



Université Saâd Dahlab, Blida-1  
Faculté de Technologie  
Département des Énergies Renouvelables

Par : SIDI MOUSSA Mohamed

Pour l'obtention du diplôme :

## **MASTER en Énergies Renouvelables**

Option : Photovoltaïque

Thème :

# **Effet de la concentration d'Indium sur les performances des cellules photovoltaïques à base de CIGS**

Soutenu devant le jury composé par :

Dr MAZOUZ	Halima	USDB	Présidente
Dr BOUZAKI	Mohammed Moustafa	USDB	Promoteur
Dr AMROUCHE	Badia	USDB	Examinatrice
Dr AIT SAHED	Oussama	USDB	Examineur

Juin 2018

## Résumé

Ce travail présente une étude sur la modélisation des performances des cellule photovoltaïques à base de CIGS, d'où nous avons analysé le comportement de ces cellules en variant l'épaisseur des couches tampon et absorbante dans une première étape, de la concentration de dopage dans la deuxième étape et en discutant l'effet de la concentration d'Indium (In) sur les cellules à base de GIGS ( $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)\text{Se}_2$ ) dans la troisième étape.

Concernant cette dernière étape, nous avons considéré un profil de gap gradient sous forme parabolique pour la couche absorbante (CIGS), d'où nous avons varié  $E_g$  entre 1,04eV et 1,68eV, à l'aide de logiciel de simulation SCAPS. Cette considération, nous a permet d'améliorer les performances de la cellule étudié :  $V_{co}=0.68\text{V}$ ,  $J_{sc}=44.10\text{mA}/\text{cm}^2$ , un  $FF=78.51\%$  et un  $\eta=23.69\%$ .

**Mots clés :** modélisation, cellules photovoltaïque à base de CIGS, concentration d'Indium.

## ملخص

يقدم هذا العمل دراسة تركز على نمذجة أداء الخلايا الضوئية القائمة على CIGS ، والتي من خلالها قمنا بمحاكاة سلوك هذه الخلايا عن طريق تباين السماكة في المرحلة الأولى، وتغيير المنشطات في المرحلة الثانية. وأخيراً، دراسة تأثير تركيز الإنديوم (In) على الخلايا المستندة إلى GIGS ( $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)\text{Se}_2$ ) ، في الخطوة الثالثة.

فيما يتعلق بهذه الخطوة الأخيرة ، نظرنا في تشكيل فجوة مكافئ لطبقة الامتصاص (CIGS) ، حيث قمنا بتنوع  $E_g$  بين 1.04 eV و 1.68 eV ، باستخدام برنامج محاكاة SCAPS. هذا الاعتبار سمح لنا بتحسين أداء الخلية المدروسة =  $V_{CO} = 0.68\text{V}$  ،  $J_{sc} = 44.10\text{mA} / \text{cm}^2$  ،  $FF = 78.51\%$  و  $\eta = 23.69\%$ .

**الكلمات المفتاحية:** النمذجة، الخلايا الكهروضوئية CIGS، تركيز الإنديوم.

## Abstract

This work presents a study focused on modelling the performance of photovoltaic cells based on CIGS, from which we simulated the behaviour of these cells by the variation of the thickness in a first stage, the variation of the doping in the second stage. , and finally study the effect of Indium concentration on GIGS-based cells ( $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)\text{Se}_2$ ) in the third step.

Concerning this last step, we considered a parabolic gap profile for the absorbing layer (CIGS), from where we varied  $E_g$  between 1.04eV and 1.68eV, using SCAPS simulation software. This consideration allowed us to improve the performance of the studied cell:  $V_{co} = 0.68\text{V}$ ,  $J_{sc} = 44.10\text{mA} / \text{cm}^2$ , a  $FF = 78.51\%$  and a  $\eta = 23.69\%$ .

**Keywords:** modelling, CIGS photovoltaic cells, Indium concentration.

# Dédicace

*A Mes chers Parents*

*Sources de mes joies, secrets de ma force, qui m'ont soutenue  
durant toutes ces années d'études et qui ont été toujours présents  
pour me pousser vers plus de réussites ;*

*Merci pour tous vos sacrifices ;*

*Merci d'être tout simplement mes parents ;*

*C'est à vous que je dois cette réussite*

*A mes frères ;*

*A tous ceux et celles qui me sont chers de ma famille.*

# Remerciements

Après avoir rendu grâce à **Dieu** le tout puissant et le Miséricordieux nous tenons à remercier vivement tous ceux qui. De près ou de loin ont participé à la réussite de ce travail. Plus particulièrement ;

A Dr **MAZOUZ Halima**

Pour avoir accepté de présider ce jury ;

A Drs **AMROUCHE Badia, AIT SAHED Oussama**

Pour avoir accepté de faire partie du jury et d'examiner ce travail avec attention ;

Je remercie mon promoteur Mr **BOUZAKI Mohamed Moustafa** Docteur en Energies Renouvelables à l'université de BLIDA (1)/département des EnR pour sa disponibilité, sa rigueur scientifique et son sens d'écoute et d'échange ;

Tout le corps des enseignants du département des EnR/ université de BLIDA (1) qui nous ont fait bénéficier d'une formation pluridisciplinaire de haut niveau et adaptée aux réalités des Energies Renouvelables ;

Je tiens également à remercier Monsieur **H. Megueni** chef de département des Energie Renouvelables, et tout le staff administratif, ainsi que mes chers enseignants

Je tiens à remercier mes chers **Parents**, pour leurs encouragements, leur sacrifice, et leur soutien permanent, aussi moral que financier, ainsi que toute ma famille ;

Je tiens également à remercier tous mes **Amis** et tous les étudiants de mastère Energies Renouvelables, et tous ceux qui m'ont soutenue moralement pendant la réalisation de ce travail pour leurs patience et leurs encouragement.

## Nomenclature - Symboles-Acronymes

$\Theta$  : angle zénithal ( $^{\circ}$ )

$\theta_s^t$  : angle solaire zénithal ( $^{\circ}$ )

$\theta_s$  : angle solaire zénithal ( $^{\circ}$ )

a= Facteur d'idéalité de diode

a-Si : Silicium amorphe

a-Si-H: Silicium amorphe

AM: air mass

ASTM: American Society for Testing and Materials

ASTM E-490: spectre de référence AM 0 de American Society for Testing and Materials

c-Si : Silicium cristallin

CdS : sulfure de cadmium

CdTe : tellure de cadmium

CIGS : diséléniure de cuivre, indium et gallium

CIS : (di) Séléniure de Cuivre Indium

Cu : Cuivre

$D_n$  : coefficients de diffusion d'électrons

$D_p$  : coefficients de diffusion des trous

$E_0^t$  : l'éclairement sur un plan horizontal ( $W/m^2$ )

$E_{0n}^t$  : l'éclairement sur plan normal ( $W/m^2$ )

$E_g$  : énergie de gap (eV)

FF : facteur de forme (%)

Ga : Gallium

GaAs : arséniure de gallium

GES : gaz à effet de serre

$\eta$  : le rendement (%)

$I_0$ = Courant de saturation de la diode (A)

$I_{01}$ = courant de saturation de D1 (A)

$I_{02}$ = courant de saturation de D2 (A)

$I_{irr}$  = Courant d'irradiation ou photo courant généré (A)

In : Indium

InS : sulfure d'indium

J : la densité totale de courant (mA/cm<sup>2</sup>)

J<sub>n</sub> : courant de diffusion provoqué par la variation de la concentration des électrons (A)

J<sub>p</sub> : courant de diffusion provoqué par la variation de la concentration des trous (A)

J<sub>sc</sub> : densité de courant de court-circuit (mA/cm<sup>2</sup>)

N : couche dopé de type n

n : nombre des électrons

N<sub>a</sub> : concentration des accepteurs

N<sub>d</sub> : concentration des donneurs

NREL : National Renewable Energy Laboratory

N<sub>s</sub> = nombre de cellules connecté en série

P : couche dopé p

p : nombre des trous

pc-Si : Silicium poly-cristallin

PV : photovoltaïque

q : charge d'électron [-1,6\*10<sup>-19</sup>(ev)]

R<sub>P</sub> : résistance parallèle (Ω\*cm<sup>2</sup>)

R<sub>s</sub> : résistance série (Ω\*cm<sup>2</sup>)

R<sub>SH</sub> : pertes de fuite

Se : Sélénium

Si : Silicium

TCO : Oxyde Transparent Conducteur

TiO<sub>2</sub> : dioxyde de Titan

V<sub>0</sub> : différence de potentiel (V)

V<sub>co</sub> : tension circuit ouvert (V)

V<sub>T</sub> = Tension thermique

ZCE : zone de charge d'espace

ZnO : Oxyde de Zinc

ZnS : Sulfure de Zin

## Sommaire

<b>Résumé</b> .....	I
<b>ملخص</b> .....	I
<b>Abstract</b> .....	I
<b>Dédicace</b> .....	II
<b>Remerciements</b> .....	III
<b>Nomenclature - Symboles-Acronymes</b> .....	IV
<b>Listes des figure</b> .....	VIII
<b>Liste de tableaux</b> .....	X
<b>Introduction générale</b>	
Introduction générale.....	1
<b>Chapitre I : Généralités sur l'énergie photovoltaïque</b>	
I.1 Introduction .....	5
I.2 L'effet photovoltaïque .....	5
I.3 Dopage des cellules photovoltaïques (N et P) .....	6
I.3.1 Dopage de type N.....	6
I.3.2 Le dopage de type P .....	6
I.4 Rayonnement solaire .....	7
I.4.1 Rayonnements direct, diffus et global.....	8
I.4.2 SUR LES SPECTRES STANDARD.....	9
I.5 Modélisation d'une cellule photovoltaïque .....	11
I.5.1 Modèle à 1 diode.....	11
I.5.2 Modèle à double diode.....	12
I.6 Les principaux matériaux semi-conducteurs photovoltaïques.....	12
I.6.1 Le silicium.....	13
I.6.2 Le CdTe le tellurure de cadmium.....	16
I.6.3 GaAs (L'arséniure de gallium).....	17
I.6.4 Autres matériaux photovoltaïques.....	17
I.6.5 CIGS (Le diséléniure de cuivre, indium et gallium) .....	17
I.7 Conclusion.....	18

<b>Chapitre II : Etude théorique des cellules PV (CIGS)</b>	
II.1	Introduction ..... 20
II.2	Cellule photovoltaïque à base de CIGS ..... 20
II.3	Différents couches de la structure CIGS ..... 21
II.3.1	Oxyde Transparent Conducteur (TCO) ..... 21
II.3.2	Couche Tampon..... 21
II.3.3	La couche absorbante (CIGS)..... 21
II.4	Etat de l'art ..... 22
II.4.1	Développement des cellules CIGS ..... 22
II.4.2	CIGS dans la recherche scientifique ..... 22
II.5	Modélisation analytique de la caractéristique J-V (jonction N-P) ..... 23
II.6	Conclusion ..... 29
<b>Chapitre III : Modélisation numérique des performances des cellules PV (GIGS)</b>	
III.1	Introduction..... 31
III.2	Structure et paramètres de la cellule CIGS ..... 31
III.2.1	L'absorption pour chaque couche ..... 33
III.3	Caractéristique J-V d'une cellule CIGS..... 34
III.4	Optimisation des performances de CIGS..... 34
III.4.1	L'influence de l'épaisseur des couches sur les performances de la cellule CIGS.....34
III.4.2	La concentration de dopage..... 36
III.4.3	Effet de la concentration d'Indium..... 37
III.5	Conclusion ..... 40
<b>Conclusion général</b>	
	Conclusion général ..... 42
<b>Bibliographie et webographie..... 43</b>	
<b>Annexes..... 47</b>	



## Listes des figure

### Introduction générale

Figure 1 : Schéma illustrant l'effet de serre [1] .....	1
Figure 2 : Origine du CO <sub>2</sub> [2].....	1
Figure 3 : Irradiation globale en Algerie [3] .....	2

### Chapitre I : Généralités sur l'énergie photovoltaïque

Figure I. 1: Principe de fonctionnement d'une cellule solaire .....	5
Figure I. 2 : Dopage type N du silicium .....	6
Figure I. 3 : Dopage type P du silicium.....	7
Figure I. 4 : Irradiation annuelle au sommet de l'atmosphère.....	8
Figure I. 5 : Les composantes directes B et diffuse D de l'éclairement global G reçu au sol sur plan .....	9
Figure I. 6 : Illustration de la masse d'air AM0, AM1.5 .....	10
Figure I. 7 :Le spectre du rayonnement solaire .....	10
Figure I. 8 : Le model a 1 diode d'une cellule PV .....	11
Figure I. 9 : Le model a 2 diodes d'une cellule PV .....	12
Figure I. 10 : Les matériaux semi-conducteurs photovoltaïques dans le tableau périodique.....	13
Figure I. 11 : Le développement des matériaux semi-conducteurs photovoltaïque [96] .....	13
Figure I. 12 : Le silicium dans la production photovoltaïque.....	14
Figure I. 13 : Structure cristallographique du silicium monocristallin .....	14
Figure I. 14 : Diagramme des bandes du silicium monocristallin .....	15
Figure I. 15 : Barreau de silicium polycristallin.....	15
Figure I. 16 : Structure du silicium poly-cristallin .....	15
Figure I. 17 : Cellule au silicium amorphe .....	16
Figure I. 18 : Structure CdTe.....	16
Figure I. 19 : La configuration en couches SC d'une cellule PV à base de CdTe .....	16
Figure I. 20 : Structure GaAs .....	17
Figure I. 21 : Configuration en couches SC d'une cellule PV à base de GaAs.....	17

## Chapitre II : Etude théorique des cellules PV à base de (CIGS)

Figure II. 1 :Structure de la jonction n-p. ....	24
Figure II. 2 :Diagramme des bandes dans la jonction n-p.....	24
Figure II. 3 :Diagramme des bandes de la jonction n-p polarisée.....	26
Figure II. 4 Le circuit électrique équivalent. ....	28

## Chapitre III : Modélisation numérique des performances des cellules PV (GIGS)

Figure III. 1 : Schéma d'une cellule CIGS.....	32
Figure III. 2 : La courbe d'absorption de ZnO.....	33
Figure III.3 : La courbe d'absorption du CdS .....	33
Figure III. 4: La courbe d'absorption du GIGS.....	33
Figure III. 5 : Caractéristique J-V d'une cellule CIGS .....	34
Figure III. 6 : Effet de l'épaisseur de la couche fenêtre ZnO .....	35
Figure III. 7 : Effet de l'épaisseur de la couche CdS .....	35
Figure III. 8 : Effet de l'épaisseur de la couche CIGS .....	35
Figure III. 9 : Dopage de la couche CIGS.....	36
Figure III.10 : Dopage de la couche CdS .....	36
Figure III. 11 :Le profil de gap de la couche absorbante.....	37
Figure III. 12 : Caracteristiques J-V avec et sans gradient.....	39

## Annexes

Figure A. 1 Interface du programme SCAPS.....	48
Figure A. 2 Panneau de définition de cellule.....	49
Figure A. 3 Le panneau de propriétés de la couche .....	49
Figure A. 4 Le panneau de bande d'énergie .....	50
Figure A. 5 Le panneau J-V de la cellule.....	50

## Liste de tableaux

### **Chapitre II : Etude théorique des cellules PV à base de (CIGS)**

Tableau II. 1 : Tableau périodique indiquant les matériaux S-C du (CIGS).....20

### **Chapitre III : Modélisation numérique des performances des cellules PV (GIGS)**

Tableau III 1 : Différents paramètres retenus pour la cellule CIGS dans la simulation..... 32

Tableau III 2 :tableau de variation de dopage et d'épaisseur avec et sans gradient ..... 38

# Introduction générale

## Introduction générale

La température de la terre ne cesse d'augmenter, de jour en jour on voit des dégâts et des catastrophes un peu partout dans le monde, dû au réchauffement climatique, cette augmentation causée par les émissions des GES (gaz à effet de serre) (figure 1), provenant de plusieurs sources, d'où on trouve la production d'énergie à la tête de ces causes, avec 32% du totale des émissions dans le monde.

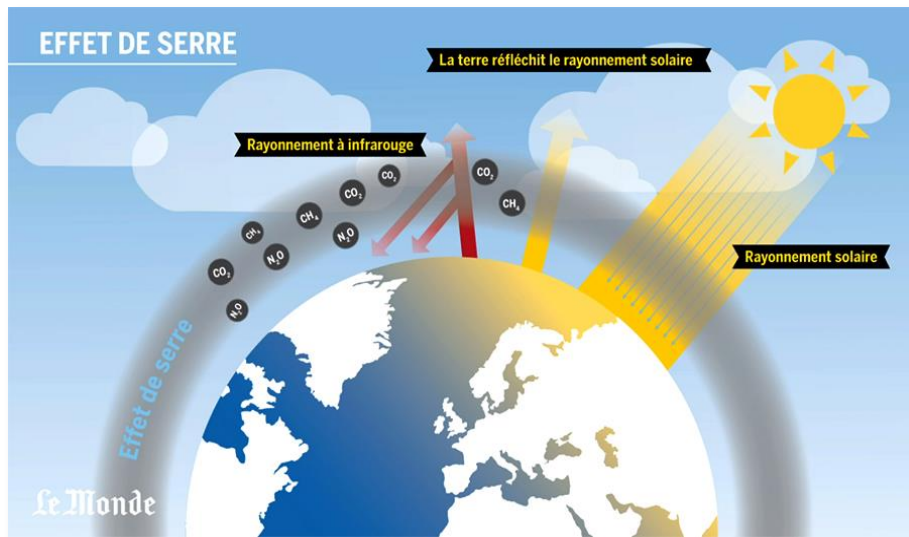


Figure 1 : Schéma illustrant l'effet de serre [1].

Les émissions des gaz à effet de serre principalement le  $\text{CO}_2$ , sont dû au besoin de l'humanité, d'où on trouve (Figure 2) la production d'énergie à 32% des émissions, l'industrie à 22%, le transport à 21%, le chauffage et divers à 11%, et le changement d'usage des sols à 14%.

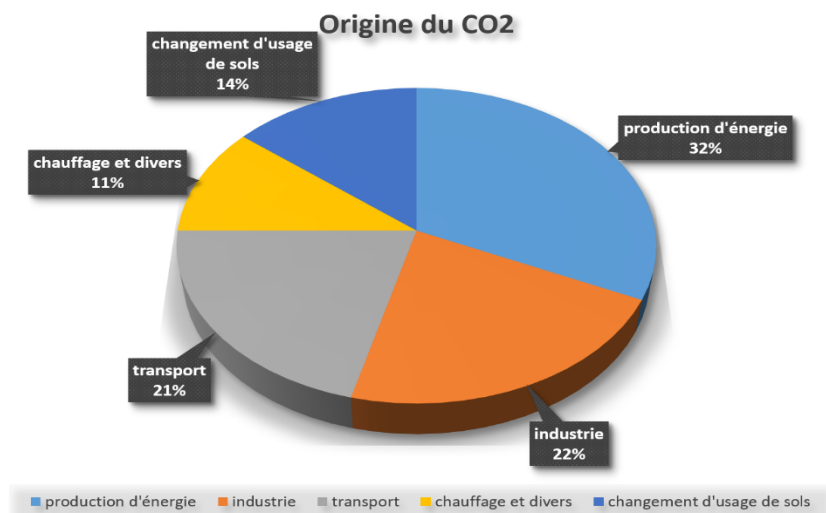


Figure 2 : Origine du CO<sub>2</sub> [2].

