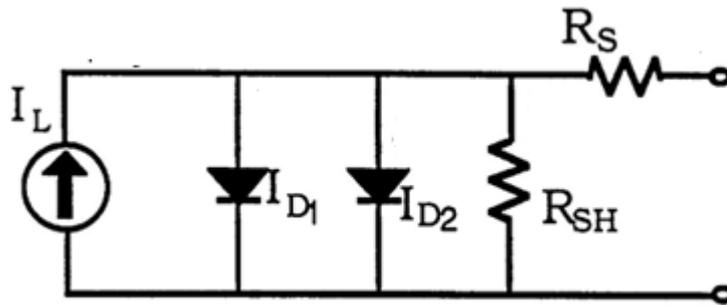


Figure II.1 : Modèle à 7 paramètres [5]

Les paramètres de ce circuit sont :

I_L, I_{ph} = courant photonique

I_{01} = courant inverse de saturation

I_{02} = courant inverse de saturation

$\gamma_1 = A_1 \times (\text{NCS})$ le facteur de qualité de la diode 1

$\gamma_2 = A_2 \times (\text{NCS})$ le facteur de qualité de la diode 2

A_1, A_2 = les facteurs d'accomplissement des diodes 1 et 2

NCS = Nombre de cellules en série

R_S = la résistance en série

R_{SH} = la résistance shunt

L'équation $I(V)$ caractéristique de ce circuit est :

$$I = I_L - I_{D1} - I_{D2} - \frac{(V + IR_S)}{R_{SH}} \quad (\text{III}, 1)$$

$$I_{D1} = I_{01} \left(\exp \left(\frac{q}{\gamma_1 k T_c} \times V + IR_S \right) - 1 \right) \quad (\text{III}, 2)$$

$$I_{D2} = I_{02} \left(\exp \left(\frac{q}{\gamma_2 k T_C} \times V + IR_s \right) - 1 \right) \quad (\text{III},3)$$

La substitution de (III.2) et (III.3) dans (III.1) nous donne :

$$I = \left[I_L - I_{01} \left(\exp \left(\frac{q(V + IR_s)}{\gamma_1 k T_C} \right) - 1 \right) - I_{02} \left(\exp \left(\frac{q(V + IR_s)}{\gamma_2 k T_C} \right) - 1 \right) - \frac{V}{R_{SH}} \right] \times \left[\frac{R_{SH}}{R_s + R_{SH}} \right] \quad (\text{III},4)$$

III.2.2. Modèle à six paramètres

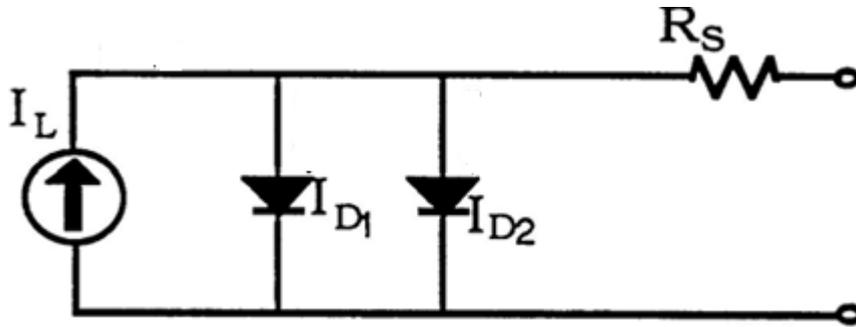


Figure III.2 Modèle à six paramètres [5]

Les six paramètres de ce circuit sont les mêmes que le modèle précédent sauf la résistance shunt.

Les relations courant-tension pour ce circuit sont les suivantes:

$$I = I_L - I_{D1} - I_{D2} \quad (\text{III},5)$$

$$I_{D1} = I_{01} \left(\exp \left(\frac{q}{\gamma_1 k T_C} \times V + IR_s \right) - 1 \right) \quad (\text{III},6)$$

$$I_{D2} = I_{02} \left(\exp \left(\frac{q}{\gamma_2 k T_C} \times V + IR_s \right) - 1 \right) \quad (\text{III},7)$$

En remplaçant (III.6) et (III.7) dans (III.5) nous obtenons :

$$I = \left[I_L - I_{01} \left(\exp \left(\frac{q(V + IR_s)}{\gamma_1 k T_C} \right) - 1 \right) - I_{02} \left(\exp \left(\frac{q(V + IR_s)}{\gamma_2 k T_C} \right) - 1 \right) \right] \quad (\text{III},8)$$

III.2.3. Modèle à cinq paramètres

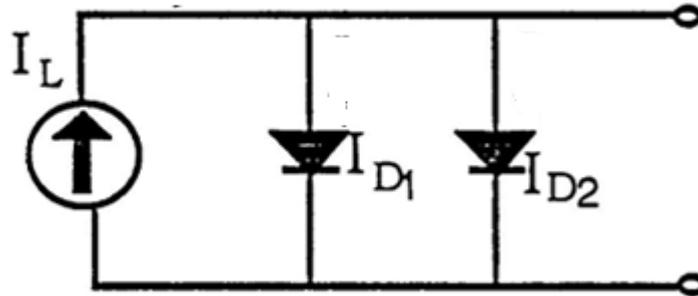


Figure III.3 : Modèle à 5 paramètres [5].

Le circuit équivalent de ce modèle est obtenu en utilisant une simplification du circuit du modèle à six paramètres représenté sur la figure (III.2). Cette simplification se traduit par supposer que la résistance en série est négligeable. Avec une résistance en série nulle, le circuit équivalent sera représenté comme suit : (figure (III.3)).

Les cinq paramètres de ce circuit sont les mêmes que le modèle précédent sauf les résistances en série et shunt.

L'équation générale de ce modèle est :

$$I = I_L - I_{D1} - I_{D2} \quad (\text{III},9)$$

$$I_{D1} = I_{01} \left(\exp\left(\frac{qV}{\gamma_1 k T_C}\right) - 1 \right) \quad (\text{III},10)$$

$$I_{D2} = I_{02} \left(\exp\left(\frac{qV}{\gamma_2 k T_C}\right) - 1 \right) \quad (\text{III},11)$$

Remplaçant (III.10) et (III.11) dans (III.9) nous obtenons :

$$I = \left[I_L - I_{01} \left(\exp\left(\frac{qV}{\gamma_1 k T_C}\right) - 1 \right) - I_{02} \left(\exp\left(\frac{qV}{\gamma_2 k T_C}\right) - 1 \right) \right] \quad (\text{III},12)$$

III.2.4. Modèle à quatre paramètres

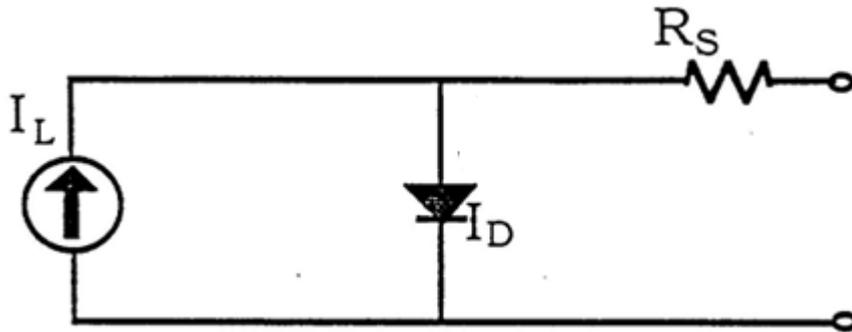


Figure III.4 : Modèle a 4 paramètres [5].

Les quatre paramètres de ce modèle sont :

I_L, I_{ph} = le courant photonique

I_0 =courant de saturation inverse

γ = facteur de qualité

R_S =la résistance en série

Les différentes équations décrivant ce modèle seront détaillées par la suite.

III.2.5. Modèle à trois paramètres

Si on suppose que la résistance en série est nulle (comme pour le circuit à cinq paramètres) le circuit à 4 paramètres se réduit à un circuit à trois paramètres représenté par la figure (III.5). Ce circuit équivalent est considéré comme idéal.

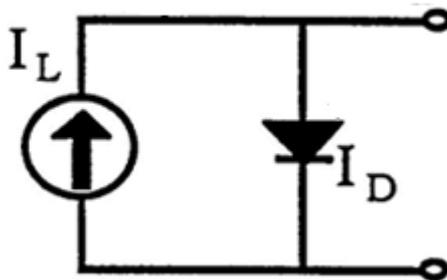


Figure III.5 : Modèle a 3 paramètres [5].

Les trois paramètres de ce circuit sont :

I_L, I_{ph} = le courant photonique

I_0 =courant de saturation inverse

γ = facteur de qualité

Les relations courant-tension de ce circuit sont :

$$I = I_L - I_D \quad (\text{III},13)$$

$$I_D = I_0 \left(\exp \left(\frac{qV}{\gamma_1 k T_C} \right) - 1 \right) \quad (\text{III},14)$$

Si on remplace (III.14) dans (III.13) on obtient :

$$I = I_L - I_0 \left(\exp \left(\frac{qV}{\gamma_1 k T_C} \right) - 1 \right) \quad (\text{III},15)$$

Les résultats sont I(V) et P(V) représentés sur la figure III.6 et III.7 pour les différents modèles.

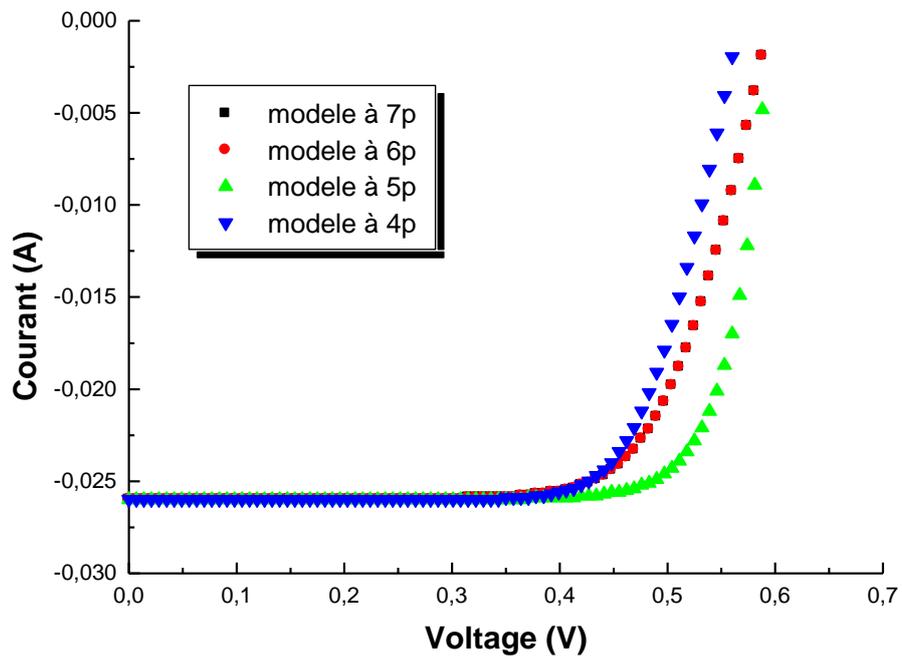


Figure III.6 : Caractéristiques I (V) d’une cellule solaire pour les différents modèles.

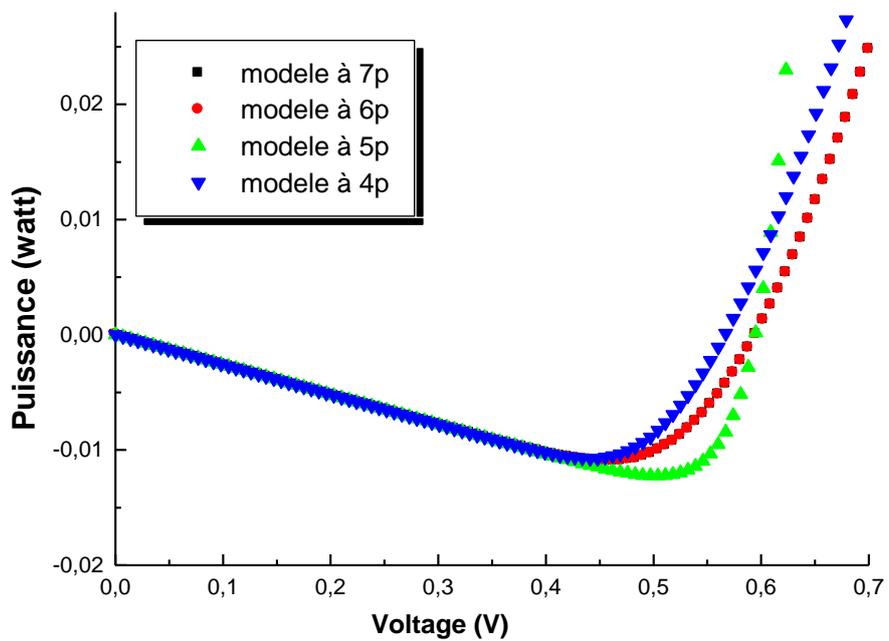


Figure III.7 : Caractéristiques P (V) d’une cellule solaire pour les différents modèles.

III.2.6. Cas général pour le choix du modèle

D'après une comparaison entre les résultats de simulation obtenus par ces modèles et les résultats expérimentaux, Townsend [5] a tiré les conclusions suivantes :

- La résistance shunt dans les modèles (**7P**), (**6P**) influe sur la caractéristique I-V uniquement au niveau des éclaircissements très bas.

- Les modèles électriques qui incluent le paramètre de la résistance en série (**4P et 6P**) sont de meilleurs modèles représentants des caractéristiques I-V, pour des niveaux d'éclaircissement assez éloignés du niveau de référence, par rapport aux modèles qui négligent cette résistance (**3P et 5P**).

- Le modèle (**7P**) ne traduit pas les caractéristiques I-V aussi bien que les autres modèles pour des températures différentes de la température de référence.

- Les courbes I-V globales, obtenues par les modèles **4P et 6P** sont plus précises.

La performance de la cellule solaire est normalement évaluée dans les conditions d'essai standard (STC), où un spectre solaire moyen de AM 1.5 est employé, l'éclaircissement est normalisé à $1000\text{W}/\text{m}^2$, et la température de la cellule est définie et égale à 25°C , pour répondre à l'exigence de la température et de l'éclaircissement au STC (Standard Test Condition).

Dans notre cas, nous utilisons la puissance maximale pour choisir le modèle

On remarque que dans les modèles à 6P et 7P nous avons la même puissance maximale (confirmation avec la littérature), par conséquent la puissance maximale dans nos simulations est meilleure pour le modèle à 5P et faible pour le modèle à 4P.

III.3. Modèle à paramètres constants

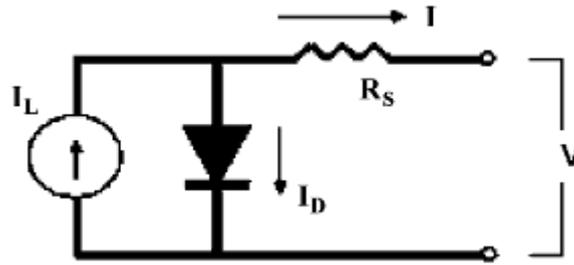


Figure III.8 : modèle à quatre paramètres 4P.

Le modèle à quatre paramètres est un modèle largement utilisé qui a été étudié par Townsend [5] et Beckman [6]. Ce modèle traite la cellule photovoltaïque comme une source de courant dépendante de l'éclairement, connectée en parallèle avec une diode et en série avec une résistance série R_s .

Les quatre paramètres apparaissant dans l'équation de la caractéristique $I(V)$ sont : le courant photonique I_L , la résistance série R_s , et les deux caractéristiques de la diode I_0 et γ . Ces paramètres ne sont pas des quantités mesurables et ne sont pas généralement inclus dans les données des fabricants. Par conséquent, ils doivent être déterminés à partir des systèmes des équations $I(V)$ pour différents points de fonctionnement (donnés par les fabricants). D'après Kirchhoff, le courant de sortie de la cellule est :

$$I = I_L - I_D \quad (\text{III},16)$$

Le courant photonique est lié à l'éclairement, à la température et au courant photonique mesuré aux conditions de référence par :

$$I_L = \left(\frac{G}{G_{REF}} \right) (I_{L,REF} + \mu_{ISC})(T_C - T_{C,REF}) \quad (\text{III},17)$$

Où

$I_{L,REF}$ = le courant photonique sous condition de référence [ampères]

G, G_{REF} = les éclairements réels et à la condition de référence [W/m^2]

$T, T_{C,REF}$ = température de cellules réelles et à la condition de référence [degré Kelvin]

I_{SCm} = coefficient de la température du courant de court-circuit [ampères/degré]

Le courant de la diode est donné par l'équation de Shockley :

$$I_D = I_0 \left(\exp \left(\frac{qV + IR_s}{\gamma_1 k T_C} \right) - 1 \right) \quad (\text{III}, 18)$$

Où

V = la tension de sortie [volts]

I = le courant inverse de saturation [ampères]

γ = le facteur de qualité

R_s = la résistance série [ohm]

q = la constante de charge d'électron, 1.602×10^{-19} C

k = la constante de Boltzmann, 1.381×10^{-23} J/K

Le courant inverse de saturation de la diode s'exprime en fonction des caractéristiques du matériau et de la température comme suit [7] :

$$I_0 = DT_C^3 \exp \left(\frac{-q\varepsilon_g}{AkT_C} \right) \quad (\text{III}, 19)$$

Où :

D = le facteur de diffusion de la diode

ε_g = l'énergie de gap (1.12 eV pour le silicium, 1.35 eV pour le germanium et 1.15 pour le CIGS)

A = facteur d'accomplissement

Le courant inverse de saturation I_0 est calculé en prenant le rapport de l'équation

(III.19) à deux températures différentes, éliminant de ce fait le facteur D . Comme pour la détermination de I_L (équation (III.17)), I_0 est lié à la température et au courant de saturation définis aux conditions de référence par la relation suivante:

$$I_0 = I_{0,REF} \left(\frac{T_C}{T_{C,REF}} \right)^3 \exp \left[\left(\frac{q\varepsilon_g}{kA} \right) \left(\frac{1}{T_{C,REF}} - \frac{1}{T_C} \right) \right] \quad (\text{III}, 20)$$

La caractéristique I(V) est décrite ainsi par :

$$I = I_L - I_0 \left(\exp \left(\frac{qV + IR_s}{\gamma_1 k T_C} \right) - 1 \right) \quad (\text{III}, 21)$$

Pour un éclairage, une température et des paramètres d'une cellule données, la relation du courant en fonction de la tension est donnée par l'équation (III.21), qui par définition est une

équation non linéaire implicite et devant être résolue numériquement. Les caractéristiques typiques courant-tension et puissance-tension décrites par cette équation sont montrés dans la figure III.9.

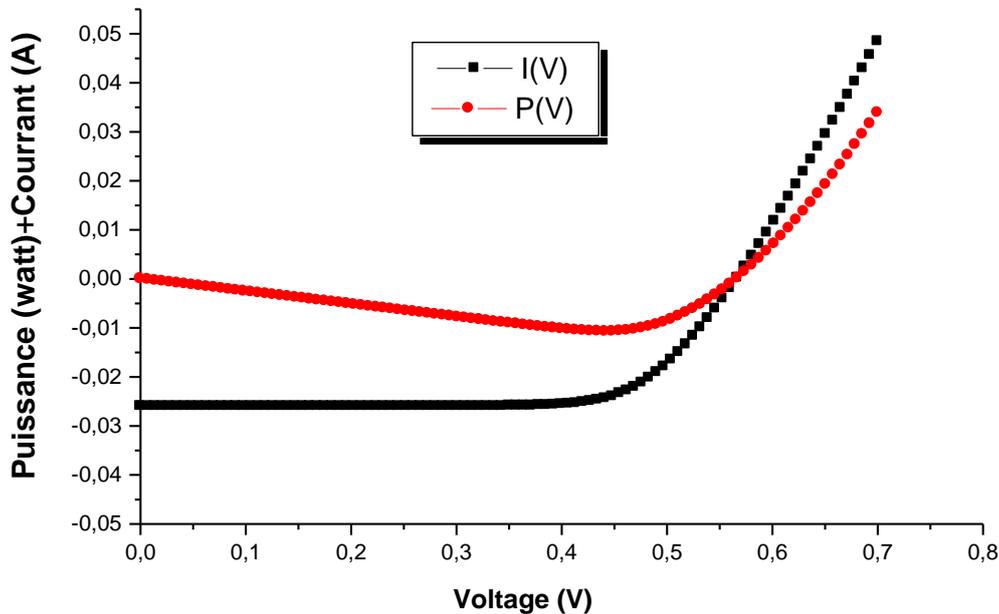


Figure III.9 : Caractéristiques I(V) et P(V)

La caractéristique I(V) nous montre que la cellule PV est une source de courant constant pour des faibles valeurs de la tension avec un courant approximativement égal au courant de court-circuit (I_{sc}). Avec l'augmentation de la tension, le courant commence à diminuer exponentiellement jusqu'à la valeur zéro où la tension est égale à la tension de circuit ouvert (V_{co}). Sur la gamme entière de tension, il y a un seul point où la cellule fonctionne au rendement le plus élevé; c'est le point de puissance maximum MPP

Le but de la conception des systèmes photovoltaïques est de faire fonctionner le système à ce point, ce qui est compliqué du fait que le point maximum de puissance change avec l'éclairement et la température.

Le facteur de base qui décrit la qualité de la courbe I (V) est le facteur de forme [FF]

$$FF = \frac{V_{MP} I_{MP}}{V_{OC} I_{SC}} \quad (III,22)$$

V_{OC} et I_{SC} la tension de circuit ouvert et le courant de court-circuit, respectivement. Le facteur de forme est utilisé pour évaluer la forme carrée de la courbe $I(V)$.

Plus le facteur de forme est grand, plus le rendement de la cellule et sa puissance maximale sont grands. Le facteur de forme est employé pour comparer les différentes cellules solaires dans les mêmes conditions de référence.

