

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed El Bachir Elibrahimi – Bordj  
Bou Arreridj Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département Sciences de la Matière

جامعة محمد البشير الإبراهيمي « برج بوعرييج »  
كلية العلوم والتكنولوجيا  
قسم علوم المادة



# Mémoire de fin d'étude

PRESENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION  
DU DIPLOME DE : **Master**

**Filière : Chimie**  
**Option : Chimie des matériaux**

## THÈME :

Simulation des propriétés et performances des cellules photovoltaïques en couches minces à base des matériaux semi-conducteurs CIGS

**Préparé par : Afaf ALLOUCHE**

**Devant le jury :**

**Mr. BOUBATRA Moustapha**

**Mme. FERKOUS Hana**

**Encadreur : Pr. Bouzid Abderrazak**

**Année Universitaire 2019-2020**

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed El Bachir Elibrahimi – Bordj  
Bou Arreridj Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département Sciences de la Matière

جامعة محمد البشير الإبراهيمي « برج بوعرييج »  
كلية العلوم والتكنولوجيا  
قسم علوم المادة



# Mémoire de fin d'étude

PRESENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION  
DU DIPLOME DE : **Master**

**Filière : Chimie**  
**Option : Chimie des matériaux**

## THÈME :

Simulation des propriétés et performances des cellules  
photovoltaïques en couches minces à base des  
matériaux semi-conducteurs CIGS

**Préparé par : Afaf ALLOUCHE**

**Devant le jury :**

**Mr. BOUBATRA Moustapha**

**Mme. FERKOUS Hana**

**Encadreur : Pr. Bouzid Abderrazak**

**Année Universitaire 2019-2020**



## *Remerciements*

Je remercie **Allah** le tout puissant pour m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail. Que nous implorons afin de nous aider à atteindre nos aspirations,

Si Dieu le veut. Je tiens à exprimer mes remerciements les plus sincères à mon encadreur **Pr. BOUZID Abderrazak** d'avoir bien voulu m'encadré.

Je remercie tous ceux qui de près ou de loin m'ont aidé à la réalisation de ce travail.





## *Dédicace*

Je dédie ce travail en signe de respect et de  
reconnaissance :

À toute ma famille sans exception.

À tous mes amis(e).

À ceux qui ont m'aidé de loin ou de près durant ma  
carrière.

A .Afaf





## Table des matières

<b>INTRODUCTION GÉNÉRALE .....</b>	<b>01</b>
------------------------------------	-----------

### **CHAPITRE I : Généralités sur les cellules solaires**

I.1 Introduction .....	4
I.2 Les énergies renouvelables .....	4
I.3 L'énergie solaire .....	4
I.3.1 Le rayonnement solaire .....	6
I.3.2 Spectre de référence .....	6
I.3.3 conversion de l'énergie solaire .....	8
I.4 Interaction rayonnement-matière .....	9
I.5 Les matériaux semi-conducteurs .....	10
I.5. 1 Notion de bandes d'énergie .....	10
I.5. 2 Différent types de dopage .....	11
I.5. 3 Les jonctions p-n .....	13
I.6 Cellule photovoltaïque .....	14
I.6.1 L'effet photovoltaïque .....	15
I.6.2 Principe de fonctionnement d'une cellule solaire photovoltaïque .....	16
I.7 Modélisation d'une cellule photovoltaïque .....	17
I.7. 1 Cellule photovoltaïque idéal .....	17
I.7. 2 Cellule photovoltaïque réel .....	18
I.8 Les différentes technologies des cellules photovoltaïques .....	19
I.8.1 La Première génération: Silicium cristallin (mono et poly) .....	19
I.8.2 La Deuxième génération: CdTe, CIS/ CIGS, silicium amorphe et microcristallin .....	19
I.8.3 La troisième génération : technologies photo-électro-chimiques .....	19
I.9 Les différentes caractéristiques d'une cellule solaire .....	20

I.9.1 Courant de court circuit.....	20
I.9.2 Tension de circuit ouvert.....	21
I.9.3 Réponse spectrale SR d'une cellule solaire.....	21
I.9.4 Facteur de forme FF.....	21
I.9.5 Rendement de conversion $\eta$ .....	22
I.9.6 Puissance maximale .....	22
I.10 Avantages et inconvénients de la cellule photovoltaïque .....	22
I.10.1 Avantage.....	22
I.10.2 Inconvénients.....	22
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>23</b>

## **CHAPITRE II : Généralités sur les cellules solaires à base de CIGS**

II.1 Introduction.....	25
II.2 Description du CIGS .....	25
II.3 Propriétés du matériau CIGS .....	26
II.3.1 Généralités sur les éléments de base du matériau CIGS.....	26
II.3.2 Structure cristalline et différents alliages dérivés du CuInSe <sub>2</sub> .....	27
II.3.3 Influence du Ga .....	29
II.4 Les couches minces .....	29
II.4.1 Définition d'une couche mince .....	29
II.5 La Synthèse du CIGS .....	30
II.5. 1 Co-évaporation .....	30
II.5. 2 Salinisation/ sulfuration de précurseurs métalliques .....	31
II.5. 3 Spray-pyrolyse .....	32
II.5 Structure d'une cellule à couche mince CIGS.....	32
II.6.1 Substrat .....	32
II.6. 2 Contact arrière .....	33

II.6. 3 Couche absorbeur .....	34
II.6. 4 Couche tampon.....	34
II.6. 5 Couche fenêtre.....	35
II.6. 6 Jonction p-n.....	35
II.7 Conclusion .....	36
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>37</b>

### **CHAPITRE III : Méthodes et moyens de calculs**

III.1 Introduction .....	38
III.2 Présentation du logiciel SCAPS .....	38
III.2. 1. Introduction.....	38
III.3 Notions de base.....	39
III.3.1 Lancer SCAPS .....	41
III.3.2 Définir le problème .....	41
III.3.3 Définir le point de fonctionnement .....	41
III.3.4 Sélection des caractéristiques à simuler .....	42
III.3.5 Lancer le calcul .....	43
III.3.6 Afficher les courbes simulées .....	43
III.3.7 Afficher les courbes I-V .....	43
III.4 Définition d'une cellule solaire .....	44
III.4.3 Définition des couches .....	45
III.5 Conclusion.....	47
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>48</b>

### **CHAPITRE IV : Résultats de simulation et Discussions**

IV .1 Introduction .....	49
--------------------------	----

IV .2 La définition des différents types de cellules solaire étudiée .....	<b>49</b>
IV .3 Présentation des paramètres de base (Baseline) .....	<b>50</b>
IV .4 Effet de la variation de l'épaisseur de la couche absorbeur .....	<b>51</b>
IV .4.1 Effet sur les caractéristiques principales de la cellule.....	<b>51</b>
IV .4.2 Effet sur la cellule à base de CIGS .....	<b>51</b>
IV .4.2 Effet sur la réponse spectrale de la cellule .....	<b>52</b>
IV .4.3 Effet sur la cellule à base de CIS .....	<b>53</b>
IV .5 Etude de l'effet des fenêtres SnO <sub>2</sub> et ITO sur les cellules solaires à base de CIGS..	<b>56</b>
IV .5.1 Effet sur les caractéristiques principales de la cellule.....	<b>56</b>
IV .5.2 Effet sur la réponse spectrale de la cellule .....	<b>56</b>
IV .6 Effet de la variation de l'épaisseur de la couche buffer CdS .....	<b>57</b>
IV .6.1 Effet sur les caractéristiques principales de la cellule.....	<b>57</b>
IV .6.2 Effet sur la réponse spectrale de la cellule .....	<b>58</b>
IV .7 Effet de l'introduction des défauts sur les caractéristiques principales et la réponse spectrale de la cellule SnO <sub>2</sub> /(n)CdS/(p) /CIGS .....	<b>59</b>
IV .7.1 Effet sur le rendement ( $\eta\%$ ) de la cellule .....	<b>60</b>
IV .7.2 Effet sur les caractéristiques principales de la cellule.....	<b>60</b>
IV .7.3 Effet sur la réponse spectrale de la cellule .....	<b>61</b>
IV.4 Conclusion.....	<b>63</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>64</b>
 <b>CONCLUSION GÉNÉRALE .....</b>	 <b>65</b>



# **Introduction Générale**

Depuis de nombreuses années, on voit augmenter la température moyenne de la planète. Tout montre que ce réchauffement n'est que la résultante directe de la croissance démographique mondiale d'une part, et de la demande liée à la consommation en matière d'énergie des pays émergents et des pays en voie de développement d'autre part.

Les énergies fossiles (Charbon, Uranium, Pétrole et Gaz naturel), sont celles qui représentent une très grande partie de ces ressources aujourd'hui. Bien que diversifiées, ces ressources ne sont pas inépuisables et à ce rythme aujourd'hui de la consommation, l'exploitation des réserves prouvées ne pourra durer plus d'un siècle. Aussi, leur utilisation génère considérablement de dioxyde de carbone, gaz en grande partie responsable de l'effet de serre. Les méfaits de cet effet de serre sont déjà visibles depuis quelques années. Le réchauffement climatique met en péril de nombreuses populations de par le monde et la stabilité géopolitique même de certaines régions du globe est même menacée par des phénomènes climatiques majeurs. Il est donc important de développer d'autres sources d'énergies, principalement issues des sources d'énergies renouvelables non polluantes, c'est-à-dire que leur exploitation produirait très peu ou pas de gaz à effet de serre, le dioxyde de carbone. Parmi ces alternatives, on peut citer l'énergie photovoltaïque. Cette dernière permet de transformer directement la lumière du soleil en électricité, grâce à des matériaux semi-conducteurs. Les matériaux utilisés dans un premier temps par ces cellules photovoltaïques étaient essentiellement inorganiques, mais aujourd'hui encore le matériau le plus couramment utilisé reste le silicium, malgré la concurrence toujours plus rude des halogénures, Arséniure de Gallium et bien d'autres.

Les cellules solaires font actuellement l'objet de multiples recherches dans le but de réaliser le meilleur rapport entre le rendement énergétique et le prix de revient. Pour diminuer à la fois le poids et le prix de ces dispositifs tout en augmentant leurs surfaces et leurs souplesses, des cellules en couches minces ont été réalisées. Les cellules solaires qui utilisent le Cu (In, Ga) Se<sub>2</sub> (CIGS) représentent l'approche la plus prometteuse au plan de réduction des coûts de production. L'avantage de ce matériau est son élaboration facile d'une part et son haut rendement d'autre part.

Notre étude a pour but de prédire les performances photovoltaïques tels que le courant de court-circuit  $I_{CC}$ , le rendement de conversion  $\eta$ , la tension de circuit ouvert  $V_{CO}$  et le facteur de forme  $FF$  ainsi que la réponse spectrale d'une cellule solaire à base de CIGS moyennant le logiciel SCAPS-1D. L'optimisation des paramètres physiques (dopage et épaisseur) des différentes couches mises en jeu dans la réalisation de cellule permettra d'aboutir au meilleur rendement qui pourra être délivré par les cellules à base de couche mince de Cu (In, Ga) Se<sub>2</sub>.

Notre mémoire est scindé en quatre chapitres.

- ❖ Dans le premier chapitre on présente succinctement l'énergie photovoltaïque et le principe de la conversion photovoltaïque et les différentes filières photovoltaïques, et les caractéristiques des cellules photovoltaïques.
- ❖ Ensuite dans le second chapitre un aperçu est donné sur la structure et les propriétés des cellules solaires à base de Cu (In, Ga) Se<sub>2</sub> (CIGS), également sur les diverses techniques de dépôt des couches minces à base de CIGS.
- ❖ Le troisième chapitre présente les détails concernant le logiciel de simulation SCAPS utilisé.
- ❖ Le quatrième chapitre est consacré à la présentation et la discussion des résultats de la simulation numérique des cellules à base de Cu (In, Ga) Se<sub>2</sub>. L'évolution des diverses performances des cellules, en fonction de la variation de plusieurs paramètres tels que : la nature de couche fenêtre, le matériau absorbant, l'épaisseur des différentes couches, la présence de défauts, ...etc., ont été explorés et discutés.
- ❖ Enfin une conclusion générale est présentée pour clore le manuscrit.

## BIBLIOGRAPHIE

[01] M. Bernard RATIER, M. Johann BOUCLÉ."Développement de composants photovoltaïques organiques et études de la morphologie des couches à l'échelle nanométrique", thèse doctorat, Université De Limoges, le 18 décembre 2013, p21.

[02] Ben Ali Mourad, Rahmouni Seddik. Simulation et Optimisation d'une Cellule Solaire à base de Cu (In, Ga) Se<sub>2</sub>, mémoire de Master, Université Ahmed Draïa Adrar, le 03/30/2018, p1/2.



# **Chapitre I :**

Généralités sur les cellules solaires

### I.1 Introduction

Ce chapitre présente les concepts dont la connaissance est nécessaire pour la compréhension de l'exploitation de l'énergie photovoltaïque. Dans un premier temps, nous décrirons la notion de l'énergie renouvelable et ces différents types ensuite nous décrirons l'énergie solaire, et le rayonnement solaire. Nous montrerons ensuite ce qu'est un semi conducteur et une cellule solaire, et ces filières en insistant sur les propriétés qui sont importantes dans le processus de conversion photovoltaïque. À la fin du chapitre, les avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque.