Parmi les solutions les plus promotrices pour lutter contre l'effet de serre, on trouve les énergies renouvelables avec tous les types (solaire, éolienne, biomasse, marémotrice, etc...) appliqué chacune selon des critères, varie de l'état du climat à l'emplacement géographique.

L'Algérie, en tant que l'un des pays les plus exposés au soleil, dispose d'un énorme gisement solaire, avec son désert qui représente 86% de la surface du pays. La durée moyenne d'ensoleillement du territoire qui dépasse les 2000 heures annuelles, avec un totale d'énergie reçue est estimé à 169 400 TWh/an (figure 3), et cela représente près de 5000 fois la consommation d'électricité annuelle du pays, donc un surplus, qui peut être exporté vers le monde entier, ce qui est bénéfique pour l'économie nationale.

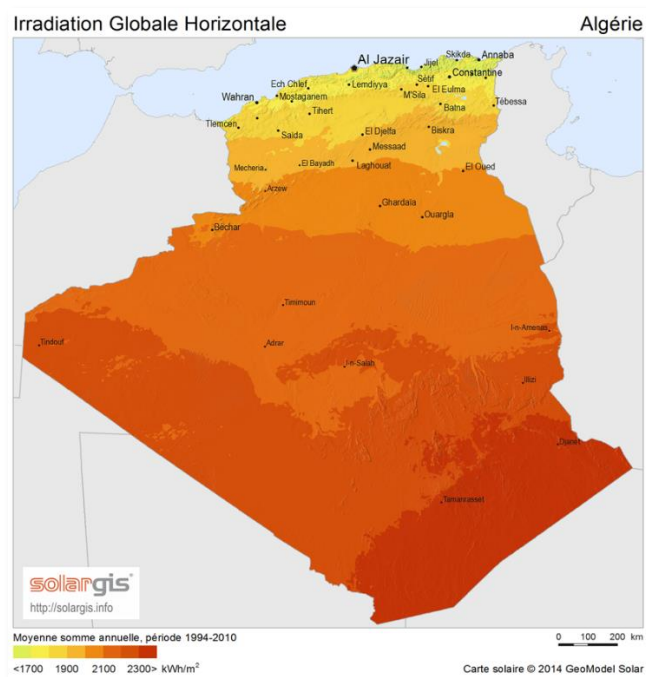


Figure 3 : Irradiation globale en Algérie [3].

Vu le gisement solaire de l'Algérie, l'énergie photovoltaïque est l'une des solutions la plus rentable pour le pays. Avec de différentes technologies, les cellules solaires sont toujours en développement. De la première génération avec des cellules cristallines (mono et poly) généralement en silicium (Si) avec une seule jonction P-N. En passant à la deuxième génération des cellules à couches minces avec plusieurs types de matériaux, et plusieurs techniques d'élaboration, où on trouve le silicium amorphe (a-Si), le Tellurure de Cadmium (CdTe), le (di) Sélénium de Cuivre Indium (CIS), Cuivre Indium Gallium (di) Sélénium (CIGS), etc...; Jusqu'à la troisième génération avec des cellules multicouches (multi-jonction), des cellules à concentrations, et des cellules organiques.

Le but de notre travail de fin d'étude est d'étudier l'effet de la concentration d'Indium sur les performances des cellules photovoltaïques à base de CIGS.

Notre manuscrit va être divisé en trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous allons faire une présentation de l'énergie photovoltaïque. On y trouvera donc le principe d'une cellule photovoltaïque, le rayonnement solaire, les modèles équivalents d'une cellule photovoltaïque ainsi les différents matériaux photovoltaïques (c-Si, a-Si, a-Si:H/c-Si, CdTe, CIGS, GaAs...).

Dans le deuxième chapitre, nous présenterons la définition et l'état de l'art de la filière étudiée (CIGS), les différentes couches d'une cellule photovoltaïque à base de CIGS ainsi que une modélisation analytique de la caractéristique J-V de la jonction N-P sera traitée.

Dans le troisième chapitre, nous allons entamer le travail principal dont nous étudierons l'influence de l'épaisseur et la concentration de dopage de chaque couche de la cellule photovoltaïque simulée. D'autre part, l'effet de la concentration d'Indium, sur les performances des cellules photovoltaïque à base de CIGS, sera étudié, analysé et discuté.

# Chapitre I

## Généralités sur l'énergie photovoltaïque



## I.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons faire une présentation de l'énergie photovoltaïque. On y trouvera donc le principe d'une cellule photovoltaïque, le rayonnement solaire, les modèles équivalents d'une cellule photovoltaïque ainsi les différents matériaux photovoltaïques (c-Si, a-Si, a-Si:H/c-Si, CdTe, GaAs, CIGS ...).

## I.2 L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque appelé aussi photoélectrique est la transformation de l'énergie de la lumière en énergie électrique, découvert en 1839 par Becquerel qui a observé le passage de courant électrique entre deux électrodes quand on les expose à la lumière, ce passage de courant était à partir d'un seuil de fréquence indépendante de l'intensité de la lumière, et c'est jusqu'à 1905 qu'en a compris ce phénomène, quand Einstein et Planck ont présenté le principe du photon. [4]

Pour les semi-conducteurs, il y a deux possibilités qui s'imposent quand un photon arrive sur un matériau :

- Il a une énergie plus faible que l'énergie de gap ( $E_g$ ), dans ce cas le matériau est transparent pour ce photon.
- Il a une énergie équivalente ou supérieure à  $E_g$ , il sera absorbé et une paire électron-trou sera créée, Si l'on arrive à séparer cette paire électron-trou et collecter les porteurs avant qu'ils ne se recombinent, on obtient un courant électrique.

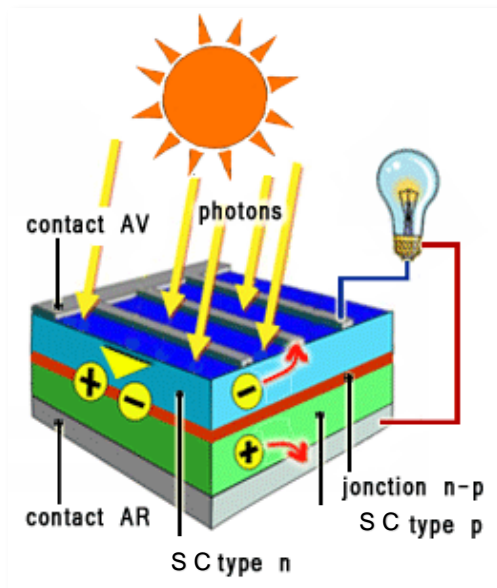


Figure I. 1: Principe de fonctionnement d'une cellule solaire

### I.3 Dopage des cellules photovoltaïques (N et P)

Une étape très importante dans la chaîne de la production des cellules photovoltaïques : c'est le dopage des couches.

Le dopage consiste à implanter des impuretés à l'intérieur d'un semi-conducteur intrinsèque afin d'en contrôler les propriétés électriques. La technique du dopage augmente (définit) la qualité des porteurs à l'intérieur du matériau semi-conducteur. [5]

Par exemple pour le cas de silicium, une fois découpées en fines plaques, il doit être dopé pour obtenir un silicium semi-conducteur de type P ou N.

Les matériaux ainsi dopés sont appelés semi-conducteurs extrinsèques.

#### I.3.1 Dopage de type N

Si on augmente la densité d'électrons, il s'agit d'un dopage de type N, qui consiste à augmenter la densité en électrons dans le semi-conducteur intrinsèque en y incluant certains atomes riches en électrons, comme le Phosphore (Figure I.2), l'Arsenic, l'Antimoine etc... Cet atome incorporé dans le réseau cristallin présentera quatre liaisons covalentes et un électron libre. Ce cinquième électron, qui n'est pas un électron de liaison, n'est que faiblement lié à l'atome et peut être facilement excité vers la bande de conduction. Un semi-conducteur dopé de type N sera donc chargé négativement (trop d'électrons).

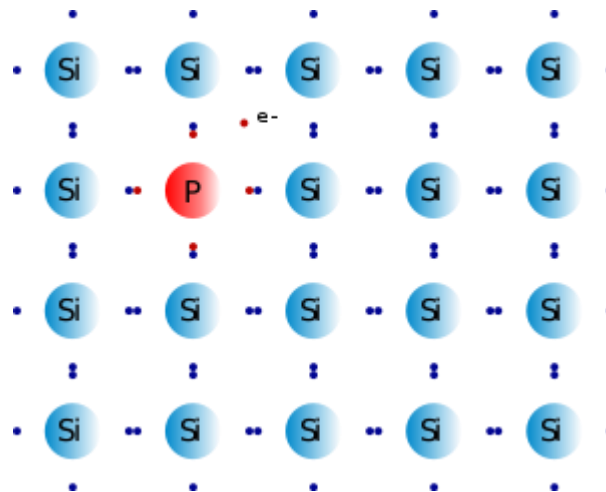


Figure I. 2 : Dopage type N du silicium

#### I.3.2 Le dopage de type P

Si on augmente celle des trous, il s'agit d'un dopage de type P, en incluant d'autres atomes pauvres en électrons, et généralement le Bore (Figure I.3) mais aussi les éléments chimiques de sa colonne. Cet atome n'ayant que trois électrons de valence, il ne peut créer que trois liaisons covalentes avec ses quatre voisins créant ainsi un trou dans la structure,

trou qui pourra être rempli par un électron donné par un atome de silicium voisin, déplaçant ainsi le trou. Le semi-conducteur est chargé positivement (moins d'électrons).

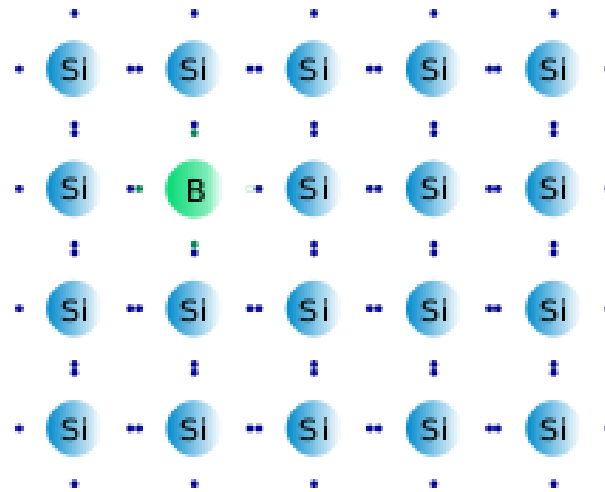


Figure I. 3 : Dopage type P du silicium

## I.4 Rayonnement solaire

Le Soleil, émet un rayonnement important de manière isotrope, dû à sa température superficielle élevée. Une partie de ce rayonnement est reçue par la terre. Le flux énergétique reçu par la Terre est appelé éclairement énergétique, abrégé en éclairement. La moyenne annuelle de cet éclairement reçu sur un plan normal aux rayons du Soleil situé au sommet de l'atmosphère est appelée constante solaire ; sa dernière estimation est de  $1362 \text{Wm}^{-2}$  [6].

L'éclairement dépend de la distance entre notre planète et le Soleil, laquelle varie selon les saisons. Plus cette distance est grande, plus l'éclairement est faible. Ainsi l'éclairement reçu au cours de l'année par un plan normal aux rayons du Soleil situé au sommet de l'atmosphère il varie entre 0,97 et 1,03 fois la constante solaire. L'activité solaire, manifestée par les taches solaires, modifie très légèrement cet éclairement d'environ 0,1 %, avec un cycle de 11 ans sur lequel se superposent parfois des variations beaucoup plus rapides d'un jour sur l'autre ou d'une semaine sur l'autre, dont l'amplitude peut atteindre  $5 \text{Wm}^{-2}$ , soit environ 0,3 % de la constante solaire [7].

L'angle solaire zénithal  $\theta_s$  joue un rôle important sur l'éclairement reçu sur un plan horizontal au sommet de l'atmosphère. Plus cet angle est élevé, plus le Soleil est proche de l'horizon et plus cet éclairement est faible. En effet, l'éclairement sur un plan horizontal  $E_0^h$  est égal au produit de l'éclairement sur plan normal  $E_{0n}^t$  par le cosinus de l'angle solaire zénithal  $\theta_s^t$ .

Puisque l'angle solaire zénithal dépend de la latitude, l'éclairement sur un plan horizontal dépend lui aussi de la latitude. Ceci est illustré par la (figure I.4), sur laquelle est représentée l'intégrale annuelle de l'éclairement, appelée irradiation annuelle, au sommet de l'atmosphère pour un plan horizontal. On peut observer que cette irradiation ne dépend que

de la latitude : l'irradiation est la même pour une latitude donnée, quelle que soit la longitude. Aux hautes latitudes, le Soleil est souvent bas sur l'horizon, même en plein été ; l'angle solaire zénithal est souvent grand et son cosinus souvent faible. Il s'ensuit que l'éclairement sur un plan horizontal est plus faible à ces hautes latitudes. Au contraire, autour de l'équateur, le Soleil sera haut dans le ciel tous les jours ; l'angle solaire zénithal prendra souvent des valeurs faibles et c'est là que sont observées les plus hautes valeurs d'éclairement au sommet de l'atmosphère. [8]

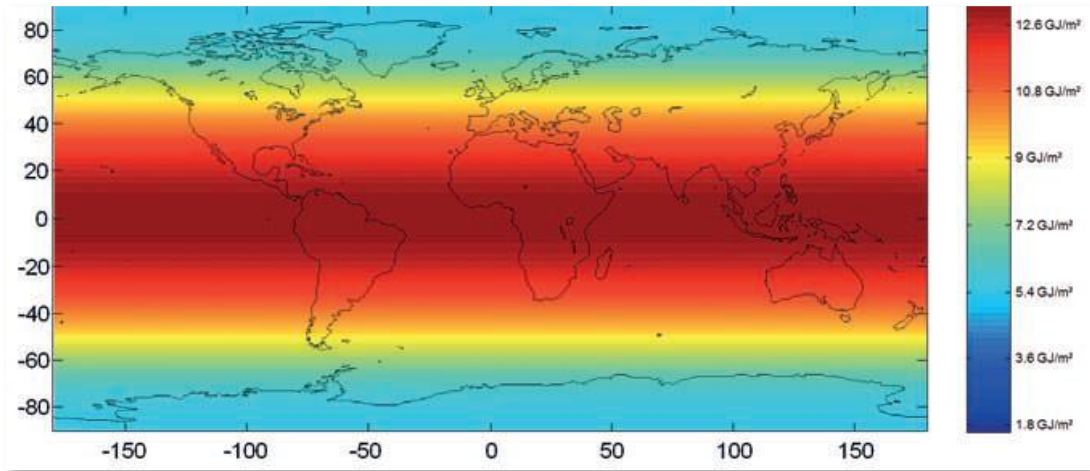


Figure I. 4 : Irradiation annuelle au sommet de l'atmosphère

#### I.4.1 Rayonnements direct, diffus et global

La figure I.5 schématise les effets de l'atmosphère sur les rayons descendants lors de leur traversée descendante vers la surface de la Terre. Même en l'absence de nuages, les rayons solaires sont partiellement absorbés par les gaz et diffusés par les molécules de l'air et les particules en suspension, solides ou liquides, appelés aérosols. La présence de nuages renforce les phénomènes de diffusion. L'absorption et la diffusion dépendent de la longueur d'onde du rayonnement incident. Les molécules de l'air diffusent davantage les petites longueurs d'onde (ultraviolet et bleu) que les grandes (rouge et infrarouge). C'est d'ailleurs pourquoi le ciel clair apparaît bleu hors la direction du Soleil.

Sauf mention contraire, ce texte traite de l'éclairement total, c'est-à-dire l'éclairement intégré sur tout le spectre solaire. Bien que, au sommet de l'atmosphère, les rayons du Soleil ne proviennent que d'une direction, l'atmosphère agit comme un milieu diffusant et le rayonnement au sol provient de toutes les directions. De manière pratique, on distingue les composantes directes et diffuses de l'éclairement reçu au sol (figure I.5).

La composante directe B est l'éclairement provenant de la direction du Soleil et reçu sur un plan horizontal. C'est cette composante qui peut être concentrée dans les systèmes de conversion d'énergie dits à concentration puisque les rayons y sont parallèles, en première approximation. Les systèmes solaires à concentration, thermodynamiques ou

photovoltaïques concentrés, seront de préférence installés dans les régions où cette composante est importante. Éclairement direct ne signifie pas que les photons n'ont pas été diffusés. Il s'agit de l'ensemble des photons, quel que soit le nombre de diffusions que chacun d'eux a subi, qui arrivent sur le plan horizontal en provenance de la direction du Soleil. La composante diffuse D est l'éclairement reçu sur le même plan horizontal depuis toutes les autres directions de la voûte céleste. Par ciel clair, c'est-à dire sans nuage, B est plus élevé que D. L'éclairement global G est la somme des rayonnements direct et diffus,

$G = B + D$ . Les systèmes photovoltaïques convertissent l'éclairement global et fonctionnent très bien même lorsque la composante diffuse domine. [8]

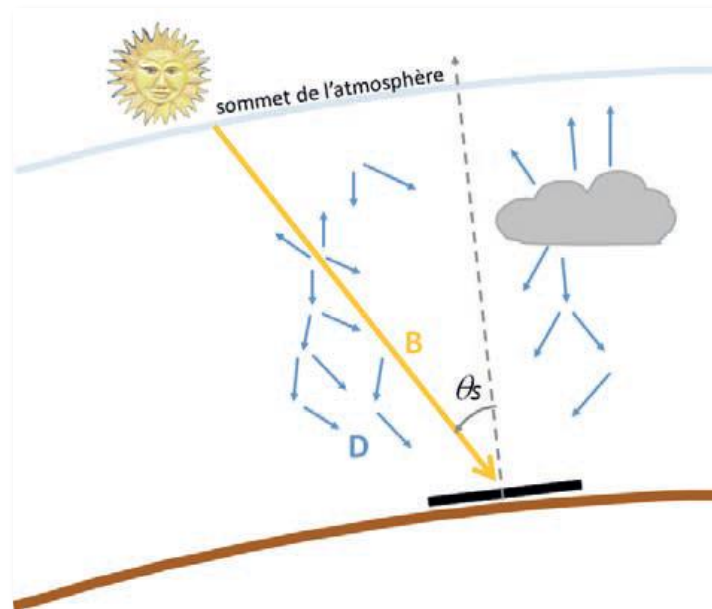


Figure I. 5 : Les composantes directes B et diffuse D de l'éclairement global G reçu au sol sur plan Horizontal,  $G = B + D$ .  $\theta_s$  est l'angle solaire zénithal.

## I.4.2 SUR LES SPECTRES STANDARD

Afin de pouvoir comparer les modules solaires, les conditions d'essai normalisées ont été conçues. Ces conditions incluent le spectre, l'intensité et la température. Les spectres standards voir emplacements génériques. Ils sont avec le préfixe «AM», qui signifie «Masse d'Air» et suivie d'un numéro qui désigne la longueur de la trajectoire dans l'atmosphère par rapport à la longueur plus courte si le soleil était dans l'apex. C'est en gros

$$AM = \frac{1}{\cos(\theta)} \quad \text{Avec l'angle zénithal } \theta$$

Le Comité Internationale Eclairage (CIE) et l'American Society for Testing and Materials (ASTM) publient un certain nombre de spectres. Leurs origines proviennent des mesures réelles, qui sont par la suite déclarés standards. Ils sont également conçus tels que le spectre peut être reproduit artificiellement.