III.4. Les méthodes mathématiques

Plusieurs problèmes en physique sont décrits par des équations implicites dont leurs nombres augmentent, en particulier dans les circuits électroniques et dans la modélisation des composants électroniques dont on peut citer ici deux d'entre eux : la fonction de Lambert W et la méthode de Newton -Raphson.

III.4.1. Fonction de Lambert W

La fonction de Lambert W est un outil mathématique qui sert à la résolution analytique et explicite de ces équations. L'utilité de la fonction de *Lambert W* est bien illustrée dans le modèle des jonctions non idéales avec une résistance série R_s et une résistance shunt R_{sh} , dans les caractéristiques des cellules solaires.

Les avantages de la solution analytique sont :

- Décrire le comportement général du problème physique, alors que la solution numérique est basée sur des résultats conditionnés par des valeurs spécifiques.
- Contribue à l'unification des différents phénomènes.
- Cette solution est exacte, alors que les résultats numériques sont exacts selon une erreur de calcul bien déterminée.
- Pas de problèmes de convergence.
- Facilite la compréhension des comportements physiques lorsque les paramètres de l'équation changent.
- Peut être intégrée et dérivée.

Une telle solution est donnée par la fonction de *Lambert W* , elle répond à tous les critères cités ci-dessus. La fonction de *Lambert W* a été introduite en 1758 dans les travaux de Lambert, ensuite elle a été étudiée par Euler en 1779. Enfin, elle a été étudiée en 1959 par E.M.Wright d'où elle a pris son nom. Le nombre d'applications de la fonction de *Lambert W* a augmenté considérablement dans les dernières années [8]. Le premier problème physique résolu explicitement avec la fonction de *Lambert W* était l'échange de force entre deux nucléons à l'intérieur d'une molécule $H(H^{2+})$ [9].

La fonction de Lambert W est définie comme étant la fonction qui vérifie la formule suivante :

$$W(Z)e^{W(Z)} = Z$$

Z : argument de la fonction W .

La fonction de Lambert W est définie comme la solution inverse de la fonction $W \rightarrow W \exp(W)$. Elle a plusieurs applications, parmi elles la solution de l'équation (III.23) :

$$x \exp(x) = a \quad (III.23)$$

$$D'où : x = W(a)$$

Le calcul de la fonction de Lambert W dépend de l'intervalle de l'argument a . Le tableau III.2 résume les différentes équations utilisées pour le calcul de la branche principale W_0 [10] de cette fonction.

La figure III.10 montre le tracé de la fonction de Lambert W avec un pas de 0.025. Le calcul d'erreur associé aux valeurs de la branche principale W_0 est représenté dans la figure III.10. Une grande perturbation de l'erreur est remarquée lorsque l'argument x augmente. Cette fluctuation est due à la valeur approximée [10] :

$$W(z) = L_1 - L_2 + \frac{L_2}{L_1} + \frac{L_2(-2+L_2)}{2L_1^2} + \frac{L_2(6-9L_2+2L_2^2)}{2L_1^3} + \frac{L_2(-12+36L_2-22L_2^2+3L_2^3)}{12L_1^4} + 0 \left(\left\{ \frac{L_2}{L_1} \right\}^5 \right) \quad (III.24)$$

avec :

$$z = x : \text{argument}, L_1 = L_n(x), L_2 = L_n(L_n(x))$$

Argument	Calcul de la fonction de Lambert W
$x =]-\infty, 1/e]$	$W = -1$
$x = \varepsilon = 1/e + 10^{-128}$	$W = -1 + p - 1/3p^2 + 11/72p^3$ $p = (2e^1 x + 1)^{1/2}$
$x =]\varepsilon, 0[$	$W = \text{num/den}$ $\text{num} = x(60 + 114x + 17x^2)$ $\text{den} = 60 + 174x + 101x^2$
$x = 0$	$W = 0$
$x =]0, 1[$	$W = \text{num/den}$
$x = [1, e[$	$W = L_n(x)$
$x = [e, +\infty[$	$W = L_n(x) - L_n(L_n(x))$

Tableau III.2. Calcul de la fonction de Lambert W [10-11].

Branche principale de la fonction de LambertW ₀	Niveau de l'erreur (e) tiré du calcul de W ₀
<pre>x=-0.4:0.011:2.2 j=lambertw(x) w=j e=j.*(exp(j))-x plot(x,j)</pre>	<pre>x=-0.4:0.011:2.2 j=lambertw(x) w=j e=j.*(exp(j))-x plot(x,e)</pre>

Tableau III.3. Le programme de Calcul de la fonction de Lambert W et le niveau de l'erreur.

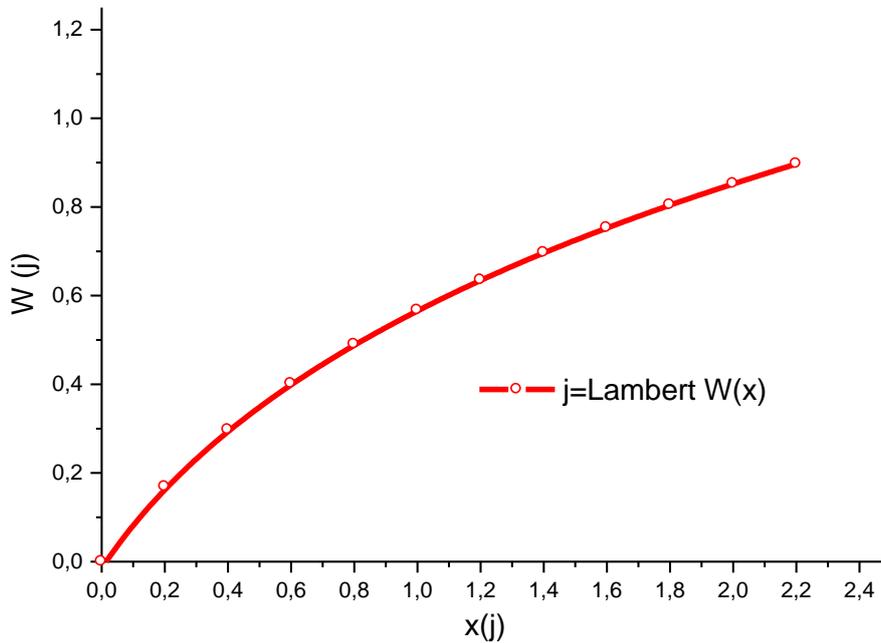


Figure III.10. Branche principale de la fonction de LambertW₀

III.4.2 .La méthode de Newton -Raphson

La méthode de Newton Raphson est l'une des méthodes les plus utilisées pour la résolution des équations non linéaires. L'algorithme de cette méthode est basé sur l'utilisation du développement de Taylor. Soit une équation à résoudre de la forme :

$$f(x) = 0 \tag{III.25}$$

A partir d'une valeur initiale x_0 de la solution, on cherche une correction δx telle que :

$$0 = f(x_0 + \delta.x) \tag{III.26}$$

En faisant un développement de Taylor autour de $x=x_0$, on trouve :

$$0 = f(x_0) + f'(x_0).\delta x + \left(\frac{f''(x_0)\delta x^2}{2!} \right) + \left(\frac{f'''(x_0)\delta x^3}{3!} \right) + \dots \quad (\text{III.27})$$

Il suffit maintenant de négliger les termes d'ordre supérieur ou égal 2 en δx pour obtenir :

$$f(x_0) + f'(x_0).\delta x \approx 0 \quad (\text{III.28})$$

On peut alors isoler la correction recherchée :

$$\delta x = -\frac{f(x)}{f'(x)} \quad (\text{III.29})$$

La correction δx est en principe la quantité que l'on doit ajouter pour annuler la fonction $f(x)$ puisque nous avons négligé les termes d'ordre supérieur ou égal à 2 dans le développement de Taylor, cette correction n'est pas parfaite et on pose :

Avec :

$f'(x)$: est la dérivée de la fonction $f(x)$

$f'(x)=0, x_i$: est une valeur actuelle et x_{i+1} est une prochaine valeur

$$f(I_{pv}) = I_{CC} - I_{pv} - I_{S1} \left(\exp \left(\frac{V_{pv} + R_S I_{pv}}{V_t \gamma_1} \right) - 1 \right) - I_{S2} \left(\exp \left(\frac{V_{pv} + R_S I_{pv}}{V_t \gamma_2} \right) - 1 \right) - \left(\frac{V_{pv} + I_{pv} R_S}{R_{sh}} \right) \quad (\text{III.30})$$

III.5. Résultats de comparaison entre deux approches (la méthode et la fonction)

Pour tester la précision de la fonction de Lambert W, on a comparé cette dernière avec la méthode de Newton. Pour cela, on a simulé la caractéristique I-V d'une cellule solaire avec la méthode de Newton et avec la fonction de Lambert W.

La figure III.11 montre la comparaison du couple Newton-Lambert. La superposition parfaite entre les deux caractéristiques I-V, favorise l'utilisation de cette fonction pour l'étude des équations implicites.

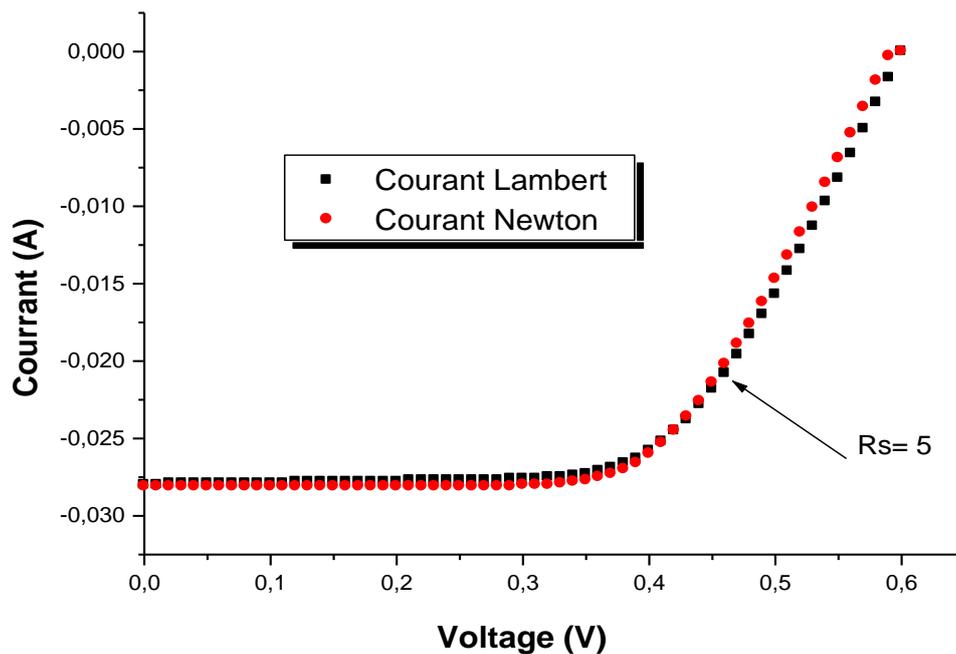


Figure III.11 : Comparaison entre la caractéristique I - V d'une cellule solaire simulée avec la méthode de *Newton* et avec la *fonction de Lambert W*.

Une étude comparative de traçage de la caractéristique I - V d'une cellule solaire sous éclairage à l'aide du modèle à une seule diode sera expliquée dans cette partie. Deux méthodes d'analyses sont trouvées dans la littérature : la méthode numérique de Newton Raphson et la méthode analytique de Lambert qui permettent de tracer l'équation implicite donnant le courant en fonction de la tension aux bornes de la cellule solaire.

D'après nos simulations, nous avons trouvé que le fitage des deux caractéristiques est presque identique pour les deux méthodes utilisées. Quelques différences en terme de puissance maximale sont enregistrées dans le tableau III.4. Pour des valeurs négligeables de R_s (zero) nous avons trouvé une puissance optimale dans la méthode de Newton (+1.5mW) par rapport à la méthode de Lambert.

Pour des valeurs moyenne de R_p (≥ 1000), nous avons trouvé une puissance optimale par la méthode de Lambert (+2mW) par rapport à la méthode de Newton.

Pour d'autres valeurs de I_{CC} (28.1mA), nous avons trouvé des anomalies en puissance optimale pour la méthode de Lambert et la méthode de Newton, et aucune différence pour la puissance optimale à la valeur critique décrite précédemment.

Une optimisation linéaire est trouvée pour la puissance maximale en fonction de V_{oc} spécifiquement pour la méthode de Newton.

Enfin, la meilleure puissance est donnée par la méthode de Newton égale à $\gamma = 1$, elle donne les puissances optimales, raison pour laquelle nous l'avons choisie pour réaliser notre étude.

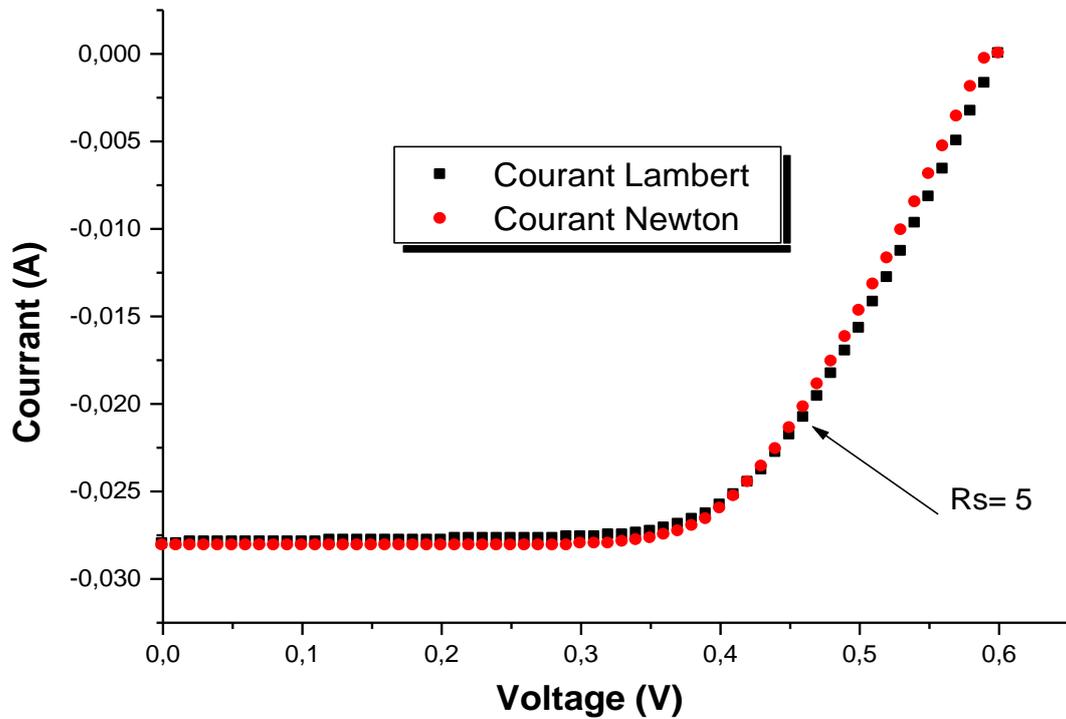


Figure III.12 : Comparaison entre la caractéristique I - V d'une cellule solaire simulée avec la méthode de *newton* et avec la *fonction de Lambert W* avec $R_s=5$ [Ω],

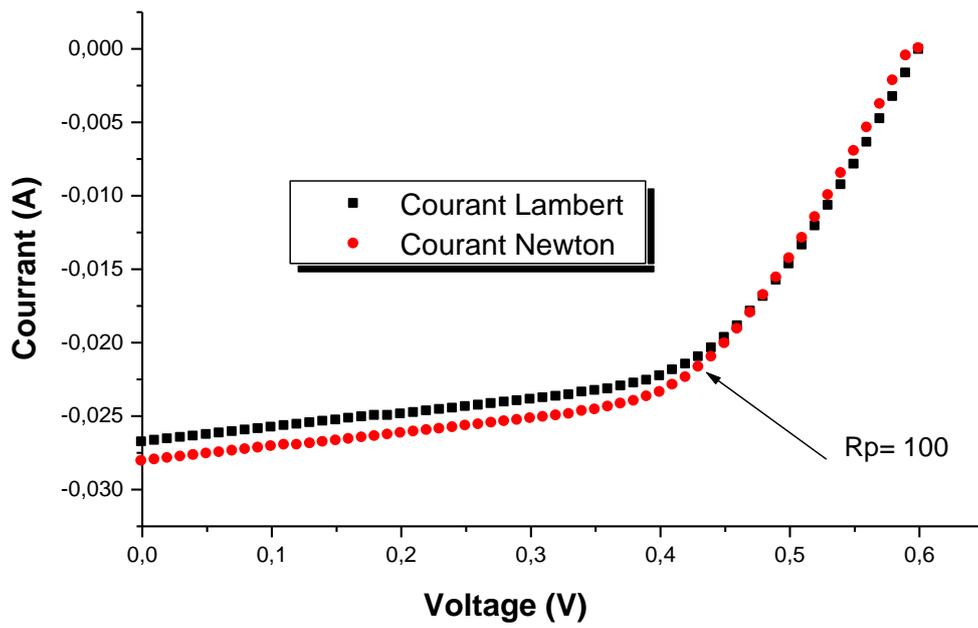


Figure III.13: Comparaison entre la caractéristique I - V d'une cellule solaire simulée avec la méthode de *newton* et avec la *fonction de Lambert W* avec $R_p = 100 \text{ } \Omega$,

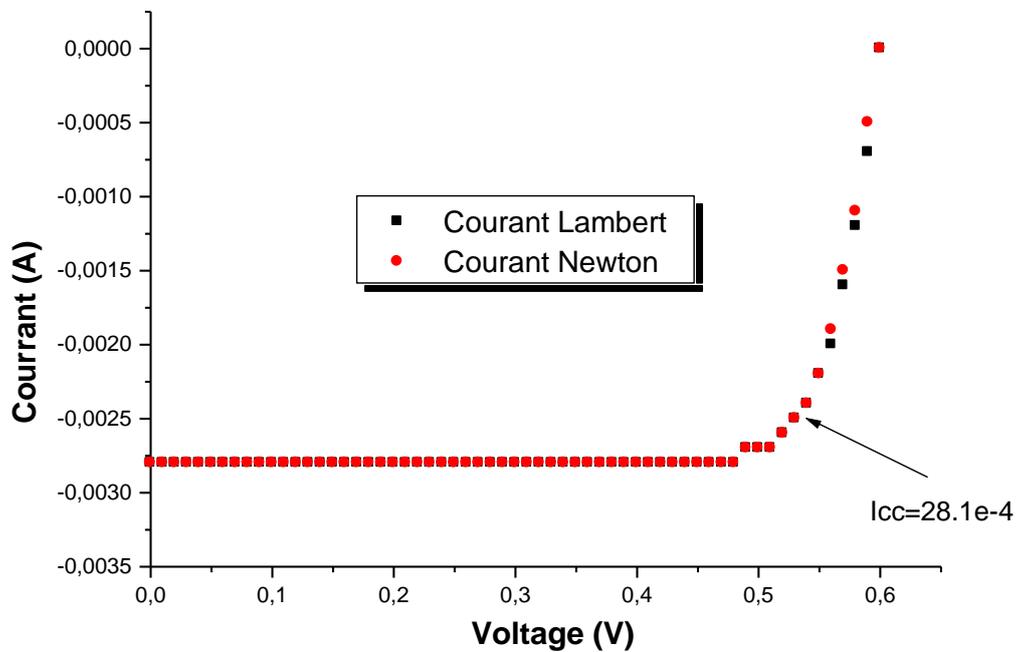


Figure III.14: Comparaison entre la caractéristique I - V d'une cellule solaire simulée avec la méthode de *newton* et avec la *fonction de Lambert W* avec $I_{cc} = 28.1 \text{ e-}4 \text{ (A)}$

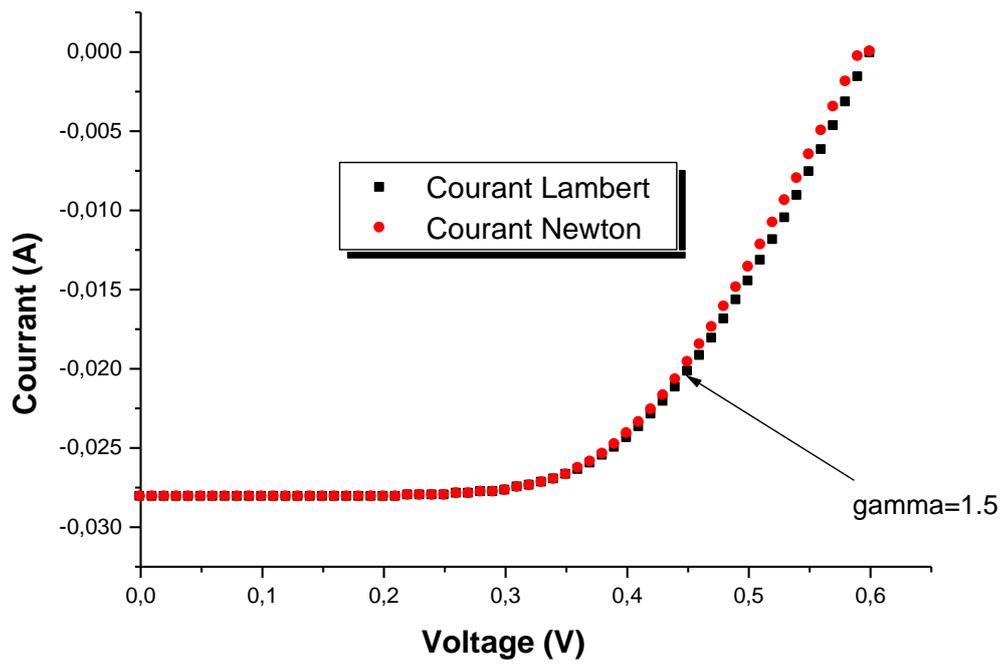


Figure III.15: Comparaison entre la caractéristique I - V d'une cellule solaire simulée avec la méthode de *newton* et avec la *fonction de Lambert W* avec $\gamma = 1.5$

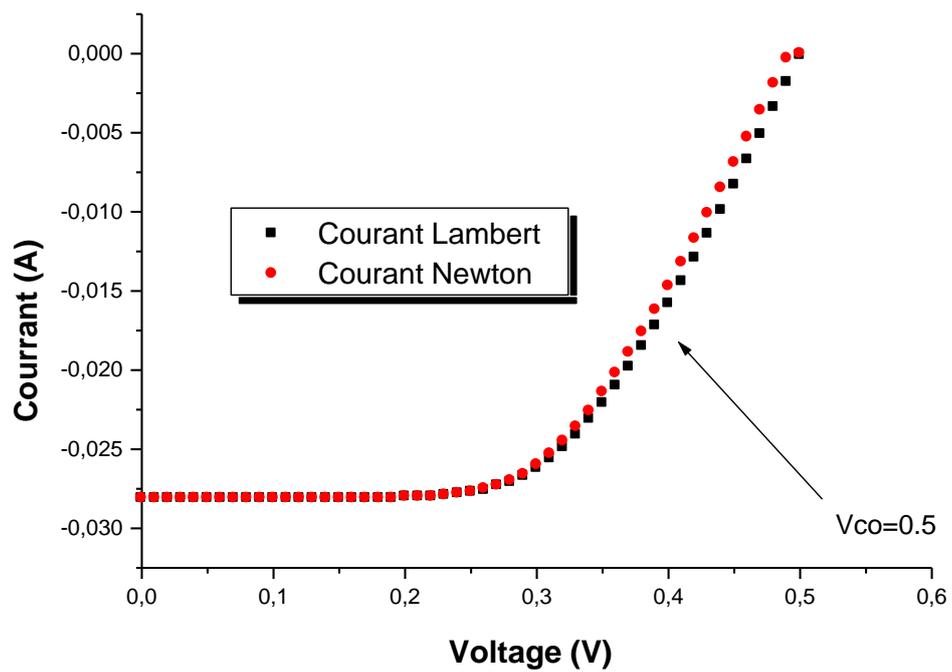


Figure III.16: Comparaison entre la caractéristique I - V d'une cellule solaire simulée avec la méthode de *newton* et avec la *fonction de Lambert W* avec $V_{co}=0.5V$

Le tableau III.4 résume tous les résultats de la simulation sur la puissance maximum P_{max} pour les différents effets des deux méthodes mathématiques de la fonction de Lambert et la méthode de Newton.