### I.2 Les énergies renouvelables

Les énergies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée. Ces énergies renouvelables regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue. Il existe plusieurs types de sources d'énergies renouvelables parmi eux : **l'énergie hydroélectrique, L'énergie géothermique, l'énergie éolienne, l'énergie de la biomasse et l'énergie photovoltaïque**. Les sources d'énergies renouvelables proviennent directement ou indirectement du Soleil. Elles sont donc disponibles indéfiniment tant que celui-ci brillera. L'énergie photovoltaïque est la plus jeune des énergies renouvelables, elle a l'avantage d'être non polluante, souple et fiable. Les systèmes photovoltaïques sont utilisés depuis 40 ans. Les applications ont commencé avec le programme spatial pour la transmission radio des satellites. Elles se sont poursuivie ensuite avec les balises en mer et l'équipement de sites isolés dans tous les pays du monde, en utilisant les batteries pour stocker d'énergie électrique pendant les heures sans soleil. [3]

### I.3 L'énergie solaire

Le soleil émet continuellement une quantité d'énergie radiante colossale dans le système solaire d'environ 5800 K. Ce qui conduit à un pic d'émission situé à une longueur d'onde de 0.5  $\mu\text{m}$  pour une puissance d' environ 60 MW 1m, soit un total de,  $9.5 \times 10^{25}$ , sauf que la part d'énergie reçue sur la surface de la terre est d'une moyenne de 367 watts pour chaque mètre carré de l' atmosphère pour une distance moyenne Terre-soleil de 150 millions de km. Cette quantité d'énergie considérable de 367 W 1m<sup>2</sup> est appelée la constante solaire. Il faut bien noter aussi que la terre reçoit une petite fraction de cette énergie car l'irradiance de ce dernier est pondérée par plusieurs facteurs à sa

surface. Parmi ces facteurs on peut citer l'absorption par les molécules des différentes couches de l'atmosphère, les conditions climatiques, l'altitude et les changements de saisons. Néanmoins la quantité d'énergie totale qui atteint la surface de la terre dans une seule journée est plus importante que toute la quantité d'énergie consommée par la population mondiale pendant toute une année. Le rayonnement solaire est constitué d'un nombre incalculable de photons transportant chacun une énergie  $E_{ph}$  donnée par la relation suivante.

$$E_{ph} = h \frac{c}{\lambda} \quad 1$$

Sans oublier de mentionner la masse d'air ( $AM_x$ ) qui correspond à la perte d'énergie solaire par l'absorption atmosphérique en fonction de l'angle  $\theta$  du soleil par rapport au zénith qui est donnée par:

$$AM \approx \frac{1}{\sin \theta} \quad 2$$

L'angle  $\theta$  est l'angle en radian entre le rayonnement solaire et le plan horizontal de la terre. Le rayonnement dit rayonnement de masse d'air est calculé par le rayonnement solaire au niveau de la mer dans des conditions météorologiques stables et qui est égale à  $1000 \text{ W/m}^2$ , dans ce cas le soleil est perpendiculaire au zénith,  $\theta=90^\circ$ . La notation utilisée est [AM],  $AM_0$  (l'irradiance hors atmosphère). Une fois que le soleil se décline vers le bas, l'éclairement solaire arrive sur la terre avec un angle de  $48^\circ$  et une masse d'air de  $1000 \text{ W/m}^2$   $AM_{1.5}$ . Le "1.5" est pour mentionner que le parcours de la lumière dans l'atmosphère est supérieur au parcours le plus court du soleil d'une fois et demie. Le spectre  $AM_1$  est considéré comme le spectre solaire standard le plus étudié, il se compose de 45% de la lumière visible, 51 % de lumière infrarouge et de 4% de la lumière ultraviolet. [4]

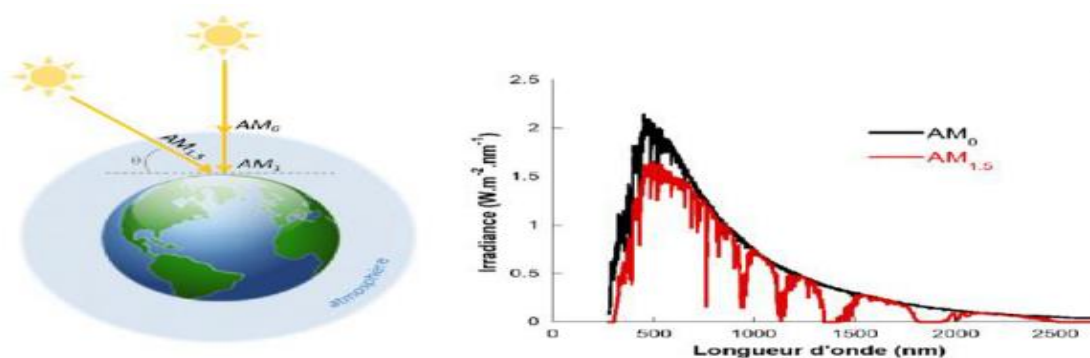
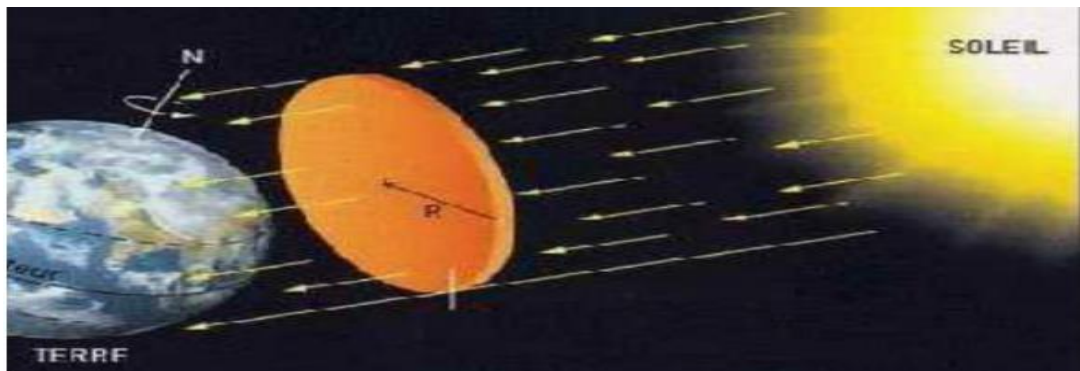


Figure I.1 : Irradiation solaire. [05]

### I.3.1 Le rayonnement solaire

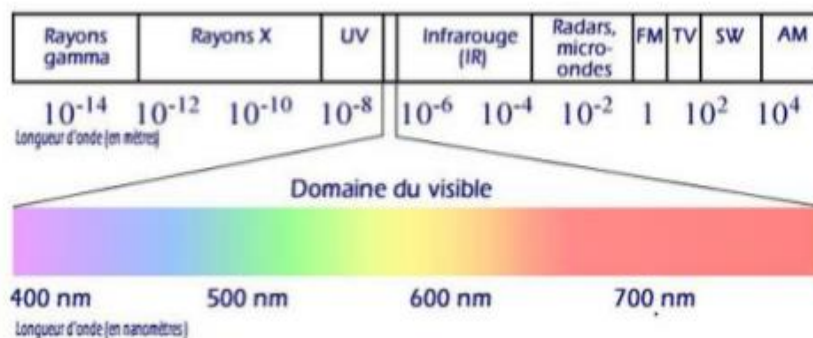
Le soleil, corps chaud à une température de plus de 6000°K, émet une énergie sous forme d'un rayonnement électromagnétique. En raison de la température élevée du soleil, le rayonnement est l'ensemble des ondes électromagnétiques émises par le soleil avec une intensité de  $1367\text{W/m}^2$  à la surface supérieure de l'atmosphère (constante solaire), constitue un spectre continu allant de l'ultraviolet à l'infrarouge en passant par le visible où il renferme le maximum d'énergie. En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire subit diverses influences (Diffusion par les molécules, les aérosols et absorption par les gaz atmosphériques...etc.). Le rayonnement solaire qui arrive finalement au sol avec une intensité réduite ( $1000\text{W/m}^2$  au niveau de la mer) avec une bande spectrale répartie de la manière suivante : UV=5%, Visible=40%, IR=55%. [06]



**Figure I.2 :** Le rayonnement solaire. [07]

### I.3.2 Spectre de référence

Hors atmosphère, l'amplitude et la distribution du spectre du rayonnement solaire sont parfaitement définies. Il n'en est pas de même au niveau du sol ou en raison de multiple paramètres atmosphériques, cette amplitude et cette distribution spectrale peuvent varier. Il est donc nécessaire de définir un spectre de référence, qui puisse être adopté au niveau international pour que des mesures comparatives soient possibles. Le spectre représenté sur la figure I.8 donne en fonction de la longueur d'onde l'irradiance spectrale, c'est-à-dire la puissance associée au rayonnement par tranche de longueur d'onde et par unité de surface. Ce spectre de référence correspond, à la traversée par le rayonnement d'une couche atmosphérique de référence spectre AM 1,5.



**Figure I.3:** Spectre solaire. [08]

Le spectre solaire est la distribution spectrale (en fonction de la longueur d'onde ou de la fréquence) du rayonnement électromagnétique émis par le soleil, depuis les rayonnements radio jusqu'aux rayons X. Le rayonnement ultraviolet est un rayonnement électromagnétique de longueur d'onde plus courte que le visible (<380 nanomètres) et plus longue que les rayons X. Le rayonnement visible est un rayonnement électromagnétique stimulant le nerf optique humain, de longueur d'ondes comprises approximativement entre 380 nm et 780 nm. Le rayonnement infrarouge est un rayonnement électromagnétique de longueur d'onde comprise entre 780 nm et 1 mm. Le rayonnement solaire global est le rayonnement émis par le soleil incident sur une surface donnée.

Le rayonnement direct est le rayonnement solaire incident sur un plan donné, et provenant d'un petit angle solide centré sur le disque solaire. Le rayonnement diffus est le rayonnement solaire global à l'exception du rayonnement direct. Il comprend la plus grande partie du rayonnement diffusé par l'atmosphère ainsi qu'une partie du rayonnement réfléchi par le sol, suivant l'inclinaison de la surface réceptrice. [08]

### I.3.3 conversion de l'énergie solaire

L'énergie solaire est transmise à la terre à travers l'espace sous forme de photons et de rayonnement électromagnétique. Cette énergie peut être captée et transformée en chaleur ou en électricité grâce à des capteurs adaptés. Comparée aux différentes formes d'énergies classiques existantes.

L'énergie du soleil peut être utilisée de différentes façons en employant trois grandes technologies soient, l'énergie solaire passive, l'énergie solaire active et l'énergie Photovoltaïque.

### **I.3.3. 1 L'énergie solaire passive**

Elle remplace avantageusement les énergies conventionnelles utilisées pour chauffer ou refroidir les bâtiments. L'énergie solaire passive, capable de fonctionner seule sans apport d'énergie extérieure, elle utilise l'architecture des bâtiments, l'orientation des murs, toits et fenêtres pour capter les rayons du soleil.

### **I.3.3. 2 L'énergie photovoltaïque**

Par l'utilisation de panneaux photovoltaïques, une partie du rayonnement solaire est directement transformée en électricité. Ces panneaux solaires sont composés de cellules photovoltaïques constituées principalement de silicium. Le principe de l'obtention du courant par les cellules photovoltaïques se nomme effet photoélectrique, qui consiste à l'émission d'électrons par un matériau soumis à l'action de la lumière. Cette production d'énergie électrique peut alors être stockée dans des batteries ou converties à l'aide d'un onduleur pour être distribuée dans le réseau électrique.

### **I.3.3. 3 L'énergie solaire active**

A l'aide de capteurs solaires, le capteur solaire actif transforme les rayons solaires en énergie thermique. Il emploie une source d'électricité supplémentaire pour actionner des pompes ou des ventilateurs qui distribuent l'énergie solaire à l'intérieur du bâtiment. Celle-ci est acheminée vers un autre endroit, ou elle sera utilisée immédiatement ou stockée en vue d'un usage ultérieur. Le transfert de chaleur s'effectue au moyen d'un fluide caloporteur, qui peut-être de l'eau, de l'antigel ou de l'air.

On utilise les systèmes solaires actifs principalement pour le chauffage de l'air et de l'eau. Il existe d'autres applications telles que la climatisation, le séchage de produit, la détoxification d'eau contaminée et la production d'énergie électrique d'origine thermique. Les systèmes solaires actifs ont plusieurs applications. Essentiellement, on distingue deux grandes catégories. Le système de chauffage solaire de l'eau, et le système de chauffage solaire de l'air. [09]

### I.4 Interaction rayonnement-matière

Les effets d'un rayonnement sur un atome désignent l'ensemble des interactions rayonnement-matière. On utilise les rayonnements pour analyser les atomes de manière indirecte en observant la manière dont ils perturbent un rayonnement incident, permettant ainsi de caractériser la structure de la matière (cristal) par les méthodes de diffraction, ou bien caractériser les énergies de liaisons de la matière par les méthodes spectrométriques qui donnent l'énergie solaire. Donc l'interaction de la lumière (onde électromagnétique) avec la matière (électrons du matériau) peut expliquer clairement les propriétés optiques d'un matériau. Cette diversité repose sur les propriétés optiques des semi-conducteurs c.à.d. leurs façons d'agir face à une excitation électromagnétique soit par absorption ou émission ou même réflexion une fraction spectrale du flux lumineux peut être absorbée par le matériau selon son coefficient d'absorption à une longueur d'onde donnée ( $\lambda$ ). Pour les semi-conducteurs, ce coefficient est caractérisé par une fenêtre de transparence limitée du côté des courtes longueurs d'onde par un seuil d'absorption.

Si ce seuil est dans l'infrarouge, le semi-conducteur absorbe la lumière visible et il est dit opaque. Par contre, si la longueur d'onde du seuil atteint le visible, le semi-conducteur est alors transparent en prenant une couleur allant du rouge au jaune si le seuil diminue. Si le seuil est dans l'ultraviolet, le cristal est totalement transparent pour le visible et apparaît sans couleur propre comme dans le cas du verre ou du diamant. Les atomes, dans la nature, présentent des transitions dont les énergies correspondent à des longueurs d'onde visible ce qui permet d'envisager leur utilisation pour les transitions optiques.

La Figure I.4 montre cette diversité où les semi-conducteurs occupent diverses plages d'ondes allant de l'infrarouge à l'ultra-violet et représente une partie des différents semi-conducteurs selon la longueur d'onde et la bande de gap. [10]

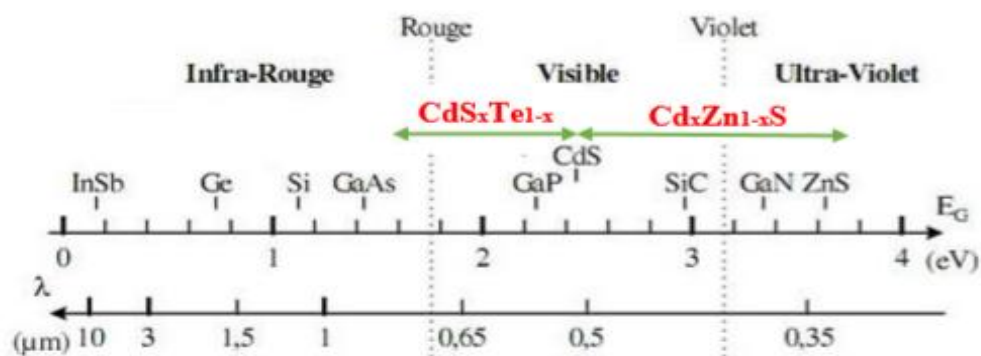


Figure I.4 : Diagramme des longueurs d'onde absorbées par les semi-conducteurs. [10]

### I.5 Les matériaux semi-conducteurs

Les semi-conducteurs sont des matériaux dont la conductivité électrique intermédiaire entre celle des conducteurs ( $\sim 10^6 \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ ) et des isolants ( $\sim 10^{-22}$  à  $\sim 10^{-14} \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ ), varie dans une grande proportion sous l'effet de la température, l'éclairement et la présence d'impuretés (dopage, défauts du réseau). Les semi-conducteurs sont principalement les éléments de la colonne IV du tableau de classification des éléments (Si, Ge) mais aussi des composés III-V (GaAs, GaN) ou II-VI (ZnS, CdTe).

#### I.5.1 Notion de bandes d'énergie

Dans un atome isolé, on montre au moyen de la mécanique quantique, que les électrons ne peuvent se trouver que dans certains états possibles caractérisés par des paramètres quantiques auxquels correspondent des niveaux énergétiques discrets. Quand des atomes identiques se rapprochent pour former un solide, l'interaction qui apparaît entre les électrons des atomes du cristal démultiplie chaque niveau discret en un ensemble d'états infiniment proches: une bande d'énergie électronique dans un cristal résulte donc de l'hybridation des niveaux individuels des atomes qui composent le cristal. Les énergies possibles pour un électron dans un solide forment ce qu'on appelle des bandes permises séparées par des bandes interdites.