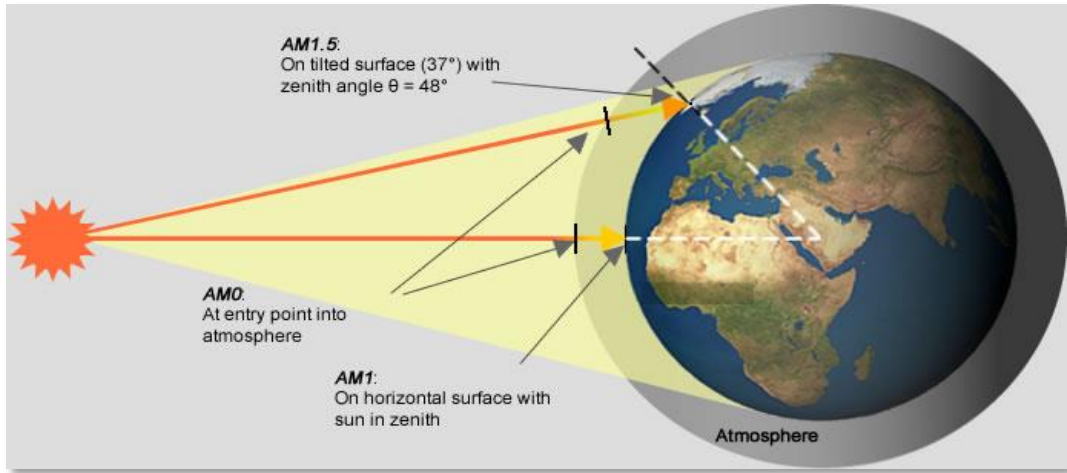


Figure I. 6 : Illustration de la masse d'air AM0, AM1.5

- Spectre solaire AM0 : En 2000, l'American Society for Testing and Materials a mis au point un spectre de référence AM 0 (ASTM E-490) pour utilisation par la communauté aéronautique. Cet éclairage spectral solaire ASTM E490 masse d'Air zéro repose sur des données provenant de missions de la navette spatiale, avion haute altitude, sondages de fusée, satellites, télescopes solaires au sol et modélé l'irradiance spectrale. L'irradiance spectrale intégrée a pour satisfaire à la valeur de la constante solaire, acceptée par la communauté spatiale ; qui est  $1366.1 \text{ W/m}^2$
- Spectre solaire AM 1.5 : il s'agit du spectre de la lumière solaire après qu'elle ait traversé une épaisseur d'air sans nuages correspondant à 1.5 fois l'épaisseur de l'atmosphère. Cette situation se présente en pratique lorsque le ciel est très clair et que le Soleil se trouve à une hauteur de  $41.8^\circ$  au-dessus de l'horizon. [9]

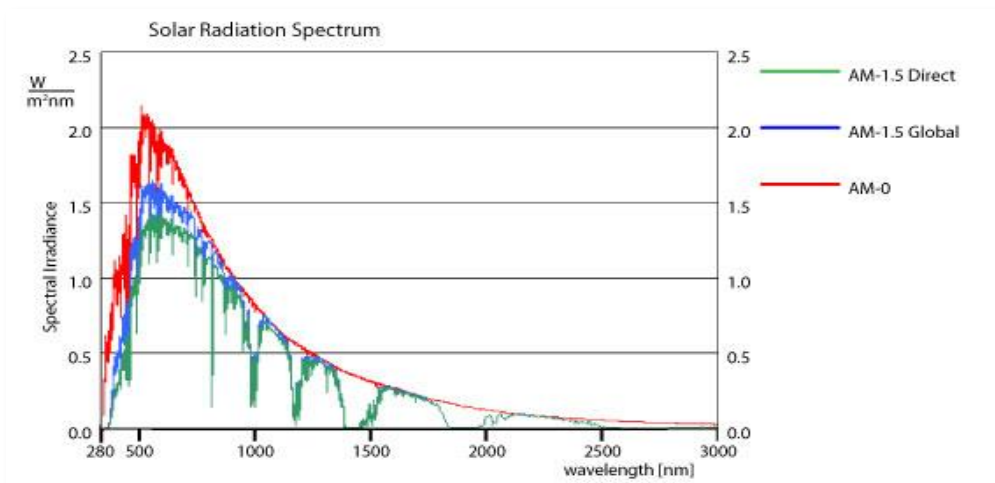


Figure I. 7 : Le spectre du rayonnement solaire

## I.5 Modélisation d'une cellule photovoltaïque

La modélisation d'une cellule Photovoltaïque est un outil essentiel pour analyser, comparer et simuler les caractéristiques Photovoltaïque. C'est un outil inévitable pour étudier et prédire les caractéristiques I-V pour différents types de cellules photovoltaïques. [10,11]

### I.5.1 Modèle à 1 diode

Le circuit équivalent d'un modèle à une seule diode est représenté sur la Figure I.8.

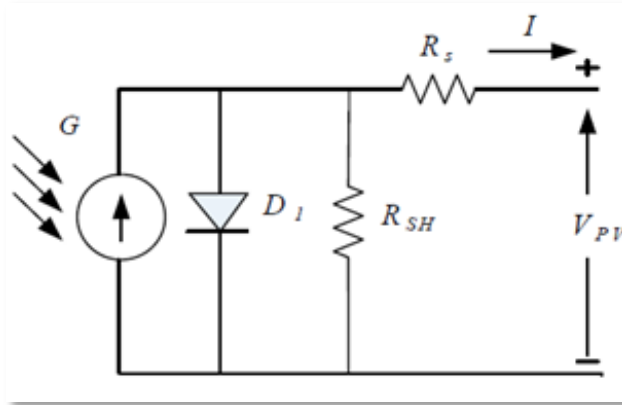


Figure I. 8 : Le model a 1 diode d'une cellule PV

On peut voir que les photo-courants sont générés lorsque la jonction exposée à l'irradiation solaire. L'équivalent électrique pour ce phénomène est une source de courant lumineuse illuminée. La diode 'D1' est simplement l'équivalent électrique des pertes optiques et de recombinaison à la surface du semi-conducteur. 'R<sub>SH</sub>' représente les pertes de fuite alors que 'R<sub>S</sub>' représente la résistance interne offerte par la cellule au flux des électrons. L'équation de courant de sortie pour le modèle peut être écrite comme

$$I = I_{irr} - I_0 \left[ e^{\frac{V + IR_{SH}}{V_T a}} - 1 \right] - \frac{V + IR_{SH}}{R_S}$$

D'où  $I_{irr}$  = Courant d'irradiation ou photo courant généré

$I_0$  = Courant de saturation de la diode

$a$  = Facteur d'idéalité de diode

$V_T$  = Tension thermique



### I.5.2 Modèle à double diode

La seule différence de circuit équivalent entre un modèle à diode unique et un modèle à double diode est la présence de la diode 'D2' qui est connectée en parallèle avec 'D1' et est illustrée sur la Figure I.9.

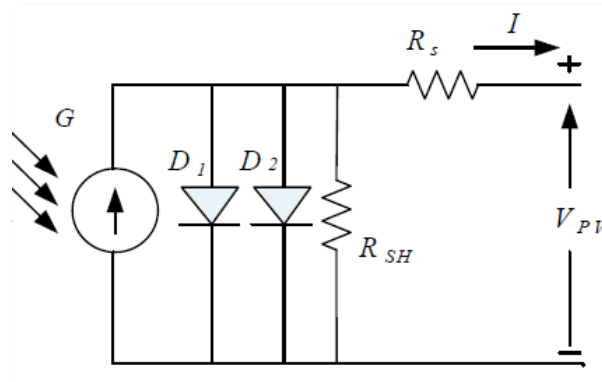


Figure I. 9 : Le model a 2 diodes d'une cellule PV

La présence de la diode D2 confère la précision du modèle en particulier dans des conditions de faible irradiation. La diode D2 compte pour les pertes de recombinaison dans la couche d'appauvrissement. Ces pertes de recombinaison seront significatives dans des niveaux de faible irradiation et lorsque la température de fonctionnement du panneau est élevée.

Comme le modèle a une capacité inhérente à compenser les pertes de recombinaison, ce modèle est généralement préféré au modèle à une seule diode pour les applications sensibles, même s'il est légèrement complexe avec 7 paramètres. En appliquant la loi de courant de Kirchoff à l'un des nœuds, le courant PV de sortie peut être mathématiquement exprimé comme

$$I = I_{irr} - I_{01} \left( e^{\frac{V + IR_{SH}}{N_s a_1 V_T}} - 1 \right) - I_{02} \left( e^{\frac{V + IR_{SH}}{N_s a_1 V_T}} - 1 \right) - \frac{V + IR_{SH}}{R_S}$$

D'où  $I_{01}$  = courant de saturation de D1

$I_{02}$  = courant de saturation de D2

$N_s$  = nombre de cellules connecté en série

## I.6 Les principaux matériaux semi-conducteurs photovoltaïques

Aujourd'hui, avec la forte progression des besoins énergétiques, le monde se dirige vers la généralisation des énergies renouvelables, surtout de fort potentielle, comme



l'énergie photovoltaïque. L'inconvénient de l'énergie photovoltaïque c'est son rendement, et c'est pour ça que les chercheurs et les scientifiques essayent toujours d'améliorer le rendement avec le développement de nouveaux matériaux semi-conducteurs photovoltaïques, on trouve les matériaux semi-conducteurs photovoltaïques dans la quatrième colonne du tableau périodique (avec 4 électrons sur la dernière couche). [12]

																		VIIIA
																		He
																		2
																		4.003
																		10
																		Ne
																		20.183
																		18
																		Ar
																		36
																		Kr
																		83.80
																		54
																		Xe
																		131.30
																		86
																		Rn
																		(222)
																		(210)
																		At
																		(210)
																		85
																		I
																		126.904
																		53
																		Br
																		79.909
																		35
																		Cl
																		35.453
																		17
																		S
																		32.064
																		16
																		O
																		15.999
																		8
																		N
																		14.007
																		7
																		C
																		12.011
																		6
																		B
																		10.811
																		5
																		III A
																		IV A
																		V A
																		VIA
																		VII A
																		18
																		Ar
																		36
																		Kr
																		83.80
																		54
																		Xe
																		131.30
																		86
																		Rn
																		(222)
																		(210)
																		At
																		(210)
																		85
																		I
																		126.904
																		53
																		Br
																		79.909
																		35
																		Cl
																		35.453
																		17
																		S
																		32.064
																		16
																		O
																		15.999
																		8
																		N
																		14.007
																		7
																		C
																		12.011
																		6
																		B
																		10.811
																		5
																		III A
																		IV A
																		V A
																		VIA
																		VII A
																		18
																		Ar
																		36
																		Kr
																		83.80
																		54
																		Xe
																		131.30
																		86
																		Rn
																		(222)
																		(210)
																		At
																		(210)
																		85
																		I
																		126.904
																		53
																		Br
																		79.909
																		35
																		Cl
																		35.453
																		17
																		S
																		32.064
																		16
																		O
																		15.999
																		8
																		N
																		14.007
																		7
																		C
																		12.011
																		6
																		B
																		10.811
																		5
																		III A
																		IV A
																		V A
																		VIA
																		VII A
																		18
																		Ar
																		36
																		Kr
																		83.80
																		54
																		Xe
																		131.30
																		86
																		Rn
																		(222)
																		(210)
																		At
																		(210)
																		85
																		I
																		126.904
																		53
																		Br
																		79.909
																		35
																		Cl
																		35.453
																		17
																		S
																		32.064
																		16
																		O
																		15.999
																		8
																		N
																		14.007
																		7
																		C
																		12.011
																		6
																		B
																		10.811
																		5
																		III A
																		IV A
																		V A
																		VIA
																		VII A
																		18
																		Ar
																		36
																		Kr
																		83.80
																		54
																		Xe
																		131.30
																		86
																		Rn
																		(222)
																		(210)
																		At
																		(210)
																		85
																		I
																		126.904
																		53
																		Br
																		79.909
																		35
																		Cl
																		35.453
																		17
																		S
																		32.064
																		16
																		O
																		15.999
																		8
																		N
																		14.007
																		7
																		C
																		12.011
																		6
																		B
																		10.811
																		5
																		III A
																		IV A
																		V A
																		VIA
																		VII A
																		18
																		Ar
																		36
																		Kr
																		83.80
																		54
																		Xe
																		131.30
																		86
																		Rn
																		(222)
																		(210)
																		At
																		(210)
																		85
																		I
																		126.904
																		53
																		Br
																		79.909
																		35
																		Cl
																		35.453
																		17
																		S
																		32.064
																		16
																		O
																		15.999
																		8
																		N
																		14.007
																		7
																		C
																		12.011
																		6
																		B
																		10.811
																		5
																		III A
																		IV A
																		V A
																		VIA
																		VII A
																		18
																		Ar
																		36
																		Kr
																		83.80
																		54
																		Xe
																		131.30
																		86
																		Rn
																		(222)
																		(210)
																		At
																		(210)
																		85
																		I
																		126.904
																		53
																		Br
																		79.909
																		35
																		Cl
																		35.453
																		17
																		S
																		32.064
																		16
																		O
																		15.999
																		8
																		N
																		14.007
																		7
																		C
																		12.011
																		6
																		B
																		10.811
																		5
																		III A
																		IV A
																		V A
																		VIA
																		VII A
																		18
																		Ar
																		36
																		Kr
																		83.80
																		54
																		Xe
																		131.30
																		86
																		Rn
																		(222)
																		(210)
																		At
																		(210)
																		85
																		I
																		126.904
																		53
																		Br
																		79.909
																		35
																		Cl
																		35.453
																		17
																		S
																		32.064
																		16
																		O
																		15.999
																		8
																		N
																		14.007
																		7
																		C
																		12.011
																		6
																		B
																		10.811
																		5
																		III A
																		IV A
																		V A
																		VIA
																		VII A
																		18
																		Ar
																		36
																		Kr
																		83.80
																		54
																		Xe
																		131.30
																		86
																		Rn
																		(222)
																		(210)
																		At
																		(210)
																		85
																		I
																		126.904
																		53
																		Br
																		79.909
																		35
																		Cl
																		35.453
																		17
																		S
																		32.064
																		16
																		O
																		15.999
																		8
																		N
																		14.007
																		7
																		C
																		12.011
																		6
																		B
																		10.811
																		5
																		III A
																		IV A
																		V A
																		VIA
																		VII A
																		18
																		Ar
																		36
																		Kr
																		83.80
																		54
																		Xe
																		131.30
																		86
																		Rn
																		(222)
																		(210)
																		At
																		(210)
																		85
																		I
																		126.904
																		53
																		Br
																		79.909
																		35
																		Cl
																		35.453
																		17
																		S
																		32.064
																		16
																		O
																		15.999
																		8
																		N
																		14.007
																		7
																		C
																		12.011
																		6
																		B
																		10.811
																		5
																		III A
																		IV A
																		V A
																		VIA
																		VII A
																		18
																		Ar
																		36
																		Kr
																		83.80
																		54
																		Xe
																		131.30
																		86
																		Rn
																		(222)
																		(210)
																		At
																		(210)
																		85
																		I
																		126.904
																		53
																		Br
																		79.909
																		35
																		Cl
																		35.453
																		17
																		S
																		32.064
																		16
																		O
																		15.999
																		8
																		N
																		14.007
																		7
																		C
																		12.011
																		6
																		B
																		10.811
																		5
																		III A
																		IV A
																		V A
																		VIA
																		VII A
																		18
																		Ar
																		36
																		Kr
																		83.80
																		54

tableau périodique des éléments, son symbole chimique est (Si), il est situé respectivement entre le carbone et le germanium, et l'aluminium et le phosphore, c'est un matériau stable et non toxique, le silicium possède des propriétés électriques relativement bonnes permettant d'obtenir des cellules performantes avec un rendement,  $\eta > 20\%$  [1]. Le silicium représente 99% de la production mondiale des matériaux pour le photovoltaïque figure I.12. Il existe sous deux formes : massive (monocristalline et poly-cristalline) et couches minces (amorphe et hétérojonction). Ces deux formes se distinguent par l'épaisseur de la couche mais aussi par la taille des grains [13,14].

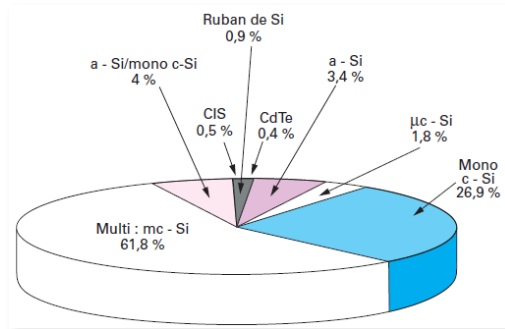


Figure I. 12 : Le silicium dans la production photovoltaïque

### I.6.1.1 Le silicium monocristallin

Le silicium monocristallin (c-Si) présente les meilleures propriétés électroniques grâce à un taux de pureté très élevé, et un réseau cristallin de structure régulière, cette structure uniforme permet aussi d'optimiser les propriétés du transport, les liaisons entre les atomes de silicium monocristallin sont des liaisons covalentes avec une distance interatomique de  $2.35\text{\AA}$  et un paramètre de maille  $a = 5.43\text{\AA}$ , figure I.13.

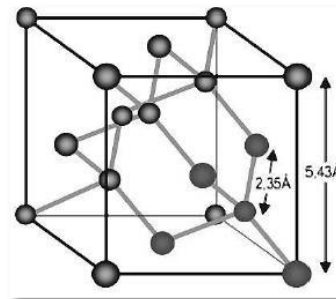


Figure I. 13 : Structure cristallographique du silicium monocristallin

Le silicium cristallin a un gap égal à  $1.12\text{eV}$  à température ambiante [14], et cela correspond à un gap indirect puisque le minimum de la bande de conduction est décalé que le maximum de la bande de valence dans la zone de Brillouin, figure I.14 : illustre le gap indirect et la répartition des niveaux d'énergie du (c-Si)

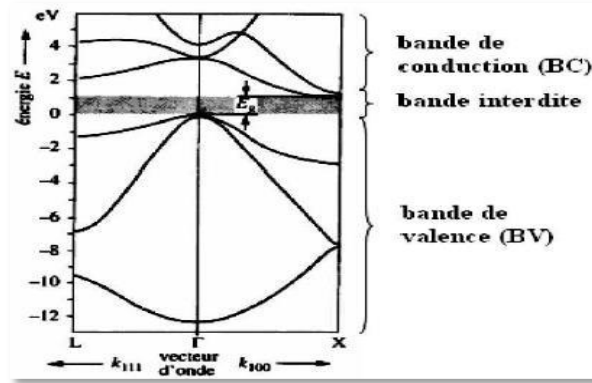


Figure I. 14 : Diagramme des bandes du silicium monocristallin.

### I.6.1.2 Le silicium poly-cristallin

Le silicium poly-cristallin (pc-Si) est le deuxième matériau à base de silicium photovoltaïque. Sa structure se situe entre celle du silicium monocristallin et celle du silicium amorphe (a-Si). Cette structure est constituée de grains, dont la taille varie de quelques centaines de nanomètres à quelques millimètres suivant les conditions d'élaboration. Ces grains sont séparés entre eux par des joints de grains. Les joints de grains délimitant des grains d'orientations différentes constituent des zones désordonnées, souvent assimilées à de a-Si [14].