L'effet de la Resistance en série R_s sur la puissance P_{max}							
R_s	$R_s=0$	$R_s=5$	$R_s=10$	$R_s=20$			
P_{max} Lambert	0.0139	0.0104	0.0085	6.6491e-004			
P_{max} Newton	0.0124	0.0124	0.0120	5.6159e-004			
L'effet de la Resistance parallèle R_p sur la puissance P_{max}							
R_p	$R_p =100$	$R_p=10000$	$R_p =1e+5$	$R_p =1e+6$	$R_p =1e+7$		
P_{max} Lambert	0.0094	0.0104	0.0104	0.0104	0.0104		
P_{max} Newton	0.0124	0.0124	0.0124	0.0124	0.0124		
L'effet de I_{cc} sur la puissance P_{max}							
I_{cc}	28.1e-5	28.1e-4	28.1e-3	28.1e-2			
P_{max} Lambert	1.3887e-004	0.0014	0.0104	0			
P_{max} Newton	1.9642e-005	0.0011	0.0103	6.1781e-005			
L'effet de V_{oc} sur la puissance P_{max}							
V_{oc}	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8		
P_{max} Lambert	0.0054	0.0079	0.0104	0.0130	0.0157		
P_{max} Newton	0.0055	0.0079	0.0103	0.0129	0.0154		
L'effet de la n sur la puissance P_{max}							
γ	1	1.4	1.8				
P_{max} Lambert	0.0104	0.0098	0.0093				
P_{max} Newton	0.0103	0.0097	0.0092				

Tableau III.4: L'effet de différent paramètre sur la puissance maximum P_{max} par méthode de newton et la fonction de Lambert W.

III.6. Détails de la modélisation et simulation numérique

III.6.1 Modèle à 4P+R_p.

Au début de ce chapitre l'équation courant-tension géant la puissance extraite d'une cellule solaire en utilisant le premier modèle est donnée par:

$$I = I_{PH} - I_S \left[\exp\left(\frac{q(V + R_S I)}{\gamma K_B T}\right) - 1 \right] - \frac{(V + R_S I)}{R_{SH}} \quad (III.31)$$

Cette équation est dite équation implicite (la densité de courant se trouve dans les deux membres de l'équation) et non linéaire (car le deuxième membre de l'équation contient un terme exponentiel en plus du précédent qui est linéaire), pour extraire les paramètres photovoltaïques à partir de cette équation on procède comme suit :

III.6.1.1 Calcul de I_{CC}, V_{CO}, I_{PH} et I_S:

Quand la condition V=0 est vérifiée, la densité de courant I=I_{CC} sera donnée par:

$$I_{CC} = I_{PH} - I_S \left[\exp\left(q \frac{I_{CC} R_S}{\gamma K_B T}\right) - 1 \right] - \frac{I_{CC} R_S}{R_{SH}} \quad (III.31)$$

Quand la condition I=0 est vérifiée, la tension V=V_{CO} :

$$I_{PH} - I_S \left[\exp\left(\frac{q V_{CO}}{\gamma K_B T}\right) - 1 \right] - \frac{V_{CO}}{R_{SH}} = 0 \quad (III.32)$$

d'où

$$I_{PH} = I_S \left[\exp\left(\frac{q V_{CO}}{\gamma K_B T}\right) - 1 \right] + \frac{V_{CO}}{R_{SH}} \quad (III.33)$$

Si on remplace l'équation (II.32) dans (II.33) on obtient ainsi :

$$I_S \left[\exp\left(q \frac{V_{CO}}{\gamma K_B T}\right) - \exp\left(q \frac{I_{CC} R_S}{\gamma K_B T}\right) \right] = \frac{I_{CC} R_S}{R_{SH}} + I_{CC} - \frac{V_{CO}}{R_{SH}} \quad (III.34)$$

donc

$$I_S = \frac{I_{CC} (R_S + R_{SH}) - V_{CO}}{R_{SH} \left(\exp\left(q \frac{V_{CO}}{\gamma K_B T}\right) - \exp\left(q \frac{I_{CC} R_S}{\gamma K_B T}\right) \right)} \quad (III.35)$$

III.6.1.2 Calcul de R_S et R_{SH}

En prenant le schéma équivalent de la **figure III.8+R_p** on peut calculer les résistances série et shunt de la façon suivante [12] :

L'application de la charge R_C donne :

$$I_{PH} = I_d + I_{SH} + I_{RC} \quad (III.36)$$

$$I_{ph} = I_S \left(e^{\frac{q}{\gamma K_B T} (V_{RC} + I_{RC} R_S)} - 1 \right) + \frac{V_{RC} + I_{RC} R_S}{R_{SH}} + I_{RC} \quad (III.37)$$

A partir des équations (III.34) (III.35) et (III.36) on calcule la tension aux bornes de la charge par :

$$V_{RC} = \frac{\gamma K_B T}{q} \ln \left[\frac{R_{SH} + (I_{PH} + I_S - I_{RC})}{R_{SH} I_S} - I_{RC} R_S \right] - I_{RC} R_S \quad (III.38)$$

En prenant deux points (I_1, V_1) et (I_2, V_2) proches entre eux et de l'axe des abscisses de la caractéristique I-V on obtient donc :

$$V_1 = \frac{\gamma K_B T}{q} \ln \left[\frac{R_{SH} + (I_{PH} + I_S - I_1)}{R_{SH} I_S} - I_1 R_S \right] - I_1 R_S \quad (III.39)$$

$$V_2 = \frac{\gamma K_B T}{q} \ln \left[\frac{R_{SH} + (I_{PH} + I_S - I_2)}{R_{SH} I_S} - I_2 R_S \right] - I_2 R_S \quad (III.40)$$

R_S peut être écrite alors sous la forme :

$$R_S = \frac{V_1 - V_2}{I_2 - I_1} - \frac{\gamma K_B T}{q} \frac{1}{I_2 - I_1} \ln \left[\frac{R_{SH} (I_{PH} + I_S - I_1) - I_1 R_S}{R_{SH} (I_{PH} + I_S - I_2) - I_2 R_S} \right] \quad (III.41)$$

Avec l'approximation $R_{SH} \gg R_S$ l'équation (III.41) devient :

$$R_S = \frac{V_1 - V_2}{I_2 - I_1} - \frac{\gamma K_B T}{q} \frac{1}{I_2 - I_1} \ln \left[\frac{(I_{PH} + I_S - I_1)}{(I_{PH} + I_S - I_2)} \right] \quad (III.42)$$

et

$$R_{SH} = \frac{V_{CO}}{I_{PH} - I_S \left(e^{\frac{q}{\gamma K_B T} V_{CO}} - 1 \right)} \quad (III.43)$$

III.6.1.3. Calcul du courant maximal I_M et la tension maximale V_M

La puissance de la cellule est $P=I.V$. Pour trouver I_M et V_M il suffit de trouver P_M la puissance maximale de la cellule. Ceci consiste à maximiser l'aire du rectangle borné par les axes de I et V et par la courbe I-V.

Pour ce faire, nous pouvons procéder à un calcul différentiel selon [13] :

$$\frac{dP}{dI} = 0 \quad (III.44)$$

où

$$P = V.I \quad (\text{III.45})$$

V est déduite à partir de l'équation (III.31) et la puissance aux bornes de la cellule est donnée par :

$$V = (-I + I_{PH} - I_S \left(\exp\left(\frac{q(V + R_S I)}{\gamma K_B T}\right) - 1 \right) - \frac{R_S I}{R_{SH}}) R_{SH} \quad (\text{III.46})$$

d'où

$$\frac{dP}{dI} = -2I(R_S + R_{SH}) + R_{SH}I_{PH} + R_{SH}I_S \left[\exp\left(\frac{q(V + R_S I)}{\gamma K_B T}\right) - 1 \right] \left[1 + \frac{R_S I}{\gamma K_B T} \right] \quad (\text{II.47})$$

La résolution de cette équation différentielle est faite par la méthode de **Newton-Raphson** qui donne la densité du courant maximale pour la cellule [14]

Enfin :

$$I_M = \left[\frac{\log(I_{CC} + I_S) - \log(I_{CC} - I_S) / I_S}{R_S \left(1 + \frac{q I_S}{\gamma K_B T} \right)} \right] \quad (\text{III.48})$$

et

$$V_M = \frac{\gamma K_B T}{q} \log((I_{CC} + I_S) / I_S) - R_S I_M \quad (\text{III.49})$$

Pour calculer la puissance maximale de la cellule il suffit de faire le produit des deux entités précédentes.

Les pentes extraites à partir de la caractéristique I(V) expérimentale sont données par l'équation (II.50) :

$$R_{S0} = -\left(\frac{\partial V}{\partial I} \right)_{V=V_{CO}}, \quad R_{SH0} = -\left(\frac{dV}{dI} \right)_{I=I_{CC}} \quad (\text{III.50})$$

Pour l'ajustement numérique des résultats expérimentaux, on va faire appel à la méthode des moindres carrés, pour cela on calcule le paramètre suivant :

$$\beta^2 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{I_{Mi} - I(V_i)}{\delta} \right)^2 \quad (\text{III.51})$$

avec

I_{Mi} : valeur expérimentale de la densité de courant qui correspond à la tension mesurée V_i .

$I(V_i)$: valeur de la densité de courant calculée par l'équation (III.49) pour une tension V_i .

N : nombre des points mesurés et relevés de la caractéristique expérimentale I-V,

δ : écart type de la densité du courant mesuré

III.6.1.4. Recherche du minimum par la méthode des moindres carrés

Calculons la dérivée première de la fonction donnée par (II.51) :

$$\sum_{i=1}^N \left(\frac{I_{mi}}{\delta^2} \right) \frac{\partial I}{\partial a_j} - \sum_{j=1}^N \left(\frac{1}{I^2} \right) I \frac{\partial I}{\partial a_j} = 0 \Bigg|_{a_j = \min \beta^2} \quad (\text{III.52})$$

où

R_S , R_{SH} , A et I_{PH} sont les paramètres électriques représentés par a_j .

d'où : $j=1-4$ et ($j=1-3$ sous obscurité).

Le développement de Taylor de premier ordre permet d'écrire :

$$\frac{\partial I}{\partial a_j} = \frac{\partial I}{\partial a_j} \Bigg|_{a_j = \min \chi^2} + \sum_{k=1}^{3,4} \left(\frac{\partial^2 I}{\partial a_k \partial a_j} \Bigg|_{a_k, a_j = \min \beta^2} \right) \delta a_k \quad (\text{III.53})$$

$$I \frac{\partial I}{\partial a_j} = \frac{\partial I}{\partial a_j} \Bigg|_{a_j = \min \beta^2} + \sum_{k=1}^{3,4} \left(\frac{\partial}{\partial a_k} \left(I \frac{\partial I}{\partial a_j} \right) \Bigg|_{a_k, a_j = \min \beta^2} \right) \delta a_k \quad (\text{III.54})$$

Avec δa_k est l'incrément des paramètres a_k .

En substituant les équations (III.53) et (III.54) dans l'équation (III.55) on obtient un ensemble d'équations linéaires en δa_k , représenté par l'équation suivante :

$$M \cdot \delta a_k = D \quad (\text{III.55})$$

où M est une matrice dont les éléments sont donnés par :

$$M_{jk} = \sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{\delta^2} \right) \left\{ (I_{mi} - I) \frac{\partial^2 I}{\partial a_j \partial a_k} - \left(\frac{\partial I}{\partial a_k} \right) \left(\frac{\partial I}{\partial a_j} \right) \right\} \Bigg|_{a_j, a_k = \min \beta^2} \quad (\text{III.56})$$

Les écarts types des paramètres sont données par les éléments de diagonale de la matrice inverse de M , tels que :

$$S_k^2 = M_{kk}^{-1} \quad (\text{III.57})$$

$$G(I_{S1}) = I(M.P.) - I_{mp} \quad (\text{III.58})$$

avec I_{mp} est la valeur expérimentale et $I(M,P)$ est la valeur calculée à partir de l'équation (III.31) pour la puissance maximale.

Les étapes précédentes sont résumées dans l'organigramme représenté par la figure III.17.

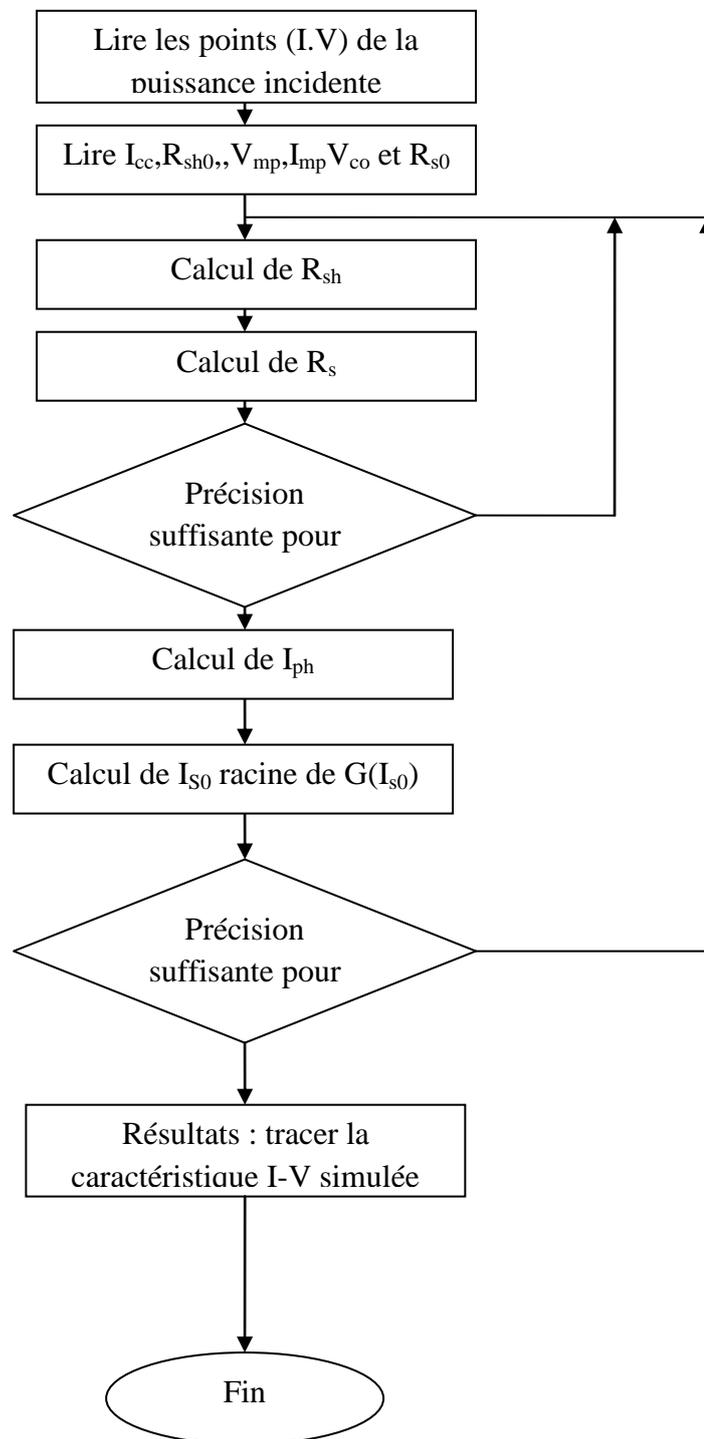


Figure III.17 : Organigramme du calcul des paramètres de la caractéristique I-V.

III.7. Influence des Différents Paramètres sur les Caractéristiques de la Cellule Solaire

II.7.1. Influence de la température

La température est un paramètre important dans le comportement des cellules. Les figures II.18 et II.19 montrent que l'augmentation de la température entraîne une diminution nette de la tension de circuit ouvert, ainsi qu'une diminution de la puissance maximale (une variation 20° K entraîne une diminution de 10 m.Watts de la puissance maximale).

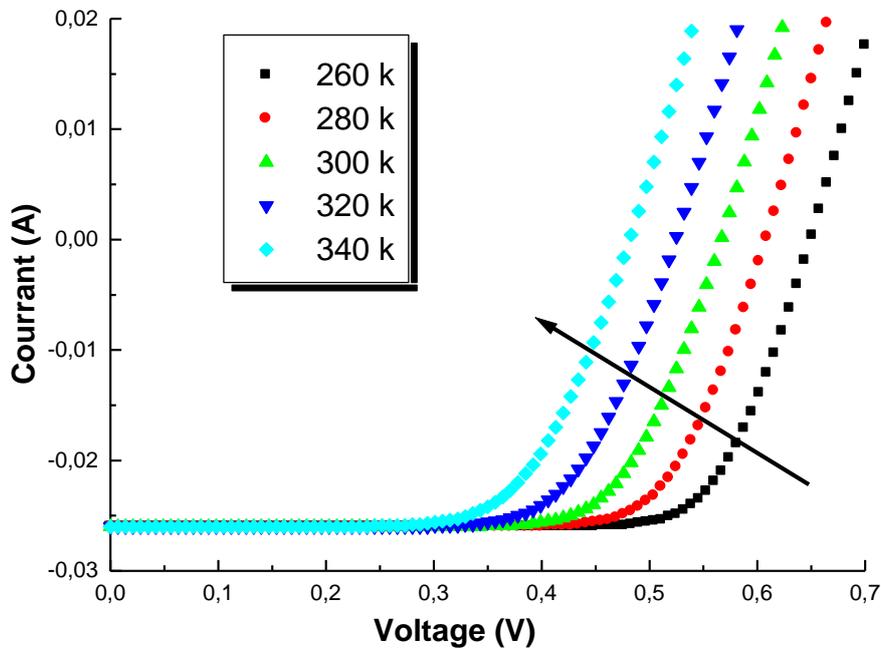


Figure. III.18 : Influence de la température sur la caractéristique I (V).

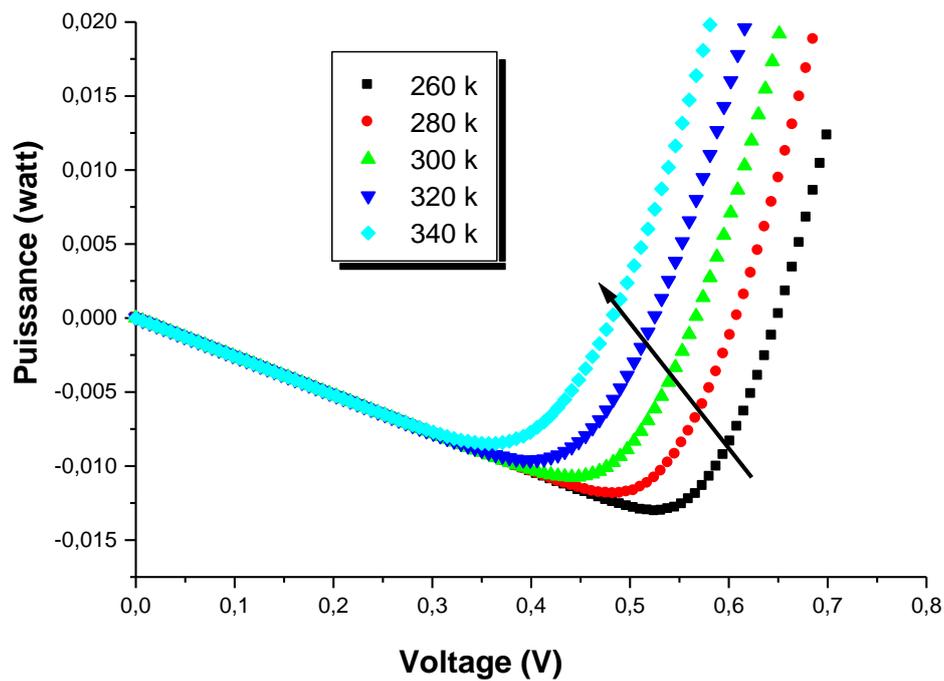


Figure. III.19 : Influence de la température sur la caractéristique P (V).