Les orbitales liantes forment la bande de valence (la dernière pleine) et les anti-liantes celle de conduction (la première vide), séparées par une bande interdite (gap) de largeur  $E_g$ . [11]

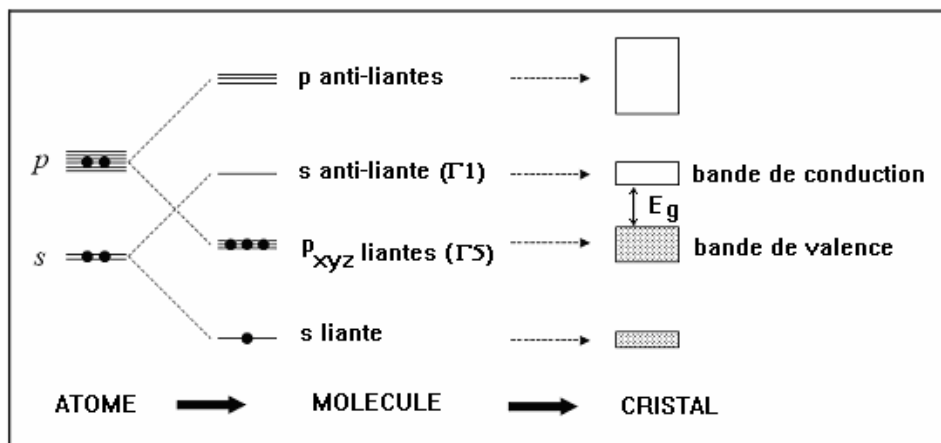


Figure I.5: Niveaux électroniques dans un atome isolé et dans un cristal. [11]



### I.5. 1.1 Les semi-conducteurs intrinsèques

Les électrons situés sur la couche la plus éloignée du noyau, qui participent aux liaisons covalentes peuvent, sous l'effet de l'agitation thermique, devenir porteur de charge. Le diagramme énergétique est constitué de deux bandes (conduction et valence) séparées par une bande interdite. Pour franchir cette bande l'électron doit acquérir de l'énergie (thermique, photon, ...) Mais le nombre d'électrons libres dans un semi-conducteur intrinsèque reste très faible. Ici le nombre de trou et d'électron est égal.

### I.5. 1.2 Les semi-conducteurs extrinsèques

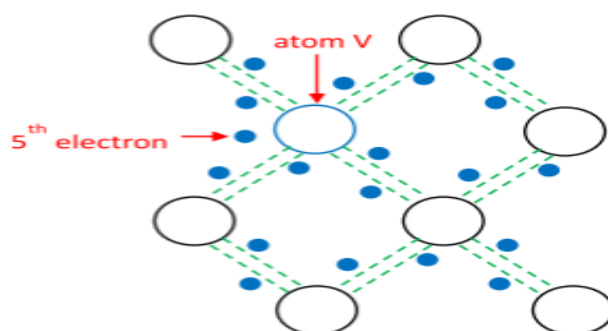
Pour augmenter la conductivité des semi-conducteurs on y introduit des impuretés. Ce procédé est appelé dopage. Le semi-conducteur extrinsèque ou semi-conducteur dopé est obtenu en introduisant des impuretés bien définies (d'une façon bien contrôlée) dans un semi-conducteur intrinsèque. Le but de ce procédé est de modifier la caractéristique électrique du semi-conducteur et c'est l'étape la plus fondamentale dans la création des dispositifs électroniques. [12]

## I.5. 2 Différent types de dopage

### I.5. 2.1 Semi-conducteur de type n

Supposons que nous dopions le cristal de silicium en utilisant un élément de la 5ème colonne de la table périodique (par exemple, phosphore (P) ou arsenic (As)). Les atomes d'impureté se placent dans la maille cristalline en substitution d'atomes d'origine.

Un élément de la cinquième colonne est pentavalent par nature, signifiant qu'il a cinq électrons dans sa couche externe. Quatre d'entre eux sont employés pour assurer les liaisons covalentes avec les quatre autres atomes de silicium voisins. Le 5ème électron ne participe pas à la cohésion du cristal, il est seulement très faiblement lié à son atome d'origine et un très faible apport d'énergie (en grande partie thermique) suffit à le rendre libre, signifiant qu'il peut alors contribuer à la conduction de charge. Une fois cet électron affranchi, l'atome d'impureté que l'on qualifie de donneur devient un ion fixe de charge positive.

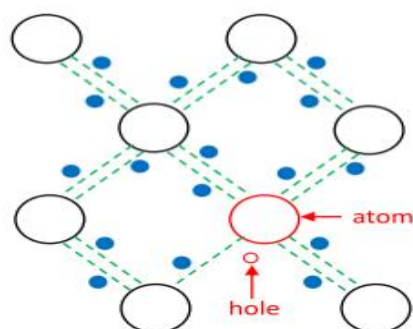


**Figure I.6 :** Présentation schématique du silicium dopé n. [13]

Dans une grande plage de températures (de 150 K à 600 K), le nombre d'électrons libres est beaucoup plus grand que le nombre de trous libres. Pour cette raison, ces électrons libres s'appellent des porteurs majoritaires et les trous les porteurs minoritaires. Le semi-conducteur ainsi dopé est qualifié « type n ». 5th electron atom V

### I.5.2.1 Semi-conducteur de type p

Considérons maintenant le dopage du silicium à l'aide d'un atome de la 3ème colonne de la table périodique (par exemple le bore (B)). Ici de nouveau, les atomes de dopage se placent dans la maille cristalline en substitution d'atomes d'origine.



**Figure I.7 :** Présentation schématique du silicium dopé p. [13]

Avec trois électrons périphériques sur sa couche externe, l'élément de la 3ème colonne de la table périodique (trivalent) peut seulement satisfaire trois liaisons covalentes avec ses quatre atomes voisins. La 4ème liaison n'est pas complète, il existe une lacune. Un très faible apport d'énergie permet à un électron de valence de venir combler cette lacune qui de ce fait se déplace. Un trou susceptible de participer à la conduction électrique vient

d'être créé, et l'atome d'impureté qualifié d'accepteur devient un ion négatif fixé. Comme avec du matériau de type N, mais d'une façon opposée, ici le nombre de trous libres est beaucoup plus grand que le nombre d'électrons libres dans une grande plage de température. Pour cette raison, ces trous s'appellent des porteurs majoritaires et les électrons s'appellent les porteurs minoritaires. Le semi-conducteur ainsi dopé est qualifié « type p ». [13]

### I.5. 3 Les jonctions p-n

Une jonction p-n est l'association d'une partie d'un semi-conducteur dopée n et d'une autre partie dopée p qu'on peut voir schématiquement sur la figure. I.8. Lorsque les deux parties de la jonction p-n sont constituées du même matériau, la jonction est une homojonction. Lorsque la partie n et la partie p sont constituées de matériaux différents, la jonction est appelée hétérojonction. Les porteurs de charge majoritaires diffusent dans la jonction où leur concentration est la plus faible. Dans la partie n, les électrons diffusent vers la partie p, et dans la partie p, les trous diffusent vers la partie n. Il en résulte une zone proche de l'interface qui est constituée de charges fixes et dépeuplée en porteurs de charge. Cette zone est appelée zone de déplétion, ou encore Zone de Charge d'Espace (ZCE). Dans la ZCE, la neutralité électrique n'est plus respectée et il se crée un champ électrique. Ce dernier s'oppose à la diffusion des électrons et des trous en accélérant les électrons dans une direction contraire à  $\vec{E}$  et accélère les trous dans la direction de  $\vec{E}$ . Ce phénomène est appelé dérive. Quand il est atteint, une différence de potentiel est formée dans la jonction. L'ensemble de la jonction p-n ainsi que les phénomènes décrits La cellule photovoltaïque est constituée de la jonction p-n à laquelle sont ajoutées des électrodes aux extrémités. Elles permettent de récolter les charges photogénérées qui sont séparées par le champ électrique. Hors de la zone de déplétion et en supposant la jonction à l'état d'équilibre, la neutralité électrique est respectée. Les zones de part et d'autre de la ZCE sont appelées Zones Quasi-Neutres (ZQN). Les porteurs de charge libres se déplacent par diffusion dans les ZQN. Ainsi, au bout du temps  $\tau$ , si ces charges ne sont pas collectées, elles se recombinent. La longueur de diffusion d'une charge est définie comme étant la distance qu'elle parcourt pendant sa durée de vie  $\tau$  avant de se recombiner. Les charges photogénérées dans les ZQN sont collectées uniquement

lorsqu'elles sont générées à une distance inférieure à leur longueur de diffusion par rapport à la jonction p-n. [14]

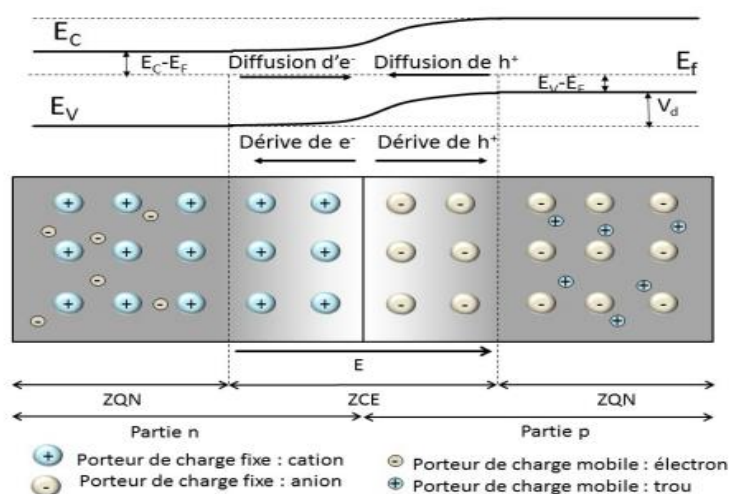


Figure I.8 : Schéma d'une jonction p-n. [14]

## I.6 Cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque est un dispositif électronique destiné à transformer la lumière en électricité, sa structure est une jonction PN c'est-à-dire composée de deux couches : une couche **P** et une couche **N**.

La cellule solaire est basée d'un semi-conducteur qui est en général le silicium, c'est un investisseur instantané fournissent de l'énergie électrique s'il reçoit une énergie solaire sous forme de rayonnement. Il se comporte alors comme en génération de courant continue.

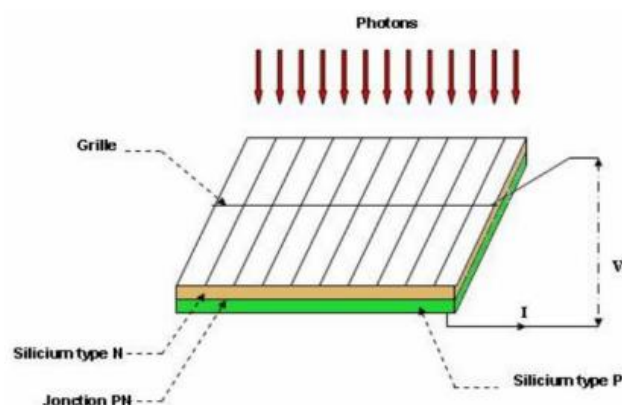
### I.6.1 L'effet photovoltaïque

#### I.6.1.1 Principe et historique

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

L'électricité photovoltaïque, qui est aujourd'hui largement répandue notamment dans le domaine de l'électrification rurale, est obtenue par transformation directe de l'énergie

lumineuse à travers un matériau semi-conducteur appelé cellule photovoltaïque ou photopile.



**Figure I.9 :** Principe de l'effet photovoltaïque dans la cellule solaire en silicium. [15]

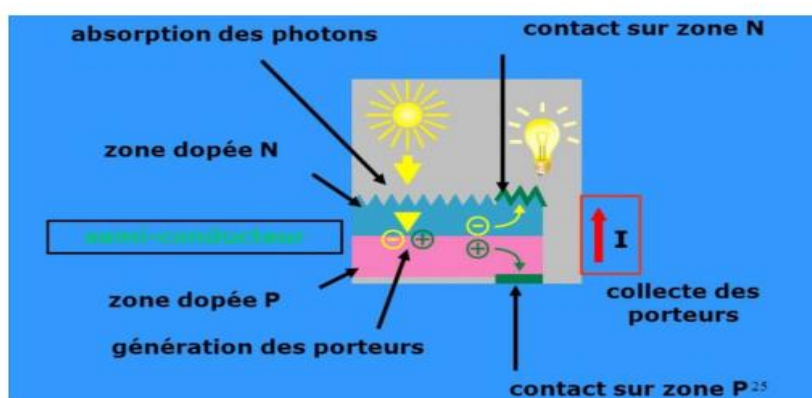
L'effet photovoltaïque est l'effet par lequel l'énergie lumineuse est directement transformée en énergie électrique dans un semi-conducteur. En général, une cellule photovoltaïque est une plaquette de silicium (semi-conducteur) dopée dans sa partie supérieure au bore (coté **P**) et dans sa partie inférieure au phosphore (coté **N**). Au voisinage de cette jonction P-N, un champ électrique maintient la séparation des charges électriques. Lorsqu'un photon vient frapper la cellule, il arrache des électrons par effet photoélectriques et crée une paire électron - trou. L'électron a suffisamment d'énergie pour franchir la jonction et il est collecté du côté N. Un courant électrique est créé. Un ensemble de cellules forment les modules solaires dont la fabrication a été multipliée par 8 sur la dernière décennie et dont le coût a baissé de 50 % en 5 ans. Actuellement, le rendement de ces cellules ne dépasse pas 15 %. Des recherches sont effectuées sur d'autres matériaux, comme le diséléniure de cuivre et d'indium ou le tellure de cadmium. Le paramètre prépondérant dans le choix d'un semi-conducteur inorganique pour la conversion photovoltaïque est donc la largeur du gap. Loferski a donné en 1956 la courbe de rendement théorique en fonction du gap des matériaux. Selon le matériau, on réalise une homojonction, (Silicium, ou Germanium) à caractère **p** (conductions majoritaires de trous) ou **n** (conductions majoritaires d'électrons), ou une hétérojonction à partir de deux matériaux différents (les composés binaires arséniure de gallium GaAs, le

tellure de cadmium CdTe, les composés ternaires CIS, GaAlAs, et les composés quaternaires CIGS...).

### I.6.2 Principe de fonctionnement d'une cellule solaire photovoltaïque

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type **n** et dopée de type **p**. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau **n** diffusent dans le matériau **p**.

La zone initialement dopée **n** devient chargée positivement, et la zone initialement dopée **p** chargée négativement.



**Figure I.10** : Principe de fonctionnement d'une cellule solaire. [15]

Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone **n** et les trous vers la zone **p**. Une jonction (dite p-n) a été formée. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones **n** et **p**, une diode est obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone **n** rejoignent les trous de la zone **p** via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel: le courant électrique circule.