Figure I. 15 : Barreau de silicium polycristallin

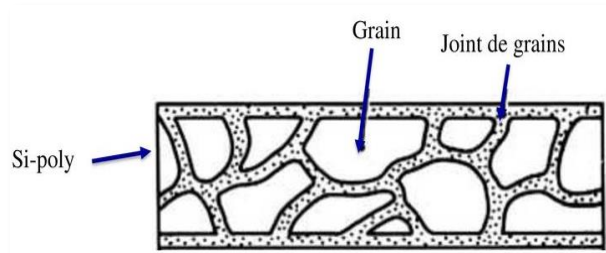


Figure I. 16 : Structure du silicium poly-cristallin

### I.6.1.3 Le silicium amorphe

Le silicium amorphe (a-Si) Une autre forme de silicium utilisé dans le demain photovoltaïque, il présente de nombreux défauts structuraux, bien qu'il y a des recherche intensive envers ce matériau, Les propriétés de transport du matériau sont dégradées par la présence de nombreuses liaisons pendantes qui sont autant des sites de recombinaison efficace des paires électrons-trous dont les liaisons pendantes sont saturées par hydrogénation (cette technique rendre le silicium amorphe acceptable pour des applications photovoltaïques). Ce matériau présente deux avantages majeurs [13, 15, 16] :

- ❖ Un fort coefficient d'absorption (il est quarante fois plus grand que celui du silicium Monocristallin) ;
- ❖ Une faible consommation énergétique durant le cycle de fabrication.

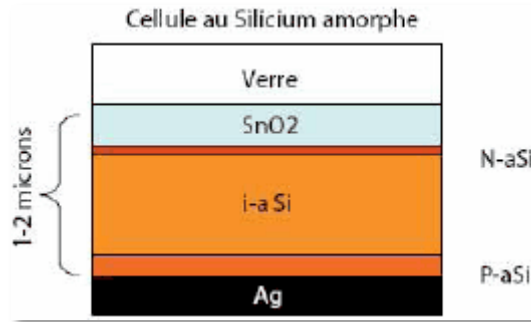


Figure I. 17 : Cellule au silicium amorphe

### I.6.2 Le CdTe le tellure de cadmium

Le tellure de cadmium (CdTe) est un matériau qui a pris sa place dans la production des cellules photovoltaïques, il a une  $E_g$  égale à 1,45eV, il peut être dopé de type N ou de type P, il a une forte absorption optique au-dessus du gap ( $> 10^4 \text{cm}^{-1}$ ), il a été reconnu très tôt comme une bonne couche d'absorption de la cellule solaire [11].

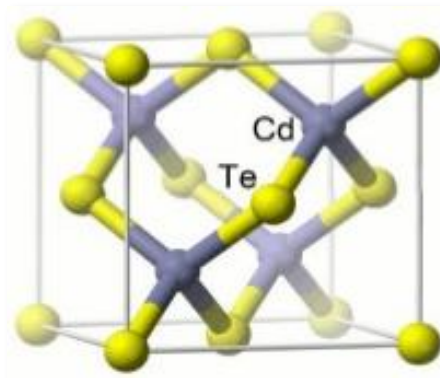


Figure I. 18 : Structure CdTe

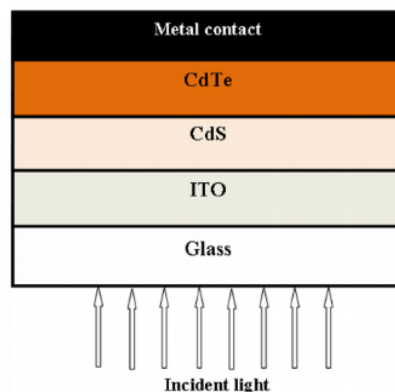


Figure I. 19 : La configuration en couches SC d'une cellule PV à base de CdTe

### I.6.3 GaAs (L'arséniure de gallium)

L'arséniure de gallium présente un gap direct de 1,43eV. Son coefficient d'absorption est très Élevé et la mobilité des porteurs de charge est importante. Les cellules à base de GaAs sont développées principalement dans la filière à base de multi-jonctions pour réaliser des cellules de petites surfaces et donc pour réaliser des cellules solaires à concentration.

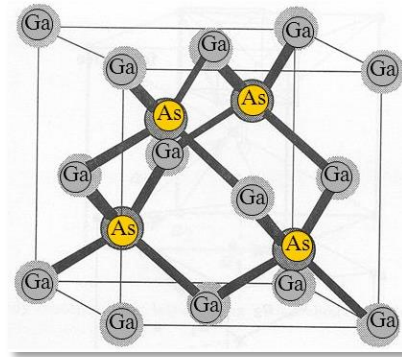


Figure I. 20 : Structure GaAs

Front contact (Ti/Pt/Au)	500 nm
Ohmic <i>p</i> -GaAs	300 nm
Window <i>p</i> -In <sub>0,5</sub> Ga <sub>0,5</sub> P	200 nm
Emitter <i>p</i> -GaAs	500 nm
Base <i>n</i> -GaAs	3500 nm
BSF <i>n</i> -In <sub>0,5</sub> Ga <sub>0,5</sub> P	50 nm
Buffer <i>n</i> -GaAs	200 nm
Substrate <i>n</i> -GaAs	350 μm
Back contact (AuGe/Ni/Au)	500 nm

Figure I. 21 : Configuration en couches SC d'une cellule PV à base de GaAs

### I.6.4 Autres matériaux photovoltaïques

Il existe d'autres matériaux qui sont utilisables et en développement dans le domaine photovoltaïque tel que le Ge, GaN, Polymères et autres matériaux inorganiques (Colorants). Il est important dans une première approche analytique, le rendement absolu est une donnée intéressante mais aussi l'évolution de ce rendement. C'est comme cela, que l'on peut voir que le rendement de la filière silicium n'évolue plus, par contre celui de la filière céramique, plus faible en absolu évolue très fortement.

### I.6.5 CIGS (Le diséléniure de cuivre, indium et gallium)

Le diséléniure de cuivre, indium et gallium (CuIn<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>Se<sub>2</sub>), est l'un des matériaux photovoltaïques en cours de développement. Il a une bande d'énergie intéressante, avec une

énergie de gap  $E_g$  varie entre 1 à 1.7eV, car il permet de réaliser une structure à gradient de gap en fonction de la concentration de gallium ( $Ga_{1-x}$ , ou  $0 < x < 1$ ) [18]. L'ajout de gallium permet d'augmenter la valeur du gap et donc de le rapprocher des énergies correspondant à la lumière visible, cela permet d'améliorer les performances de la cellule construite de ce matériau, l'avantage supplémentaire est que ces matériaux ont un très fort coefficient d'absorption.

## I.7 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre, des généralités sur l'énergie photovoltaïque, d'où nous avons expliqué l'effet photovoltaïque, le rayonnement solaire, le principe des cellules photovoltaïques, les modèles équivalents des cellules, ainsi que les différents matériaux photovoltaïques.

## Chapitre II

### Etude théorique des cellules photovoltaïque à base de CIGS



## II.1 Introduction

Dans ce chapitre, une étude théorique des cellules photovoltaïques à base de CIGS sera présentée où on va aborder la composition de ce matériau, les différentes couches de la cellule CIGS et le développement de cette technologie au niveau de laboratoire et aussi en industrie. D'autre part, une modélisation analytique de la caractéristique J-V sera traitée.

## II.2 Cellule photovoltaïque à base de CIGS

Les cellules solaires Chalcopyrite Cuivre indium gallium (di) sélénure Cu (In, Ga) Se<sub>2</sub> (CIGS) est un matériau photovoltaïque composé de cuivre (Cu), d'indium (In), de gallium (Ga) et de sélénium (Se) -Figure II.1.

Tableau périodique																			
1	1.0079																2	4.0026	
	H																	He	
2	3	4												5	6	7	8	9	10
	Li	Be												B	C	N	O	F	Ne
	6.941	9.0122												10.811	12.011	14.007	15.999	18.998	20.180
	Li	Be												B	C	N	O	F	Ne
	Lithium	Béryllium												Bore	Carbone	Azote	Oxygène	Fluor	Neon
3	11	12												13	14	15	16	17	18
	Na	Mg												Al	Si	P	S	Cl	Ar
	22.990	24.305												26.982	28.086	30.974	32.065	35.453	39.948
	Na	Magnésium												Aluminium	Silicium	Phosphore	Soufre	Chlore	Argon
4	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	
	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
	39.098	40.078	44.956	47.867	50.942	51.996	54.938	55.845	58.933	58.693	63.546	65.38	69.723	72.64	74.922	78.96	79.904	83.8	
	K	Ca	Scandium	Titane	Vanadium	Chrome	Manganèse	Fer	Cobalt	Nickel	Cuivre	Zinc	Gallium	Germanium	Arsenic	Sélénium	Brome	Krypton	
5	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	
	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
	85.468	87.62	88.906	91.224	92.906	95.94	98	101.07	102.91	106.42	107.87	112.41	114.82	118.71	121.76	127.6	126.9	131.29	
	Rb	Sr	Yttrium	Zirconium	Niobium	Molibdène	Technetium	Ruthénium	Rhodium	Palladium	Argent	Cadmium	Indium	Étain	Antimoine	Tellure	Iode	Xénon	
6	55	56	57-71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	
	Cs	Ba	La..	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
	132.91	137.33	138.905	178.49	180.95	183.84	186.21	190.23	192.22	195.08	196.97	200.59	204.38	207.2	208.98	209	210	222	
	Césium	Baryum	Lanthanides	Hafnium	Tantalum	Tungstène	Réhenium	Osmium	Iridium	Platine	Or	Mercure	Thallium	Plomb	Bismuth	Polonium	Astato	Radon	
7	87	88	89-103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	
	Fr	Ra	Ac..	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Uub	Nh	Fl	Mc	Lv	Ts	Og	
	Francium	Radium	Actinides	Réactifs	Dubnium	Seaborgium	Berkelium	Hassium	Moscovium	Darmstadtium	Roentgenium	Copernicium	Nihonium	Flerovium	Moscovium	Livermorium	Tennessine	Oganesson	
	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	
	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu				
	138.91	140.12	140.91	144.24	145	150.36	151.96	157.25	158.93	162.50	164.93	167.26	168.93	173.04	174.97				
	La	Cérite	Praseodyme	Néodyme	Prométhée	Samarium	Europium	Gadolinium	Terbium	Dysprosium	Holmium	Erbium	Thulium	Ytterbium	Lutécium				
	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	
	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr				
	Actinium	Thorium	Protactinium	Uranium	Neptunium	Plutonium	Ameéricium	Curium	Berkelium	Californium	Einsteinium	Fermium	Mendelevium	Nobelium	Lavendulum				
Z																			
Symbole																			
Nom																			

Tableau II. 1 : Tableau périodique indiquant les matériaux S-C du (CIGS)

En fonction de l'énergie de gap de la couche CIGS, Le rendement maximal théorique de cette technologie est d'environ 33% [22], mais le meilleur rendement des cellules solaires à base de CIGS, en (2017), est égal à 22,6% obtenue par Solar Frontier selon le rapport de NREL «National Renewable Energy Laboratory» [23].

Le paramètre le plus important concernant cette technologie est l'énergie de gap  $E_{g\text{ CIGS}}$ , dans la couche Cu (In<sub>1-x</sub> Ga<sub>x</sub>) Se<sub>2</sub> qui varie de 1eV à 1,7eV, avec la variation de « x »,  $x = \text{Ga} / (\text{In} + \text{Ga})$ . On note qu'il y a des structures de la couche CIGS où ils sont conçus avec x constant et d'autres où  $E_{g\text{ CIGS}}$  est un gradient suivant x variant de 0 à 1 [24].

Un deuxième paramètre important qui a une influence sur la performance et le coût de la cellule est l'épaisseur de cette couche. Cette épaisseur est généralement comprise entre 0,5 µm et 5 µm résultant un rendement variant entre 17% et 22% comme mentionné dans la littérature [25,26].



## II.3 Différents couches de la structure CIGS

### II.3.1 Oxyde Transparent Conducteur (TCO)

Dans les cellules photovoltaïques à base de CIGS, la couche d'Oxyde Transparent Conducteur, TCO, est déposée sous forme d'électrode dans surface supérieure. Le matériau le plus prometteur utilisé comme une couche de TCO dans les cellules solaires à base de CIGS est l'oxyde de zinc (ZnO). ZnO est un semi-conducteur avec un gap égal à 3,3eV [27]. Ses principales propriétés avantageuses sont la mobilité électronique élevée et ses excellentes propriétés optiques, principalement une transparence élevée dans une gamme de longueurs d'onde [28-30].

### II.3.2 Couche Tampon

Une couche tampon est généralement inséré entre les couches CIGS et ZnO pour fournir la stabilité structurelle du dispositif et de fixer les conditions électrostatiques à l'intérieur de la couche d'absorption [31]. La plupart des cellules solaires à base de CIGS utilisent CdS comme une couche tampon ayant un gap relativement important,  $E_{g, \text{CdS}}=2,4$  eV, permettant de diminuer les pertes d'absorption concernant les longueurs d'onde du spectre solaire efficaces dans la couche d'absorption. Néanmoins, cette couche CdS provoque généralement des pertes qui sont estimées par J. Sites [32], qui a signalé que jusqu'à 20% du courant de court-circuit ( $J_{\text{SC}}$ ) perdu peut se produire dans des cellules construites avec couche tampon CdS épaisses. Santos et al. dans Réf. [33] soulignent que le remplacement de CdS par une couche tampon avec un gap plus grand peut conduire à réduire les pertes de courant. Cependant, afin d'éviter l'utilisation des couches classiques toxiques de CdS, sulfure de zinc, ZnS ( $E_{g, \text{ZnS}}=3,7\text{eV}$ ) ou Indium Sulfure, InS ( $E_{g, \text{InS}}=2,8\text{eV}$ ) sont actuellement utilisés comme couche tampon en cellules solaires à base de CIGS.

### II.3.3 La couche absorbante (CIGS)

La couche absorbante pour ce type des cellules photovoltaïques est une couche de CIGS.

Une propriété intéressante de ce matériau, CIGS, est la possibilité, dans certains procédés de fabrication, de faire varier le rapport «  $x$  », qui égal à  $\text{Ga}/(\text{In} + \text{Ga})$ , produisant des différentes profils du gap. Ce profilage de gap est l'un des propriétés les plus caractérisés de la couche de CIGS [21,24, 34,35].

Autre avantage de CIGS, ces composés sont des semi-conducteurs à bande interdite directe qui minimisent le besoin de longues longueurs de diffusion des porteurs minoritaires. De tels semi-conducteurs de type p à coefficient d'absorption élevé sont les matériaux absorbants prometteurs pour la technologie photovoltaïque à couches minces [36].

## II.4 Etat de l'art

Le premier panneau photovoltaïque a été construit en 1954 par les laboratoires Bell. Il a été appelé batterie solaire, avec un rendement de 6%, mais c'était juste un effet d'annonce car il était trop coûteux à produire.

L'étude de cellules solaires à base de CIGS a débuté dans les années 1970 [37]. En 1975, le laboratoire Bell a démontré un rendement de 12% pour une cellule solaire CuInSe<sub>2</sub>/CdS [38].

### II.4.1 Développement des cellules CIGS

Le développement des cellules solaire à base de CIGS a commencé en 1975 par le laboratoire Bell, ensuite plusieurs laboratoires et compagnies ont suivi le développement de ce type de cellules.

Voici une liste des différents développeurs et les meilleurs rendements obtenue des cellules de recherche (CIGS) entre 1970 et 2017 selon NREL [23] :

- Boeing en 1980 avec un rendement de 7 %
- Boeing en 1981 avec un rendement de 10 %
- Boeing en 1985 avec un rendement de 10.5 %
- Arco en 1986 avec un rendement de 11 %
- Arco en 1989 avec un rendement de 12 %
- Boeing entre 1989-1992 avec un rendement de 12.5 ~ 13 %
- NREL en 1993 avec un rendement de 14%
- NREL en 1995 avec un rendement de 17%
- NREL entre 2000-2007 avec un rendement entre 19 % - 20%
- ZSW en 2010 avec un rendement de 21%
- NREL en 2013 avec un rendement de 21.3 %
- ZSW en 2014 avec un rendement de 22 %
- ZSW en 2016 avec un rendement de 22.3%

### II.4.2 CIGS dans la recherche scientifique

Cette filière de CIGS a attiré l'intention de plusieurs chercheurs dont focalisés leurs projets de recherche où on peut trouver plusieurs publications scientifiques qui traitent l'optimisation des performances des cellules photovoltaïques à base de CIGS dans des revues exceptionnels (Nature et Science) et aussi dans des journaux classe A (Elsevier, IOP, AIP...).

Dans ce paragraphe, on va présenter cinq articles qui traitent cette filière.

Jakapan Chantana et al, en mars 2014, pour un article publié sur la revue *Japanese Journal of Applied Physics* 53 (IOP), sous le titre "Multi layer precursor method for Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> solar cells fabricated on flexible substrates" ont étudié les cellules solaire fabriqué sur des substrats flexibles par la méthode de précurseur multicouche pour les cellules à base de CIGS[43].

M. D. Heinemann et al, en avril 2017, pour un article publié aussi dans la revue *Nature*, ont étudié l'évolution des propriétés optoélectroniques au cours de la formation du film de semi-conducteurs complexes, l'étude a été basée sur la variation de la concentration du Cu, d'où le rendement obtenue et de 22.6 % [40].

D'autre part Johannes Löckinger et al, en septembre 2017, pour un article publié sur la revue *Solar Energy Materials and Solar Cells* (Sciencedirect), ont étudié l'effet de TiO<sub>2</sub> as intermediate buffer layer in Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> solar cells, l'étude a été basé sur l'application TiO<sub>2</sub> comme couche fenêtre sur les cellule couches minces à base de Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>, ou ils ont obtenu un rendement de 22.6 % [42].

Dans la revue (*Nature*), S. A. Jensen et al, en octobre 2017 ont étudié le phénomène Optiquement induite métastabilité en Cu (In, Ga) Se<sub>2</sub>, l'étude a été basé sur les effets de la métastabilité induites par la lumière dans des films polycristallins CIGS, avec des lacunes de bande d' $E_g = 1.10 - 1,12$  eV, et  $E_g = 1,50$  eV, respectivement, ou ils ont obtenu un rendement de 22.5 % [41].

En février 2018, Diego Colombara et al, pour un article publié dans la revue (*Nature*), ont étudié le phénomène ou le Sodium améliore l'inter-diffusion indium-gallium en absorbeurs photovoltaïque de cuivre indium gallium di sélénium, l'étude a été basée sur la variation de la bande interdite qui peut être réglé d'environ 1,0 eV (CIS) à environ 1,7 eV (CGS), ou ils ont obtenu un rendement de 22.9 % [39].

### II.5 Modélisation analytique de la caractéristique J-V (jonction N-P)

Cette partie, basée sur les travaux référencés [44, 45,46], nous permet de présenter la caractéristique courant-tension d'une cellule solaire à base d'une jonction semi-conductrice. La jonction entre un semi-conducteur de type n et de type p est appelée une jonction de N-P et est montrée sur le figure II.2, la jonction étant représentée en blanc dans cette représentation très schématique et simplifiée.

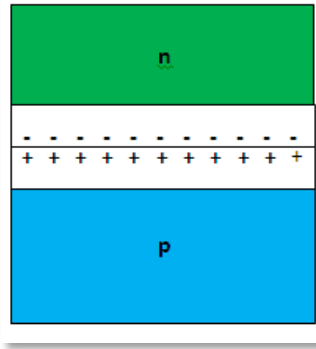


Figure II. 1 : Structure de la jonction n-p.