III.7.2. Influence de la Résistance série :

La résistance série agit sur la pente de la caractéristique dans la zone où la photodiode se comporte comme un générateur de tension, et lorsqu'elle est élevée, elle diminue la valeur de courant de court-circuit (voir figure. III.20). Elle influe aussi sur la puissance maximale extraite à partir de la cellule solaire, cette puissance est alors optimale pour les valeurs les plus minorées de R_s .

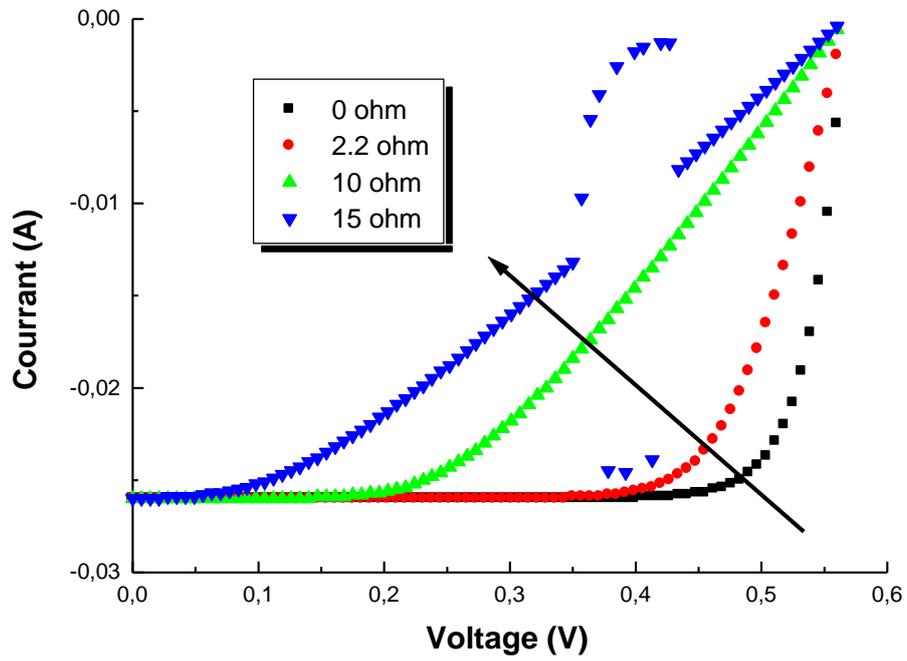


Figure. III.20 : Influence de la résistance série sur la caractéristique I (V).

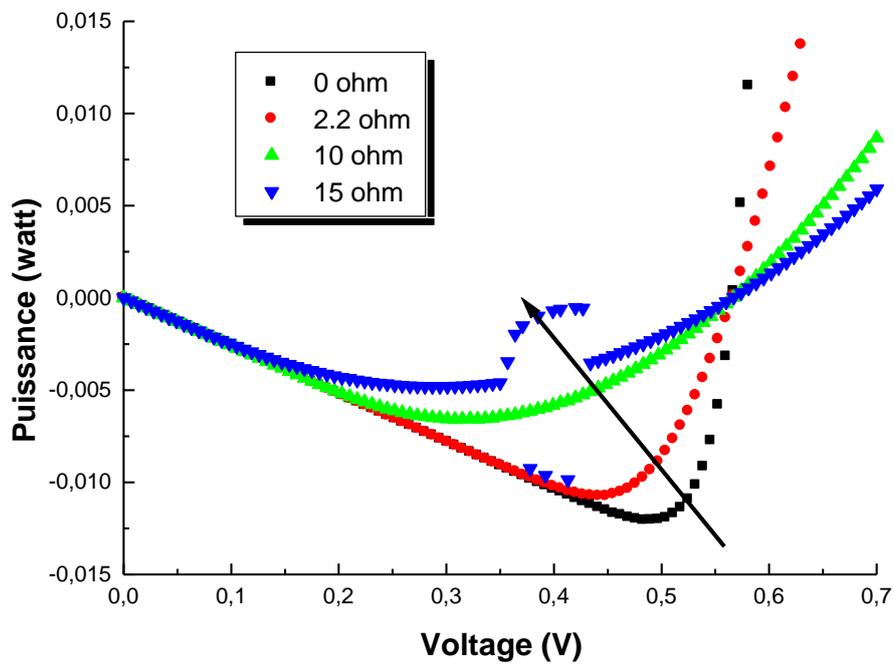


Figure. III.21 : Influence de la résistance série sur la caractéristique P (V)

III.7.3. Influence du facteur de qualité

L'augmentation du facteur d'idéalité de la diode influe inversement sur le point de puissance maximale et cela se traduit par une baisse de puissance au niveau de la zone de fonctionnement.

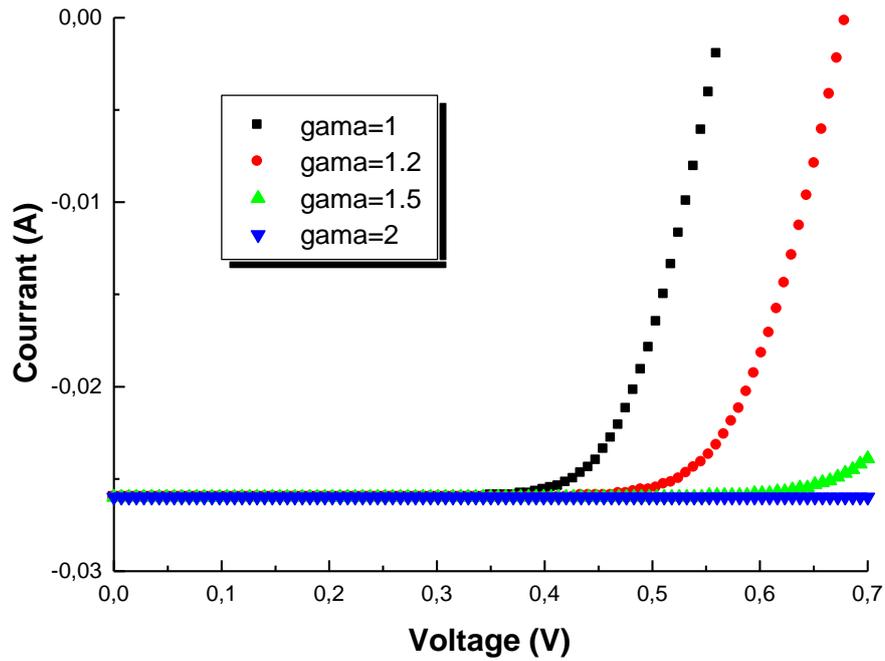


Figure. III.22 : Influence du facteur de qualité sur la caractéristique I (V)

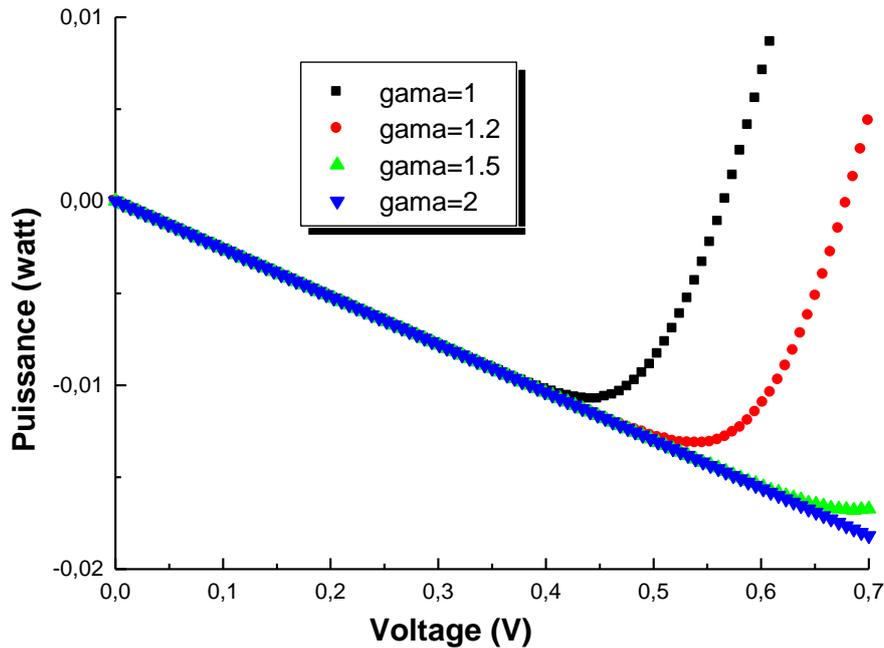


Figure. III.23 : Influence du facteur de qualité sur la caractéristique P (V).

III.8. Application dans les Cellules Photovoltaïques à Base de CIGS

Au début de notre travail nous avons choisi un modèle conventionnel utilisé dans la modélisation des cellules solaires à base de silicium, CdTe, GaAs ...etc. et nous l'avons appliqué au CIGS ; c'est le modèle à une seule diode. Nous avons commencé par l'ajustement de la caractéristique I-V de notre cellule choisi en bon accord avec la théorie. Nous avons ensuite entamé un travail de prédiction théorique des paramètres photovoltaïques V_{OC} , I_{SC} , FF et le rendement. Puisque nous n'avons pas des données expérimentales détaillées sur l'évolution théorique des paramètres photovoltaïques décrites précédemment en fonction des températures R_s et E_g , alors nous avons utilisé le deuxième modèle, celui à deux diodes, et nous avons effectué la même chose qu'avec le modèle à une seule diode afin de faire une comparaison entre les deux méthodes. Chaque modèle donne des avantages et des inconvénients comme montre la discussion.

L'objectif dans le premier temps est de déterminer les différents paramètres électriques régissant le fonctionnement d'une cellule solaire comme la résistance série, la résistance shunt, le photo-courant...etc, afin d'étudier un modèle correspondant (modèle à une seule diode) décrivant le comportement d'une cellule solaire à base de CIGS sous éclairage. Ceci est effectué à travers des simulations faites dans l'environnement utilisé en appliquant les méthodes numériques usuelles telles que la méthode de *Newton-Raphson*.

III.8. 1. Modèle Equivalent du Circuit de la Cellule Solaire à base CIGS

Le modèle de la cellule solaire CIGS doit tenir compte des paramètres électriques, optiques et géométriques [15-16]. La lumière est absorbée dans la cellule solaire et un courant est généré suite à l'équation de la diode, mais cette absorption dans le contact avant transparent entraîne des pertes optiques. Les résistances électriques R_s et R_p d'un module de la cellule solaire CIGS sont indiquées sur la figure III.24. Le courant latéral dans la face de contact est transparente (ZnO : Al) et le contact de retour (Mo) n'est pas uniforme. Par conséquent, ces couches constituent des résistances distribuées en série. Les résistances en série sont $R_{ZnO : Al ; 1}$; $R_{ZnO : Al ; 2}$; ; $R_{ZnO : Al ; n}$ pour le ZnO : Al et $R_{MO ; 1}$; $R_{MO ; 2}$; ; $R_{MO ; n}$ pour le Mo , comme indiqué dans la figure III.24 d'après [15] et [16] .

La structure d'interconnexion du ZnO:Al qui transporte le courant complet est modélisée sous la forme d'une résistance série discrète appelée R_d . Il existe aussi une résistance supplémentaire, R_c , au contact ZnO:Al/Mo. La couche CIGS fourni un chemin de dérivation entre le contact avant et le contact arrière, indiquée par $R_{sh,1}$; $R_{sh,2}$, ... ; $R_{sh , n}$ dans la même figure et la structure d'interconnexion conduit à des pertes dans la zone active. Ceci conduit à un ensemble d'équations aux dérivées partielles non linéaires qui peuvent être résolues numériquement.

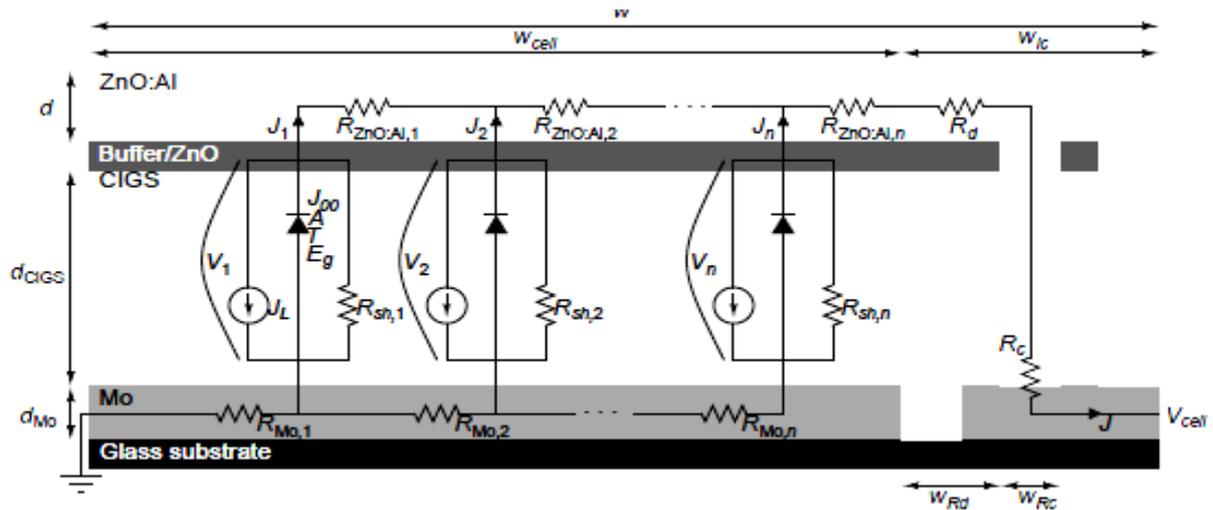


Figure. III.24 : Le circuit équivalent de la cellule solaire à base de CIGS décrivant modèle à une seule diode.

Le tableau ci-dessous représente les différents paramètres photovoltaïques de la cellule solaire à base du matériau CIGS mesurée dans le coté expérimentale par deux méthodes de dépôt; la première méthode est le dépôt par CBD et la deuxième méthode est le dépôt PVD.

	I_{sc} (mA)	V_{oc} (mV)	FF(%)	η (%)
La méthode de dépôt CBD	82.1	689.9	75.7	14.6
La méthode de dépôt PVD	26.1	568.7	71	10.5

Tableau .III.5 : Représente les performances PV de la cellule mesurée par deux méthodes des dépôts PVD et CBD-CdS [17].

III.8. 2. Résultats et Discussion

Pour visualiser après les possibilités du modèle proposé, nous analyserons comment changer la valeur des paramètres dans les deux modèles qui affectent la forme des caractéristiques I-V de la cellule solaire CIGS. Les équations ont été résolues avec succès en utilisant des paramètres constants aux conditions de référence, ($G=1000 \text{ W/m}^2$, $T=298 \text{ K}$) sous lequel les modèles ont été mis en application avec la méthode de Newton-Raphson. Des simulations qui montrent comment les caractéristiques I-V des cellules changent avec les modèles d'une et deux-diodes à la température de 300 K pour des données expérimentales (efficacité 10.55%) [17] sont démontrées sur le schéma III.25. Les paramètres sont énumérés dans le tableau III.6, avec R_s , R_{sh} , I_{s1} , I_{s2} , γ_1 et γ_2 étant des constantes. Les graphes prouvent que le modèle de simple-diode fournit une meilleure description pour les caractéristiques I-V du dispositif. Le modèle montre clairement le bon ajustement de l'expérience parce que la déviation est réduite au minimum dans ce modèle et les résultats peuvent être décrits avec plus de précision particulièrement aux potentiels plus bas que 0.55 volt.

Tableau III.6 Paramètres utilisés dans les simulations avec les modèles d'un et deux-diodes pour les différentes efficacités expérimentales (10.55%) pour une cellule rapportée.

	$R_{sh}(\Omega)$	$R_s(\Omega)$	γ_1	γ_2	$I_{s1}(A)$	$I_{s2}(A)$
Model D ₁	10^7	2.2	1	-	$7.95 \cdot 10^{-12}$	-
Model D ₂	10^6	2.1	1	2	$1.11 \cdot 10^{-10}$	$2.6 \cdot 10^{-8}$

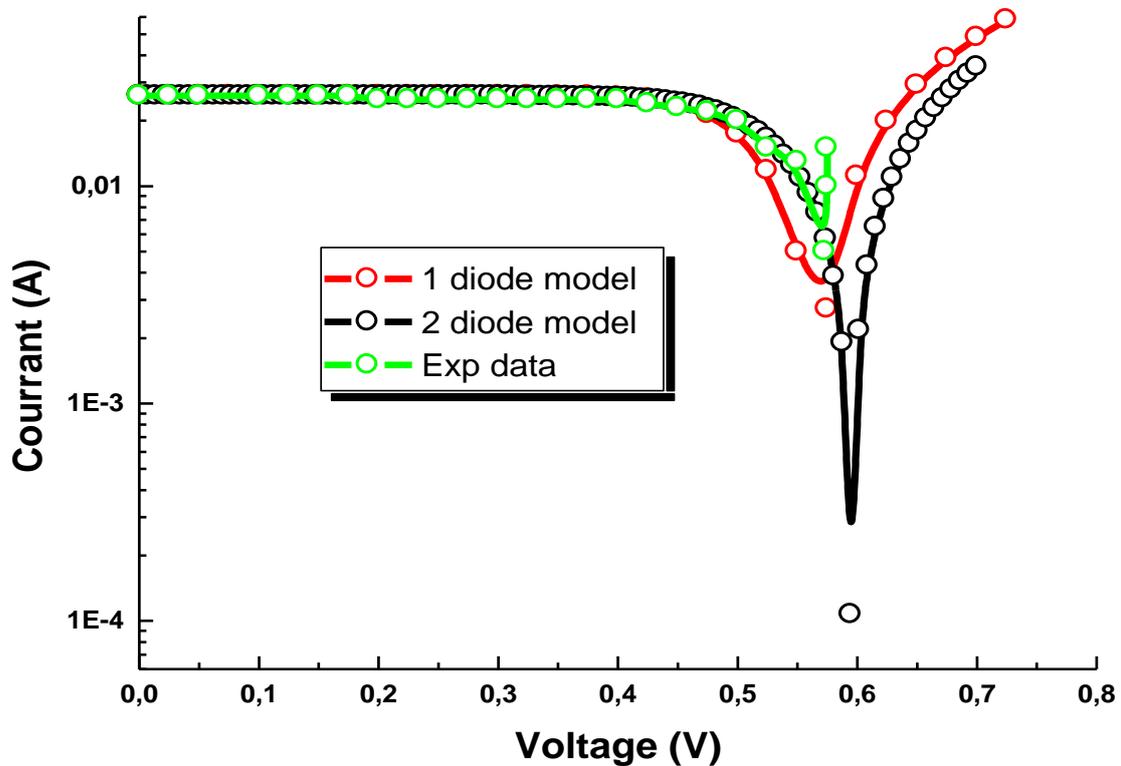


Figure.III.25 Caractéristiques I-V en utilisant les modèles d'une et deux-diodes pour la cellule expérimentale décrite dans le tableau III.6.

La figure.III.25 prouve que le modèle d'une-diode donne un meilleur ajustage de précision avec des résultats expérimentaux par rapport au modèle à deux diodes. Dans ce dernier, la valeur du courant augmente à la tension la plus haute que 0.6 V.

La figure.III.26 expose comment la température de fonctionnement affecte l'exécution de la cellule solaire. La température de fonctionnement optimal montrant le rendement le plus élevé, dans toutes les simulations ici, est 300 K, comme montré dans la figure III.26 (d). L'efficacité diminue quand la température augmente avec une tendance de 0.32% K.

Bien que plus d'électrons libres soient excités à la bande de conduction, avec la température accrue, plus de désordre et plus d'états extérieurs peuvent se produire à températures élevées. Ceci rend la recombinaison possible. Pour simplifier cette simulation, les mêmes paramètres structuraux ont été employés pour toutes les températures de fonctionnement.

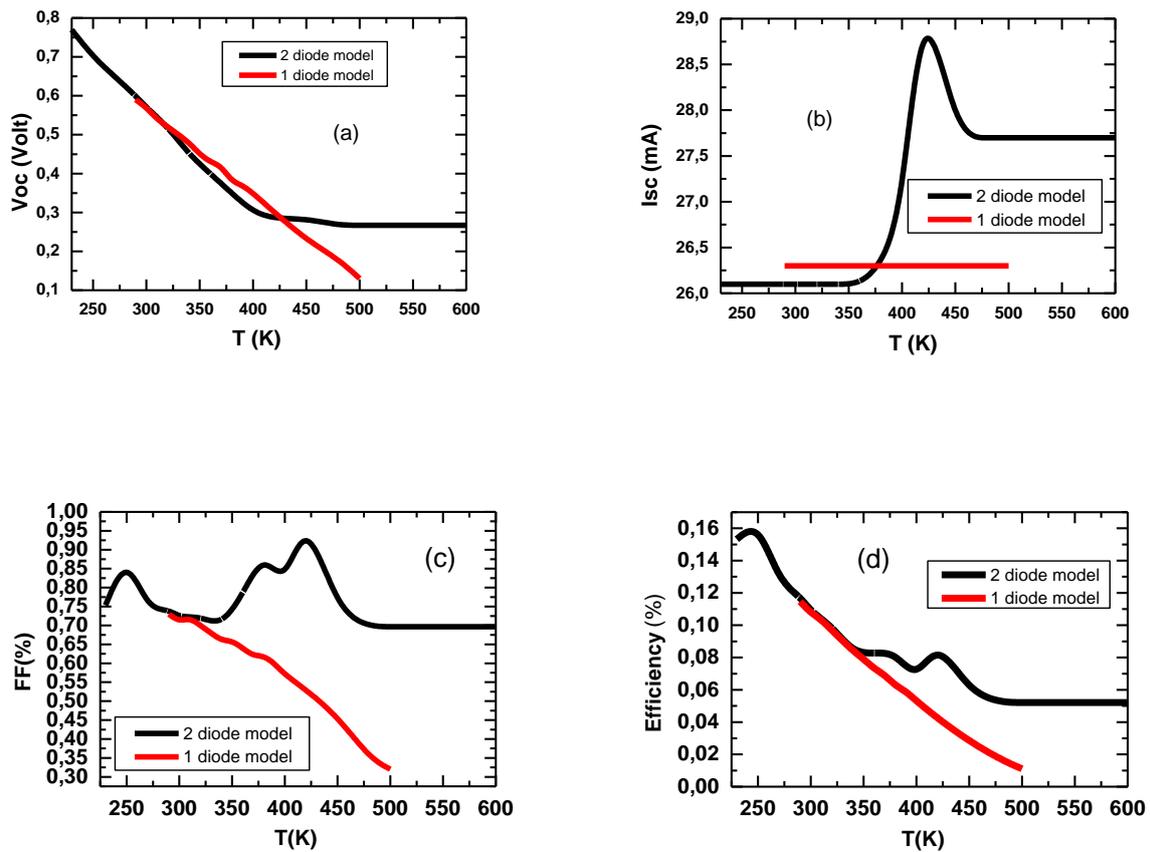


Figure.III.26 : Effet de la température (k) sur les différentes caractéristiques de la cellule solaire CIGS pour les modèles de un et deux-diodes, a) V_{OC} , b) I_{SC} , c) FF, et d) efficacité%. Toutes les simulations ont été faites à R_S supposée constante pour la cellule décrite dans le tableau III.6.