## I.7 Modélisation d'une cellule photovoltaïque

### I.7.1 Cellule photovoltaïque idéal

Une cellule photovoltaïque peut être décrite de manière simple comme une source idéale de courant qui produit un courant  $I_{ph}$  proportionnel à la puissance lumineuse incidente en parallèle avec une diode .

$$I = I_{ph} - I_d \quad 1.1$$

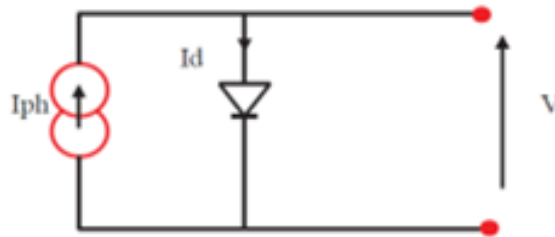


Figure I.11 : modèle de cellule photovoltaïque idéal. [16]

$$V = V_d \quad 1.2$$

La diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique I-V est donnée par la relation :

$$I = I_0 \left( \exp\left(\frac{V_d}{V_t}\right) - 1 \right) \quad 1.3$$

Donc la relation (I.4) sera :

$$I = I_{ph} - I_0 \left( \exp\left(\frac{V_d}{V_t}\right) - 1 \right) \quad 1.4$$

### I.7.2 Cellule photovoltaïque réel

Le model photovoltaïque précédent ne rendait pas compte de tous les phénomènes présents lors de la conversion d'énergie lumineuse. En effet, dans le cas réel, on observe une perte de tension en sortie ainsi que des courants de fuite. On modélise donc cette perte de tension par une résistance en série  $R_S$  et les courants de fuite par une résistance en parallèle  $R_P$  .

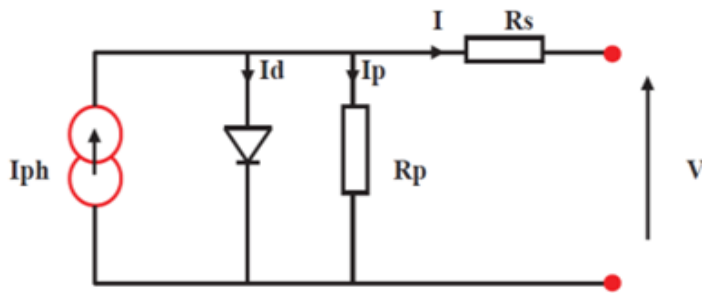


Figure I.12 :.modèle de cellule photovoltaïque. [16]

$$I_p = \left( \frac{v+R_s.I}{R_p} \right) \quad 1.5$$

$$I_d = I_0 \left( \exp \left( \frac{v+R_s.I}{V_t} \right) - 1 \right) \quad 1.6$$

Donc (I.4) sera:

$$I_0 \left( \exp \left( \frac{v+R_s.I}{V_t} \right) - 1 \right) - \left( \frac{v+R_s.I}{R_p} \right) \quad [16]$$

### I.8 Les différentes technologies des cellules photovoltaïques

Il existe un grand nombre de technologies mettant en œuvre l'effet photovoltaïque.

Beaucoup sont encore en phase de recherche et développement :

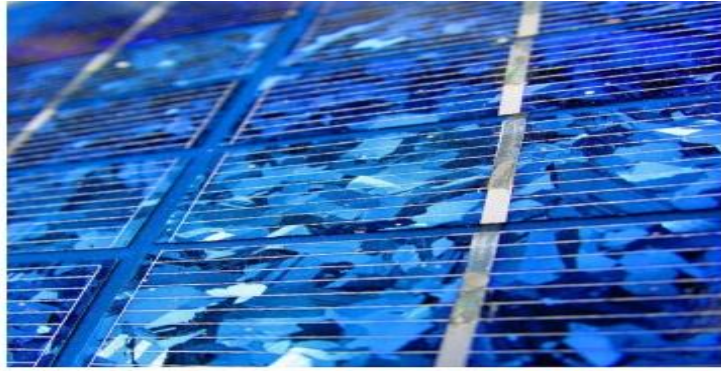
Il existe trois générations de cellules :

#### I.8.1 La Première génération: Silicium cristallin (mono et poly)

Cette génération repose sur les wafers de silicium cristallin, dont le matériau doit avoir une pureté élevée et contenir 99.99999% de silicium.

Les cellules cristallines se subdivisent en 2 catégories : mono et poly cristallin selon le type et structure de procédé de purification et de solidification différent (processus Czochralski Cz et processus Siemens) et se distinguent aussi par rapport à leur plan de coupe qui est différent.

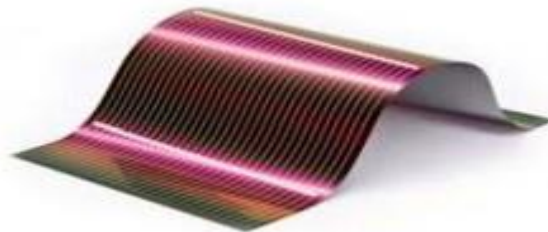




**Figure I.13** : cellules solaires en silicium. [17]

### **I.8.2 La Deuxième génération: CdTe, CIS/ CIGS, silicium amorphe et microcristallin**

Cette génération de cellules repose sur la déposition de matériaux semi-conducteurs en couche mince (thin film). L'épaisseur de la couche varie entre quelques nanomètres à des dizaines de micromètres ces technologies qui étaient initialement chère, étaient réservé aux applications spatiales et technologies de concentration avec l'augmentation des volumes de production, le prix de revient de ces technologies a baissé pour devenir compétitif avec les technologies cristallines de la première génération.



**Figure I.14** : cellules solaires CIGS. [17]

### **I.8.3 La troisième génération : technologies photo-électro-chimiques (Dye Sensitised Cell et Organic PV)**

Les cellules photovoltaïques organiques sont des cellules photovoltaïques dont au moins la couche active est constituée de molécules organiques. Il en existe principalement deux types :

- Les cellules photovoltaïques organiques moléculaires.
- Les cellules photovoltaïques organiques en polymères.

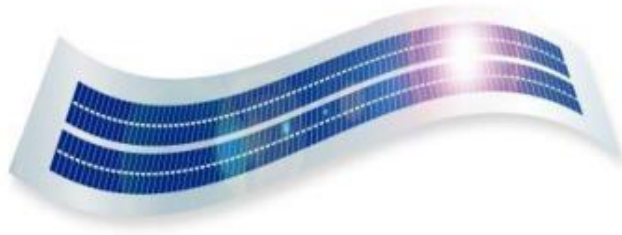


Figure I.15 : cellules solaires organiques. [17]

## I.9 Les différentes caractéristiques d'une cellule solaire

### I.9.1 Courant de court circuit

Le courant de court-circuit exprimé en mA, est le courant qui circule dans la cellule sous éclairage et en court-circuitant les bornes de la cellule (sans application de tension). Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et il dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs de charges et de la température.

### I.9.2 Tension de circuit ouvert

La tension de circuit ouvert exprimée en V, est la tension mesurée lorsqu'aucun courant ne circule dans la cellule.

### I.9.3 Réponse spectrale SR d'une cellule solaire

La réponse spectrale RS d'une cellule photovoltaïque est le rapport entre le courant de court-circuit généré par la cellule et la puissance lumineuse incidente, en fonction des différentes longueurs d'onde formant le rayonnement incident. La réponse spectrale RS est donnée par la relation suivante :

$$RS = \frac{I_{cc}(\lambda)}{P_{in}(\lambda)}$$

Le rendement quantique externe EQE de la cellule est le rapport du nombre de porteurs générés sur le nombre de photons incidents pour chaque longueur d'onde, il est relié à la Réponse spectrale par :

$$EQE = RS(\lambda) \frac{hc}{\lambda q}$$

Le rendement quantique interne IQE de la cellule est le rapport du nombre de porteurs

générés sur le nombre de photons pénétrant dans le matériau, il est relié au rendement quantique externe EQE par l'équation :

$$IQE(\lambda) = \frac{EQE(\lambda)}{1-R(\lambda)}$$

Où  $R(\lambda)$  représente le coefficient de réflexion pour la longueur d'onde  $\lambda$ .

### I.9.4 Facteur de forme FF

La puissance fournie au circuit extérieur par une cellule photovoltaïque sous éclairage dépend de la résistance de charge (résistance externe placée aux bornes de la cellule). Le facteur de forme est défini par la relation suivante :

$$FF = \frac{P_m}{V_{oc} \cdot I_{sc}} = \frac{V_m I_m}{V_{oc} \cdot I_{sc}}$$

### I.9.5 Rendement de conversion $\eta$

Le rendement  $\eta$  de la cellule solaire exprimé en pourcentage, désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente  $P_{in}$ . [18]

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{FF \cdot V_{oc} \cdot I_{sc}}{P_{in}}$$

### I.9.6 Puissance maximale

La puissance délivrée par une cellule solaire est maximum quand le produit  $I \cdot V$  est maximum

$$P_{max} = I_{max} \cdot V_{max} \quad [17]$$

## I.10 Avantages et inconvénients de la cellule photovoltaïque

### I.10.1 Avantage

- ☑ Ressource gratuite et énorme potentiel réparti sur la terre.
- ☑ Moyen décentralisé de production, autonomie.
- ☑ Grande fiabilité et peu d'entretien (pas de pièces mobiles).
- ☑ Pas de pollution durant l'utilisation.
- ☑ Grande souplesse de production, du milliwatt au Mégawatt.

### I.10.2 Inconvénients

- ☒ Investissement élevé, nécessité d'aides, dépendance aux décisions politiques.
- ☒ Disponibilité intermittente (réseau électrique ou stockage ou énergie d'appoint)
- ☒ Source diffuse, grande surface de capteur, difficulté d'intégration bâti/paysagères
- ☒ Technologie de fabrication poussée, énergivore, utilisation de produits chimiques
- ☒ Difficulté à recycler des composants qui doivent résister plus de 20 ans aux intempéries. [19]

## BIBLIOGRAPHIE

- [03] MAATI Hocine, BAHLOULI Kamel. "Etude des performances d'une cellule photovoltaïques à base D'InGaN", mémoire de Master, UNIVERSITÉ DE SAÏDA DR MOULAY TAHAR, 2018, p3.
- [04] MOHAMED Mimoune. "Étude Des Capteurs Photovoltaïques Basés Sur Les Nanotechnologies", mémoire de Master, Université Du Québec À Trois-Rivières, mars 2016, p5/6/7.
- [05] OUBOUCHOU Amina, "étude et simulation d'une cellule solaire à base couches minces". Mémoire de master, université SAAD DAHLAB DE LBLIDA, 2018.2019, p7.
- [06] ATEK Mourad. "Effets du taux d'ombrage sur les performances des cellules solaires à base de CIGS", mémoire de master, Université Ferhat Abbas de SÉTIF, le 19/09/2013, p10.
- [07] Energie solaire photovoltaïque.doc / B. Flèche - D. Delagnes / juin 07.
- [08] Belalem Abdeldjabar, Sandali Walid. Simulation d'une cellule solaire photovoltaïque à base de  $Cu_2 ZnSn(S, Se)_4$ . UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, Le : 06/06/2017, p4/5.
- [09] HADJ BELKACEMI Mohammed, "Modélisation et Etude Expérimentation d'un Capteur Solaire non Vitré et Perforé", Mémoire de Master, Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, le 06 juillet 2011.
- [10] Mme MENASSEL Née HALOUI HAFSIA. "Contribution à la conception et modélisation d'un capteur solaire hybride photovoltaïque thermique à base de cellules solaires en couches minces". Thèse doctorat, UNIVERSITE D'OUUM EL BOUAGHI, p7/8.
- [11] Riad BOULKROUNE, "Élaboration et caractérisation de films de polystyrène dopés par des nanocristaux du semi-conducteur ZnS", mémoire de master, UNIVERSITE MENTOURI CONSTANTINE, UNIVERSITE MENTOURI CONSTANTINE, p10/11.
- [12] H. Mathieu, «Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques», 2ème Edition, Masson, 1990.
- [13] Thomas Zimmer. Université de Bordeaux, France, p7/8.

- [14] FILLON Raphaël, "Etude des propriétés électroniques de couches minces de CZTSSe". Thèse doctorat, thèse doctorat, UNIVERSITE DE GRENOBLE, p15/16.
- [15] Mme MENASSEL Née HALOUI HAFSIA."Contribution à la conception et modélisation d'un capteur solaire hybride photovoltaïque thermique à base de cellules solaires en couches minces". Thèse doctorat, UNIVERSITE D'OUM EL BOUAGHI, p9/10/11/12.
- [16] OUBOUCHOU Amina, "étude et simulation d'une cellule solaire à base couches minces". Mémoire de master, université SAAD DAHLAB DE LBLIDA,2018.2019,p22/23/24.
- [17] OUBOUCHOU Amina, "étude et simulation d'une cellule solaire à base couches minces". Mémoire de master, université SAAD DAHLAB DE LBLIDA, 2018.2019, p22-24.
- [18] MAATI Hocine, BAHLOULI Kamel. "Etude des performances d'une cellule photovoltaïques à base D'InGaN", mémoire de Master, UNIVERSITE DE SAÏDA DR MOULAY TAHAR, 2018, p36/37.
- [19] Stuart R. Wenham, Martin A. Green, Muriel E. Watt, Richard Corkish, "applied photovoltaics", Routledge, 2013

## **Chapitre II :**

Les cellules solaires à base de  
CIGS

### II.1 Introduction

L'énergie solaire est entrain de devenir l'une des principales sources d'énergie, en remplacement des combustibles fossiles, en raison de son abondance. Les cellules solaires convertissent cette énergie solaire en énergie électrique par absorption des photons par des matériaux semi-conducteurs. Les semi-conducteurs entrant dans la fabrication de ces cellules solaires sont l'objet de multiples recherches, dont le but principal est d'améliorer le rendement de conversion de ces dispositifs.

Les cellules solaires en couches minces à base de CIGS sont des cellules à hétérojonction, où le semi-conducteur de type p, le CIGS, est l'absorbeur de la cellule (c'est-à dire la zone où les paires électrons trous sont générées sous illumination). La jonction est formée avec le CdS/ZnO, des semi-conducteurs de type n. Le ZnO est appelé couche fenêtre, car il doit laisser passer le rayonnement jusqu'à l'absorbeur. [01]

Dans ce chapitre, on tentera de présenter le CIGS, donner une idée générale sur ces propriétés, puis nous montrerons ce qu'est une couche mince et les techniques de dépôt des couches minces à base de CIGS, ensuite nous décrivons la structure d'une cellule à couche mince CIGS, en terminant le chapitre par une étude bibliographique.

### II.2 Description du CIGS

Le Cuivre Indium Gallium Sélénium (CIGS où  $\text{CuIn}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{Se}_2$ ) est un semi-conducteur ternaire en solution solide. La concentration d'indium et de gallium peut varier du sélénure de cuivre et d'indium pur ( $x=1$ , CIS) à du sélénure de cuivre et de gallium pur ( $x=0$ , CGS). Ainsi, son gap varie continuellement avec  $x$ , de 1.0 eV pour CIS aux environs 1.7eV pour le CGS. Cristallographiquement, le CIGS est un tétraèdre appartenant à la famille des I-III-VI<sub>2</sub> avec une structure de chalcopyrite Figure II.1.