Le courant de diffusion est provoqué par la variation de la concentration des électrons et des trous à travers la jonction. Les expressions de cette densité de courant de diffusion pour les électrons et les trous s'écrivent :

$$J_p(diff) = -qD_p \frac{dp(x)}{dx} \quad (II.1)$$

$$J_n(diff) = qD_n \frac{dn(x)}{dx} \quad (II.2)$$

Avec  $q$  est la charge d'électron,  $D_n$  et  $D_p$  sont les coefficients de diffusions d'électron et de trou.

Sur le plan énergétique, la jonction correspond à une région où les électrons libres de la zone N se recombinent avec les trous de la zone P créant ainsi une absence de porteurs de charge libres. Cette zone dans laquelle produit les recombinaisons est appelée la zone de charge d'espaces (ZCE), possédant une largeur  $W$ . On la retrouve dans le diagramme des énergies représenté dans la figure II.3.

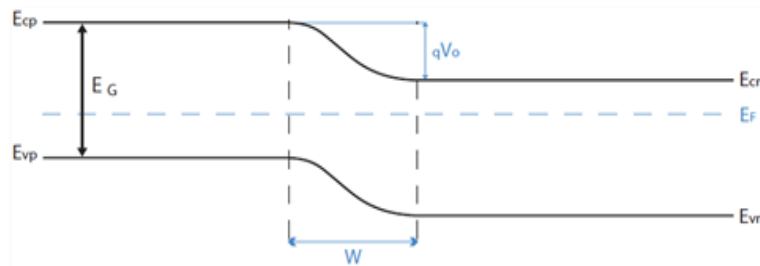


Figure II. 2 : Diagramme des bandes dans la jonction n-p.

Les charges forment un champ électrique  $E$  induisant un courant de dérive « drift current » dans la direction opposée du courant de diffusion. Les expressions pour la densité de courant de dérive dans la direction  $x$  pour les électrons et les trous sont données comme :

$$J_n(drift) = q\mu_n n(x)\xi(x) \quad (II.3)$$

$$J_p(drift) = q\mu_p p(x)\xi(x) \quad (II.4)$$

A l'équilibre thermique, le courant possède une valeur nulle à travers la jonction, c'est-à-dire :

$$J_p(drift) + J_p(diff) = 0 \quad \text{Et} \quad J_n(drift) + J_n(diff) = 0 \quad (II.5)$$

La différence de potentiel  $V_0$  donnée par l'équation :

$$V_0 = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_a N_d}{n_i^2}\right) \quad (II.6)$$

Avec 
$$\frac{D}{\mu} = \frac{kT}{q} \quad (II.7)$$

$$\xi(x) = -\frac{dV(x)}{dx} = \frac{1}{q} \frac{dE_i}{dx} \quad (II.8)$$

Toujours dans le cas de l'équilibre, le niveau de Fermi est constant donc nous pouvons écrire :

$$\frac{dE_F}{dx} = 0 \quad (II.9)$$

Lorsque la jonction est illuminée, les conditions d'équilibre n'existent plus et il y a photo-génération d'un courant, dit courant photovoltaïque, dépendant de l'intensité et du spectre lumineux de la lumière incidente et des propriétés physiques et électroniques de la jonction N-P.

Nous allons maintenant donner une expression décrivant la caractéristique courant-tension de la cellule solaire à l'équilibre, c'est à dire une expression indépendante du temps, correspondant au cas où la cellule reçoit une illumination constante.

Nous utilisons pour cela l'approximation linéaire de recombinaison c.-à-d. que la recombinaison varie linéairement avec les densités de porteurs de charge minoritaires, et seulement la recombinaison linéaire des densités de porteur de charge seront considérées. Afin de justifier cette approximation, considérons les tensions et courants en présence à l'équilibre et hors équilibre.

A l'équilibre, la différence de potentiel à travers la région ZCE est définie par la grandeur  $V_0$ . En présence d'une tension de polarisation  $V$  à travers la jonction, le potentiel résultant changera en  $(V_0 - V)$ . Cette diminution du champ électrique en dehors de la région ZCE fait apparaître le courant de diffusion. En dehors de la ZCE, les porteurs de charge majoritaires varient peu par rapport à leurs concentrations d'équilibre. Ceci signifie que seulement le courant de diffusion des porteurs de minorité déterminera le courant.

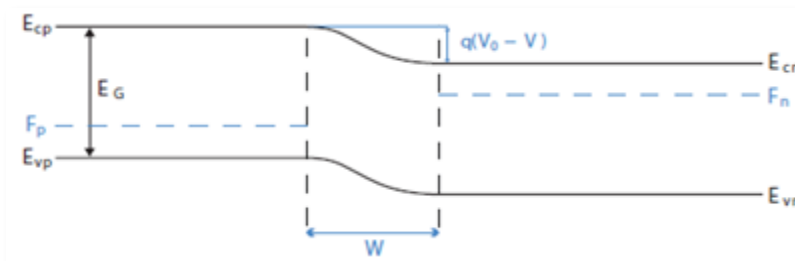


Figure II. 3 : Diagramme des bandes de la jonction n-p polarisée.

Afin d'établir les paramètres de conduction, nous considérons que la largeur de la région ZCE dans la couche n est  $w_n$  et la largeur de la région ZCE dans la couche p est  $w_p$ . Nous considérons également que la jonction est illuminée par un flux de photon  $F(E)$  générant une tension au-dessus de la jonction  $V$ , et que la densité de courant des porteurs de charge minoritaires prend les valeurs  $J_p(x)$  et  $J_n(x)$ , avec  $x$  la profondeur dans les couches p et n.

Pour calculer le courant de diffusion de l'équation (II.1) et (II.2), il est nécessaire de connaître la concentration en porteurs de charge minoritaires dans la couche n et p. Ces concentrations peuvent être trouvées avec les deux équations de continuité, respectivement pour les trous et pour les électrons, à savoir :

$$\frac{\partial \Delta p}{\partial t} = -\frac{1}{q} \frac{\partial j_p}{\partial x} + (G_p - U_p) \quad (\text{Pour } x < -w_n) \quad (\text{II.10})$$

$$\frac{\partial \Delta n}{\partial t} = -\frac{1}{q} \frac{\partial j_n}{\partial x} + (G_n - U_n) \quad (\text{Pour } x > w_p) \quad (\text{II.11})$$

Avec  $G$ , le taux de génération et  $R$ , le taux de recombinaison.

Dans l'état d'équilibre seulement le courant de diffusion et la recombinaison linéaire sont considérés, l'équation (II.10) et (II.11) peuvent être écrites respectivement dans les couches n et p, par :

$$0 = \frac{d^2 \Delta p}{dx^2} - \frac{\Delta p}{L_p^2} + \frac{\int g(E,x)dE}{D_p} \quad (\text{Pour } x < -w_n) \quad (\text{II.12})$$

$$0 = \frac{d^2 \Delta n}{dx^2} - \frac{\Delta n}{L_n^2} + \frac{\int g(E,x)dE}{D_n} \quad (\text{Pour } x > w_p) \quad (\text{II.13})$$

Avec  $L_p^2 = D_p \tau_p$  et  $L_n^2 = D_n \tau_n$  les longueurs de diffusion et avec  $\tau_p$  et  $\tau_n$  les durées de vies des trous et des électrons.

Les concentrations d'équilibre  $p_0$  et  $n_0$  sont assumées constantes avec  $x$ . Aux frontières de la région ZCE les concentrations de trou et d'électron s'expriment alors par :

$$\Delta p = \frac{n_i^2}{N_d} (e^{qV/kT} - 1) \quad (\text{Pour } x < -w_n) \quad (\text{II.14})$$

$$\Delta n = \frac{n_i^2}{N_a} (e^{qV/kT} - 1) \quad (\text{Pour } x > w_p) \quad (\text{II.15})$$

Dans ces équations, nous considérons que le potentiel au-dessus de la région ZCE est donné par  $V_0 - V$  et que les concentrations en porteurs de charge majoritaires sont approximativement constantes.

Sur les surfaces, nous pouvons déduire à partir des équations (II.3) et (II.4), les vitesses de recombinaison  $S_p$  et  $S_n$  donnant les conditions aux limites, soit respectivement pour les deux zones :

$$D_p \frac{d\Delta p}{dx} = S_p \Delta p \quad (\text{Pour } x < -w_n) \quad (\text{II.16})$$

$$-D_n \frac{d\Delta n}{dx} = S_n \Delta n \quad (\text{Pour } x > w_p) \quad (\text{II.17})$$

Les concentrations de porteurs de charge minoritaires seront obtenues à partir des équations de continuité ainsi que les conditions aux limites données dans les équations (II.14 à II.17). Par conséquent, ils conduisent à des densités de courant de diffusion pour les électrons et les trous à la frontière de la région ZCE :

$$J_p(-w_n) = - \int \left( \frac{q(1-R)F\alpha L_p}{\alpha^2 L_p^2 - 1} \right) \times \left( \frac{(K_p + \alpha L_p)e^{-\alpha l_n} - \left( K_p \cosh\left(\frac{l_n}{L_p}\right) + \sinh\left(\frac{l_n}{L_p}\right) \right)}{K_p \sinh\left(\frac{l_n}{L_p}\right) + \cosh\left(\frac{l_n}{L_p}\right)} - \alpha L_p e^{-\alpha l_n} \right) dE + \frac{qD_p p_0 (e^{qV/kT} - 1)}{L_p} \left( \frac{K_p \cosh\left(\frac{l_n}{L_p}\right) + \sinh\left(\frac{l_n}{L_p}\right)}{K_p \sinh\left(\frac{l_n}{L_p}\right) + \cosh\left(\frac{l_n}{L_p}\right)} \right) \quad (\text{II.18})$$

$$J_n(w_p) = - \int \left( \frac{q(1-R)F\alpha L_n}{\alpha^2 L_n^2 - 1} e^{-\alpha(x_n + w_p)} \right) \times \left( \frac{(K_n + \alpha L_n)e^{-\alpha l_p} - \left( K_n \cosh\left(\frac{l_p}{L_n}\right) + \sinh\left(\frac{l_p}{L_n}\right) \right)}{K_n \sinh\left(\frac{l_p}{L_n}\right) + \cosh\left(\frac{l_p}{L_n}\right)} - \alpha L_n \right) dE + \frac{qD_n p_0 (e^{qV/kT} - 1)}{L_n} \left( \frac{K_n \cosh\left(\frac{l_p}{L_n}\right) + \sinh\left(\frac{l_p}{L_n}\right)}{K_n \sinh\left(\frac{l_p}{L_n}\right) + \cosh\left(\frac{l_p}{L_n}\right)} \right) \quad (\text{II.19})$$

Avec  $K_n = \frac{S_n L_n}{D_n}$ ,  $K_p = \frac{S_p L_p}{D_p}$ ,  $l_p = x_p - w_p$  et  $l_n = x_n - w_n$ ,  $A$  le coefficient d'absorption,  $R$  : représente le coefficient de réflexion et  $F$  le flux des photons.

La densité totale de courant dans la cellule solaire est donnée comme la somme des densités de courant de trou et d'électron en un point spécifique de la cellule, ce que l'on peut exprimer par :

$$J = -J_p(-w_n) - J_n(-w_n) = -J_p(-w_n) - J_n(w_p) - J_{ZCE} \quad (\text{II.20})$$

Dans cette équation, le signe est positif quand le courant traverse la jonction de n vers p, signifiant alors un photo-courant positif.  $J_{ZCE}$  est la densité de courant nette résultant de la génération et de la recombinaison dans la région ZCE.

En effet, la densité totale de courant est la somme signée du photo-courant  $J_{ph}$  qui est fonction de la densité de puissance de la lumière incidente et du courant d'obscurité  $J_{obs}(V)$  qu'est en fonction de la tension appliquée, ce qui s'exprime par :

$$J = J_{ph} - J_{obs}(V) \quad (II.21)$$

Le procédé de domination de recombinaison est considéré par les états non-radiatifs de piège de cuvette de recombinaison donnés par l'expression de Shockley Read Hall. Les concentrations d'électron et de trou varient par la région ZCE et peuvent avoir la grandeur semblable. En supposant que la force intrinsèque de Fermi  $E_i$  varie linéairement à travers la région ZCE et que la différence entre les niveaux de quasi-Fermi  $F_n$  et  $F_p$  est constante et égale au  $qV$ , la densité de courant de recombinaison dans la région ZCE est prise comme maximum

$$J_{SRH,dep} = \frac{qn_i(w_n+w_p)}{\sqrt{\tau_{p,SRH}\tau_{n,SRH}}} \frac{\pi \sinh\left(\frac{qV}{2kT}\right)}{\frac{q(V_0-V)}{kT}} \quad (II.22)$$

La densité de courant de génération dans la région ZCE est trouvée en intégrant le taux de génération au-dessus de cette région avec le résultat

$$J_{gen,dep} = \int q(1-R)F e^{-\alpha L_n} \left(1 - e^{-\alpha(w_n+w_p)}\right) dE \quad (II.23)$$

$$J_{dep} = J_{dep,0} \frac{\pi \sinh\left(\frac{qV}{2kT}\right)}{\frac{q(V_0-V)}{kT}} - \int q(1-R)F e^{-\alpha L_n} \left(1 - e^{-\alpha(w_n+w_p)}\right) dE \quad (II.24)$$

La densité de courant de recombinaison dans la région ZCE est approximée :

$$J_{SRH,dep} \approx J_{dep,0} \left(e^{\frac{qV}{2kT}} - 1\right) \quad (II.25)$$

$$\text{Avec} \quad J_{dep,0} = \frac{qn_i(w_n+w_p)}{\sqrt{\tau_{n,SRH}\tau_{p,SRH}}} \quad (II.26)$$

$$\text{Donc} \quad J = J_{ph} - J_0 \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1\right) - J_{dep,0} \left(e^{\frac{qV}{2kT}} - 1\right) \quad (II.27)$$

De l'équation (II.27) la cellule solaire peut être modélisée comme un circuit se composant d'une source courante idéale avec la densité de courant  $J_{ph}$  et de deux diodes parallèlement aux facteurs d'idéalité égaux à 1 et à 2 de même que peut vu sur la figure II.5 [47].

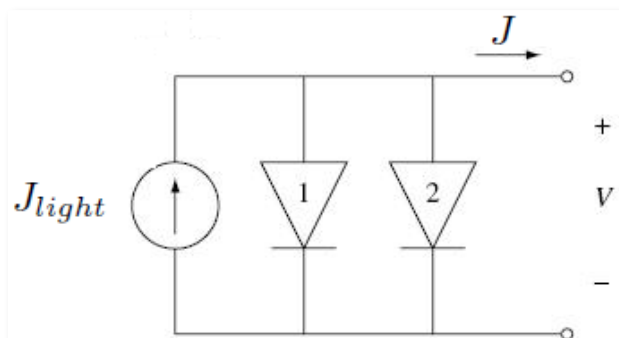


Figure II. 4 Le circuit électrique équivalent.

L'équation (II.27) peut être réécrite en présentant le facteur  $A_0$  d'idéalité de diode



$$J = J_{ph} - J_{obs} \left( e^{\frac{qV}{A_0 kT}} - 1 \right) \quad (II.28)$$

$A_0$  a une valeur entre 1 et 2 et varie avec la qualité de tension et de matériel. Quand la recombinaison non-radiative dans la région ZCE domine,  $A_0$  a une valeur approximativement égale à 2, alors que quand la recombinaison dans la région ZCE n'est pas aussi importante que la recombinaison dans les couches p et n,  $A_0$  a une valeur de 1.

Souvent, seulement la diode sur la figure II.5 avec le facteur d'idéalité égal à 1 est considérée, signifiant que la recombinaison dans la région ZCE n'est pas incluse. Ceci donne le comportement courant-tension. Là quatre aspects importants sont identifiés, cela est la densité de courant de court-circuit  $J_{sc}$ , la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  et la densité de courant  $J_m$  et la tension  $V_m$  qui donne la densité de puissance maximum  $P_m = J_m \times V_m$ . La densité de courant de court-circuit peut être trouvée en plaçant  $V$  égale à 0 dans l'équation (II.28) et est égale à la densité photo-courant  $J_{ph}$ . La tension de circuit ouvert peut être trouvée en plaçant  $J$  égal à 0 dans l'équation (II.28) et est égale à

$$V_{co} = \frac{A_0 kT}{q} \ln \left( \frac{J_{ph}}{J_{obs}} + 1 \right) \quad (II.29)$$

## II.6 Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté une étude théorique qui traite les cellules photovoltaïques à base de CIGS où on a essayé de présenter tout qui concerne cette technologie (Définition, composition, développement et modélisation analytique de la caractéristique J-V d'une jonction N-P).

Pour résumer, le rendement actuel des cellules photovoltaïques à base de CIGS est loin de le rendement théorique maximal par 11%, donc il reste des points à améliorer ; pour cela on va traiter le chapitre III à but de bien maitriser cette filière et aussi d'optimiser les performances de ces cellules photovoltaïques.

## Chapitre III

# Modélisation numérique des performances des cellules photovoltaïques à base de GIGS

### III.1 Introduction

Le semi-conducteur  $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)\text{Se}_2$ , noté CIGS, est l'un des matériaux les plus prometteurs pour les cellules photovoltaïques à couches minces due à son coefficient d'absorption élevé, son gap direct, et ses performances stables à long terme [19-20].

En fonction de l'énergie de gap de la couche CIGS, le rendement maximal théorique de cette technologie est d'environ 33% [22], mais le meilleur rendement des cellules photovoltaïques à base de CIGS, est égal à 22,6% obtenue par Solar Frontier selon le rapport du National Renewable Energy Laboratory (NREL) [23].

Dans la littérature, les cellules photovoltaïques à base de CIGS sont constituées de trois principales couches : la couche absorbante CIGS, la couche tampon à base de CdS et la couche fenêtre ZnO.

Dans ce chapitre, nous analysons, dans une première partie, par simulation avec le programme SCAPS [Annexes], l'impact des différents paramètres sur les performances ( $V_{oc}$ ,  $J_{sc}$ , FF et  $\eta$ ) de la cellule étudiée avec un rapport constant  $\text{Ga}/(\text{In}+\text{Ga})$ .

L'effet de la concentration d'Indium sur les performances d'une cellule photovoltaïque à base de CIGS, qui est notre principal objectif, sera traité dans la deuxième partie de ce chapitre.

### III.2 Structure et paramètres de la cellule CIGS

La Figure III. 1 représente la structure de notre cellule de référence [21, 24, 34,35].

La structure initiale définie dans SCAPS [Annexes] est constituée des couches suivantes :

- Une couche ZnO « TCO ».
- Une couche CdS « L'émetteur ».
- Une couche CIGS « L'absorbeur ».

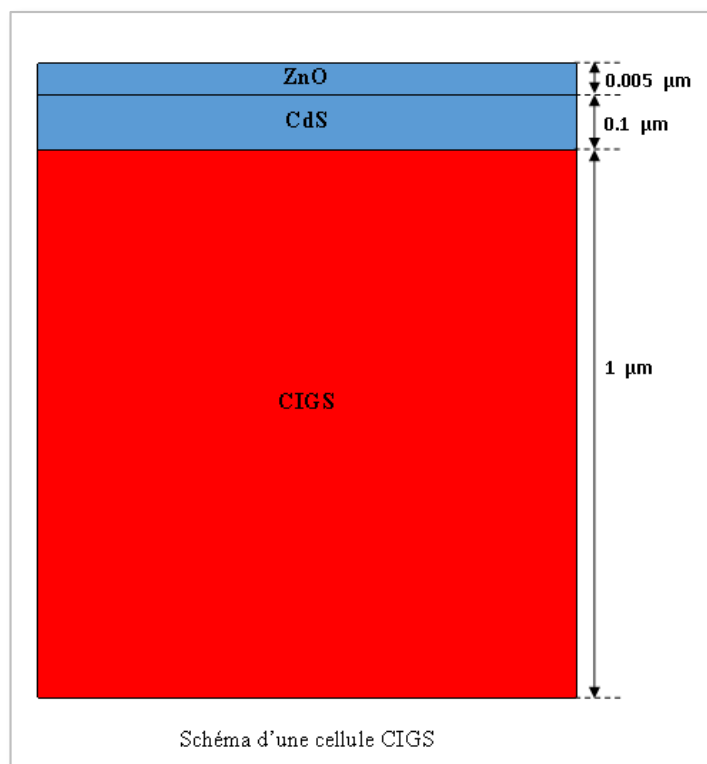


Figure III. 1 : Schéma d'une cellule CIGS

Le tableau III.1 Représente les paramètres de la cellule avec lesquelles nous allons commencer notre travail.