Les figures.III.26 (a) et (c) exposent comment la température affecte des valeurs du facteur de forme et la tension du circuit-ouvert (régression linéaire), pour le modèles d'une seule diode particulièrement aux températures inférieures à 400 K. Des valeurs optimales de la tension du circuit ouvert et du facteur de forme sont trouvées dans la gamme de températures comprise entre 250 K et 425 K pour les deux modèles.

La figue III.26.(b) montre que le courant de court-circuit est relativement instable aux hautes températures (environ 425 K) pour le modèle de deux-diodes, comparé à la valeur stable pour le modèle d'une-diode. L'efficacité de conversion de puissance est linéarisée pour le modèle d'une-diode. Pour le modèle de deux-diodes, la valeur d'efficacité flotte aux plus

hautes températures (350 K), se stabilise à partir de 500 K. La bonne linéarisation du facteur de forme et de l'efficacité montrée dans les figures.III.26 (c.à.d.), aide dans la prévision directe des exécutions photovoltaïques des cellules solaires basées sur le modèle à une-diode.

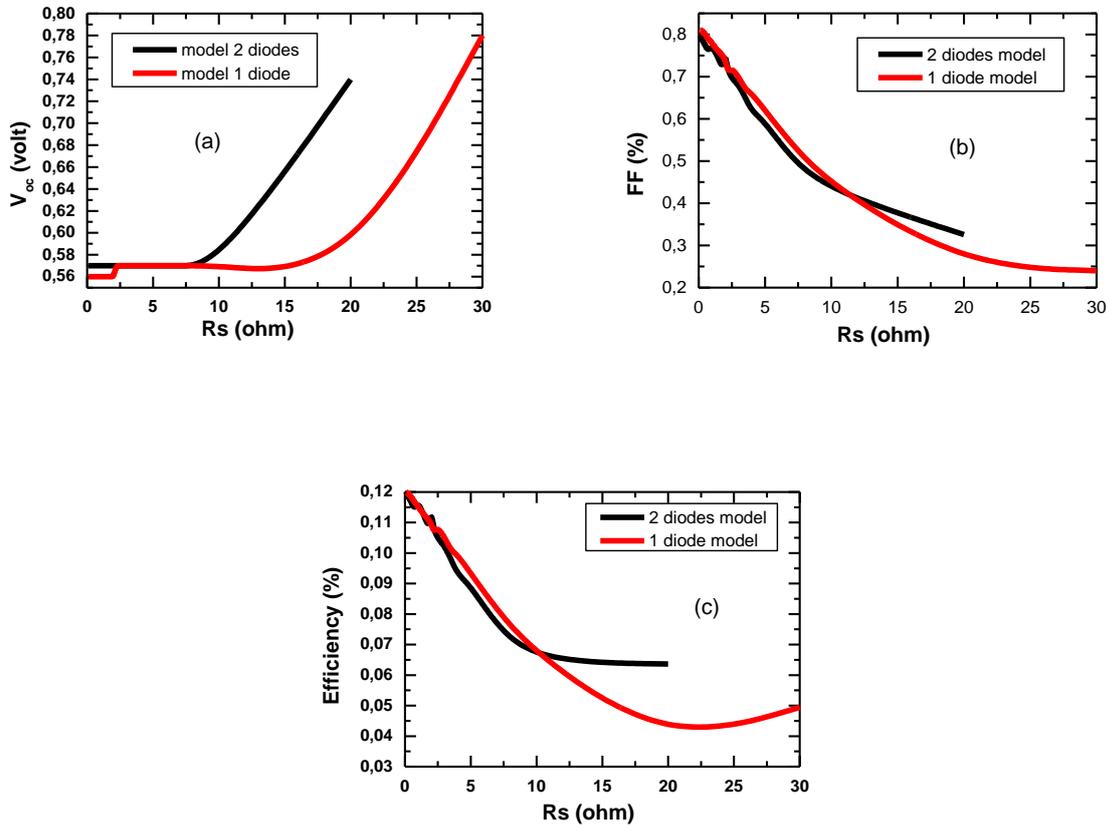


Figure III.27. Les résultats de simulation montrent l'effet de R_s sur V_{OC} (a), FF (b) et le rendement (c) pour des cellules basées de CIGS sur les deux modèles d'une et deux-diodes. Calculs effectués à 300K et assurant que I_{SC} est constant comme décrit dans le tableau III.6.

La figue. III.27 expose des résultats de simulation, indique l'effet de R_s sur V_{OC} , FF et l'efficacité pour des cellules solaires CIGS pour les deux modèles : un et deux-diodes. La figure III.27 (a) prouve que la valeur de V_{OC} est stable pour les deux modèles pour R_s inférieure à $10 \Omega \cdot \text{cm}^2$. Dans le modèle de deux-diodes, le V_{OC} augmente linéairement pour R_s avec une valeur supérieure à $10 \Omega \cdot \text{cm}^2$, tandis que dans le modèle à une diode l'augmentation commence après que R_s devienne égale à $20 \Omega \cdot \text{cm}^2$. La valeur de V_{OC} devient trop petite pour une valeur de R_s inférieure à $2.5 \Omega \cdot \text{cm}^2$ dans le cas du modèle à une-diode. Le graphe

du modèle à une diode donne un phénomène en exponentiel pour la tension du circuit ouvert en l'absence de la deuxième diode parasite.

La figure III.27 (b) prouve que le facteur de forme est affecté par des variations de la résistance R_S . La valeur de R_S (environ $12 \Omega \cdot \text{cm}^2$) de la cellule solaire étudiée de deux-diodes et de simple-diode est un point critique pour que le facteur de forme puisse diminuer d'une manière rapide. À partir d'une valeur de R_S inférieure à $11 \Omega \cdot \text{cm}^2$, le modèle à une seule diode prévoit des valeurs plus élevées de FF que le modèle à deux-diodes.

L'effet de la résistance série R_S sur l'efficacité est démontré dans la figure III.27 (c). On observe des valeurs plus élevées pour le modèle à une seule -diode prenant des valeurs inférieures à $10 \Omega \cdot \text{cm}^2$ de R_S . Cela est dû à la négligence de la recombinaison dans les cellules solaires CIGS. D'un autre côté, on observe des valeurs plus stables de l'efficacité qui prennent des valeurs comprises entre 10 et $20 \Omega \cdot \text{cm}^2$ de R_S pour le modèle à deux-diodes.

II.10.3. Energie de gap du CIGS

L'énergie de gap de la couche CIS se trouve dans la gamme de 0.98-1.04 eV [18]. La valeur trouvée par simulation 1.04 eV ne sera pas exclue [19]. En ajoutant le contenu du gallium dans le modèle CIS, l'espace de bande résultant du CIGS s'étend à 1.0 à 1.7 eV [20]. Cependant, l'espace de bande de CIGS optimal se trouve dans la gamme de 1.16 à 1.38 eV [21]. Dans cette étude travail, l'espace de bande de CIGS est simulé à 1.0 jusqu'à 1.6 eV afin de montrer l'effet de l'espace de bande sur les propriétés de la cellule solaire.

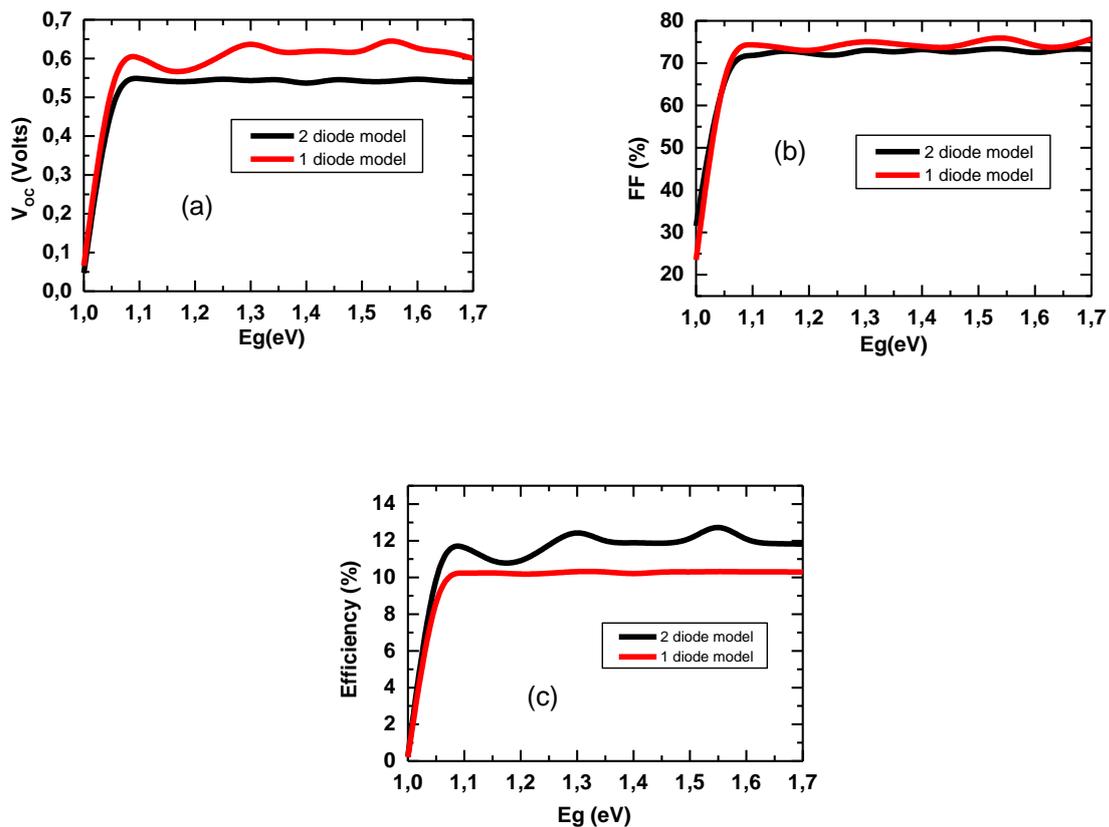


Figure. III.28 : Les résultats de simulation montrant l'effet de l'énergie de gap sur V_{OC} (a), FF (b) et l'efficacité (c), pour les cellules solaires à base de CIGS en utilisant les modèles à une-diode et deux-diodes avec R_S constant, $T=300K$ et $I_{SC} = (0.026 A)$.

La figure III.28 montre des résultats de simulation de l'effet de l'énergie de gap sur les caractéristiques de la cellule solaire à base d'un matériau CIGS par les modèles d'une et deux-diodes. Les figures III.28 (a) et (b) montrent l'effet d' E_g sur le courant du court-circuit et le facteur de forme, respectivement. Le point critique remarquable d'une valeur de E_g égal à 1.55 eV est équivalent pour toutes les simulations des deux modèles et rapportent de bonnes courbes courant tension I-V.

La figure III.28 (c) montre qu'à une valeur de E_g égale à 1.55 eV, l'efficacité de puissance maximale est d'environ 13.12% pour le modèle à une-diode. Pour le modèle de deux-diodes, la valeur du rendement est de 10.34% seulement. La première valeur est plus pragmatique car elle permet d'obtenir la relation linéaire de l'efficacité à différentes valeurs d' E_g comprise entre 1.1-1.7 eV.

III.9.CONCLUSION

Dans cette étude, une simulation numérique a été utilisée pour analyser une cellule solaire à base de CIGS. En premier lieu, un modèle numérique a été mis en application en utilisant un circuit électrique équivalent et un ensemble d'équations partielles. Des optimisations par simulation ont été utilisées et un modèle d'une-diode a été choisi parce qu'il donne un résultat optimal avec une valeur de puissance plus élevée en fonction de la température.

Des procédures employées pour extraire les paramètres du modèle en adaptant les équations aux données peuvent être considérablement simplifiées. C'est particulièrement utile au cours d'une activité de recherche qui entoure une variété de contributions des sujets techniques telles que la science des semi-conducteurs, la technologie électronique, et les mesures optiques. Cette simulation numérique précise et réaliste, particulièrement avec le modèle d'une-diode, donne un outil puissant pour mesurer et comprendre les effets des paramètres principaux du dispositif. Le modèle de deux-diodes donne un bon outil de prévision pour étudier l'impact de la recombinaison pour un certain rang de paramètres.

III.10. Références

- [1] S. Liu and R. A. Dougal, «**Dynamic multiphysics model for solar array**», IEEE Trans. Energy Conversion, Vol.17, No.2, pp.285-294, June 2002
- [2] A. Cow and C.D. Manning, «**Development of a photovoltaic array model for use in Power electronics simulation studies**», IEE Proc. Electr. Power Appl., Vol. 146, Na.2, pp.193-200, March 1999
- [3] H. Yamarhita, K. Tamahashi, M. Michihim., A. Tsuyoshi, K. Amako, and M. Park, «**A novel Simulation technique of the PV generation system using real weather conditions**», in 2002 Proc. Power Conversion Con!, V01.2, pp. 839 444, April 2002
- [4] G. A. Vokas, A. V. Machias, and J. L. Souflis, « **Computer modeling and Parameters estimation for solar cells**», h 1991 Proc Medirerranean Electrotechnical Conf, v01.1.pp. 206 -209, May 1991
- [5] Townsend, Timothy U. “**A Method for Estimating the Long-Term Performance of Direct- Coupled Photovoltaic Systems**”. M. S. Thesis. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison: 1989.
- [6] Beckman, William A,« Personal communication: September, 1998».
- [7] Carlin, John; Fred Mayes, et Louise Guey-Lee, «**Renewable Data Overview**», Renewable Energy Annual 1996. Energy Information Administration: April 1997.
<http://www.eia.doe.gov/cneaf/solar.renewables/renewable.energy.annual/chap01.html>
- [8] francisco j. garcíasánchez, adelmoortiz-conde, “**applications of lambert’s w function to electron device modeling applications**”, *iee-eds orlando chapter colloquium*, 2006.
- [9] r.s. r. valluri, d. j. jeffrey, r. m. corless, "some applications of lambert w function to physics", *can.j.phys*, vol., pp 1-8, 1998.
- [10] a. ferhat-hamida, z. ouennoughi, n.bouzit, m.n.harmas, k.zehar, “**Extraction des paramètres d’une diode Schottky par moindres carrés pondérés**”. CIGE’04, Sétif, Algérie, pp 421-424, 2003.
- [11] B. G. YACOBI, *Semiconductor Materials: An Introduction to Basic Principles*, kluwer academic publishers, 2004.
- [11] B. G. YACOBI, *Semiconductor Materials: An Introduction to Basic Principles*, kluwer academic publishers, 2004.
- [12] J. Thongpron_, K. Kirtikara, C. Jivacate **A method for the determination of dynamic resistance of photovoltaic modules under illumination** 2006.

- [13] www.GeoCities.com/CapeCanaveral/Station/3622/ Sébastien Gauthier.
- [14] A.Cheknane, **minimisation de l'effet de la résistance série dans une photopile solaire a base se silicium sous concentration solaire** 2005.
- [15] M. Burgelman and A. Niemegeers, **Calculation of CIS and CdTe module efficiencies**, 1998
- [16] U. Malm, **Stability Characteristics and Modelling of Cu(In; Ga)Se₂ Solar Cells**, Lecture, Uppsala University, 2006
- [17] A.Romero, R.Gysel, S,Buzzi ,D.Abou-Ras, D.L Batzner, D.Rudmann, **Properties of CIGS solar cells developed with evaporated II-VI buffer layers Int' PVSEC Thailand** 2004
- [18] A.O. Pudov, A. Kanevce, H. Al-Thani, J.R. Sites, F.S. Hasoon, *J. Appl. Phys.* 97 (2005) 1063.
- [19] K. Ramanathan, M. Contreras, C. Perkins, S. Asher, F. Hasoon, J. Keane, D. Young, M. Romero, W. Metzger, R. Noufi, J. Ward, A. Duda, *Prog. Photovolt: Res.: Appl.* 11 (2003) 225–230.
- [20] M. Gloeckler, J.R. Sites, *J. Phys. Chem. Solids* 66 (2005) 1891–1894.
- [21] Clas Persson, *Braz. J. Phys.* 36 (3b) (2006).
- [22] C.H. Huang, Sheng S. Li, T.J. Anderson, in: *Proceedings of 29th IEEE Photovoltaic Specialist Conference*, 2002, pp. 748–**751**

III.11. Annexe (Calcul des erreurs)

III.11.1 Calcul des erreurs entre la partie expérimentale et la partie théorique

Il y'a plusieurs méthode pour calculer l'erreur entre la partie expérimental et la partie théorique parmi ces méthodes on peut citer deux

III.11.1.a. premier méthode les data points (jth)

Equation de calcul des erreurs entre la partie expérimentale et la partie théorique pour résoudre c'est problème la il faut un modelé mathématique et faire une programme

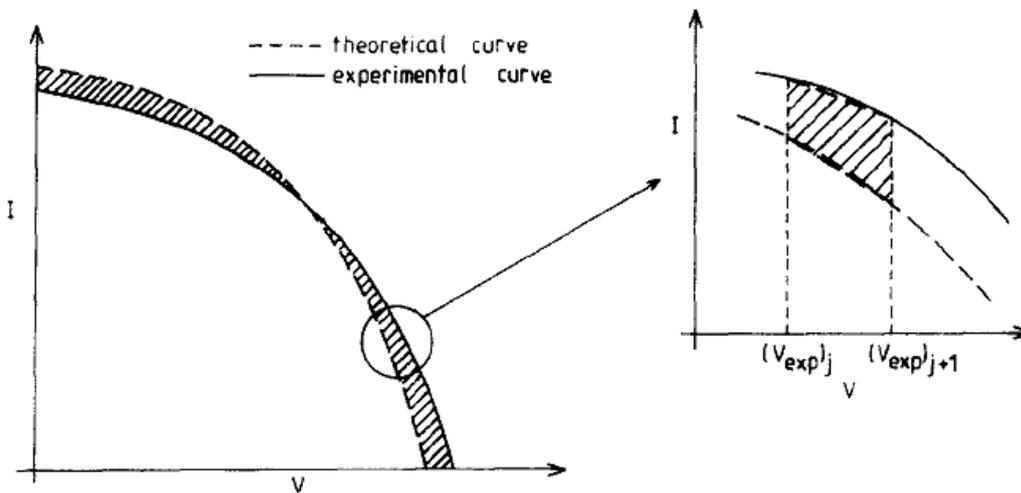


Fig. 3. The area criterion of fit.