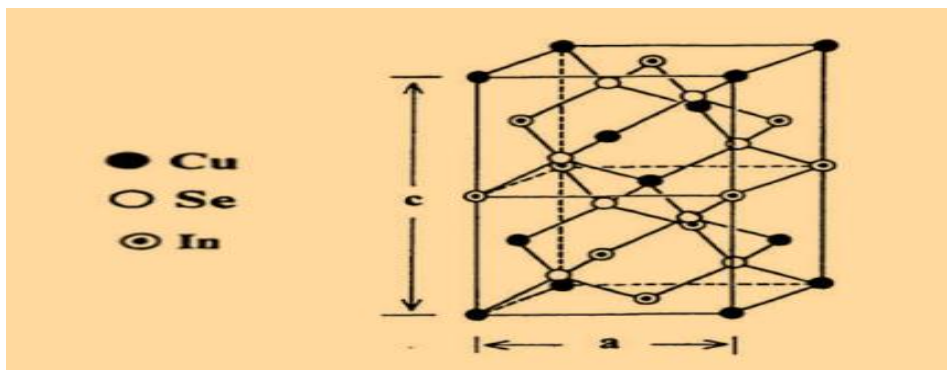


Figure II.1: Maille élémentaire du composé CIS. [02]



L'alliage CIGS entre principalement dans la fabrication d'une cellule solaire utilisée sous forme d'une couche mince poly-cristalline, comme dans les cellules de première génération issues du silicium elles utilisent le principe de la jonction PN. La différence est que la structure du CIGS forme une jonction complexe constituée de matériaux de nature différentes (hétérojonction) de type CIGS(p)/CdS(n)/ZnO(n). La communauté scientifique travaille depuis déjà quelques années au remplacement de la couche de CdS par un film écologiquement plus compatible ne contenant plus de cadmium toxique, les matériaux les plus prometteurs étant des composés communs (Zn, Mg) (O, S) ou de sulfure d'indium (métal plus rare). [02]

### II.3 Propriétés du matériau CIGS

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

#### II.3.1 Généralités sur les éléments de base du matériau CIGS

La première cellule solaire à base de semi-conducteur a été réalisée en 1876 par l'élaboration d'une couche de sélénium entre deux électrodes. Mais la réalisation des cellules solaires en couches minces à base des matériaux à structures chalcopyrites suite à l'élaboration de cellules photovoltaïques en  $\text{CuInSe}_2$  /CdS par S.Wagner et al.en 1974, et ces travaux ont abouti à des rendements de 12% à partir d'un monocristallin de  $\text{CuInSe}_2$ . Des paramètres physiques et chimiques des éléments (Cu, In, Ga, Se) utilisés pour l'élaboration des couches  $\text{CuInSe}_2$  et  $\text{Cu}(\text{In, Ga})\text{Se}_2$  sont groupés dans le tableau II.1.

Paramètres	Cu	In	Ga	Se
Masse atomique (g/mol)	63.546	114.82	69.74	78.96
Configuration électronique	[Kr] 3d <sup>10</sup> 4s <sup>1</sup>	[Kr] 3d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>1</sup>	[Ar] 3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>1</sup>	[Ar] 3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>4</sup>
Masse volumique à 300 k (g/cm <sup>3</sup> )	8.96	7.31	5.1	4.79
Température de fusion (°C)	1083	156	29.78	217
Température d'ébullition (°C)	2595	2000	2403	688
Conductivité électronique (10 <sup>6</sup> /cm.Ω)	0.596	0.116	0.0678	10 <sup>-12</sup>
Conductivité thermiques (W/cm. K)	4.01	0.816	0.0678	0.0204
Potentiel d'ionisation (1 <sup>er</sup> ) (eV)	7.726	7.786	5.999	9.752
Electronégativité de Pauling	1.9	2	1.81	2.4
Rayon atomique (nm)	0.128	0.162	0.161	0.14

**Tableau II.1:** Propriétés physiques et chimiques des éléments Cu, In, Ga et Se.

Les deux semi-conducteurs chalcopyrites (CGS et CIGS) appartiennent à la première famille qui est composée d'un élément de la 1<sup>ère</sup> colonne, d'un élément de la 3<sup>ème</sup> colonne et d'un élément de la 6<sup>ème</sup> colonne du tableau périodique des éléments chimiques c'est -à-dire I-III-VI 2.

I	III	VI
	<sup>5</sup> <sub>10.81</sub> <b>B</b>	<sup>8</sup> <sub>15.99</sub> <b>O</b>
	<sup>13</sup> <sub>26.98</sub> <b>Al</b>	<sup>16</sup> <sub>32.065</sub> <b>S</b>
<sup>29</sup> <sub>63.546</sub> <b>Cu</b>	<sup>31</sup> <sub>69.74</sub> <b>Ga</b>	<sup>34</sup> <sub>78.96</sub> <b>Se</b>
	<sup>49</sup> <sub>114.82</sub> <b>In</b>	<sup>52</sup> <sub>127.60</sub> <b>Te</b>

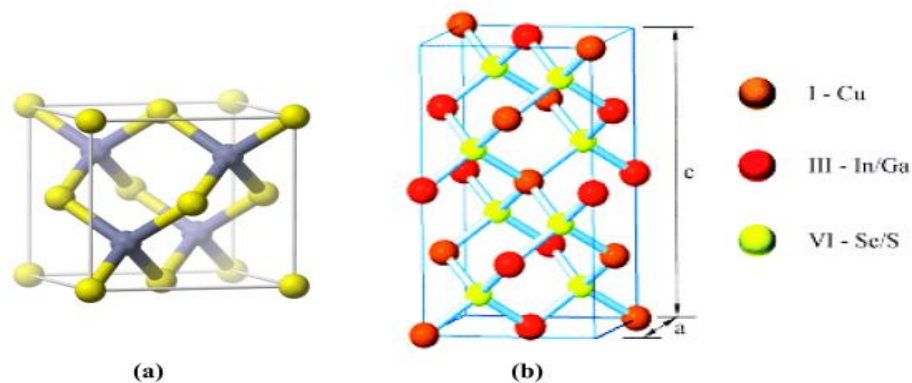
**Tableau II.2 :** La classification périodique des éléments constituant la famille I-III-VI 2.

### II.3.2 Structure cristalline et différents alliages dérivés du CuInSe<sub>2</sub>

#### II.3.2. 1 Structure cristalline

Le CuInSe<sub>2</sub> et le CuGaSe<sub>2</sub> sont des matériaux qui forment l'alliage de Cu (In, Ga)Se<sub>2</sub>, appartiennent à la famille I-III-VI 2 qui possède une structure tétragonale de chalcopyrite. Les chalcopyrites basées sur le CuInSe<sub>2</sub> ont une structure cubique zinc

blende, également appelée sphalérite comme le ZnSe. Chaque atome de Se est lié tétraédriquement à deux atomes de Cu et d'In, tandis que chaque atome de Cu ou d'In est entouré par quatre atomes de Se. La longueur de la liaison Cu-Se est de  $2.43\text{\AA}$  et celle de In-Se est de  $2.57\text{\AA}$ , ce qui donne une distorsion tétragonale de l'unité de 0.3%. Dans le cas du CIGS, les sites des atomes du groupe III sont donc occupés par des atomes d'In ou de Ga, dans des proportions dépendant de la composition de l'alliage.



**Figure II.2:** (a) Structure de la maille élémentaire du zinc-blende, (b) Structure de la maille élémentaire de la chalcopyrite du CuInSe<sub>2</sub>. [03]

### II.3.2. 2 Propriétés électriques

#### ▪ Dopage

Le CIGS utilisé dans les cellules standard est de type p. Ce dopage est dû à la présence de défauts cristallins générant des états accepteurs (dopage intrinsèque).

Dans le cas du CIGS, ces valeurs varient dans de faibles proportions en fonction du taux de Ga.

Les niveaux accepteurs sont principalement dus aux lacunes de cuivre ( $V_{Cu}$ ) et d'indium ( $V_{In}$ ), ainsi qu'aux substitutions d'indium par le cuivre ( $Cu_{In}$ ). Cependant le dopage p du CIGS est essentiellement lié aux  $V_{Cu}$  pour deux raisons. Premièrement, ils génèrent un niveau accepteur très proche (0.03 eV) du maximum de la bande de valence. Deuxièmement, leur énergie de formation est la plus favorable ( $E_f = 0.6\text{eV}$ ). Quand aux défauts générant des niveaux donneurs ( $In_{Cu}$  et  $Cu_{In}$ ), ils possèdent une énergie de formation beaucoup élevée que les  $V_{Cu}$ . C'est donc l'abondance de ce dernier défaut dans le CIGS qui est à l'origine de son dopage p. [04]

### II.3.2.3 Propriétés optiques et génération de courant

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

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

Cette relation illustre clairement l'influence du gap sur la plage d'énergies dans laquelle le CIGS absorbe. [05]

### II.3.3 Influence du Ga

L'introduction des atomes de Ga dans le  $\text{CuInSe}_2$  permet d'obtenir le composé  $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$  dont la valeur de la bande interdite est comprise entre 1.0 et 1.7 eV. Les cellules solaires à base du matériau en  $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$  avec un rapport  $\text{Ga}/(\text{In}+\text{Ga})$  de 25 à 35% (Bande interdite de 1.1 à 1.2 eV) présentent les meilleurs rendements. Ces performances sont attribuées à la présence de la couche d'OVC, couche déficitaire en cuivre en surface du  $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$  qui participe aux performances photovoltaïques de ce matériau. De même que les lacunes ( $2V_{\text{Cu}} + V_{\text{Ga}}$ ) sont moins stables que celles impliquant l'indium, et donc participent moins à neutraliser les défauts d'un point de vue électronique dans le  $\text{CuGaSe}_2$ . On observe une diminution de la densité de défauts pour une quantité optimale de Ga ( $\frac{\text{Ga}}{\text{Ga}+\text{In}} = 0.3$ ) pour un composé en  $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$ . La présence d'un nombre plus faible de défauts implique moins de pertes par recombinaison dans le volume du matériau. [03]

## II.4 Les couches minces

### II.4.1 Définition d'une couche mince

Par principe, une couche mince est une fine couche d'un matériau déposé sur un autre matériau, appelé "substrat" dont l'une des dimensions qu'on appelle l'épaisseur a été fortement réduite de telle sorte qu'elle varie de quelques "nm" à quelques " $\mu\text{m}$ ". Cette faible distance entre les deux surfaces limites entraîne une perturbation de la majorité des

propriétés physiques, très souvent un tel petit nombre de couches atomiques possède des propriétés très différentes. Par exemple la réflexion optique ou l'absorption peuvent être maîtrisées de manière très précise, de même pour la conductivité électrique.

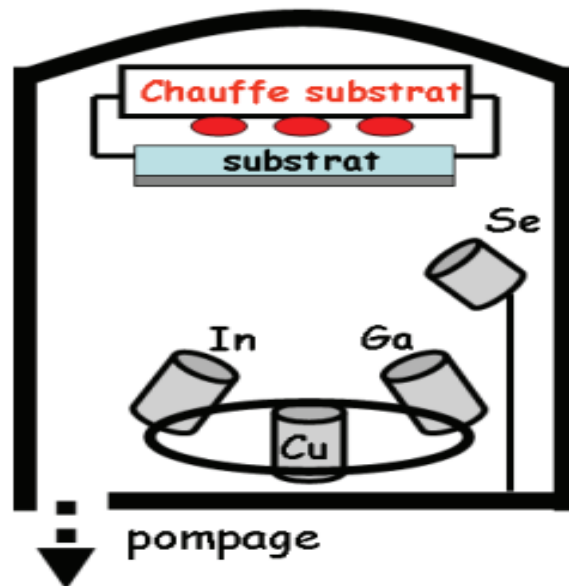
En revanche, lorsque l'épaisseur d'une couche mince dépassera un certain seuil l'effet d'épaisseur deviendra minime et le matériau retrouvera les propriétés bien connues du matériau massif. [06]

### II.5 La Synthèse du CIGS

Plusieurs méthodes de dépôt sont développées pour le CIGS. Certaines permettent d'atteindre de très hauts rendements en laboratoire, mais le coût du procédé et sa mise en œuvre peuvent s'avérer difficiles à développer à grande échelle, tandis que d'autres sont moins efficaces, mais économiques et facilement transposables en industrie. Le choix de la méthode s'avère important pour allier facilité de mise en œuvre et qualité du matériau. Dans cette partie, les principaux procédés sont décrits.

#### II.5.1 Co-évaporation

La Co-évaporation est une méthode de dépôt où le cuivre, l'indium, le gallium et le sélénium sont évaporés indépendamment sous un vide poussé (de l'ordre de  $10^{-8}$  mbar) sur un substrat chauffé à une température comprise entre 450 et 550 °C, sont déposés simultanément le Se dont le creuset est chauffé entre 300 et 320 °C, le Cu (1360 °C), l'In (900 °C) et le Ga (990 °C). Un schéma du montage est présenté en figure II.7. La procédure de dépôt permettant d'atteindre les meilleurs rendements de conversion est constituée de trois étapes, appelée « three-stage process », développée par le NREL, et désormais majoritairement privilégiée par les laboratoires. Cette procédure est présentée sur la figure suivante :



**Figure II.3 :** Représentation schématique du bâti de dépôt par Co-évaporation utilisé pour la synthèse des couches de CIGS. [07]

Une première étape implique le dépôt de  $(\text{In, Ga})_2 \text{Se}_3$  sur un substrat à 300-350°C.

Une deuxième étape de dépôt de Cu et Se permet d'obtenir une couche riche en cuivre et d'initier la croissance de gros grains, alors que le procédé se termine par un dépôt riche en indium et gallium pour assurer les bonnes propriétés électroniques de la couche. Les dernières étapes sont effectuées avec une température de substrat de 550 à 600°C. Le refroidissement se fait sous vapeur de Se.

Les meilleures cellules obtenues par ce procédé atteignent un rendement de conversion de l'ordre de 20%.

### II.5.2 Salinisation/ sulfuration de précurseurs métalliques

Cette approche consiste à déposer le Cu, l'In et le Ga couche par couche ou simultanément à basse température (en général inférieure à 200°C), puis à les sélénier pour obtenir l'absorbeur. La salinisation conduisant souvent à un gradient de Ga vers la face arrière, une sulfuration peut être également afin d'augmenter la largeur de bande interdite de l'absorbeur en surface. Ce procédé de salinisation sulfuration permet ainsi d'obtenir un double gradient de gap comme pour la Co-évaporation. On notera plus particulièrement qu'un recuit inadéquat conduit à une ségrégation du gallium vers la face arrière du CIGS, limitant fortement le  $V_{CO}$  et le rendement des cellules.