Tableau III 1 : Différents paramètres retenus pour la cellule CIGS dans la simulation

Paramètre	ZnO	CdS	CIGS
Épaisseur (µm)	0,005	0,1	1
Energie de gap (eV)	3,3	2,4	1,1
Affinité électronique	4,5	4,5	4,5
Permittivité diélectrique	9	10	13,6
Densité efficace des états CB (cm-3)	$3,00 \cdot 10^{+18}$	$2,00 \cdot 10^{+18}$	$7,00 \cdot 10^{+17}$
Densité efficace des états VB (cm-3)	$1,70 \cdot 10^{+19}$	$9,10 \cdot 10^{+19}$	$1,50 \cdot 10^{+19}$
Vitesse électronique (cm/s)	$1,00 \cdot 10^{+07}$	$1,00 \cdot 10^{+07}$	$1,00 \cdot 10^{+07}$
Vitesse des trous (cm/s)	$1,00 \cdot 10^{+07}$	$1,00 \cdot 10^{+07}$	$1,00 \cdot 10^{+07}$
Mobilité électronique (cm <sup>2</sup> /Vs)	$1,00 \cdot 10^{+02}$	$7,20 \cdot 10^{+01}$	$1,00 \cdot 10^{+02}$
Mobilité des trous (cm <sup>2</sup> /Vs)	$2,50 \cdot 10^{+01}$	$2,00 \cdot 10^{+01}$	$1,25 \cdot 10^{+01}$
Densité des donateurs ND (cm-3)	$1,00 \cdot 10^{+17}$	$1,00 \cdot 10^{+17}$	/
Densité des accepteurs NA (cm-3)	/	/	$1,00 \cdot 10^{+16}$

Pour toutes les structures, la résistance série «  $R_S$  » été considérée égales à  $0,36 \Omega$  et la résistance shunt «  $R_P$  » été considérée égales à  $1000 \Omega.cm^2$ . Cette étude a été effectuée pour un spectre solaire AM.1.5 et à une température fixée à  $T=300K$ .

### III.2.1 L'absorption pour chaque couche

Les figures III.2, III.3 et III.4, représentent les courbes d'absorption des couches ZnO, CdS et CIGS, respectivement.

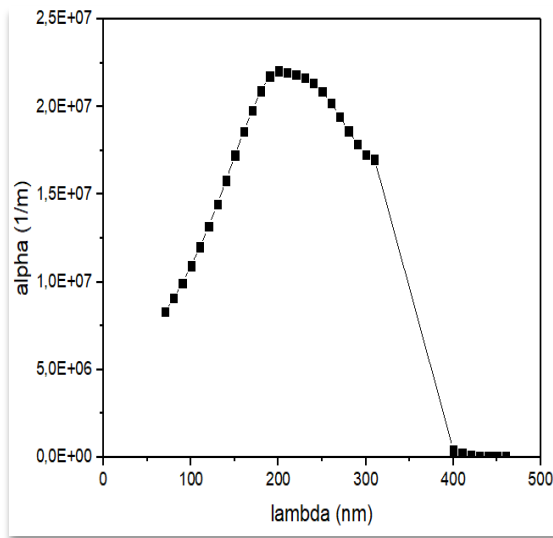


Figure III. 2 : La courbe d'absorption de ZnO [48]

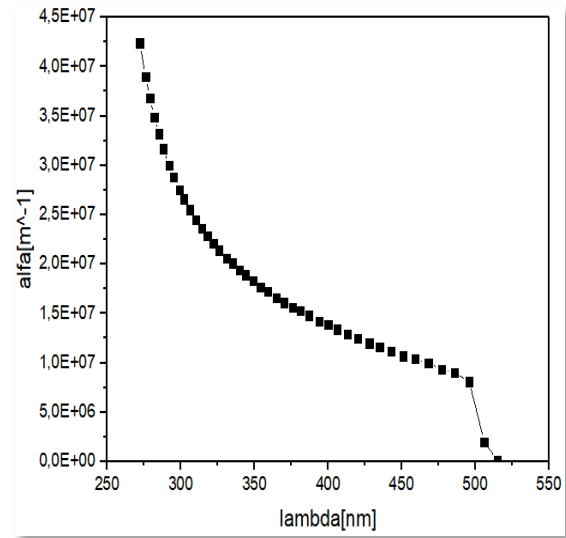


Figure III.3 : La courbe d'absorption du CdS[49]

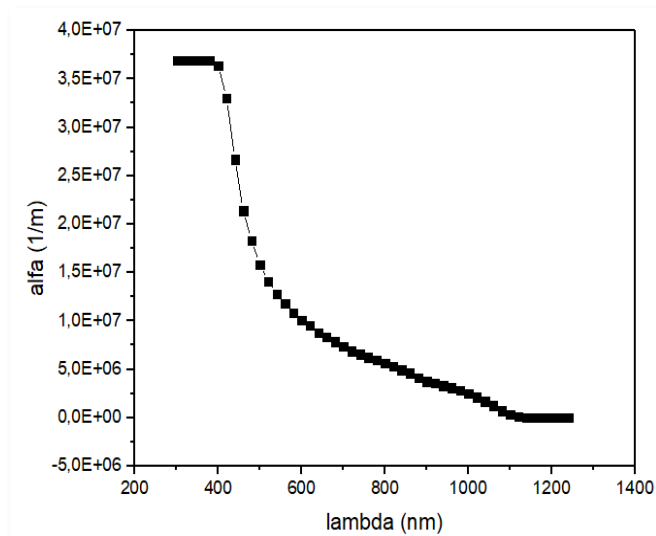


Figure III. 4: La courbe d'absorption du GIGS [50]

### III.3 Caractéristique J-V d'une cellule CIGS

Chaque cellule photovoltaïque a sa propre caractéristique J-V.

La caractéristique J-V de notre cellule, Figure III. 5, a été tracé à partir des paramètres indiqué dans le tableau III.1.

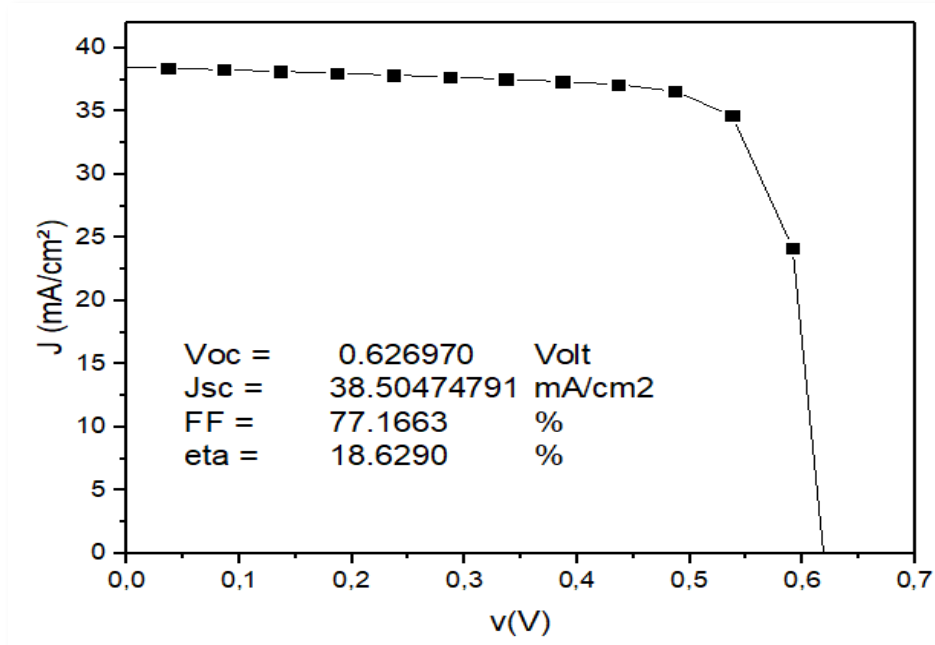


Figure III. 5 : Caractéristique J-V d'une cellule CIGS

A partir de la figure III.5, notre cellule caractérise par une tension de circuit ouvert  $V_{CO}=0.62$  V, une densité de courant de court-circuit  $J_{SC}=38.50$  mA/cm<sup>2</sup>, un facteur de forme  $FF=77.16$  % et un rendement  $\eta=18.62$  % sous un spectre AM 1.5.

Dans ce qui suit, nous présenterons les résultats d'une optimisation de ces paramètres obtenus en changeant l'épaisseur et la concentration de dopant de chaque couche.

### III.4 Optimisation des performances de CIGS

#### III.4.1 L'influence de l'épaisseur des couches sur les performances de la cellule CIGS.

Le gap ( $E_g$ ) de CIGS peut varier entre 1eV et 1,7eV. Dans ce qui suit, nous considérons  $E_{g,CIGS}=1,1$ eV [32] en tant que valeur standard qui sera utilisée dans cette première partie

La variation de  $V_{OC}$ ,  $J_{SC}$ ,  $FF$  et  $\eta$  en fonction des épaisseurs de la couche fenêtre, la couche émettrice et de la couche absorbante sont indiquées sur les figures III.6, III.7 et III.8.

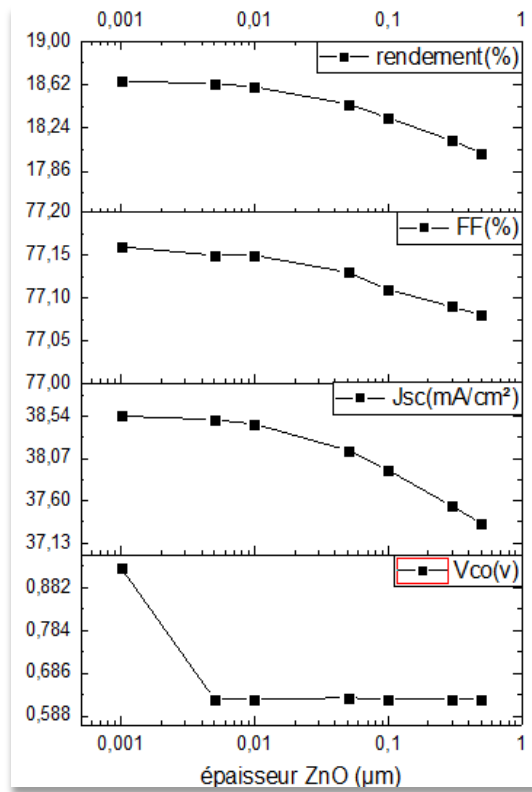


Figure III. 6 : Effet de l'épaisseur de la couche fenêtre ZnO

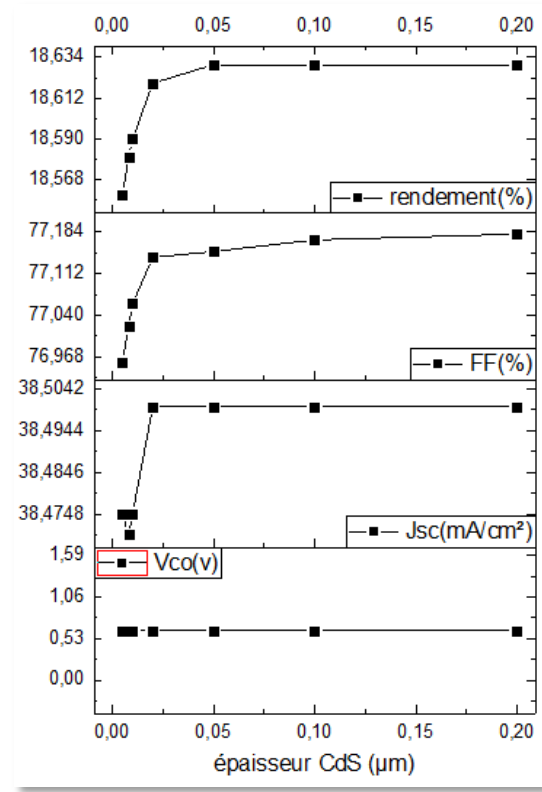


Figure III. 7 : Effet de l'épaisseur de la couche CdS

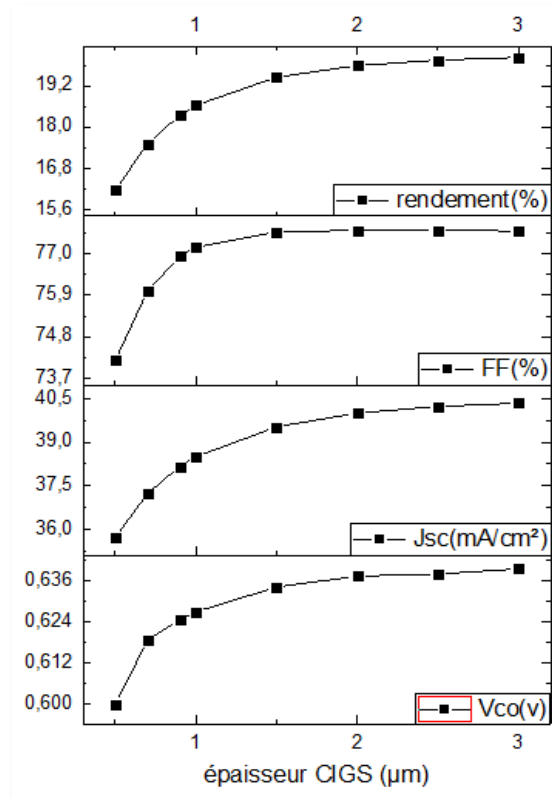


Figure III. 8 : Effet de l'épaisseur de la couche CISG

D'après la figure III.6, l'augmentation de l'épaisseur de la couche ZnO conduit à une diminution des performances de la cellule CIGS, et ceci due aux pertes d'absorption dans cette couche. Contrairement à l'effet de l'épaisseur de la couche absorbante, l'augmentation de cette épaisseur résulte une amélioration des performances de notre cellule jusqu'à une saturation à cause de l'augmentation des porteurs de charge dans cette couche.

Concernant la couche tampon (CdS), on remarque que les performances sont presque stables.

Pour le reste de notre étude, on va fixer à 5nm, 0,1 $\mu$ m et 1 $\mu$ m comme épaisseurs de ZnO, CdS et CIGS, respectivement, à but de la réduction de la quantité des matériaux utilisés en gardant un bon comportement de notre cellule.

### III.4.2 La concentration de dopage

Nous étudions dans cette section l'effet de la concentration de dopage de la couche absorbante et de la couche émettrice.

$E_{g\text{ CIGS}}$  et l'épaisseur des couches ZnO, CdS et CIGS sont maintenues constantes.

Les variations de  $V_{oc}$ ,  $J_{sc}$ , FF et  $\eta$  en fonction de la concentration de dopage de la couche absorbante et de la couche CdS représentées sur les figures III.9 et III.10.

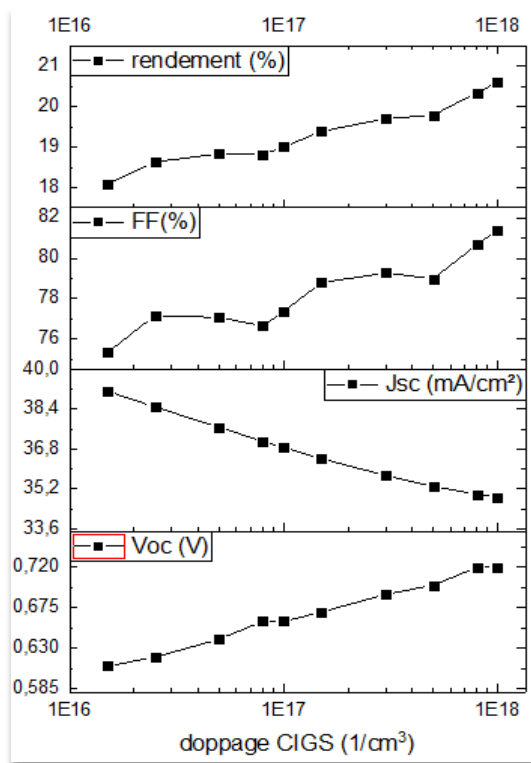


Figure III. 9 : Dopage de la couche CIGS

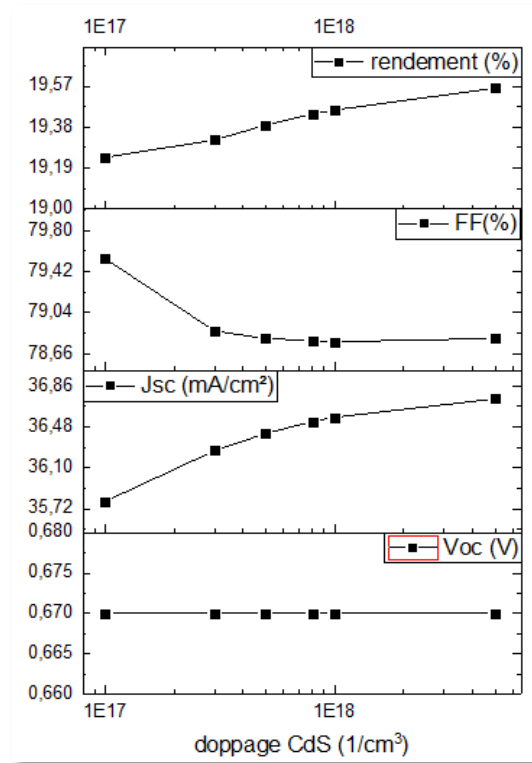


Figure III.10 : Dopage de la couche CdS



La Figure III.9 montre que  $V_{OC}$  et  $\eta$  augmentent de façon continue et  $J_{SC}$  diminue quand le dopage de la couche absorbante augmente de  $1,5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  à  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . Pour le FF, il augmente légèrement.

La variation de ces performances avec la concentration de dopage de la couche absorbante est expliquée par la largeur de la zone de charge d'espace dépend fortement de la concentration de dopage donc un changement concernant la possibilité des collections des transporteurs.

Une concentration de dopage de la couche absorbante CIGS de  $1,5 \cdot 10^{17} (1/\text{cm}^3)$  conduit à les paramètres suivantes : une tension de circuit ouvert  $V_{CO} = 0.67\text{V}$ , le courant de court-circuit  $I_{CC} = 36.42 \text{ mA/cm}^2$ , le facteur de forme  $FF = 78.8 \%$ , le rendement  $\eta = 19.39 \%$ .

Lorsque on fixe la concentration de dopage de la couche CIGS à  $1,5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , et pour une concentration de dopage de la couche CdS de  $5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , la cellule modélisée fourni les paramètres suivantes : une tension de circuit ouvert  $V_{CO} = 0.67\text{V}$ , le courant de court-circuit  $I_{CC} = 36.42 \text{ mA/cm}^2$ , le facteur de forme  $FF = 78.8 \%$ , le rendement  $\eta = 19.39 \%$ .