Figure. IV. 34 : représente l'erreur commise entre la partie expérimentales et la partie théorique

$$\Delta Area \approx \sum_{j=1}^{N-1} ABS \left\{ \frac{[(I_{th})_j + (I_{th})_{j+1} - (I_{exp})_{j+1} - (I_{exp})_j][(V_{exp})_{j+1} - (V_{exp})_j]}{2} \right\}$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta Area}{\sum_{j=1}^{N-1} \left\{ \frac{[(I_{exp})_j + (I_{exp})_{j+1}][(V_{exp})_{j+1} - (V_{exp})_j]}{2} \right\}}$$

Avec

$(V_{th})_j$ le voltage théorique avec les valeurs de j_{th} data point

$(V_{exp})_j$ le voltage expérimentale avec les valeurs de j_{th} data point

$(I_{th})_j$ le voltage théorique avec les valeurs de j_{th} data point

$(I_{exp})_j$ le voltage expérimentale avec les valeurs de j_{th} data point

$\Delta Area$ deviation as defined in equ

ϵ area deviation as defined in equa

III.11.1.b. Deuxième méthode Calcul de la surface d'erreurs

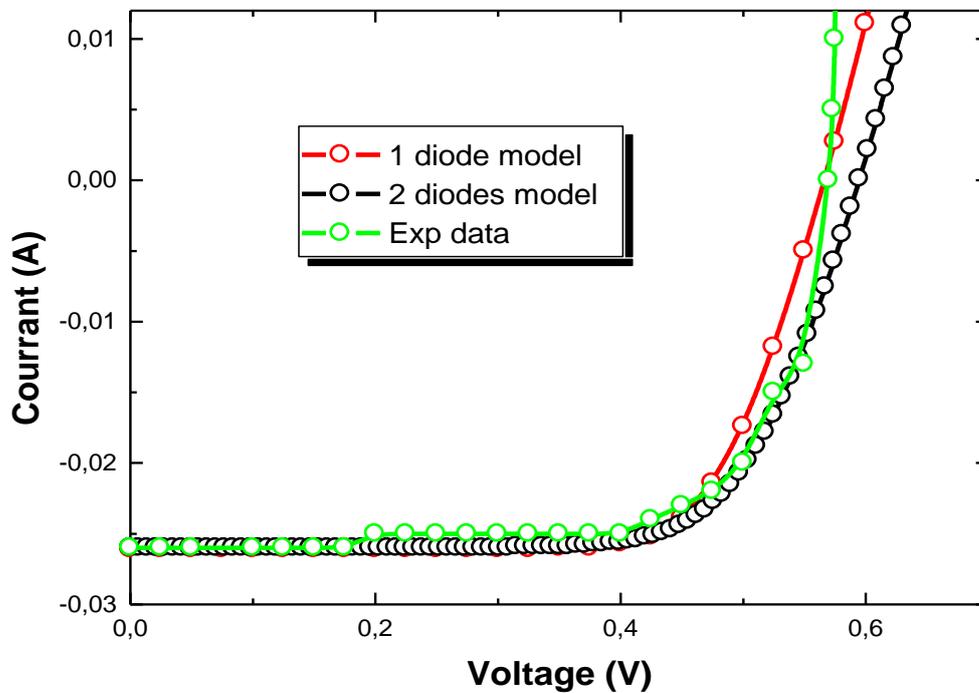


Figure : représente I(V) de deux model avec expérimentale data de la cellule à base du matériau CIGS

Application

Les figures indiquent la courbe d'erreurs des deux model

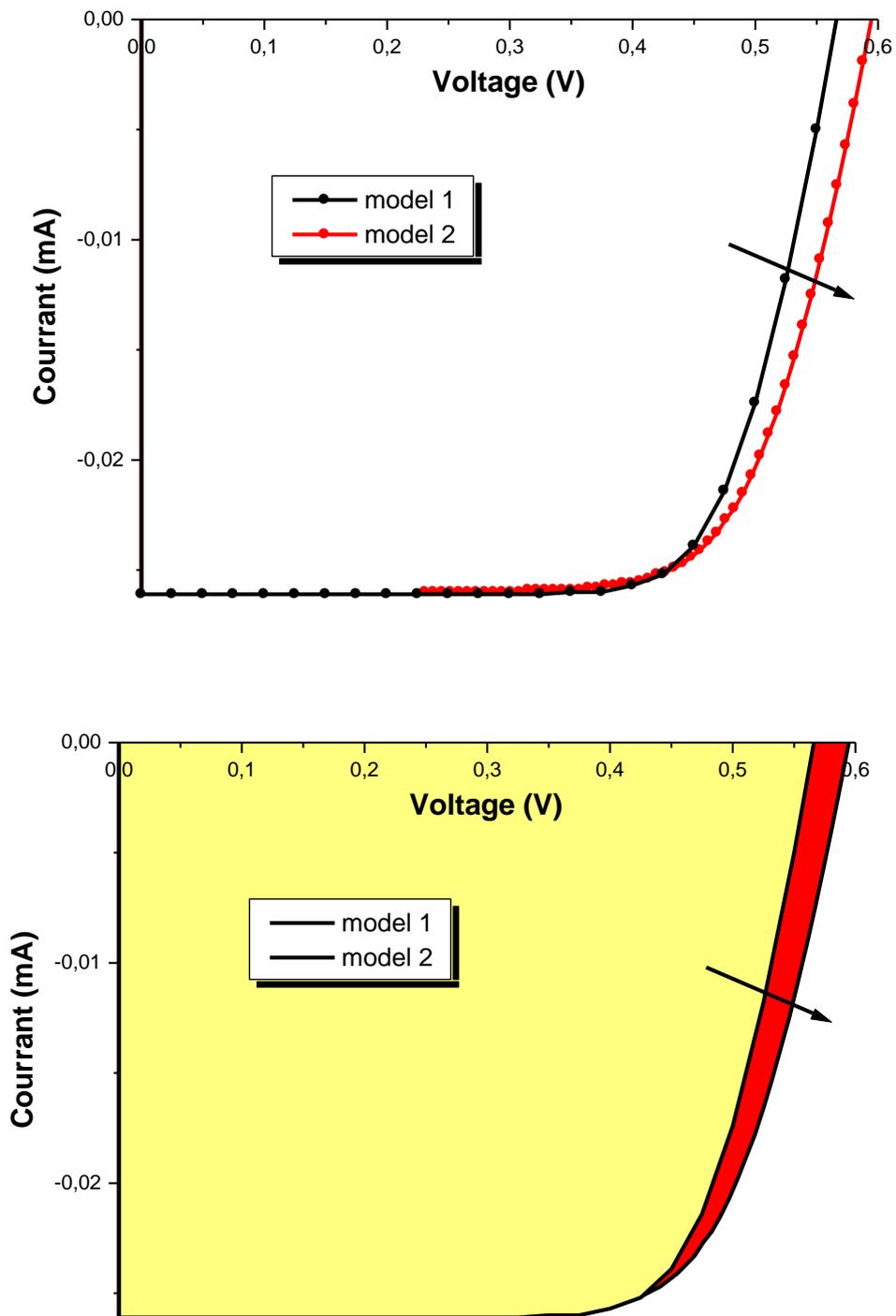


Figure : la définition de l'erreur courbe entre deux modèle 1et 2

***Chapitre IV : La Couche Absorbante
CIGSe Pour les Cellules Solaires***

IV.1.Introduction

Les matériaux utilisés dans les applications photovoltaïques peuvent être produits dans une large variété cristalline et poly cristalline, bien que les matériaux cristallins aient montrés de très hauts rendements de conversion mais leur coût de production reste encore relativement élevé. Plusieurs matériaux polycristallins ont gagné récemment de plus en plus d'attention à cause de leur performance, leur stabilité et leur faible coût de production. Parmi eux, on cite le CIGS qui est considéré comme l'un des choix les plus appropriés compte tenu de leurs bonnes propriétés électriques

Les problématiques au sein de la structure Verre/Mo/Cu(In,Ga)Se₂/CdS/ZnO sont nombreuses. D'une part, les multiples hétéros interfaces qui demandent une compréhension accrue des interfaces. D'autre part, les différentes couches sont déposées par des procédés physiques ou chimiques qui font intervenir divers modes de croissance. Dans les deux premiers points, la réduction de l'épaisseur des cellules entraîne un certain nombre de contraintes sur la technologie habituellement utilisée, dans le procédé industriel standard et dans l'expérience

La meilleure façon de comprendre les mécanismes de fonctionnement de ces dispositifs tels que les courants de transport, la génération électron-trou et les phénomènes de recombinaison est la construction de modèle numérique pour la simulation. Cela permet d'étudier les processus qui limitent les performances de la cellule et de donner une conception optimale des structures à la base de ces dispositifs.

Dans ce chapitre nous introduisons le concept de simulation numérique des semi-conducteurs, particulièrement son application sur les cellules photovoltaïques de type CIGS. Les caractéristiques de la cellule utilisée sont similaires à celles employées dans les études précédentes qui donnent de bons rendements photovoltaïques. L'influence de la réduction de l'épaisseur de la couche absorbante CIGSe sur les paramètres photovoltaïques et le rendement quantique externe des cellules a été examinée dans notre étude afin de donner la configuration optimale qui offre le meilleur rendement.

En suite, nous avons essayé d'étudier l'influence des différentes couches sur la caractéristique électrique I (V) et EQE

Les cellules solaires à base de cuivre, indium, gallium et di-sélénium (CIGSe) sont la technologie en couches minces présentant les plus hauts rendements de conversion, avec une valeur record de 20.3% récemment obtenue par ZSW en Allemagne [1]. Ces impressionnantes performances ont permis le rapide essor de la filière industrielle dite CIGSe, et un nombre croissant de compagnies produisent aujourd'hui des modules photovoltaïques CIGSe avec des rendements de conversion supérieurs de 12% [2].

IV.2. Structure d'une cellule solaire à base de Mo/Cu(In,Ga)Se₂/CdS/ZnO:Al

Les dispositifs photovoltaïques à base de Cu(In,Ga)Se₂ sont constitués d'un empilement de couches minces : Mo/Cu(In,Ga)Se₂/CdS/i-ZnO/ZnO:Al déposées le plus souvent sur un substrat de verre soudé comme décrit et illustré ci-dessous:

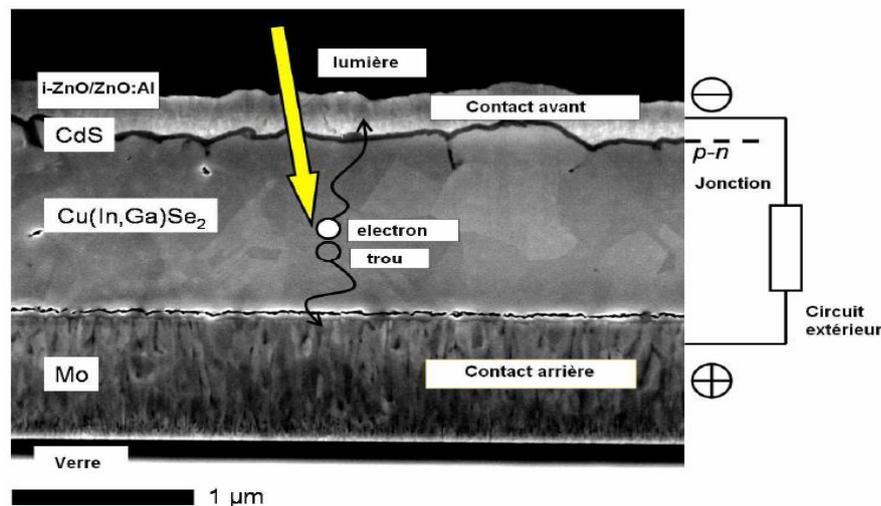


Figure IV.1 : Micrographie MEB d'une cellule solaire à base de Cu(In,Ga)Se₂ [3].

IV.2.1. Substrat de Verre

Le substrat de verre sodo-calcique (1-3 mm) a été utilisé originellement pour sa disponibilité, son coût peu onéreux, son coefficient d'expansion thermique adapté à la croissance de couches de CIGSe ainsi que pour sa bonne planéité. De plus, sa bonne tenue mécanique ainsi que sa relative neutralité chimique aux températures de synthèse sont des atouts importants. En effet, la communauté scientifique du CIGSe s'est aperçue que le sodium contenu dans le verre sous forme de Na₂O joue un rôle important tant au niveau de la croissance que des performances photovoltaïques [4, 5, 6]. Au sein de la couche de

Cu(In,Ga)Se_2 , le sodium se situe principalement aux joints de grains [7]. Il aurait pour conséquence de passiver les joints de grains et d'augmenter la densité d'accepteurs au sein de la couche de CIGSe [8]. Pour contrôler l'apport du sodium au sein de l'absorbeur, l'ajout de couches barrière (Al_2O_3) au sodium peut être effectué entre le verre et le molybdène. Ensuite, l'adjonction de précurseurs contenant du Na (e.g. NaF) [9, 10] peut être éventuellement effectuée.

IV.2.2. Molybdène

Afin d'assurer la collecte des porteurs photo-générés, une couche de molybdène (0.3- 1 μm), dit contact arrière, est déposée par pulvérisation cathodique magnétron sur le substrat [11]. Le principal avantage de cette couche est sa grande stabilité à haute température sous atmosphère sélénée, ainsi que la faible résistivité de contact qu'elle forme avec le CIGSe. Le bon comportement électronique de l'interface formée entre le CIGSe et le Mo serait dû à la présence d'une fine couche de MoSe_2 [12,13]. De plus, la tenue en compression ou en tension de la couche de molybdène joue un rôle important au niveau de la porosité du Mo. Elle a un impact direct sur la perméabilité au Na qui diffuse plus ou moins à travers le molybdène et participe à la croissance du CIGSe.

IV.2.3. Couche absorbante de Cu(In,Ga)Se_2

La couche absorbante polycristalline du Cu(In,Ga)Se_2 est un semi-conducteur de type p. L'absorption des photons qui contribue à la génération de paires électron-trou.

IV.2.4. Couche tampon de CdS

Une couche mince de **sulfure de cadmium** (CdS) de type n appelée couche tampon est déposée par bain chimique sur l'absorbeur afin de réaliser la jonction p-n avec le CIGSe. Cette fine couche de l'ordre de 50 nm est formée par immersion du substrat (Verre/Mo/CIGSe) dans une solution aqueuse contenant de l'acétate de cadmium ($\text{Cd}(\text{CH}_3\text{CO}_2)_2, 2\text{H}_2\text{O}$), de l'ammoniaque (NH_4OH) ainsi que de la Thiourée (H_2NCSNH_2). La couche tampon doit avoir une largeur de bande interdite plus grande que celle de l'absorbeur ($E_g(\text{CdS}) = 2,4 \text{ eV} > E_g(\text{CIGSe}) = 1,04\text{-}1,68 \text{ eV}$) afin que les photons incidents puissent atteindre l'absorbeur. Cependant, le faible gap du CdS perturbe la transmission de la lumière incidente aux courtes longueurs d'ondes.

IV.2.5. Oxydes Transparents Conducteurs (OTC) à base de ZnO

Le dépôt des différentes couches minces présentées précédemment est suivi par la pulvérisation cathodique d'une couche d'oxyde optiquement transparente composée d'oxyde de zinc non dopé (i-ZnO, $e = 50$ nm, $E_g = 3,3$ eV) ainsi que par une couche d'oxyde transparente conductrice d'oxyde de zinc dopé d'aluminium (ZnO:Al, $e = 300$ nm, $E_g = 3,6$ eV) de type dégénéré n^+ dont le taux de dopage est de l'ordre de 3.10^{20} e-/cm³. Ces couches doivent présenter une transparence maximale tout en assurant une résistivité minimale afin de permettre la transmission de la majorité de la lumière incidente utile à l'absorbeur. Afin de mesurer la performance de l'OTC, Kessler *et al.* [14] ont proposé une figure de mérite définie par la densité de courant perdue due à l'absorption optique pour une résistance carrée donnée.

IV.2.6. Grille métallique à base de Ni/Al/Ni

Une grille métallique est finalement déposée dans le but d'améliorer l'extraction des porteurs de charge photo-générés. Ces grilles sont composées d'une succession de 3 couches à base de **nickel** ($e = 50$ nm), d'**aluminium** ($e = 2000$ nm) et de **nickel** ($e = 50$ nm). La première couche de Ni empêche l'oxydation de l'aluminium contenu dans l'OTC. La couche d'aluminium représente le contact ohmique avant du dispositif. En dernier lieu, au même titre que la première couche de Ni, la seconde couche en nickel empêche l'oxydation de l'aluminium qui pourrait créer un contact direct avec la couche fenêtre du ZnO.

IV.3. Influence de la Réduction de l'épaisseur de la couche de CIGSe

IV.3.1. Caractéristique J(V)

Le paramètre le plus important au sein d'une cellule solaire est son rendement (η). Il est mesuré comme le rapport de la puissance délivrée par la cellule photovoltaïque sur la puissance lumineuse incidente :

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{ill}} = \frac{V_{\max} \cdot J_{\max}}{P_{ill}} \quad \text{IV.1}$$

De plus, les caractéristiques quotidiennement utilisées pour décrire les performances des cellules solaires dans les conditions standards ($T=25^\circ\text{C}$, $P_{ill}=1000\text{W/m}^2$ et AM1,5G), la tension du circuit-ouvert (V_{oc}), la densité de courant du court-circuit (J_{sc}) ainsi que le facteur de forme (FF) peuvent être déduits via l'équation du modèle à une diode :

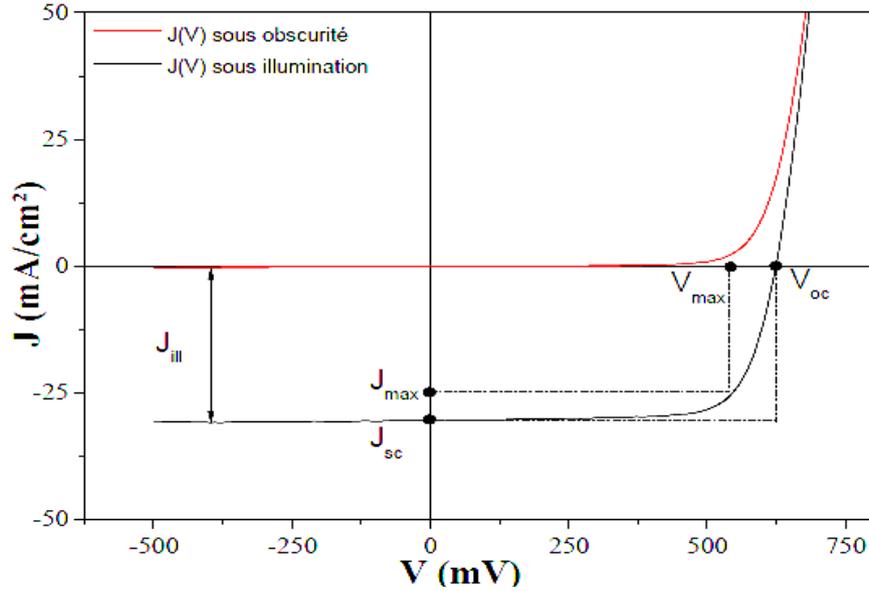


Figure IV.2 : Caractéristique $J(V)$ sous illumination et sous obscurité.

A l'aide de la figure IV.2, nous pouvons également donner des indications sur la qualité de la diode via un facteur géométrique qui rend compte de la forme rectangulaire de la diode appelée facteur de forme (FF). Il correspond au rapport d'aire entre le rectangle décrit d'une part par V_{\max} et J_{\max} , et d'autre part par le rectangle décrit par J_{sc} et V_{oc} . Ainsi, le facteur de forme peut s'écrire de la manière suivante:

$$FF = \frac{P_{\max}}{V_{oc} \cdot J_{sc}} = \frac{V_{\max} \cdot J_{\max}}{V_{oc} \cdot J_{sc}} \quad \text{IV.2}$$

En outre, en combinant les équations (1) et (6), nous pouvons également décrire le rendement de la manière suivante:

$$\eta = \frac{V_{oc} \cdot J_{sc} \cdot FF}{P_{ill}} \quad \text{IV.3}$$

IV.3.2. Rendement quantique externe

Le rendement quantique est un paramètre adimensionnel caractérisant le courant de collecte au sein des cellules solaires. Il est défini comme le rapport entre la quantité d'électrons collectés et la quantité de photons incidents à chaque longueur d'onde (λ) :

$$RQE(\lambda) = \frac{I(\lambda) / q}{\phi_p(\lambda)} = \text{Quantité de paires électrons-trous collectés} / \text{Quantité de photons incidents}$$

Où ϕ_p : représente le flux de photons incidents à chaque λ , $I(\lambda)$ le photo-courant (A) et q la

charge élémentaire (C). De ce fait, ce paramètre optoélectronique nous permet de connaître la capacité de la cellule solaire à convertir la lumière en électricité, par conséquent de nous rendre compte des différentes pertes qui peuvent être présentes au sein du dispositif. Ces différentes pertes sont représentées sur le schéma IV.3.

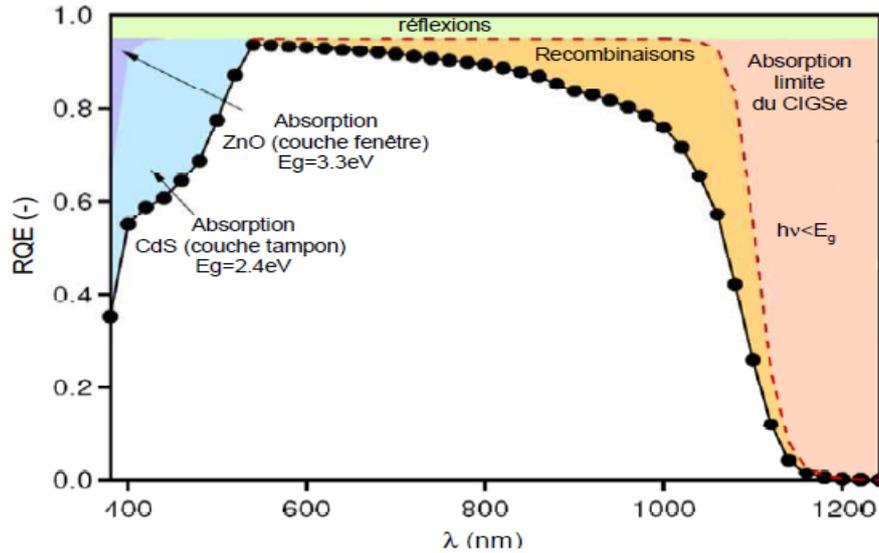


Figure IV.3 : Rendement Quantique Externe d'une cellule solaire à base de $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)\text{Se}_2$

Ces pertes peuvent être d'origine optique:

1- Les pertes par réflexion sont dues principalement aux différentes interfaces qui existent au sein de la cellule solaire ($\text{ZnO}:\text{Al}/i\text{-ZnO}/\text{CdS}/\text{Cu}(\text{In},\text{Ga})\text{Se}_2/\text{Mo}/\text{Verre}$). Cependant, ces pertes peuvent être optimisées par l'application d'une couche anti-reflet tel que le MgF_2 . D'autres pertes dues à la présence des contacts (Ni/Al) non- transparents peuvent altérer la collecte. Dans notre cas, la taille du spot lumineux est petite et ne couvre pas les grilles métalliques ou d'origine électronique:

2- L'absorption due à la couche d'oxyde transparent (ZnO) est estimée entre 1 et 3 %.

3- L'absorption due à la couche tampon (CdS) est proportionnelle à l'épaisseur de celle-ci. Ainsi, plus la couche tampon sera épaisse, plus les paires électrons-trous générées au sein de celle-ci ne seront pas collectées. La réduction de l'épaisseur de la couche tampon et l'utilisation des couches tampons alternatives avec des largeurs de bandes interdites plus importantes peuvent être des solutions, afin de minimiser l'absorption due au CdS .