### II.5.3 Spray-pyrolyse

Cette technique consiste à pulvériser sur un substrat chauffé une solution contenant des précurseurs de Cu, In, Ga et Se. En contact du substrat, les éléments vont se décomposer et réagir ensemble sous l'effet de la chaleur. Les précurseurs utilisés sont le plus souvent des chlorures de Cu et d'In, avec un composé chalcogène comme le chlorure cuivreux et la diméthylséléno-urée. Les rendements obtenus ne dépassent malheureusement pas 9,5 %. [07]

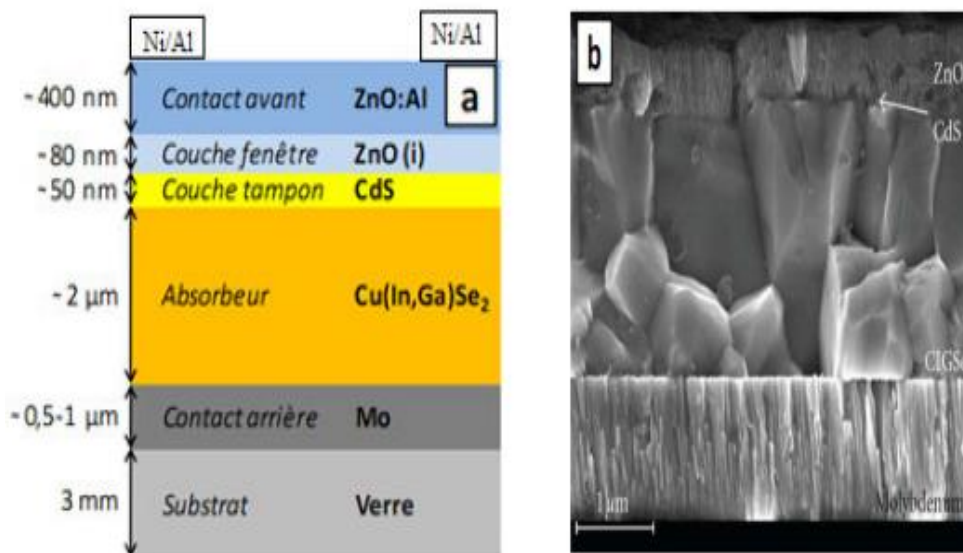
### II.6 Structure d'une cellule à couche mince CIGS

Dans sa structure la plus répandue, une cellule CIGS est formée d'un empilement de plusieurs matériaux en couches minces déposés successivement sur un substrat. La figure II.8 présente la structure standard d'une cellule à base de Cu (In, Ga)(Se)<sub>2</sub>.

Les principaux éléments dans la cellule sont:

#### II.6.1 Substrat

Le substrat le plus couramment utilisé est le verre sodo-calcique, qui présente toutes les propriétés requises. Il contient notamment du sodium, qui diffuse vers le CIGS lors de l'étape de recuit. Son effet bénéfique sur le fonctionnement de la cellule a été démontré par de nombreux auteurs.



**Figure II.4 :** Structure d'une cellule solaire à base de CIGS. (a) schéma de l'empilement des différentes couches, (b) image MEB de la tranche d'une cellule. [08]

### II.6. 2 Contact arrière

Le contact arrière, qui constitue le pôle positif du générateur photovoltaïque, est un métal déposé sur la partie inférieure de l'absorbeur dont le rôle est de collecter les porteurs à partir de l'absorbeur et de les livrer à la charge externe. Il doit donc, répondre à certains critères chimiques, mécaniques et économiques. De nombreux métaux ont été étudiés comme le Tungstène, le Molybdène, le Chrome, le Tantale, le Manganèse, l'Or, l'Aluminium, l'Argent et le cuivre. Parmi ces métaux, le Molybdène qui est le plus couramment utilisé comme contact arrière des cellules solaires CIGS par les laboratoires de recherche et en industrie, en raison de sa stabilité relative aux températures élevées rencontrées lors du procédé de fabrication du CIGS (de l'ordre de 550 à 600° C), et de sa faible résistance de contact avec le CIGS. Son épaisseur est d'environ 300 nm à 1000 nm. La méthode de dépôt utilisée est la pulvérisation cathodique. La valeur typique de la résistivité de Mo est de l'ordre  $5 \times 10^{-5}$  cm ou moins. De plus, il ne réagit pas avec le CIGS ou y diffuse. En effet, le Mo peut réagir avec le Se lors du dépôt de CIGS pour former une couche de quelques nanomètres de  $\text{MoSe}_2$ . Par conséquent, la structure CIGS/Mo devient alors CIGS/ $\text{MoSe}_2$ /Mo. Le  $\text{MoSe}_2$  est un semi-conducteur possédant un gap de 1,41 eV, il est plus élevé que celui du CIGS est permet ainsi, de diminuer les recombinaisons à l'interface de ces deux couches. De plus, il a pour effet de donner un comportement ohmique à l'hétéro contact CIGS/Mo. Mais le problème posé récemment pour le Mo est sa réflectivité relativement faible qui devient un inconvénient lorsque des absorbeurs avec une épaisseur réduite ( $< 2 \mu\text{m}$ ) sont utilisés. c.à.d. dans le cas où les photons incidents, avec des énergies plus grandes que la largeur de bande, ne peuvent pas être absorbés dans un seul passage dans l'absorbeur.

### II.6. 3 Couche absorbeur

L'absorbeur est la partie de la cellule dans laquelle les photons vont être convertis en paires électrons-trous. Dans le cas présent, il s'agit d'un semi-conducteur de type P de la famille I-III-VI, dont les différentes variantes déjà étudiées conduisent à la formule générale suivante:  $(\text{Cu}, \text{Ag}) (\text{In}, \text{Ga}, \text{Al}) (\text{Se}, \text{S}, \text{Te})_2$ . La substitution du Cu par de l'argent, de l'indium par du gallium ou de l'aluminium, du sélénium par du soufre ou du tellure, permet de modifier les propriétés du matériau comme sa largeur de bande



interdite. Le composé le plus développé en recherche et en industrie, et qui constitue le sujet de notre étude, est le  $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$ .

### II.6. 4 Couche tampon

La couche tampon est un semi-conducteur ayant une conductivité de type n dont le gap doit être supérieur à celui de l'absorbeur. Deux rôles lui sont majoritairement attribués : un rôle électrique, et un rôle de couche protectrice. Du point de vue électrique, cette couche adapte la largeur de la bande interdite entre l'absorbeur et la couche fenêtre et limite les recombinaisons des porteurs à l'interface de ces deux couches. Elle permet également de protéger la surface de l'absorbeur lors du dépôt par pulvérisation cathodique de la couche de ZnO, qui peut engendrer des défauts à la surface du CIGS.

Plusieurs semi-conducteurs de type n dont les bandes interdites sont entre 2,0 et 3,6 eV ont été appliqués comme tampon pour les cellules solaires CIGS. Cependant, le CdS déposé par bain chimique (CBD) reste le préféré car il donne toujours des hauts rendements. Néanmoins, sa largeur de bande interdite, égale à 2,4 eV relativement faible engendre des pertes optiques, de sorte que des quantités importantes de lumière sont absorbées avant de pouvoir atteindre la couche CIGS, même pour les couches de CdS aussi minces que 50 nm. Les photons absorbés dans le CdS ne contribuent pas au photocourant, à cause de la petite longueur de diffusion des porteurs minoritaires (trous) dans le CdS, ce qui conduit à un taux élevé de recombinaison. Pour cette raison, et en plus des contraintes liées à l'utilisation du Cadmium (Cd) qui est un élément toxique, de nombreuses études sont menées pour substituer le CdS par d'autres matériaux, parmi eux, on peut citer (OH, S), Zn (O, OH), ZnS, ou ZnSe.

### II.6. 5 Couche fenêtre

La couche fenêtre doit être à la fois transparente, afin de laisser suffisamment de lumière à la région de jonction et la couche absorbante du dispositif, et conductrice pour permettre le transport du photo-courant généré au circuit extérieur sans trop de pertes. Cette couche fenêtre est constituée d'oxyde transparent conducteur (TCO), sur lequel une fine grille métallique doublée (Ni-Al) est déposée de façon à réduire la résistance série de la couche fenêtre et de collecter les charges générées par le dispositif. Le Ni sert de couche d'accroche et permet d'éviter l'oxydation de l'Al liée à la présence sous

jacente du TCO. Le TCO, généralement utilisé pour les cellules CIGS, est l'oxyde de Zinc (ZnO) déposé par pulvérisation cathodique, mais l'oxyde d'Indium dopé à l'étain (ITO) peut également être rencontré.

Une bicouche ZnO est souvent utilisée pour le contact frontal transparent. La première couche est une couche mince de ZnO intrinsèque (i-ZnO), qui est typiquement de (50 - 100 nm) d'épaisseur et très résistive. Elle sert à limiter la formation de court-circuit dans les zones présentant un recouvrement imparfait du CIGS par la couche tampon. La seconde couche est fréquemment du ZnO dopé à l'Aluminium (ZnO: Al), mais d'autres dopants comme le Bore (ZnO: B) ou le Gallium (ZnO: Ga) existent aussi. L'épaisseur et le dopage de cette couche sont ajustés de façon à combiner transparence et conductivité. La bande interdite de la couche fenêtre doit être aussi élevée et aussi mince que possible afin de maintenir une faible résistance série. Le ZnO et le ZnO: Al ont respectivement des bandes d'environ 3,2 eV et 3,6 à 3,8 eV.

### II.6. 6 Jonction p-n

La jonction p-n dans les cellules solaires CIGS est formée entre le semi-conducteur type p (CIGS) et le type n (CdS). La différence des affinités électroniques des deux matériaux constituant la jonction se traduit par une discontinuité de bande interdite. La courbure de la bande de conduction ou  $\Delta E_c$  (Conduction Band Offset) entre le CIGS et le CdS est par convention positive, ce qui signifie que la bande de conduction de CdS est supérieure à celle de CIGS.

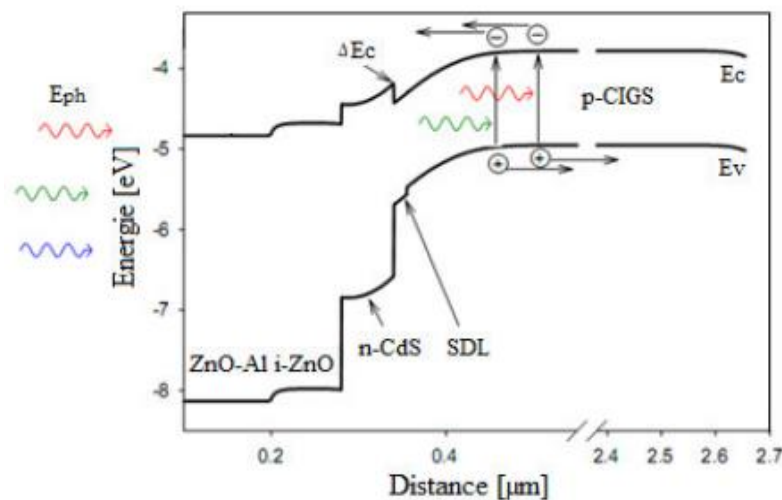


Figure II.5 : Structure de bande d'une cellule solaire Cu (In, Ga) Se<sub>2</sub>. [08]

La valeur optimale de la courbure de la bande de conduction est  $\Delta E_c = 0,3 \text{ eV}$  est obtenue pour un gap de CIGS=1,15 eV. Une courbure de la bande de conduction supérieure à 0,5 eV crée une barrière forte pour les électrons photo- générés limitant ainsi, le transport du courant. En revanche, une courbure de la bande de conduction nulle ou négative conduit à une augmentation de la recombinaison à l'interface, ce qui limite la tension de la cellule. La présence d'une couche de type inversé (type n) identifiée comme étant une couche de défauts de surface ou SDL (Surface Defect Layer) à la surface du matériau CIGS était rapportée par plusieurs auteurs. Elle possède un gap plus large que le CIGS, ce qui permet de réduire la recombinaison à l'interface CdS/CIGS et contribue ainsi à l'amélioration des performances de la cellule. [08]

### II.7 Conclusion

Ce chapitre a été consacré aux cellules solaires à base de matériaux semi-conducteurs de type CIGS, il se compose en trois principales parties, la première consacré à la description du matériau CIGS, et des propriétés de ses diverses compositions.

Ceci est suivi par la deuxième partie par de bref aperçus de la technique d'élaboration du CIGS. et on termine notre chapitre par la troisième partie on présente la structure la Structure d'une cellule à couche mince CIGS

Cette revue bibliographique nous a permis de cerner divers aspects concernant les semi-conducteurs les plus intéressants pour la fabrication de cellules solaires en couches minces, à savoir le diséléniure de cuivre et d'indium  $\text{CuInSe}_2$  et ses alliages avec Ga (Cu (In, Ga)  $\text{Se}_2$ ) sous sa forme chalcopyrite.

## BIBLIOGRAPHIE

- [01] Ben Ali Mourad, Rahmouni Seddik."Simulation et Optimisation d'une Cellule Solaire à base de Cu (In, Ga) Se<sub>2</sub> «, mémoire de master, Université Ahmed Draïa Adrar, 03/30/2018, p21.
- [02] ATEK Mourad. "Effets du taux d'ombrage sur les performances des cellules solaires à base de CIGS", mémoire de master, Université Ferhat Abbas de SÉTIF, le 19/09/2013, p36/37.
- [03] Elbar Mourad," Etude par simulation numérique d'une cellule solaire en CIGS à multi-jonction par le logiciel Tcad Silvaco", thèse doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, 21/06/2018, p12-20.
- [04] Ben Ali Mourad, Rahmouni Seddik," Simulation et Optimisation d'une Cellule Solaire à base de Cu (In,Ga)Se<sub>2</sub>",mémoire de master, Université Ahmed Draïa Adrar, 03/30/2018,p28.
- [05] Beghdadi souaad," Etude des performances d'une cellule solaire de type Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> (CIGS)",mémoire de master, Université Abou Baker Belkaid Tlemcen, 2015/2016,p53-54.
- [06] MOSTEFA KARA Selma, "Etude Et Simulation De Cellules Photovoltaïques A Couches Mincees A Base De Cis Et Cigs", Mémoire Master, Université Abou-Bakrbelkaid Tlemcen, 2012, P28.
- [07] Mme CHADEL ASMA," Optimisation et simulation numérique du profil de la couche absorbante et des différentes couches des cellules photovoltaïques à base de CIGS ", thèse de doctorat, UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID – TLEMCEM, p32-34.
- [08] Naïma TOUAFEK," Contribution à l'étude d'une cellule solaire en couches minces à base de CuIn<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>Se<sub>2</sub> "thèse de doctorat, Université Des Frères Mentouri – Constantine, 15 / 06 / 2015, p23-26.



## **Chapitre III :**

Méthodes et moyens de calculs

### III.1 Introduction

Le but de l'étude de simulation est d'estimer l'évolution des propriétés de la cellule simulée et de comprendre physiquement la structure développée d'une cellule solaire donnée en essayant d'analyser la tension du circuit ouvert  $V_{oc}$ , le courant de court circuit, le facteur de forme FF et le Rendement de conversion  $\eta$ . Pour cela, il est nécessaire d'utiliser un logiciel capable de simuler les paramètres d'une telle cellule. Plusieurs logiciels de simulation existent, parmi lesquels, nous avons utilisé le logiciel SCAPS (Solar Cell Capacitance Simulator). Dans ce chapitre, nous présentons les résultats de simulations des caractéristiques électriques, courant-tension et réponse spectrale, d'une cellule solaire en CIGS de type PN en utilisant le logiciel SCAPS. Pour chaque structure, on a procédé à une recherche particulière pour retrouver les paramètres de simulation des cellules présentant le meilleur rendement de conversion. [01]

### III.2 Présentation du logiciel SCAPS

#### III.2. 1. Introduction

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

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

SCAPS est développé à l'origine pour des structures des cellules de  $\text{CuInSe}_2$  et de  $\text{CdTe}$ . Cependant, Plusieurs version ont été amélioré ses capacités de façon à devenir applicable pour des cellules solaires cristallines (Si et GaAs) et des cellules amorphes (a-Si et de Si micro-morphe). [02]

Le SCAPS-1D est un bon logiciel utilisé pour la simulation numérique en une dimension des dispositifs photovoltaïques. Ce modèle est basé sur la résolution des équations de

## Chapitre III : Méthodes et moyens de calculs

---

continuité des électrons et des trous et sur l'équation de poisson. Il est très facile à l'utiliser.