### III.4.3 Effet de la concentration d'Indium

Une propriété intéressante de cellules CIGS est la possibilité, dans certains procédés de fabrication, de faire varier le rapport « x », qui égal à  $\text{Ga}/(\text{In} + \text{Ga})$ , produisant des différents profil du gap. Ce profilage de band gap est l'un des propriétés les plus caractérisés de la couche CIGS.

Pour notre contribution, le profil de gap de la couche absorbante est considéré sous la forme gradient avec une dépendance parabolique positive, pour  $0 < x < 1$  à partir du bas de la couche absorbante Figure III. 11

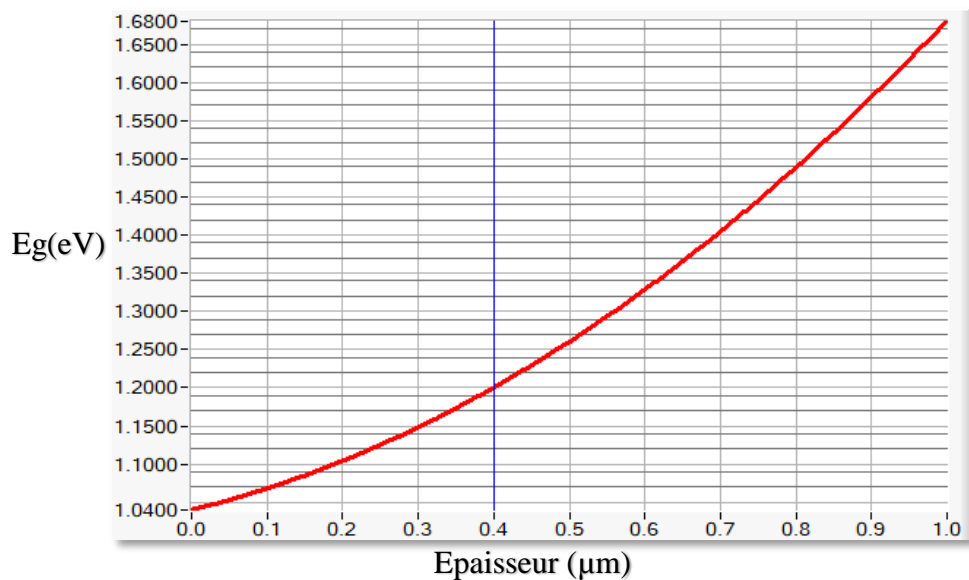


Figure III. 11 : Le profil de gap de la couche absorbante

Dans cette partie de notre travail, et c'est la partie la plus importante, nous intéressons à étudier la couche absorbante CIGS on variant l'énergie de gap  $E_g$  entre 1,04eV et 1.68eV de manière gradient à l'aide de logiciel SCAPS [Annexes]. Les résultats obtenue avec et sans gradient, concernant le profil de gap, sont présentées dans le Tableau III 2.

Les résultats présentés en vert sont les performances de notre cellule en utilisant un profil de gap gradient sous forme parabolique Figure III. 12.

Tableau III 2 :tableau de variation de dopage et d'épaisseur avec et sans gradient

	Epaisseur ( $\mu\text{m}$ )	Dopage ( $1/\text{cm}^3$ )	Gradient							
			sans				avec			
			Vco (v)	Jcc ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ )	FF (%)	$\eta$ (%)	Vco (v)	Jcc ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ )	FF (%)	$\eta$ (%)
CIGS	1	$1 \cdot 10^{17}$	0.66	36.87	77.37	19.00	0.66	44.66	77.91	23.30
		$1.5 \cdot 10^{17}$	0.67	36.42	78.8	19.39	0.67	44.34	78.60	23.67
		$1.8 \cdot 10^{17}$	0.67	36.23	79.15	19.5	0.68	44.10	78.51	23.69
		$3 \cdot 10^{17}$	0.69	35.74	79.27	19.70	0.70	42.83	76.84	23.06
		$5 \cdot 10^{17}$	0.70	35.31	78.99	19.79	0.71	41.31	75.33	22.21
	2	$5 \cdot 10^{17}$	0.71	37.47	79.57	21.39	0.70	39.94	73.8	20.70
CdS	0.1	$5 \cdot 10^{17}$	/				0.68	44.10	78.51	23.69
	0.2						0.68	44.12	78.56	23.71
	0.3						0.68	44.13	78.58	23.72
	0.5						0.68	44.13	78.59	23.73

D'après le tableau III.2, un rendement 23.69 % est obtenu en utilisant  $1\mu\text{m}$  d'épaisseur et  $1.8 \cdot 10^{17}\text{cm}^{-3}$  de concentration de dopage pour la couche absorbante (CIGS) et une épaisseur de  $0.1\mu\text{m}$  et une concentration de dopage de  $5 \cdot 10^{17}\text{cm}^{-3}$  concernant la couche émettrice (CdS).

Remarque : on variant l'épaisseur de la couche CdS de 0.1 $\mu$ m-0.5 $\mu$ m on peut atteindre un rendement de 23.73 %, mais cela augment l'épaisseur de la cellule, donc plus de matériaux et par conséquent une augmentation de prix de la cellule. D'autre part, le CdS est un matériau toxique, pour cela on a préféré la réduction de la quantité utilisé au lieu de l'augmentation des performances de notre cellule (un plus de rendement de 0.04 % ce qui n'est pas vraiment une grande différence).

A partir des résultats obtenue dans le Tableau III.2, nous avons tracé les caractéristiques J-V de la cellule dans les deux cas, avec et sans gradient pour montrer la différence entre les deux cas.

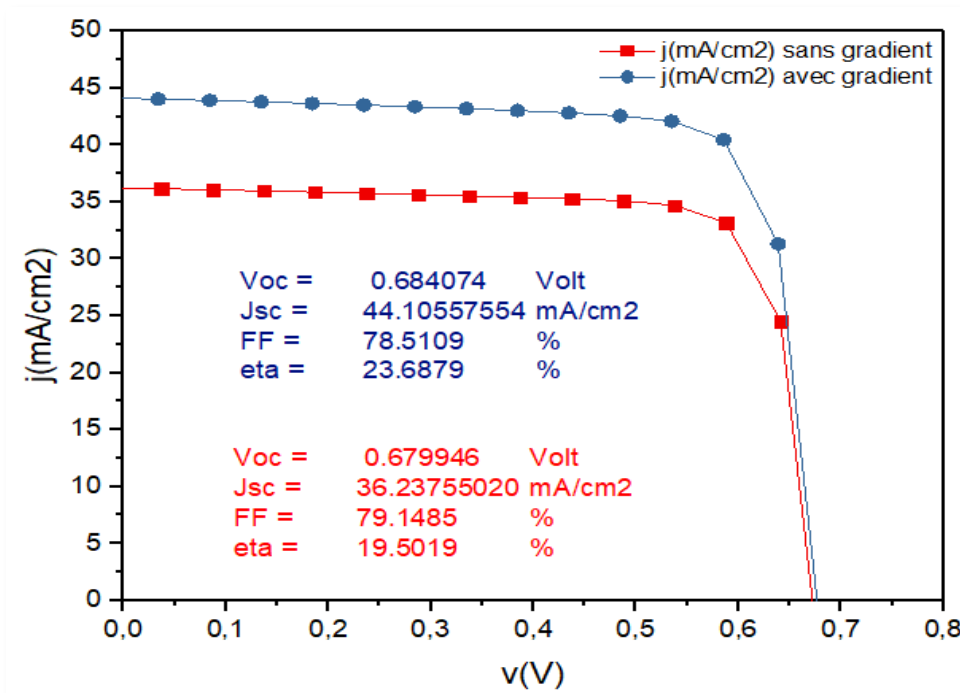


Figure III. 12 : Caracteristiques J-V avec et sans gradient

D'après la figure III.12, l'utilisation d'une couche CIGS avec un profil de gap gradient sous forme parabolique conduit à une augmentation de la densité de courant (7,8 mA/cm<sup>2</sup>) et le rendement (4,1%) de la cellule modélisée. Contrairement de la tension du circuit-ouvert qui va diminuer par presque 6mV et de facteur de forme où il y a une perte de 0.6%.

Cette amélioration de la performance de la cellule CIGS liée à l'augmentation du gap qui a été expliquée par Lundberg et al [35] par la combinaison de l'effet de la création d'un champ électrique supplémentaire due au "In" gradient et la réduction de la probabilité de recombinaison qui est inversement proportionnelle au gap.

### III.5 Conclusion

Dans ce chapitre, on a simulé, analysé et discuté les performances d'une cellule photovoltaïque à base de CIGS où on a étudié l'influence de l'épaisseur de chaque couche et sa concentration de dopage sur les paramètres  $V_{OC}$ ,  $J_{SC}$ , FF et  $\eta$  dans la première partie.

Concernant la deuxième partie, l'influence de la concentration d'indium, pour la couche CIGS, sur les performances de la cellule étudiée est inscrite dans la case du gap gradient sous forme parabolique, de la couche CIGS, car ce matériau est la cause de cette modification dans l'énergie de gap.

Notre optimisation permet d'obtenir un rendement de 23.69 % en utilisant  $1\mu\text{m}$  d'épaisseur et  $1.8 \cdot 10^{17} \text{cm}^{-3}$  de concentration de dopage pour la couche absorbante (CIGS) et une épaisseur de  $0.1\mu\text{m}$  et une concentration de dopage de  $5 \cdot 10^{17} \text{cm}^{-3}$  concernant la couche émettrice (CdS).

## Conclusion général

## Conclusion général

Dans ce travail nous avons abordé des généralités, des définitions et une recherche bibliographique sur les cellules photovoltaïques à base de CIGS comme nous avons simulé, analysé et discuté le comportement des cellules de cette filière.

Dans le chapitre I, nous avons présenté des généralités sur l'énergie photovoltaïque, d'où nous avons expliqué l'effet photovoltaïque, le rayonnement solaire, le principe des cellules photovoltaïques, les modèles équivalents des cellules ainsi que les différents matériaux photovoltaïques.

Dans le chapitre II, nous avons présenté une étude théorique qui traite les cellules photovoltaïques à base de CIGS où nous avons fait une recherche bibliographique en relation avec le sujet traité, sur des différentes revue et journaux scientifique, tel que Nature, IOP, AIP et Elsevier, ainsi que les cellules commercialisées effectué par NREL. D'autre part, et dans le même chapitre, une modélisation analytique de la caractéristique J-V d'une jonction N-P a été abordé.

Dans le chapitre III, nous avons entamé le travail principal de ce projet de fin d'études, intitulé l'effet de la concentration d'Indium sur les performances des cellules photovoltaïque à base de CIGS. D'où en première étape, l'étude a été basée sur l'influence de l'épaisseur des différentes couches de la cellule, dont le ZnO, le CdS, et le CIGS, pour but d'améliorer le rendement de la cellule en réduisant la quantité de matière utilisé, d'où nous avons eu un rendement été de 18.62 %. (Avec 5nm, 100nm et 1 $\mu$ m comme épaisseurs des couches ZnO, CdS et CIGS, respectivement).

La deuxième étape de ce chapitre été d'analyser l'effet de la concentration de dopage des couche CdS et CIGS, en fixant les épaisseurs pour les valeurs précédentes, dans le but d'améliorer le comportement de la cellule CIGS. La variation du dopage nous a donné une amélioration de rendement, d'où nous avons obtenu un rendement de 19.39 % pour un dopage  $N_A=1.5*10^{17}\text{cm}^{-3}$  pour le CIGS, et un dopage  $N_D=5*10^{17}\text{cm}^{-3}$  pour le CdS.

Dans la troisième partie de ce chapitre, nous avons étudié l'influence de profil de gap concernant la couche absorbante (CIGS), d'où nous avons considéré que l'énergie de gap de cette couche varie entre 1,04eV et 1,68eV (gradient sous forme parabolique), à l'aide de logiciel de simulation SCAPS [Annexes].

Cette considération, gap gradient sous forme parabolique, nous a permet d'améliorer les performances de la cellule étudié ( $V_{co}=0.68\text{V}$ ,  $J_{sc}=44.10\text{mA/cm}^2$ , un  $FF=78.51\%$  et un  $\eta=23.69\%$ ).

## Bibliographie et webographie

- [1] La pollution de l'air - réchauffement climatique - effet de serre  
[www.youtube.com/watch?v=hBaXbJAxVIE](http://www.youtube.com/watch?v=hBaXbJAxVIE)
- [2] R. Dussault, Histoire Planétaire Le Changement Climatique et Les Effets Mondiaux.  
<http://slideplayer.fr/slide/4823756/>
- [3] Solargis : Carte Irradiation Solaire Algérie.  
Dans : [http://solargis.info/doc/\\_pics/freemaps/1000px/ghi/SolarGIS-Solar-map-Al..](http://solargis.info/doc/_pics/freemaps/1000px/ghi/SolarGIS-Solar-map-Al..)
- [4] W. El-Huni. Modélisation de cellules solaires multi-tandem bas coût et très haut rendement à Base de nitrures des éléments III-V. Physique [physics]. Université Paris-Saclay, 2016. Français. < NNT : 2016SACLS296 >.
- [5] <http://cellule-photovoltaïque.e-monsite.com/pages/le-dopage-des-cellules-photovoltaïques.html>
- [6] M. Meftah, Dewitte S., Irbah A., Chevalier A., Conscience C., Crommelinck D., Janssen E., Mekaoui S., 2004. SOVAP/Picard, a spaceborne radiometer to measure the total solar irradiance. *Sol. Phys.*, 289, 1885-1899. doi: 10.1007/s11207-013-0443-0
- [7] G. Kopp, Lean J.L., 2011. A new, lower value of total solar irradiance: evidence and climate significance. *Geophys. Res. Lett.*, 38, L01706. doi: 10.1029/2010GL045777
- [8] P. Blanc, Lucien Wald. L'estimation du rayonnement solaire au sol par la nouvelle méthode Heliosat-4. *La Météorologie, Météo et Climat*, 2015, 90, pp.53-61.
- [9] C. Gueymard, The sun's total and spectral irradiance for solar energy applications and solar radiation models, *Solar Energy*, Volume 76, Issue 4, April 2004, Pages 423-453
- [10] M. B, Rummel S, Anderberg A. Current-voltage curve translation by bilinear interpolation. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. 2004 Dec 1; 12(8):593-607.
- [11] Y. Hishikawa, Imura Y, Oshiro T. Irradiance-dependence and translation of the IV characteristics of crystalline silicon solar cells. In *Photovoltaic Specialists Conference, 2000. Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE 2000* (pp. 1464-1467). IEEE.
- [12] S. Martinuzzi, Les cellules solaires au silicium cristallin, *Dossier Photovoltaïque*, 2007.
- [13] P.-Eymeric Janolin, De l'effet photovoltaïque aux cellules photoélectriques, *Techniques de L'Ingénieur l'expertise technique et scientifique de référence 2013*
- [14] Z. Saidbacar, Elaboration et caractérisations du silicium polycristallin par cristallisation en phase Liquide du silicium amorphe, *Thèse de doctorat, université paris sud (2012)*.

- [15] A. Slaoui, Électricité photovoltaïque - Matériaux et marchés, Techniques de l'Ingénieur l'expertise technique et scientifique de référence 2013.
- [16] S. Astier, Conversion photovoltaïque : du rayonnement solaire à la cellule, Techniques de l'Ingénieur l'expertise technique et scientifique de référence 2008.
- [17] N. Zanio, Cadmium telluride, in: R.K. Willardson, A.C. Beer (Eds.), Semiconductors and Semimetals, vol. 13, Wiley, New York, 1978.
- [18] M. Saadat, M. Moradi, M. Zahedifar, CIGS absorber layer with double grading Ga profile for highly efficient solar cells, Superlattices and Microstructures (2016), doi: 10.1016/j.spmi.2016.02.036.
- [19] P. Jackson, D. Hariskos, R. Wuerz, O. Kiowski, A. Bauer, T.M. Friedlmeier, M. Powalla, Properties of Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> solar cells with new record efficiencies up to 21.7%, Phys. Status Solidi RRL 9 (2015) 28–31.
- [20] Z. Han, D. Zhang, D. Zhang, R. Hong, Q. Chen, C. Tao, Y. Huang, Z. Ni, S. Zhuang, Synthesis and reaction pathway investigation of chalcopyrite CuInSe<sub>2</sub> nanoparticles for one-pot method, Superlattices and Microstructures 62 (2013) 156–165.
- [21] M. D. Heinemann, F. Ruske, D. Greiner, A.R. Jeong, M. Rusu, B. Rech, R. Schlatmann, C.A. Kaufmann, Advantageous light management in Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> superstrate solar cells, Solar Energy Materials & solar cells 150 (2016) 76-81.
- [22] J.H. Werner, J. Mattheis, U. Rau, Efficiency limitations of polycrystalline thin film solar cells: case of Cu (In, Ga) Se<sub>2</sub>, Thin Solid Films 480 (2005) 399-409.
- [23] [http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency\\_chart.jpg](http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency_chart.jpg)
- [24] M. Saadat, M. Moradi, M. Zahedifar, CIGS absorber layer with double grading Ga profile for highly efficient solar cells, Superlattices and Microstructures (2016), doi: 10.1016/j.spmi.2016.02.036.
- [25] M.A.M. Bhuiyan, M.S. Islam, A.J. Datta, Modeling, simulation and optimization of high performance CIGS solar cell, International Journal of Computer Applications 57 (2012) 26-30.
- [26] S. Ouédraogo, F. Zougmore, and J. M. Ndjaka, Numerical Analysis of Copper-Indium-Gallium-Diselenide-Based Solar Cells by SCAPS-1D, International Journal of Photoenergy (2013) doi:10.1155/2013/421076.
- [27] W. Promnopas, T. Thongtem, S. Thongtem, Effect of microwave power on energy gap of ZnO nanoparticles synthesized by microwaving through aqueous solutions, Superlattices and Microstructures 78 (2015) 71–78.