4- Les recombinaisons aux grandes longueurs d'ondes s'expliquent par le fait que plus la longueur d'onde est grande, plus elle pénètre dans le matériau. Ainsi, les porteurs de charges créés ont une probabilité plus grande de se recombiner via des défauts au lieu de diffuser vers la zone de charge espace. Elles peuvent être d'origine interfaciale à travers les

discontinuités de bandes positives ou négatives au niveau de la bande de conduction qui peuvent exister entre la couche tampon et l'absorbeur.

5- Finalement, les pertes générées pour des longueurs d'onde supérieures à large bande interdite sont inhérentes à chaque semi-conducteur étant donné que les photons avec une énergie inférieure de gap ($h\nu < E_g$) ne sont pas absorbés.

IV.4. Détails de l'application

Dans cette partie, nous nous concentrons sur la simulation d'une cellule solaire à base de CIGSe qui sera utilisée comme point de référence. Nous étudierons ensuite l'influence de la réduction progressive de l'épaisseur de l'absorbeur vers le bas CIGSe à 100 nm. Des simulations numériques nous permettent de discerner les paramètres clés de la cellule solaire sont touchés par l'absorbeur réduction de l'épaisseur,

Nous avons utilisé les paramètres électroniques et optiques pour définir les différents matériaux et les interfaces qui composent la cellule solaire.

Le modèle de recombinaison y compris les différents types de défauts (neutre, simple / double Donneur / accepteur, amphotère...) sont également des paramètres d'entrée.

Tableau IV.1 : Paramètres du matériau utilisé pour la simulation d'une cellule solaire à base de CIGSe [15]

Les couches	ZnO :Al	CdS	CIGS
W [nm]	200	50	3000
ϵ/ϵ_0 [1]	9	10	13.6
μ_e [cm ² /Vs]	100	100	100
μ_h [cm ² /Vs]	25	25	25
n, p [cm ⁻³]	n: 10 ¹⁸	n: 10 ¹⁷	p: 2x10 ¹⁶
E _g [eV]	3.3	2.4	1.15
N _C [cm ⁻³]	2.2x10 ¹⁸	2.2x10 ¹⁸	2.2x10 ¹⁸
N _V [cm ⁻³]	1.8x10 ¹⁹	1.8x10 ¹⁹	1.8x10 ¹⁹

Tableau. IV.1 : Les différents paramètres du matériau CIGS utilisé dans la simulation.

IV.4.1. L'optimisation de la couche absorbeur CIGS en fonction de l'épaisseur

Afin de simuler le comportement d'une cellule CIGSe lors de la réduction d'épaisseur de la couche absorbante, nous avons représenté dans la figure IV.4 la cellule solaire obtenue la caractéristique courant tension (J-V) et la réponse spectrale (External Quantum Efficiency, EQE) de la cellule solaire simulée. Nous avons pris en considération les propriétés des couches citées dans le tableau 1

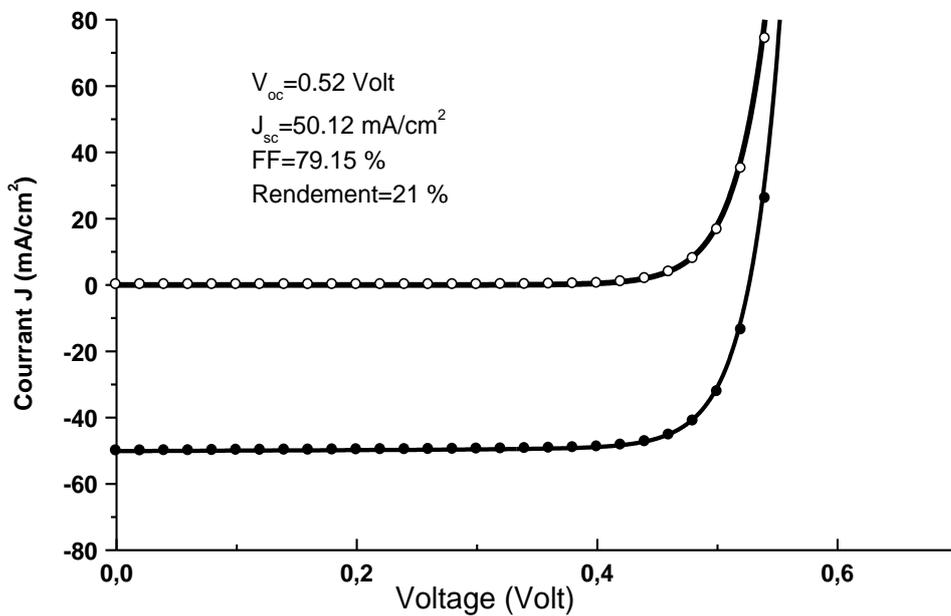


Figure IV.4 : Caractéristique Courant-Voltage sous illumination et sous obscurité pour le ZnO/CdS/CIGS/Mo.

Les figures IV.5 et IV.6 présentent respectivement la courbe J-V simulée de la cellule CIGSe avec différentes épaisseurs d'absorbeurs, ainsi que les paramètres photovoltaïques extraits de ces courbes (V_{oc} , J_{sc} , FF, rendement (η)), on prend l'épaisseur de la couche transparente du contact arrière à base de ZnO: Al qui reste constante (égale à 100 (nm)). Nous identifions deux régimes distincts en fonction de l'épaisseur de la couche de CIGSe. Dans le premier régime, de 3000 nm et 4000 nm à 1000 nm, seul le J_{sc} est affecté par la réduction d'épaisseur, alors que le V_{oc} et le FF restent constants. Par conséquent, le rendement décroît modérément d'environ 21% (3000 nm CIGSe) à environ 17% (1000 nm CIGSe)

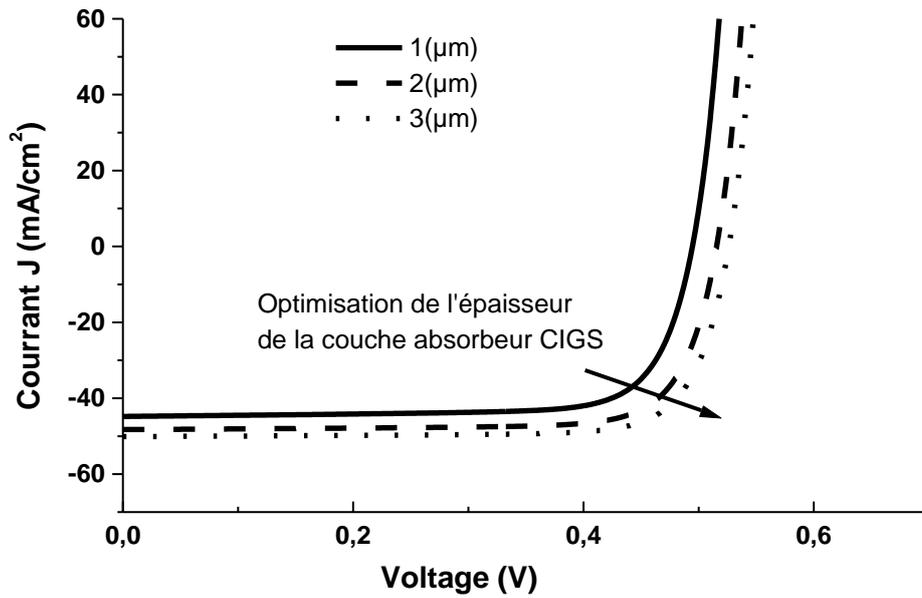


Figure IV.5. Influence de l'épaisseur de la couche absorbeur CIGS sur la caractéristique J (V).

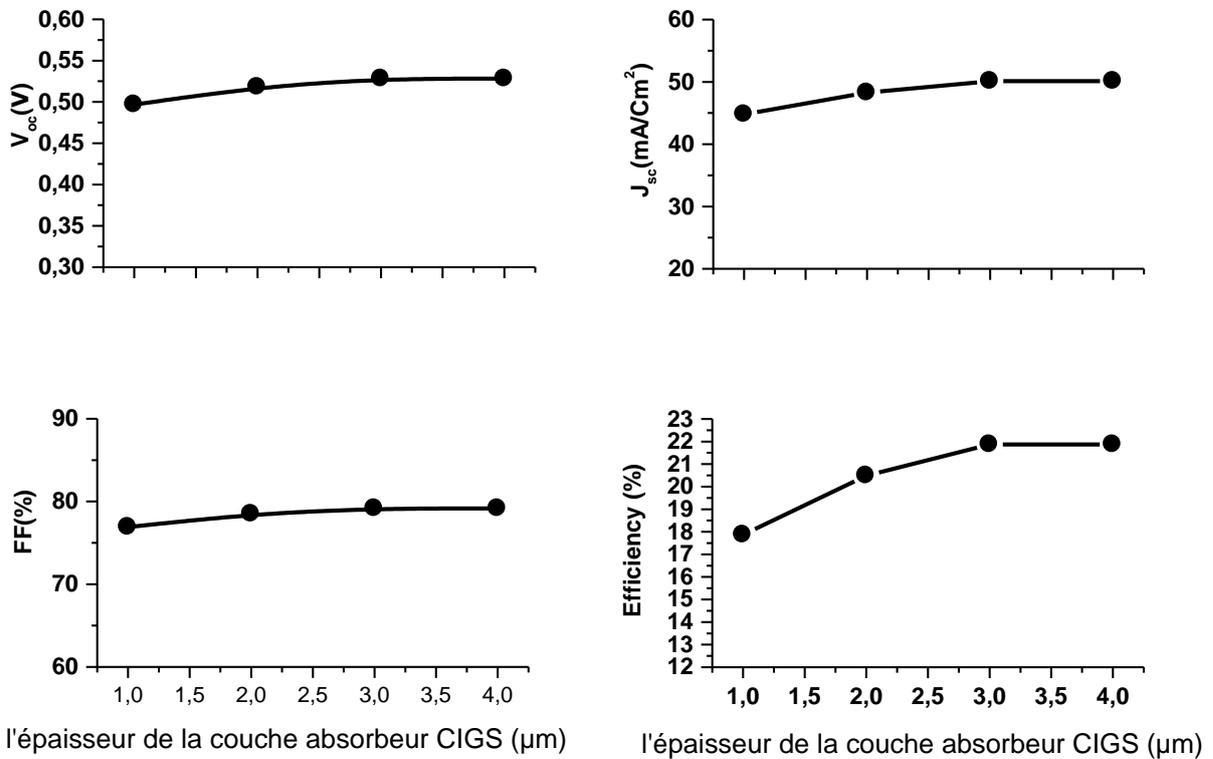


Figure IV.6 : Paramètres photovoltaïques des cellules CIGSe pour différentes épaisseurs d'absorbeur.

La figure IV.7 représente les courbes EQE des cellules simulées correspondants à la figure IV.3. Comme trouvé dans la littérature, on voit que les photons de faible énergie (Infrarouge) sont les plus touchés par la réduction d'épaisseur de l'absorbeur, bien qu'aux plus faibles épaisseurs la diminution de EQE se fait également sentir dans la partie visible du spectre. Ces diminutions sont attribuées à l'effet conjoint des recombinaisons en face arrière, et à la non-absorption des photons incidents.

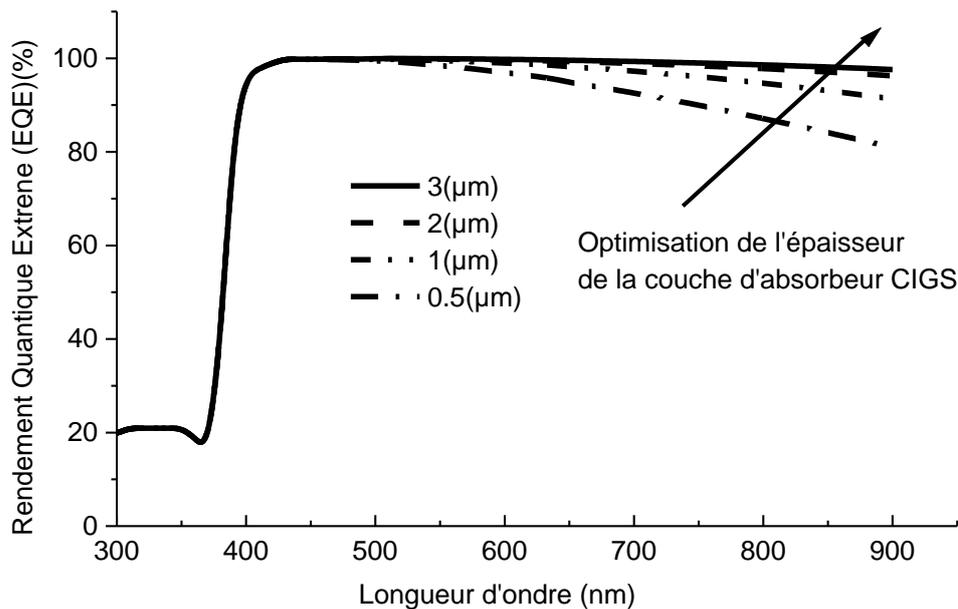


Figure IV.7 : Réponse Spectrale simulée par un programme de calcul pour différentes épaisseurs de CIGSe.

On premier lieu, on a modifié l'épaisseur de la couche d'absorbeur CIGS pour déterminer l'épaisseur optimale de la structure c.-à-d. la cellule solaire à base de ZnO/CdS/CIGS/Mo illustré dans la figure IV.5. On a constaté que l'efficacité de la cellule solaire augmente avec l'épaisseur de la couche absorbante CIGS, mais avec une vitesse beaucoup plus lente au-dessus de 3000 nm. L'épaisseur optimale de la couche absorbante du CIGS serait autour de 3000-4000 nm et reste constante. La figure IV.6 présente les épaisseurs de 1000 nm et 4000 nm, et l'efficacité enregistrée 17.86% et 21.87% respectivement. En comparant les résultats obtenus avec le rendement de 21.87% à 3000 nm, il a été constaté que la diminution de 1000 nm de l'épaisseur de l'absorbeur a entraîné une diminution de 4 % du

rendement. D'autre part, l'augmentation de 1000 nm de l'épaisseur de l'absorbant seulement abouti à une augmentation de 1.39 % de l'efficacité entre deux l'épaisseur (2000-3000 nm).

La tension en circuit ouvert (V_{oc}) et court-circuit densité de courant (J_{sc}) des cellules solaires CIGS sont également représentés dans les figures IV.5. et IV.6 respectivement. Nous remarquons que les deux valeurs augmentent avec l'épaisseur de la couche absorbante.

Cela peut principalement être due à l'augmentation de la couche absorbante, qui est la région de type p dans la cellule solaire. Cela permet aux longueurs d'onde de la lumière de collecter de son côté une génération de paire électron-trou. Par conséquent, les valeurs de V_{oc} et J_{sc} sont augmentées. Il est également attendu que tant les valeurs de J_{sc} et V_{oc} seront réduites si l'épaisseur de la couche d'absorption est réduite. Cela peut être provoqué par le processus de recombinaison au contact arrière de la cellule solaire. Si l'épaisseur de la couche absorbante est réduite, le contact arrière sera très proche de la région d'appauvrissement. Ainsi, les électrons seront capturés facilement par le contact arrière par le processus de. Par conséquent, moins d'électrons contribueront à l'efficacité quantique de la cellule solaire et les valeurs de V_{oc} et J_{sc} seront faibles. Lorsque l'épaisseur de la couche d'absorption augmente, les photons sont absorbés, en particulier les grandes longueurs d'onde de l'illumination. De ce fait, un plus grand pourcentage de paires électron-trou serait produit à partir des photons absorbés. Par conséquent, le rendement quantique augmente avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche absorbante.

IV.4.2. Optimisation de l'épaisseur de la couche tampon du CdS

En général, l'épaisseur de la couche tampon du CdS optimal doit être inférieure à 50 nm et 60 nm [16]. La figure IV.8 présente une cellule solaire des différentes couches et la variation d'épaisseur de la couche tampon du CdS. Dans cette étude, nous allons essayer de faire une optimisation de cette couche entre 0.010 μm et 0.300 μm pour obtenir un rendement de cette cellule égale à 21,87% quand l'épaisseur de cette couche est égale à 0,010 μm , la figure ci-dessous représente la variation de la couche tampon du CdS sur les paramètres de la cellule solaire et l'épaisseur de la couche tampon du CdS variée de 0.010 μm et 0.300 μm nous constatons des résultats de simulation optimaux, Les paramètres de la cellule solaire sont représentés dans la figure IV.8. On remarque que les valeurs de V_{oc} et FF de la cellule baissent légèrement avec la variation de la couche tampon CdS. D'autre part, les valeurs du J_{sc} et le rendement de la cellule solaire diminuent avec l'augmentation de

l'épaisseur de la couche tampon. Nous constatons que l'épaisseur de cette couche est optimale égale à 0.010 μm .

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

Par conséquent, elle conduirait à une diminution des photons qui ont atteint la couche absorbante. Une diminution du nombre de photons dans la couche d'absorbant diminuerait le rendement quantique de la cellule solaire comme le montre la figure IV.9.

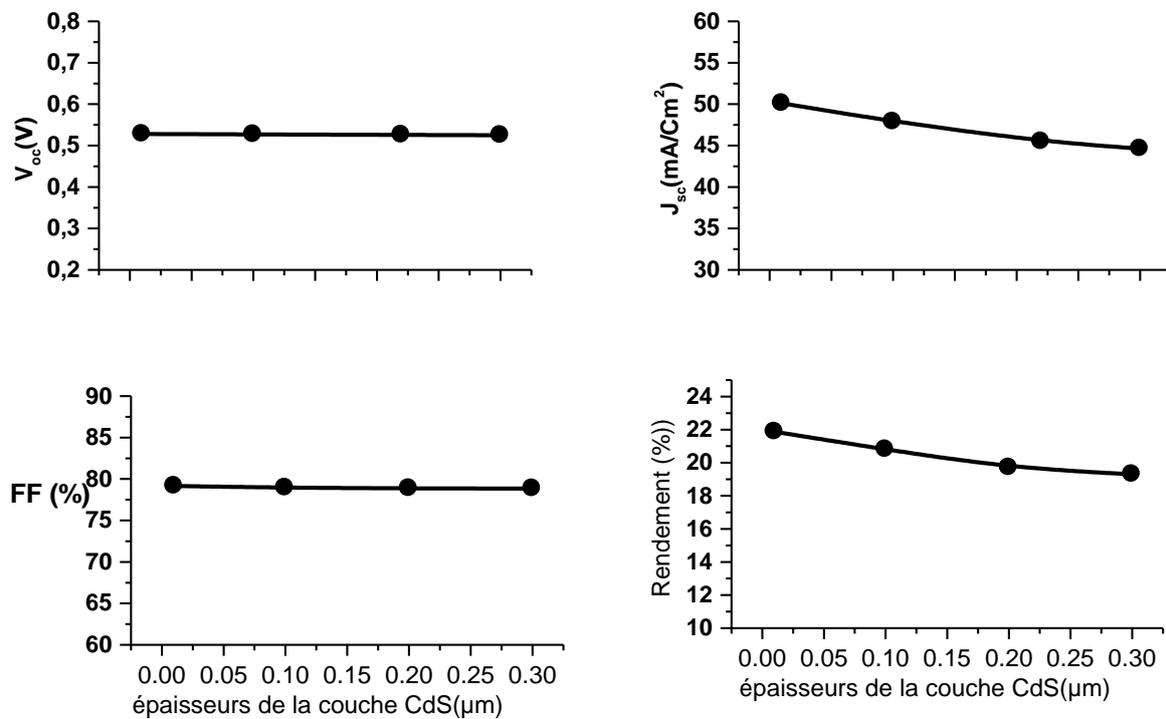


Figure IV.8 : Paramètres photovoltaïques des cellules CIGSe pour différentes épaisseurs de la couche tampon CdS.

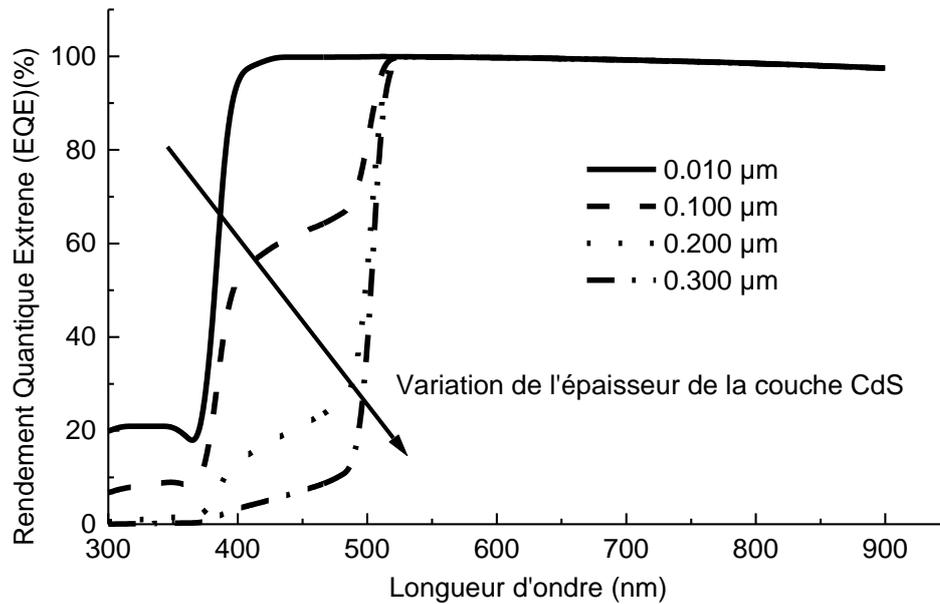


Figure V.9 : Réponses spectrales pour différentes épaisseurs du CdS.