[03]

Un aperçu de ses caractéristiques principales est donné ci-dessous:

- Jusqu'à 7 couches semi-conductrices.

Presque tous les paramètres peuvent être introduits avec variations graduées (en dépendance de la composition et de la profondeur de la cellule): Par exemple:  $\chi$ ,  $\epsilon$ ,...

- Mécanismes de recombinaison : bande à bande (direct), SRH ou Auger.
- Les niveaux de défauts: en volume ou à l'interface, en considérant leurs états de charge et la recombinaison à leurs niveaux.
- Les niveaux des défauts, type de charge: pas de charge (neutre), monovalent (un seul donneur, accepteur), divalent (double donneur, double accepteur, amphotère), multivalent (défini par l'utilisateur).
- Les niveaux des défauts, distribution énergétique : niveau discret, uniforme, Gauss, sous forme de queue ou bien une combinaison.
- Les niveaux des défauts, propriété optique : Excitation directe par la lumière est possible (connu par effet de l'impureté photovoltaïque, IPV).
- Les niveaux des défauts, transitions métastables entre les niveaux.
- Contacts: Travail de sortie du métal ou régime de bande plate; Propriété optique (Réflexion ou transmission) du filtre.

SCAPS est originellement développé pour les structures de cellules de famille CuInSe<sub>2</sub> et CdTe. Cependant, plusieurs extensions ont amélioré ses capacités de façon à devenir applicable pour les cellules solaires cristallines (de la famille Si et GaAs), ainsi que les cellules solaires amorphes (a-Si et les micro-morphes Si). [02]

### III.3 Notions de base

SCAPS est un programme conçu pour fonctionner sous le système Windows, développé par Lab Windows/CVI de la national Instruments. SCAPS s'ouvre avec l'icone 'Action Panel'. La fenêtre qui s'ouvre est présentée dans la Figure III.1.

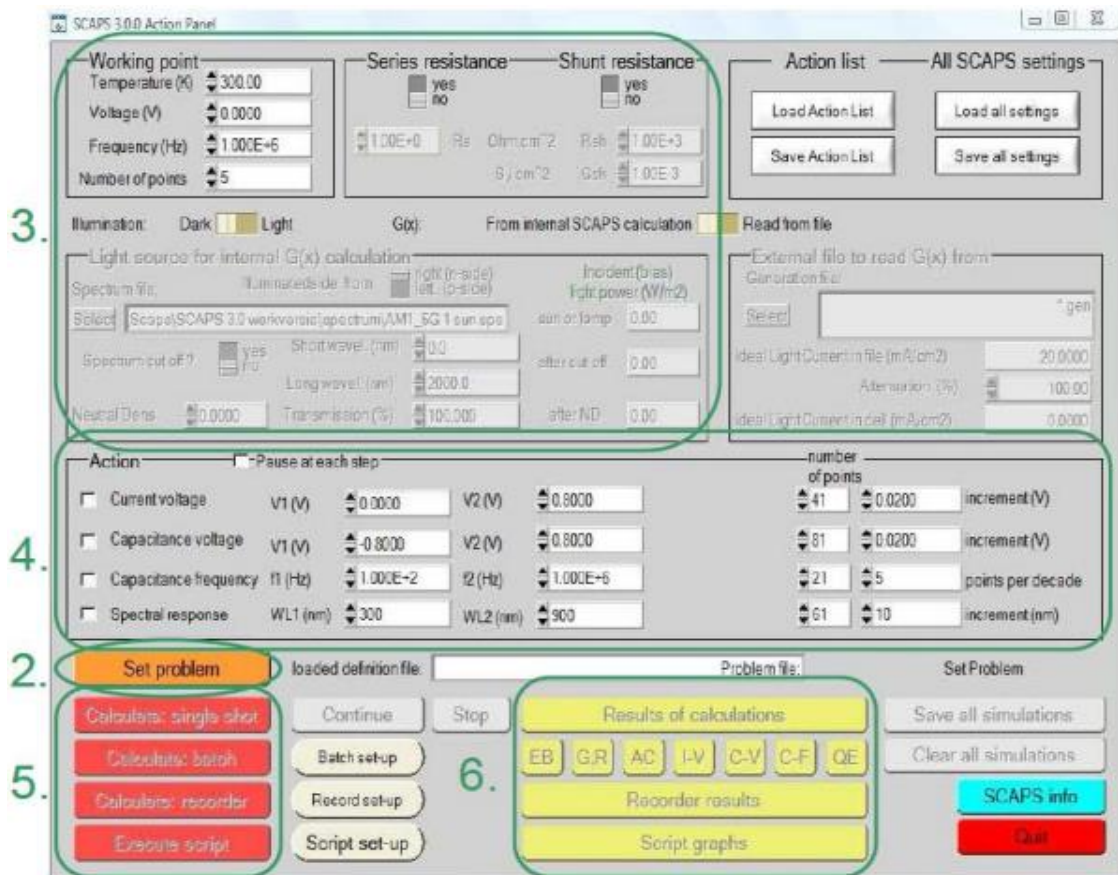


Figure III.1 : Panneau de démarrage de SCAPS, le panneau d'action ou principal. [03]

La signification des blocs numérotés de 1 à 6 est expliquée dans le texte. Il ya des panneaux dédiés pour les actions de base:

1. Lancer SCAPS.
2. Définir le problème, ainsi que la géométrie, les matériaux et toutes les propriétés de la cellule solaire étudiée.
3. Indiquer les circonstances dans lesquelles la simulation est effectuée (spécifier le point de fonctionnement).
4. Indiquer la mesure (la caractéristique) à simuler.
5. Commencer le(s) calcul(s).
6. Afficher les courbes de simulation.

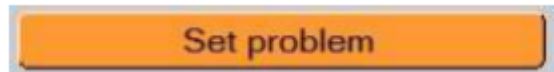
Ces étapes sont plus détaillées dans ce qui suit :





### III.3.1 Lancer SCAPS

On clique sur l'icône ci-dessus sur le bureau, ou bien double-clique sur le fichier SCAPS3200.EXE dans le gestionnaire de fichiers (ou dans n'importe quelle autre version de SCAPS). SCAPS s'ouvre avec le panneau d'action.



### III.3.2 Définir le problème

On clique sur le bouton SET PROBLEM dans le panneau d'action, et on choisit LOAD dans le coin droit en bas du panneau qui s'ouvre par la suite. On sélectionne et on ouvre (par exemple NUMOS CIGS Baseline.def. Ceci est un fichier exemple d'une cellule solaire à base de CIGS. Par la suite, il est possible de modifier toutes les propriétés de la cellule en cliquant sur 'SET PROBLEM' dans le panneau d'action.

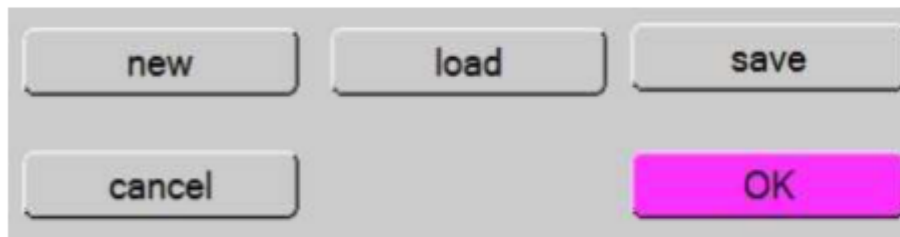
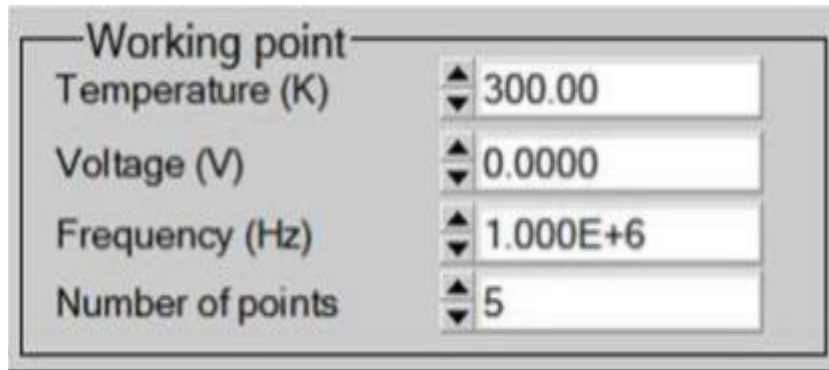


Figure III.2 : Définir le problème. [03]

### III.3.3 Définir le point de fonctionnement

Le point de fonctionnement spécifie les paramètres qui ne sont pas variables dans les mesures de la simulation, et qui sont relatifs à l'opération de mesure. Ceci implique :

- **La température T** : Importante pour toutes les mesures. Note : dans SCAPS :  $N_c(T)$ ,  $N_v(T)$ , les vitesses thermiques, le voltage thermique  $kT$  et tous leurs dérivés sont les seuls variables qui ont une dépendance thermique explicite ; on doit saisir manuellement, pour chaque valeur T, les paramètres du matériau correspondant.



**Figure III.3 :** Points de fonctionnement (point de travail). [03]

- **Le voltage V** : il ne concerne pas les simulations I-V et C-V. C'est le voltage de la polarisation DC dans une simulation C-f et  $QE(\lambda)$ . SCAPS commence toujours à 0 V, et s'exécute au voltage du point de fonctionnement par un nombre d'étapes qu'on doit aussi spécifier.
- **La fréquence f** : elle ne concerne pas les simulations I-V,  $QE(\lambda)$  et C-f. C'est la fréquence dans laquelle la caractéristique C-V est simulée.
- **L'illumination** : elle est utilisée dans toutes les mesures. Pour  $QE(\lambda)$ , elle détermine les conditions de polarisation de la lumière.

Les paramètres de base sont : l'obscurité ou la lumière, le choix du côté illuminé, le choix du spectre. Le spectre d'illumination one Sun ( $= 1000 \text{ W/m}^2$ ) avec la masse d'air 1.5 global est le spectre par défaut, mais il existe aussi une large gamme de lumières monochromatiques et de spectres pour plus de simulations personnalisées. S'il y a un simulateur optique, on peut immédiatement charger un profil de génération au lieu d'utiliser un spectre.

### III.3.4 Sélection des caractéristiques à simuler

Dans la partie Action du panneau action, on peut choisir un ou plusieurs mesures à simuler: I-V, C-V, C-f et  $QE(\lambda)$ . On peut ajuster également, les valeurs initiales et finales de l'argument, ainsi que le nombre des étapes

### III.3.5 Lancer le calcul



### III.3.6 Afficher les courbes simulées

Après les calculs, SCAPS passe au panneau de bande d'énergie, présenté dans la figure III.4. Dans ce panneau, on peut voir les diagrammes de bandes, les densités des porteurs pour des tensions intermédiaires, on utilise le bouton pause dans le panneau d'action. On peut faire apparaître les résultats par les commandes PRINT, SAVE libres, la densité du courant ; au dernier point de polarisation. Si on veut afficher les résultats



Figure III.4 : Panneau des bandes d'énergie. [03]

### III.3.7 Afficher les courbes I-V

La figure III.5 montre le panneau d'affichage des courbes I-V à l'obscurité et sous éclairage. La couleur de la dernière courbe calculée est indiquée (lorsque le graphe est trop encombré, on clique CLEAR ALL GRAPHS dans le panneau d'action). Les courbes des taux de recombinaison sont affichées seulement pour la dernière simulation. La couleur de la légende correspond à la couleur de la courbe.

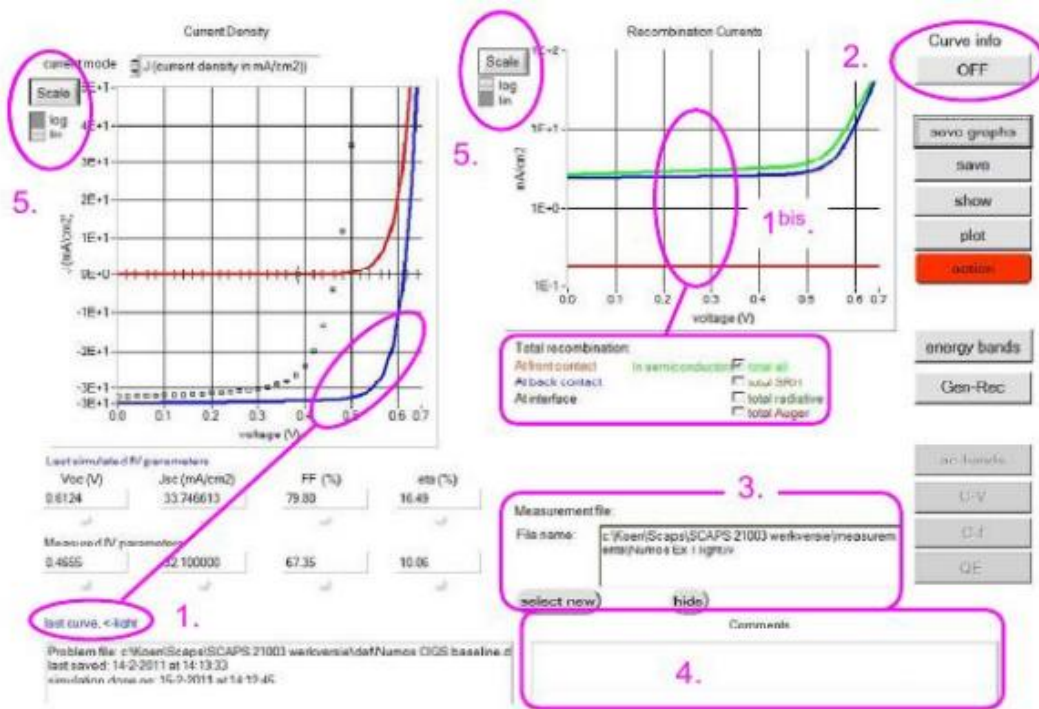


Figure III.5 : Panneau d'affichage des courbes I-V à l'obscurité et sous éclairage. [03]

### III.4 Définition d'une cellule solaire

La méthode recommandée pour introduire une cellule solaire est d'utiliser l'interface graphique du programme. De cette façon on peut introduire interactivement tous les paramètres qui seront contrôlés par SCAPS de manière à ne pas obtenir des valeurs impossibles ou incohérentes.

#### III.4.1 Edition de la structure d'une cellule solaire

Quand on clique sur le bouton 'SET PROBLEM' sur le panneau d'action, le panneau 'SOLAR CELL DEFINITION' s'affichera. Ce dernier permettra de créer ou de modifier les structures des cellules solaires et de les enregistrer. Les propriétés des couches, des contacts et d'interfaces peuvent être modifiés en cliquant sur le bouton approprié comme le montre la figure III.6. De la même manière, des couches peuvent être rajoutées en cliquant 'ADD LAYER'.