- [28] H. Bayhan, M. Bayhan, An analysis of the effect of illumination to the reverse and forward bias current transport mechanisms in an efficient n-ZnO/n-CdS/p-Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> solar cells, *Solar Energy* 87 (2013) 168-175.
- [29] A. Bedia, F.Z. Bedia, M. Aillerie, N. Maloufi, B. Benyoucef, Influence of the Thickness on Optical Properties of Sprayed ZnO Hole-blocking Layers Dedicated to Inverted Organic Solar Cells, *Energy Procedia* 50 (2014) 603-609
- [30] A. Bedia, F.Z. Bedia, M. Aillerie, N. Maloufi, S. Ould Saad Hamady, O. Perroud, B. Benyoucef "Optical, electrical and structural properties of nano-pyramidal ZnO films grown on glass substrate by spray pyrolysis technique" *Optical Materials* 36 (2014) 1123–1130
- [31] M.I. Hossain, P. Chelvanathan, M. Zaman, M.R. Karim, M.A. Alghoul, N. Amin, Prospects of indium sulphide as an alternative to cadmium sulphide buffer layer in cis based solar cells from numerical analysis, *Chalcogenide Letters* 8 (2011) 315-324.
- [32] S. Kang, R. Sharma, J.K. Sim, C.R. Lee, Band gap engineering of tandem structured CIGS compound absorption layer fabricated by sputtering and selenization, *Journal of Alloys and Compounds* 563 (2013) 207–215.
- [33] N. Khoshsirat, N.A. Yunus, Numerical analysis of In<sub>2</sub>S<sub>3</sub> layer thickness, band gap and doping density for effective performance of a CIGS solar cell using SCAPS, *Journal of Elec Materi* (2016) doi: 10.1007/s11664-016-4744-6.
- [34] K. Decocka, J. Lauwaerta, b, M. Burgelmana, Characterization of graded CIGS solar cells, *Energy Procedia* 2 (2010) 49–54.
- [35] O. Lundberg, M. Edoff, L. Stolt, The effect of Ga-grading in CIGS thin film solar cells, *Thin solid films* 480-481 (2005) 520-525.
- [36] A. Bouloufa, K. Djessas, A. Zegadi , Numerical simulation of CuIn<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>Se<sub>2</sub> solar cells by AMPS-1D ,*Thin Solid Films* , 2007, 6285–6287.
- [37] W. N. Shafarman, Susanne Siebentritt, and Lars Stolt. Cu(InGa) Se<sub>2</sub> Solar Cells. In *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, 546. 2011
- [38] J. L. Shay, S. Wagner, and H. M. Kasper, Efficient CuInSe<sub>2</sub>/CdS solar cells, *Applied Physics Letters*, vol. 27, no. 2, 89, 1975.
- [39] J. Chantana et al, Multi-layer precursor method for Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> solar cells fabricated on flexible substrates, *Japanese Journal of Applied Physics* 53, 05FW03 (2014).
- [40] M. D. Heinemann et al, Evolution of opto-electronic properties during film formation of complex semiconductors, *Scientific Reports* | 7:45463 | DOI: 10.1038/srep45463

- [41] J. Löckinger et al, TiO<sub>2</sub> as intermediate buffer layer in Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> solar cells, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 174 (2018) 397–404
- [42] S. A. Jensen et al, Optically induced metastability in Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>, *Scientific REPOrtS* | 7: 13788 | DOI:10.1038/s41598-017-14344-6.
- [43] D. Colombara et al, Sodium enhances indium-gallium interdiffusion in copper indium gallium diselenide photovoltaic absorbers, DOI: 10.1038/s41467-018-03115-0
- [44] V. Sark, W.G.J.H.M., Alsema, E.A., Junginger, H.M., De Moor, H.H.C., Schaeffer, G.J. Accuracy of progress ratios determined from experience curves, the case of photovoltaic technology development, *Prog. Photovolt: Res. Appl.* 16, 441–453 (2008)
- [45] T. Worren Reenaas, Modeling of intermediate band solar cells, MASTER'S THESIS FOR STUD. TECHN. KIRSTI KVANES 2009
- [46] M .M. BOUZAKI, Etudes comparées et modélisation des performances des Différentes technologies de cellules photovoltaïques en vue du Dimensionnement des systèmes et installations photovoltaïques, Unité de Recherche Matériaux et Energies Renouvelables (URMER), Tlemcen - Algérie
- [47] X. M. Dai and Y. H. Tang. A simple general analytical solution for the quantum efficiency of front-surface-field solar cells, *Solar Eenergy Materials and Solar Cells* 43, (1996) 363
- [48] S. Adachi, Optical constants of crystalline and amorphous semiconductors, p. 427, Kluwer Academic Publishers, 1999, Extrapolated outside the data range with the purpose to illustrate a graded Zn(O,S) material, Distributed with SCAPS2.8, may 2009
- [49] S. Adachi, Optical constants of crystalline and amorphous semiconductors, 502-506 (for E perpendicular to c)
- [50] M. Gloeckler, A.Fahrenbruch and J.Sites, Numerical modelling of CIGS and CdTe solar cells: setting the baseline, *Proc. 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (Osaka, Japan, May 2003)*, 491-494, WCPEC-3, Osaka (2003)

## Annexes

SCAPS est un programme pour simuler les caractéristiques électriques DC et AC des cellules solaires à hétérojonction à couches minces. Il est spécialement développé pour les cellules solaires CdTe et Cu (In, Ga) Se<sub>2</sub>.

Il est développé par le Département d'Electronique et des Systèmes d'Information (ELIS) de Université Belge de Gent, Pietersnieuwstraat 41, B-9000 Gent,

Le programme implémente les algorithmes présentés dans les publications et les articles suivants :

- 1- Référence de base: M. Burgelman, P. Nollet and S. Degrave, "Modelling polycrystalline semiconductor solar cells", Thin Solid Films 361-362 (2000), pp. 527-532
- 2- À propos des cellules et des matériaux avec des propriétés graduées: M. Burgelman and J. Marlein, "Analysis of graded band gap solar cells with SCAPS", presented at the 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference (Valencia, E, september 2008).
- 3- A propos des mécanismes de tunnellation inclus dans SCAPS 2.6.1 et suivants: J. Verschraegen and M. Burgelman, "Numerical modeling of intra-band tunneling for heterojunction solar cells in SCAPS", Thin Solid Films, 515 (2007) pp. 6276-6279.
- 4- Références antérieures:
  - a. A. Niemegeers and M. Burgelman, "Numerical modelling of ac-characteristics of CdTe and CIS solar cells", Proc. 25th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (Washington D.C., april 1996) pp. 901-904, IEEE, New-York, 1996
  - b. A. Niemegeers, S. Gillis and M. Burgelman, "A user program for realistic simulation of polycrystalline heterojunction solar cells: SCAPS-1D", Proceedings of the 2nd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion , (Wien, Österreich, july 1998), pp. 672-675, JRC, European Commission, 1998
  - c. S. Degrave, M. Burgelman, P. Nollet, "Modelling of polycrystalline thin film solar cells: new features in SCAPS version 2.3", Proceedings of the 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (Osaka, Japan, may 2003), pp. 487-490, WCPEC-3, Osaka, 2003

Droits d'auteur :

Arc Burgelman, ELIS, UGent

Ceci est un programme d'application de LabWindows / CVI - un produit National Instruments

Les contributeurs au SCAPS étaient: Alex Niemegeers, Marc Burgelman, Stefaan Degraeve, Johan Verschraegen

Contacte :

Marc Burgelman, University of Gent, ELIS, Pietersnieuwstraat 41, B-9000 Gent, Belgium

phone +32 9 264 3381 fax : +32 9 264 3594

e-mail: Marc.Burgelman@elis.ugent.be

<http://trappist.elis.ugent.be/ELISgroups/solar/staff/burgelman.html>

Interface du programme :

Voici quelques images illustrant l'interface du programme SCAPS

La figure A.1 montre l'interface principale du programme

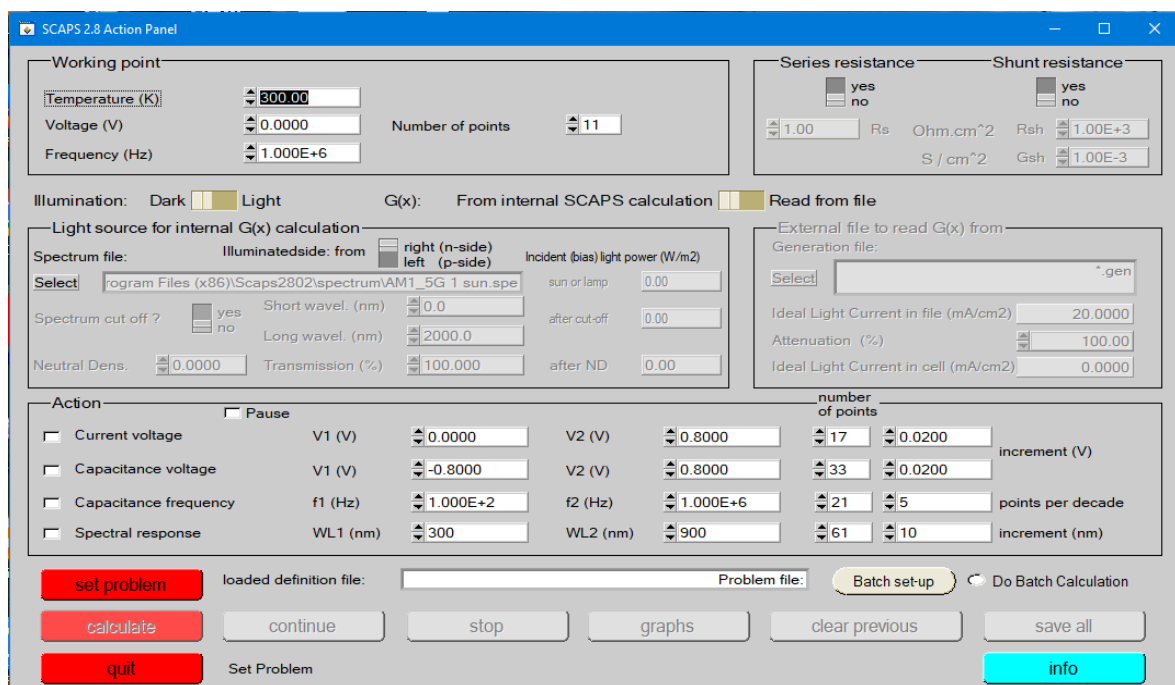


Figure A. 1 Interface du programme SCAPS.

La figure A.2 montre le panneau de définition de cellule

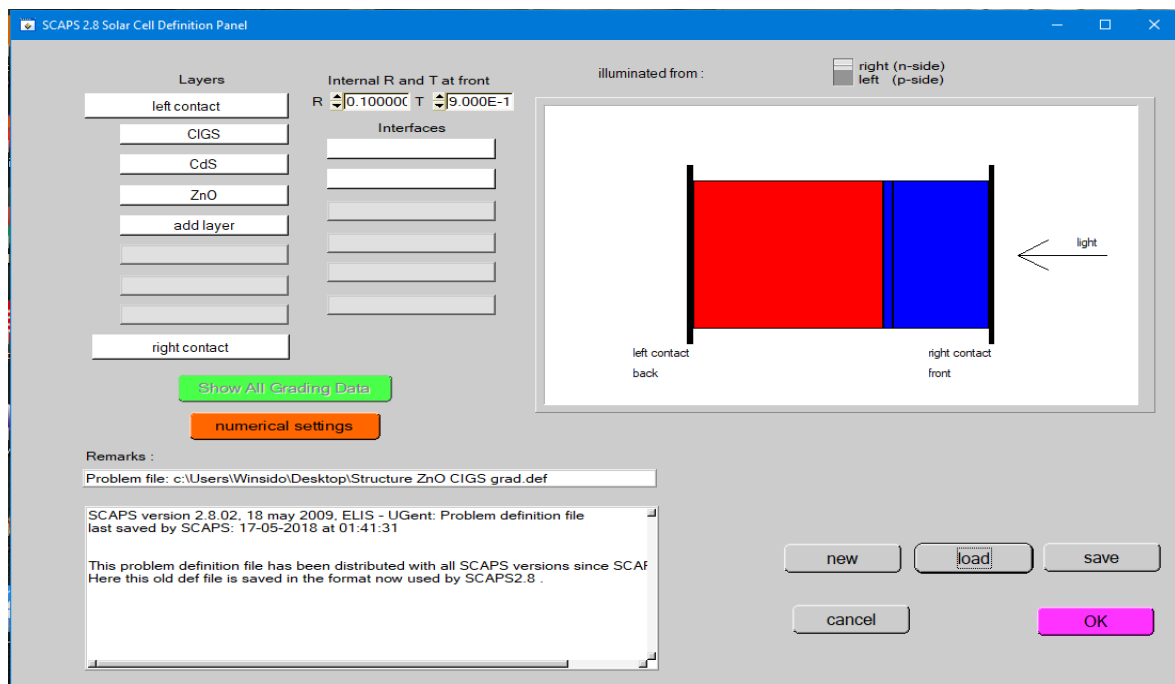


Figure A. 2 Le panneau de définition de cellule

La figure A.3 montre le panneau de propriétés de la couche

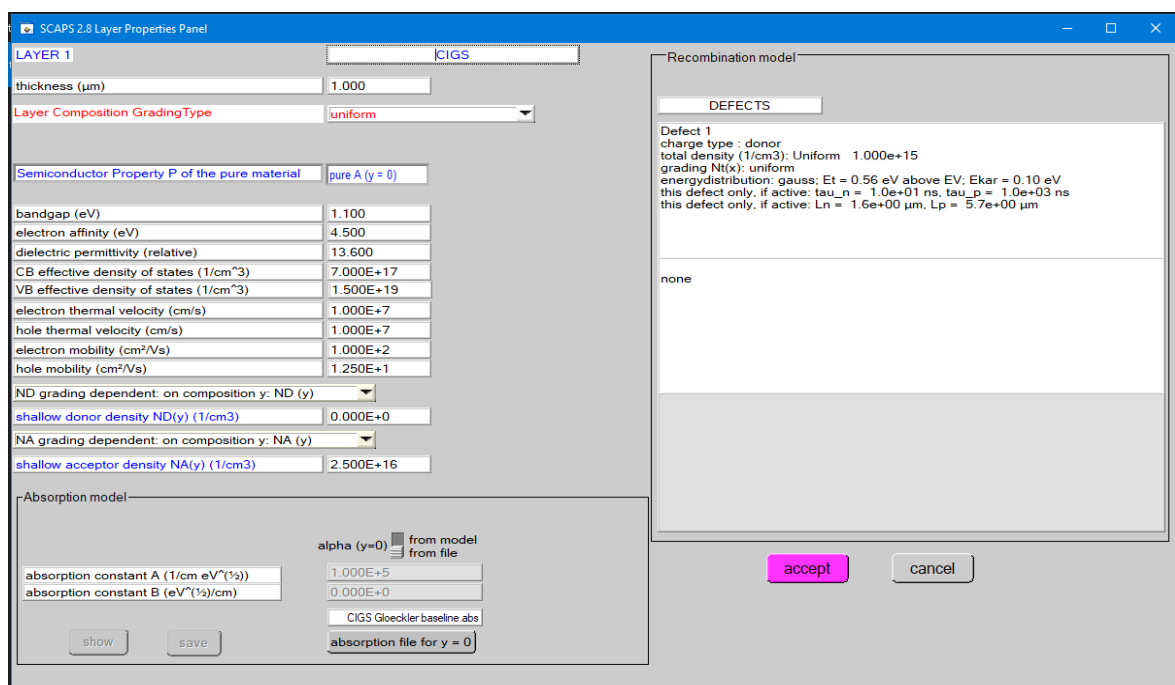


Figure A. 3 Le panneau de propriétés de la couche

La figure A.4 montre le panneau de bande d'énergie

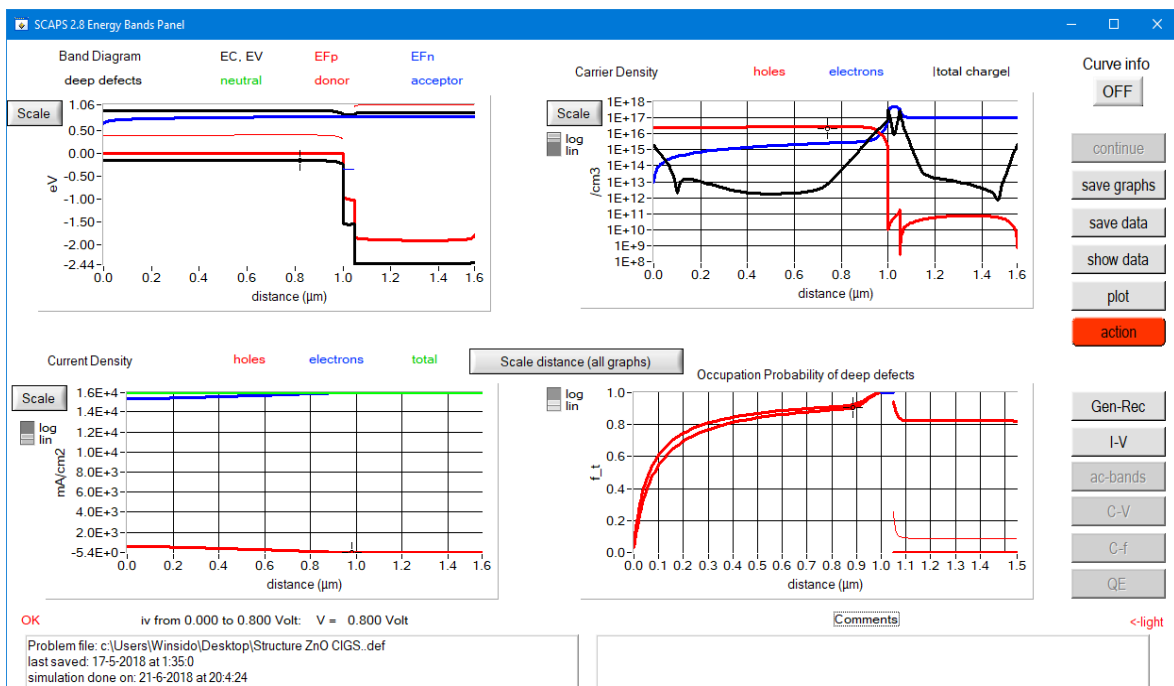


Figure A. 4 Le panneau de bande d'énergie

La figure A.5 montre le panneau J-V de la cellule

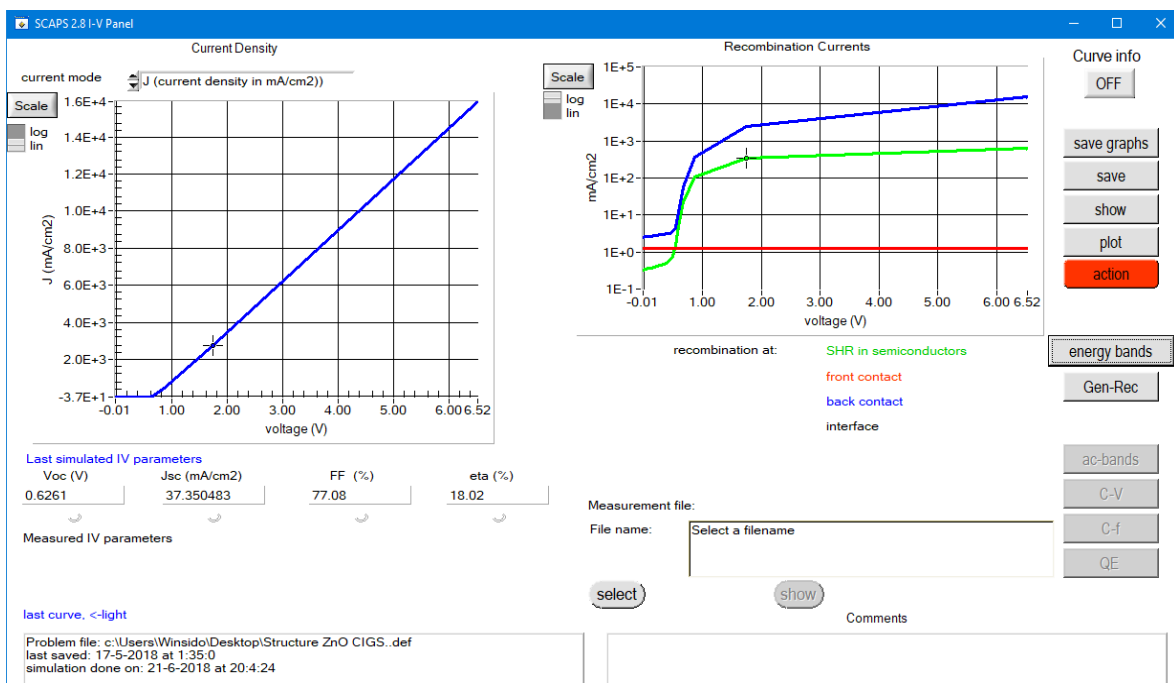


Figure A. 5 Le panneau J-V de la cellule