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

IV.5. Influence de la température

La température est un paramètre important dans le comportement des cellules. Les figures IV.10 et IV.11 montrent tous les résultats V_{oc} , J_{sc} , FF et le rendement obtenu en fonction de la température. On observe que l'augmentation de la température entraîne une diminution nette de la tension du circuit ouvert, ainsi qu'une diminution de la puissance maximale et le rendement de la cellule. La température de fonctionnement joue un rôle essentiel dans les performances des cellules solaires. La température optimale de fonctionnement utilisée dans nos calculs est égale à 300 K

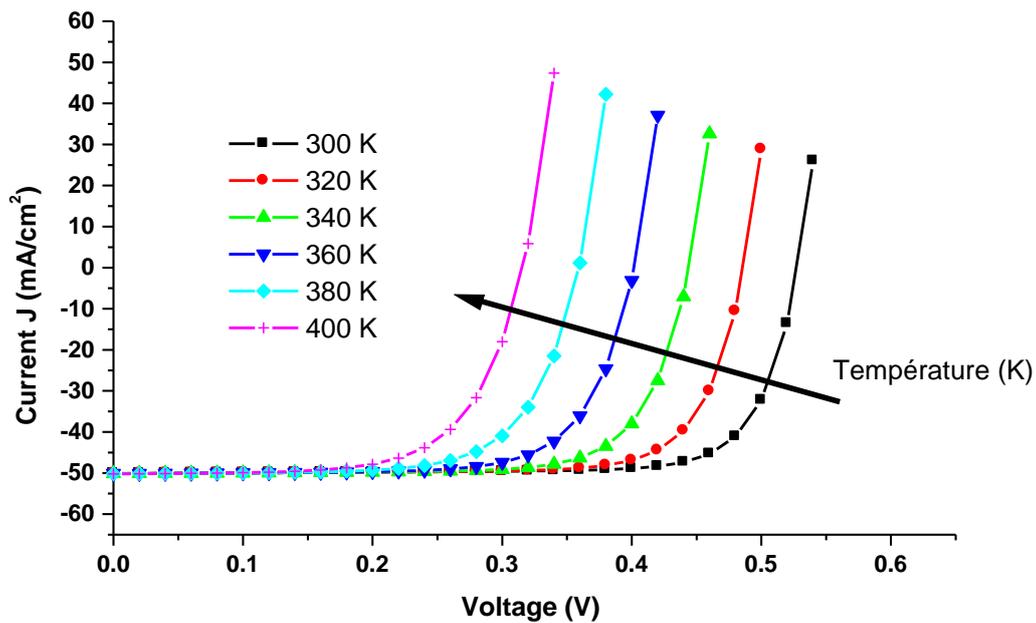


Figure IV.10 : Influence de la température sur la caractéristique $J (V)$.

A plus haute température, des paramètres tels que l'électron et de la mobilité des trous, Des concentrations des porteurs et des bandes interdites des matériaux seraient affectés dans ce résultat par une moindre efficacité des cellules [17].

L'efficacité diminue lorsque la température augmente avec une tendance à la déclinaison de $0,32 \% / K$. A plus haute température, l'énergie de la bande interdite a été légèrement réduite, ce qui peut accélérer la recombinaison entre la bande de valence et la bande de conduction.

Bien que plus d'électrons libres sont produits dans la bande de conduction, mais l'écart de bande d'énergie à haute température est instable qui peut conduire à la recombinaison des électrons et des trous tout en parcourant à travers les régions.

Dans notre étude, nous avons utilisé les mêmes paramètres structuraux pour toutes les températures de fonctionnement. Une étude similaire a été menée pour les couches tampons CdS - libres avec la température de fonctionnement variable entre 300 K à 400 K afin de comprendre l'effet sur la performance de la cellule.

Pour les cellules à base de ZnO, le gradient de température est enregistré à $0.29 \% / K$. On pourrait s'attendre à ce que une température plus élevée des paramètres tels que l'électron et de la mobilité des trous, des concentrations des porteurs et des bandes interdites des matériaux pourraient être concernés, comme trouvés dans l'analyse.

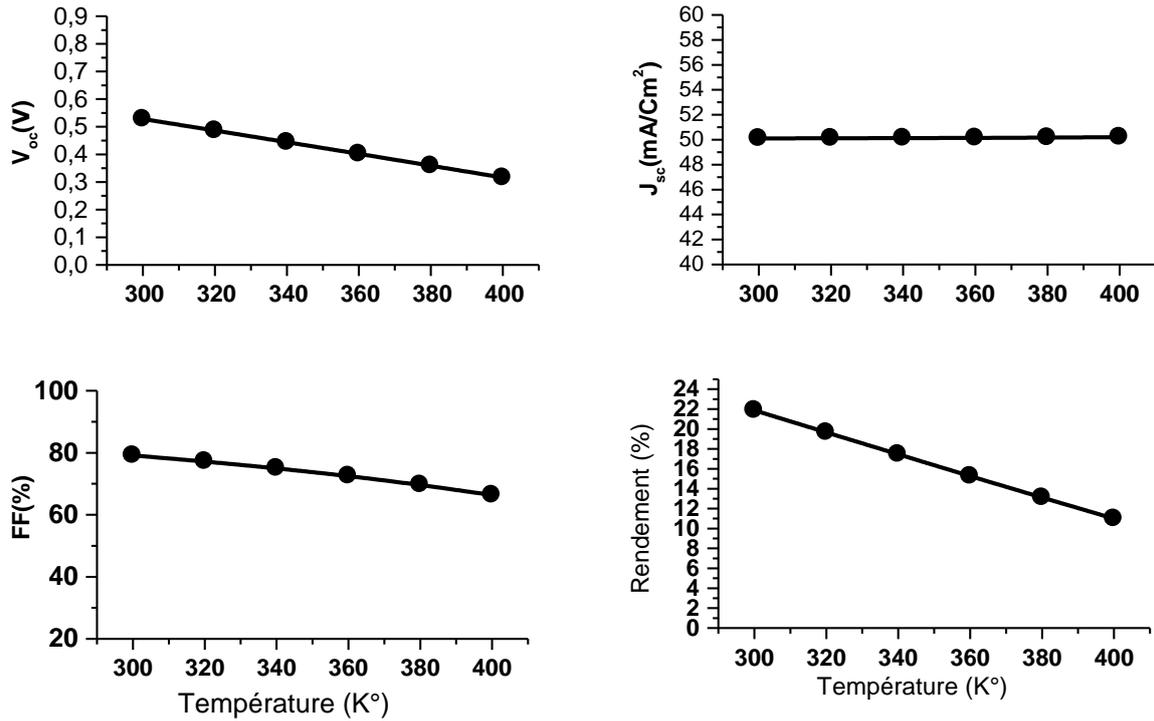


Figure V.11 : Paramètres photovoltaïques des cellules CIGSe pour différentes températures ;

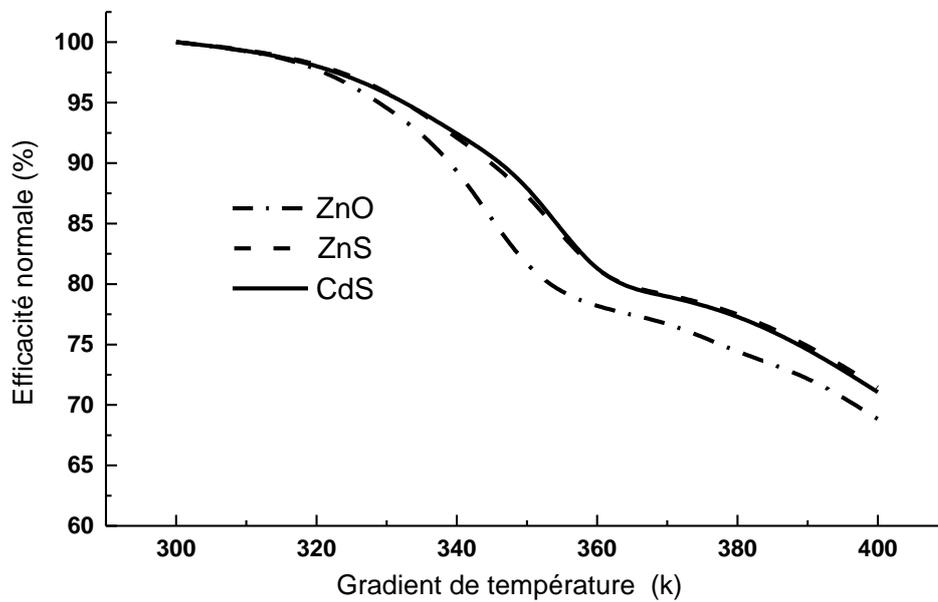


Figure IV.12 : L'efficacité normale pour les différentes couches tampons ZnO, CdS et ZnS en fonction du gradient de température de la cellule solaire à base de CIGS.

Après simulation des différentes couches tampons des ZnO, CdS et ZnS en fonction du gradient de température de la cellule solaire à base de CIGS, on remarque qu'il y a eu une diminution à cause d'une perte du potentiel de la cellule. On obtient un rendement élevé égal à 21,87 % de la couche ZnO et un rendement plus proche avec une cellule du CdS 21,87 %. Ils restent presque les mêmes en fonction de la température, cependant, la cellule à base de ZnS donne un rendement plus petit à une température de 300 K qui est 21,16 %. Cela indique que l'énergie du gap et l'augmentation de la température de chaque couche jouent un rôle important sur le rendement de la cellule.

IV.6. Les effets des couches tampons CdS et ZnS sur la caractéristique I(V)

Les paramètres photovoltaïques sont déduits. Le but de cette comparaison est l'augmentation du rendement de la cellule, donc on a observé une augmentation du J_{sc} entre ZnS et CdS. Dans nos résultats de calculs, nous avons gardé les mêmes épaisseurs de chaque couche de la cellule. Cette augmentation représente la différence entre les énergies de gap.

Cependant, le comportement des ZnS-buffered de la cellule solaire est différent par rapport aux CdS-tampon. Le V_{oc} et le FF diminuent fortement jusqu'à 0,49 V et 53% respectivement pour le ZnS-tampon de la cellule solaire, tandis que la couche tampon de la cellule solaire du CdS a une tendance assez constante pour ces deux paramètres. Le J_{sc} continue à diminuer pour les deux cellules. Dans le tableau ci-dessous, les différents des deux cellules sont représentés.

Tableau IV.2 : Le rendement photovoltaïque des cellules CIGSe pour différentes couches tampons CdS et ZnS.

Les Cellules	Rendement (%)
ZnO/CdS/CIGSe	21.87
ZnO/ZnS/CIGSe	20.61

IV.7. Les effets des couches tampons CdS et ZnS sur le rendement quantique externe EQE

Dans la figure IV.13 on remarque une différence entre les CdS et ZnS de 550 nm - 1000 nm dans la réponse spectrale. Cette différence est due au fait que les couches fenêtres du ZnO sont décalées entre les couches tampons du CdS et ZnS. Pour la référence d'épaisseur de la cellule solaire du CIGSe, Le gain dans la gamme de l'UV est visible avec la couche tampon du ZnS, En revanche, l'efficacité quantique globale est inférieure d'environ 5% sur le reste du spectre (de 550 nm à la bande interdite) ce qui peut être lié à une collecte suffisante des porteurs propres en raison des défauts à l'interface PN dans le ZnS.

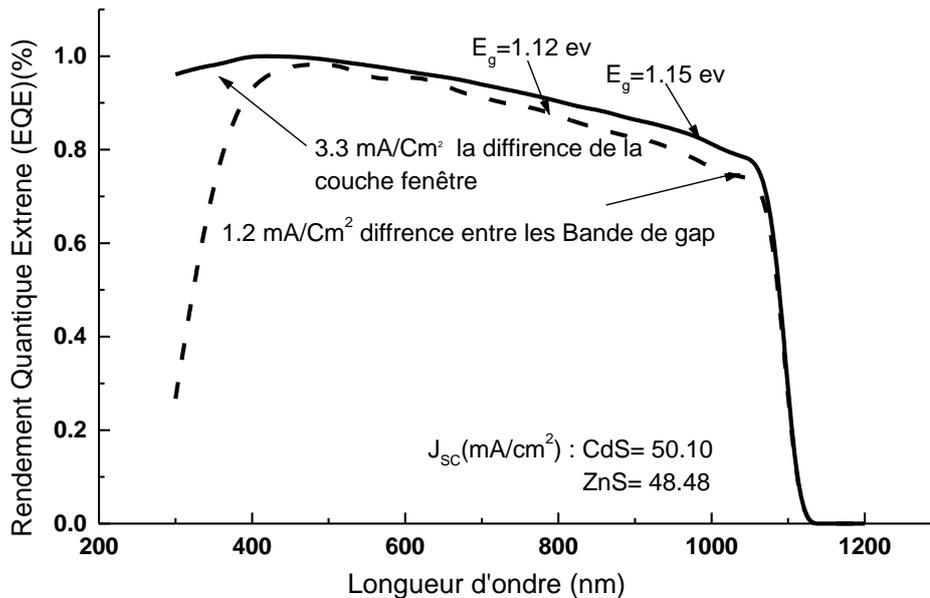


Figure IV.13 : Rendement Quantique Externe (EQE) simulé pour les deux cellules ZnO/CdS/CIGS/Mo et ZnO/ZnS(O,OH)/CIGS/Mo.

IV.8. Conclusion :

Dans le but d'améliorer les performances des dispositifs photovoltaïques, la présentation d'un modèle théorique par simulation numérique s'avère être nécessaire. Dans cette partie, nous avons décrit les concepts fondamentaux du programme utilisé pour calculer les propriétés physiques, en l'occurrence l'influence des épaisseurs et de la température sur les caractéristiques $J(V)$ de la cellule solaire à base de CIGS. Le phénomène de transport de photo-génération et combinaison a été mis en valeur. Nous avons pu conclure que les propriétés intrinsèques de la cellule solaire étudiée influent largement sur les performances de celle-ci, et dépendent de la température de fonctionnement ainsi que des couches qui la composent. En effet, les courbes obtenues illustrant les caractéristiques $J(V)$ montrent un rendement de conversion optimal égal à 21.87% pour la couche absorbante de 3000 nm. Finalement, une comparaison entre la couche tampon du CdS et celle du ZnS a été élaborée.

IV.9. Références

- [1] Jackson, P. et al. **New world record efficiency for Cu(In,Ga)Se₂ thin-film solar cells beyond 20%**. Progress in Photovoltaics: Research and Applications 19, 894–897 (2011).
- [2] Dhere, N. G. **Toward GW/year of CIGS production within the next decade. Solar Energy Materials and Solar Cells** 91, 1376–1382 (2007).
- [3] D.Abou-Ras, Helmholtz Center Berlin for Materials and Energy, Allemagne.
- [4] U.Rau, M.Schmitt, F.Engelhardt, O.Seifert, J.Parisi, W.Riedl, J.Rimmasch and F.Karg **"Impact of Na and S incorporation on the electronic transport mechanisms of Cu(In,Ga)Se₂ solar cells"**Sol. State Comm. 107 (1998) 59.
- [5] L.Kronik, D.Cahen, and H.W.Schock, **"Effect of Na on CuInSe₂ and its solar cell performance"**Adv. Mater. **10** (1998) 31.
- [6] S.H.Wei, S.B.Zhang, and A.Zunger, **"Effects of Na on the electrical and structural properties of CuInSe₂ thin films"** J. Appl. Phys. **85** (1999) 7214.
- [7] M.Bodegård, L.Stolt, and J.Hedström, **The influence of Na on the grain structure of CIS films for photovoltaic applications**, Proc. 12th EUPVSEC, Amsterdam (1994) 1743.
- [8] M.Ruckh, D.Schmid, M.Kaiser, R.Schäffler, T.Walter, and H.W.Schock **"Influence of substrates on the electrical properties of Cu(In,Ga)Se₂ thin films"** Sol.Energy Mat. Sol.Cells **41** (1996) 335.
- [9] V.Lyahovitskaya, Y.Feldman, K.Gartsman, H.Cohen, C.Cytermann, and D.Cahen, **"Na effect on CuInSe₂: distinguishing bulk from surface phenomena"** J. Appl. Phys. **91** (2002) 4205.
- [10] D.Rudmann, G.Bilger, M.Kaslin, F. J.Haug, and H.Zogg, **"Effects of NaF coevaporation on structural properties of Cu(In,Ga)Se₂ thin films"** Thin Solid Films **431** (2003) 37.
- [11] J.H.Scofield, A.Duda, D.Albin, B.L.Ballard, and P.Predecki, **"Sputtered molybdenum bilayer back contact for copper indium diselenide-based polycrystalline thin-film solar cells"** Thin Solid Films **260** (1995) 26.
- [12] M.Nishiwaki, N.Kohara, T.Negami, and T.Wada, **"MoSe₂ layer formation at Cu(In,Ga)Se₂/Mo interfaces in High Efficiency Cu(In_{1-x}Ga_x)Se₂ Solar Cells"** Jpn. J. Appl. Phys. **37** (1998) L71.
- [13] L.Assmann, J.C.Bernede, A. Drici, C. Amory, E. Halgand and M. Morsli, **"Study of the Mo thin films and Mo/CIGS interface properties"** Appl. Surface Science 246 (2005) 159.

[14] J.Kessler, J.Norling, O.Lundberg, J.Wennerberg, and L.Stolt, "**Optimization of RF-sputtered ZnO/ZnO:Al for Cu(In,Ga)Se₂ based devices**", 16th EPVSEC (2000), Glasgow.

[15] Gloeckler .M, Fahrenbruch .A.L, Sites .J.R, 2003, **Numerical Modeling of CIGS and CdTe Solar Cells: setting the Basline** , in: 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, vol. 1,pp. 491–494.

[16] Yamamoto, Y. Saito, K. Takahashi, M. Konagai, Sol. Energy Mater. Sol. Cells 65 (2001) 125–132.

[17] T. Nakada, M. Mizutani, Jpn. J. Appl. Phys. 41 (2002) 165.

Conclusion Générale

CONCLUSION GENERALE

Actuellement, existes 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 19.9%, le tellure de cadmium noté CdTe avec un rendement de 16.5%, et les matériaux à base de silicium amorphe et microcristallin avec des valeurs comprises entre 7% et 9 % de rendement. le matériau Cu(In,Ga)Se_2 fait l'objet d'étude dans le cadre de cette thèse.

Dans la deuxième partie, nous avons vu plusieurs modèles de la cellule qui ont été développés et rapportés dans la littérature calculant la puissance fournie par cette cellule solaire en ce basant sur les données des constructeurs. Cela est pris en considération afin de prouver que les modèles tiennent compte de l'influence des conditions atmosphériques sur les paramètres de la cellule solaire, plus exactement le modèle basé sur les paramètres intérieurs. D'autre part, nous avons essayé d'utiliser les deux types de modélisations et évaluer la différence par la comparaison des résultats de simulation des deux modèles avec les données expérimentales pour la cellule solaire à base du matériaux CIGS.

Enfin, nous avons étudié la structure de la cellule solaire CIGSe à absorbeur mince. Après une étude prédictive faisant appel à la simulation numérique pour évaluer les problèmes et les solutions à apporter pour augmenter les performances des cellules.

Nous avons procéder à une étude de l'influence de l'épaisseur et la température de la couche active à base de CIGSe sur les propriétés des cellules solaires.

Les résultats obtenus sont en très bon accord avec l'expérience, de ce fait, nous avons identifié le courant du court-circuit comme étant le principal facteur limitant le rendement des cellules à absorbeur.

Afin d'augmenter ce paramètre, nous avons procédé à un remplacement de la couche tampon du CdS par un matériau de plus grand gap (ZnS). Bien qu'une augmentation du J_{sc} soit observée dans les deux cas, elle reste insuffisante pour espérer retrouver les performances

d'une cellule standard dans des cellules CIGSe . Nous déduisons donc que la couche tampon joue un rôle très important dans la protection entre la couche antireflet et la couche active.

Comme perspectives, nous envisageons de réaliser un échantillon à base de la structure : Verre/Mo/Cu(In,Ga)Se₂/CdS/ZnO et faire la caractérisation, ensuite les comparer avec les résultats expérimentaux dans le cas I-V.

Abstract

Using physical and electrical informations gathered in photovoltaic cells, their operating description with the I-V characteristic approximation can be built and presented by mathematical models. In this work, CIGS solar cells are modeled and simulated with the one and two diodes models. Within these models, we have obtained the dependence of some parameters with temperature that constitute a set of data generally not provided by manufacturers. Simulations are performed using the Newton-Raphson methods to the I-V implicit equations. And in the second part we saw the effect of the Influence of the Reduction of the layer thickness of absorbing CIGSe layer on the photovoltaic parameters and quantum efficiency of the solar cell.

Résumé

Utilisant des informations physiques et électriques recueillies pour les cellules photovoltaïques et leur description d'opération avec l'approximation de la caractéristique I-V peut être établie et représentée par les modèles mathématiques. Dans ce travail, des cellules solaires à base de CIGS sont modélisées et simulées avec les modèles de un ou deux diodes. Dans ces modèles, nous avons obtenu la dépendance de quelques paramètres avec la température qui constituent un ensemble de données généralement non fournies par les fabricants. Des simulations sont effectuées suite aux méthodes de Newton-Raphson pour les équations I-V implicites. Et dans la deuxième partie nous avons vu l'effet de l'influence de la réduction de l'épaisseur de la couche absorbante CIGSe sur les paramètres photovoltaïques et le rendement quantique de la cellule solaire.

المخلص

استخدام المعلومات الفيزيائية والكهربائية التي تم جمعها للخلايا الضوئية ووصف عملها مع تقريب IV يمكن أن تنشأ ويمثلها النماذج الرياضية. في هذا العمل، وعلى غرار الخلايا الشمسية على أساس CIGS ومحاكاة مع نماذج من واحد أو اثنين من الثنائيات. في هذه النماذج، حصلنا على اعتماد بعض المعلمات مع درجة الحرارة التي تشكل مجموعة من البيانات عادة لم تقدم من قبل الشركات المصنعة. يتم تنفيذ المحاكاة التالية أساليب نيوتن-رافسون في المعادلات المتضمنة IV. وفي الجزء الثاني نرى تأثير في الحد من سماكة طبقة ماصة على CIGSe على المعلمات الضوئية ومرودية على الخلايا الشمسية.