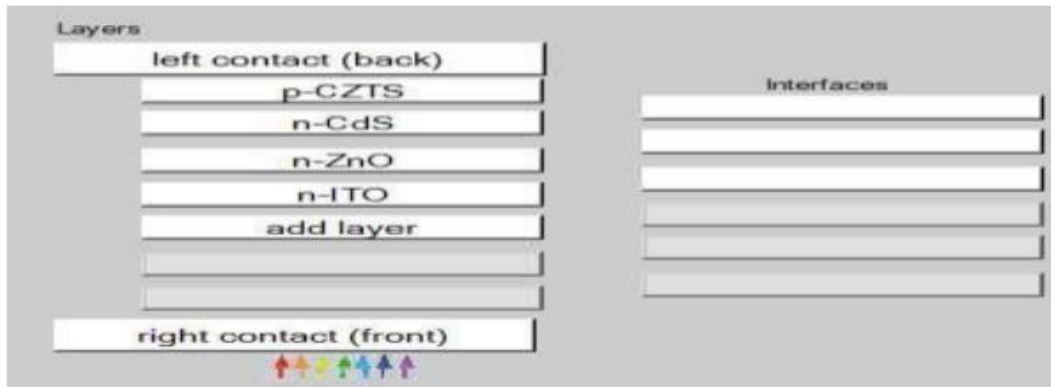


Figure III.6 : Définition de la structure d'une cellule solaire. [03]

### III.4. 2 Propriétés des contacts

Les propriétés des contacts peuvent être introduites soit en cliquant sur le bouton du contact avant ou celui du contact arrière sur le panneau de définition de la cellule. Un panneau des propriétés de contact 'CONTACT PROPERTIES PANEL' s'ouvre, comme le montre la figure III.7.

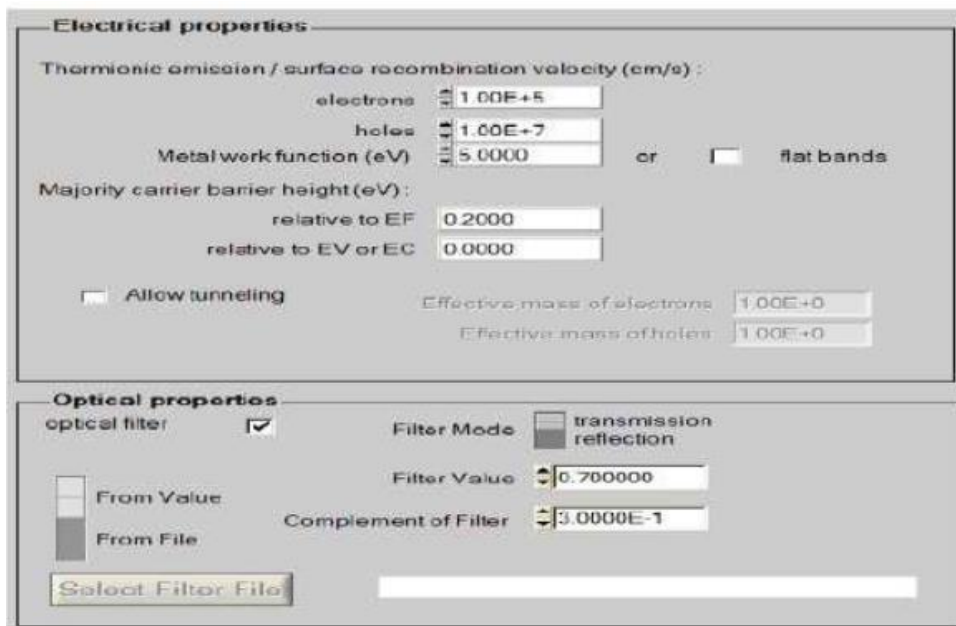


Figure III.7 : Panneau des propriétés des contacts. [03]

### III.4.3 Définition des couches

En cliquant sur le bouton « add layer », une fenêtre (Figure III.8) s'ouvre qui contient les différents paramètres du matériau à introduire. Ces paramètres peuvent avoir des

### Chapitre III : Méthodes et moyens de calculs

distributions uniformes ou non uniformes, selon la physique du matériau. Dans la première case, on introduit le nom de la couche (qui correspond au type du dopage). Dans la deuxième case, l'épaisseur de la couche est introduite. Dans le deuxième block, on introduit : le gap d'énergie, l'affinité électronique, la permittivité diélectrique, les densités effectives des bandes de conduction et de valence, vitesse thermique des électrons et des trous libres, les mobilités des électrons et des trous.

Finalement, une case, qui permet d'ajouter les masses effectives des électrons et des trous si on tient compte du transport des porteurs par effet tunnel. Si le matériau est un composé d'éléments avec des concentrations non uniforme, on peut introduire des variations graduelles des précédents paramètres.

Si on introduit les défauts (pièges); ils peuvent être uniformes ou non uniformes, discrets, avec des distributions gaussiennes, donneurs, accepteurs, neutres, monovalents ou divalents.

SCAPS 3.2.01 Layer Properties Panel	
LAYER 1	p-CZTS
thickness (μm)	2.000
	uniform pure A (y=0)
The layer is pure A: y = 0, uniform	0.000
Semiconductor Property P of the pure material	pure A (y = 0)
bandgap (eV)	1.500
electron affinity (eV)	4.500
dielectric permittivity (relative)	10.000
CB effective density of states (1/cm <sup>3</sup> )	2.200E+18
VB effective density of states (1/cm <sup>3</sup> )	1.800E+19
electron thermal velocity (cm/s)	1.000E+7
hole thermal velocity (cm/s)	1.000E+7
electron mobility (cm <sup>2</sup> /Vs)	1.000E+2
hole mobility (cm <sup>2</sup> /Vs)	2.000E+1
<input type="checkbox"/> Allow Tunneling	effective mass of electrons
	effective mass of holes
	1.000E+0
	1.000E+0
	no ND grading (uniform)
shallow uniform donor density ND (1/cm <sup>3</sup> )	0.000E+0
	no NA grading (uniform)
shallow uniform acceptor density NA (1/cm <sup>3</sup> )	1.000 16

Figure III.8 : Propriétés de la couche ajoutée. [03]

Defect 4 of layer 1		
defect type	Single Donor (0/+)	
capture cross section electrons (cm <sup>2</sup> )	1.000E-15	
capture cross section holes (cm <sup>2</sup> )	1.000E-15	
energetic distribution	Gauß	
reference for defect energy level Et	Above EV (SCAPS < 2.7)	
energy level with respect to Reference (eV)	0.600	
characteristic energy (eV)	0.200	
Nt grading dependent on position x: Nt(x) exponential		
Nt total (1/cm <sup>3</sup> )	Left (x=0) 1.000E+15	Right (x=1) 1.000E+14
Nt peak (1/eV/cm <sup>3</sup> )	Left (x=0) 2.821E+15	Right (x=1) 2.821E+14

Figure III.9 : Définition des types des défauts et de recombinaison présents. [03]

### III.5 Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté on détail le fonctionnement de cet outil unidimensionnel de simulation, les différents modules, la partie de définition de la structure et enfin la partie d'affichage des résultats. Pour les avantages de ce logiciel, on a choisi d'utiliser le SCAPS-1D pour simuler une structure classique d'une cellule solaire substrat à base du composé CIGS en couches minces. Dans le chapitre qui suit on va présenter la simulation de la structure proposée, les résultats des performances photovoltaïques obtenus et la discussion. [03]



## BIBLIOGRAPHIE

- [01] MAATI Hocine, BAHLOULI Kamel. "Etude des performances d'une cellule photovoltaïques à base D'InGaN", mémoire de Master, UNIVERSITE DE SAÏDA DR MOULAY TAHAR, 2018, p40.
- [02] Beghdadi souaad," Etude des performances d'une cellule solaire de type Cu (In, Ga) Se<sub>2</sub> (CIGS) ", mémoire de master, Université Abou Baker Belkaid Tlemcen, 2015/2016, p56-59.
- [03] NOURI Achouak, BOUALLEM Zineb," Etude de l'effet de la couche mince CdZnS dans la cellule solaire CZTS ", Mémoire de Master, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, 2016/2017, p28-35.





## **Chapitre IV :**

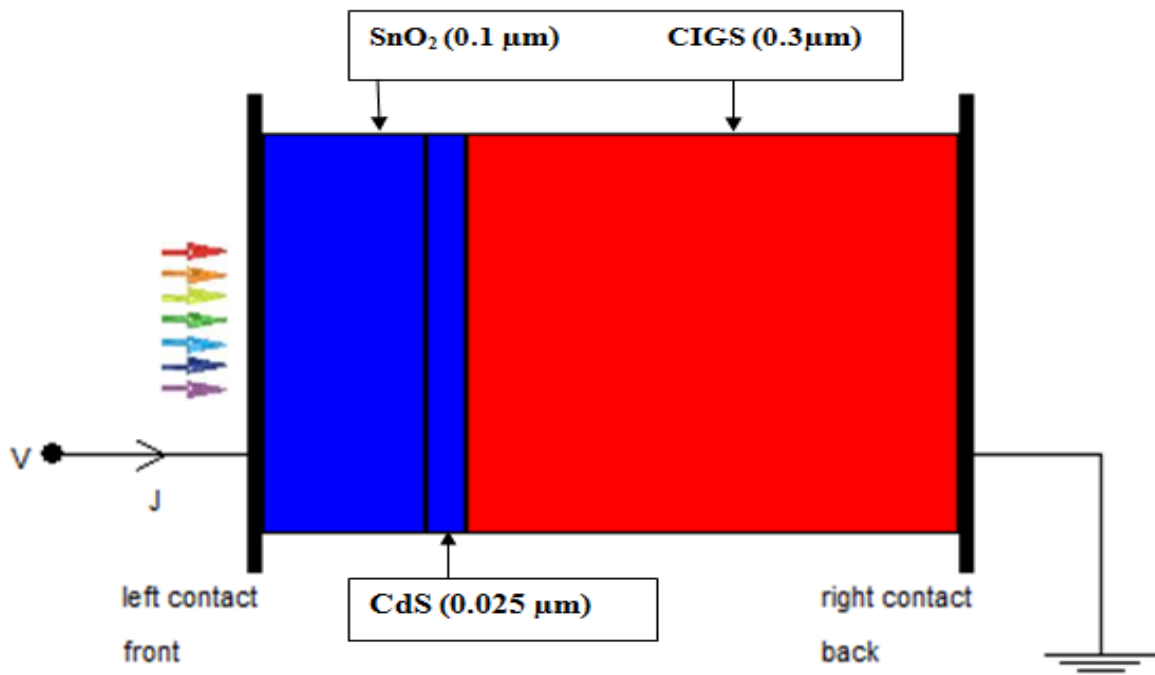
Résultats de simulation et  
Discussions

### IV .1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter les résultats de la simulation numérique par le logiciel SCAPS-1D des cellules solaires simple jonction CIGS et l'interprétation des résultats trouvés. Nous commençons ce chapitre par la définition de la structure de la cellule solaire étudiée, et les paramètres des matériaux employés dans la simulation numérique. Après cela, nous allons étudier l'effet de la variation de l'épaisseur de la couche absorbeur (CIGS/CIS). Ensuite, nous montrons l'effet de variation de l'épaisseur de la couche fenêtre ( $\text{SnO}_2$  /ITO) sur les cellules solaires à base de CIGS. Nous allons aussi étudier par simulation, l'influence de l'épaisseur de la couche buffer CdS. Enfin, nous allons étudier la possibilité d'une couche intermédiaire dans la structure de la cellule.

### IV .2 La définition des différents types de cellules solaire étudiée

La cellule simulée est de type  $\text{SnO}_2$ /(n) CdS/(p) CIGS. Elle contient respectivement les couches suivantes : La couche fenêtre  $\text{SnO}_2$  de conductivité de type n suivie par la couche tampon CdS de type n et l'absorbeur CIGS de type p. l'absorbeur CIGS avec une énergie de gap 1.2 eV constitue un absorbeur presque idéal. Il ne nécessite pas beaucoup d'épaisseur pour absorber la quasi-totalité du spectre solaire.



**Figure IV.1** : Le schéma de la cellule typique introduit au simulateur à base de CIGS.

**IV .3 Présentation des paramètres de base (Baseline)**

Le tableau IV.1 regroupe les paramètres physiques utilisés dans la simulation. Pour les paramètres fixes tels que ceux de l'absorbeur CIGS, et CIS la couche tampon, la fenêtre optique et les contacts devant et arrière, le choix de ces valeurs est guidé sur le modèle dans logiciel SCAPS et quelques structures de laboratoires.

<b>A. Propriétés générales de dispositif</b>					
	<b>Devant</b>			<b>Arrière</b>	
$\Phi_b$ (eV)	$\Phi_{bn} = 0.1$			$\Phi_{bp} = 0.$	
$S_e$ (cm/s)	$10^7$			$10^7$	
$S_t$ (cm/s)	$10^7$			$10^7$	
Réfectivité	0.1			0.8	
<b>B. Propriétés des couches</b>					
	<b>SnO<sub>2</sub></b>	<b>ITO</b>	<b>CdS</b>	<b>CIS</b>	<b>CIGS</b>
W ( $\mu\text{m}$ )	0.1	0.1	0.025	0.3	0.3
$\epsilon/\epsilon_0$	9	8.9	10	13.6	13.6
$\mu_e$ (cm <sup>2</sup> /Vs)	100	100	100	100	100
$\mu_h$ (cm <sup>2</sup> /Vs)	25	100	25	25	25
N <sub>D/A</sub> (cm <sup>-3</sup> )	N <sub>D</sub> : $10^{17}$	N <sub>D</sub> : $10^{20}$	N <sub>D</sub> : $1.1 \times 10^{18}$	N <sub>A</sub> : $2.10^{16}$	N <sub>A</sub> : $2 \times 10^{16}$
E <sub>g</sub> (eV)	3.6	3.65	2.4	1.02	1.15
N <sub>c</sub> (cm <sup>-3</sup> )	$2.2 \times 10^{18}$	$5.2 \cdot 10^{18}$	$2.2 \times 10^{18}$	$2.2 \cdot 10^{18}$	$2.2 \times 10^{18}$
N <sub>v</sub> (cm <sup>-3</sup> )	$1.8 \times 10^{19}$	$10^{18}$	$1.8 \times 10^{19}$	$1.8 \cdot 10^{19}$	$1.8 \times 10^{19}$
<b>C. Paramètres de défauts</b>					
	<b>SnO<sub>2</sub></b>	<b>CdS</b>	<b>CIGS</b>		
type de défaut	Neutre	Neutre	Neutre		
distribution énergétique	Single	Single	Single		
$W_G$ (eV)	0.1	0.1	0.1		
$\sigma_e$ (cm <sup>2</sup> )	$10^{-12}$	$10^{-17}$	$5 \cdot 10^{-13}$		
$\sigma_h$ (cm <sup>2</sup> )	$10^{-15}$	$10^{-12}$	$10^{-15}$		

**Tableau IV.1 :** Les paramètres physiques de la simulation.

**IV .4 Effet de la variation de l'épaisseur de la couche absorbeur**

**IV .4.1 Effet sur les caractéristiques principales de la cellule**

- ✓ Les caractéristiques essentielles de la cellule photovoltaïque sont **V<sub>co</sub>**: tension de circuit ouvert mesurée aux bornes de la cellule sous éclairement et sans circuit de charge.
- ✓ **I<sub>cc</sub>**: courant de court-circuit (lorsque V=0).
- ✓ **V<sub>m</sub>** : tension correspondante à la puissance maximale fournie.
- ✓ **I<sub>m</sub>** : courant correspondant à la puissance maximale fournie.
- ✓ **FF** : facteur de forme qui détermine la qualité électrique de la cellule.

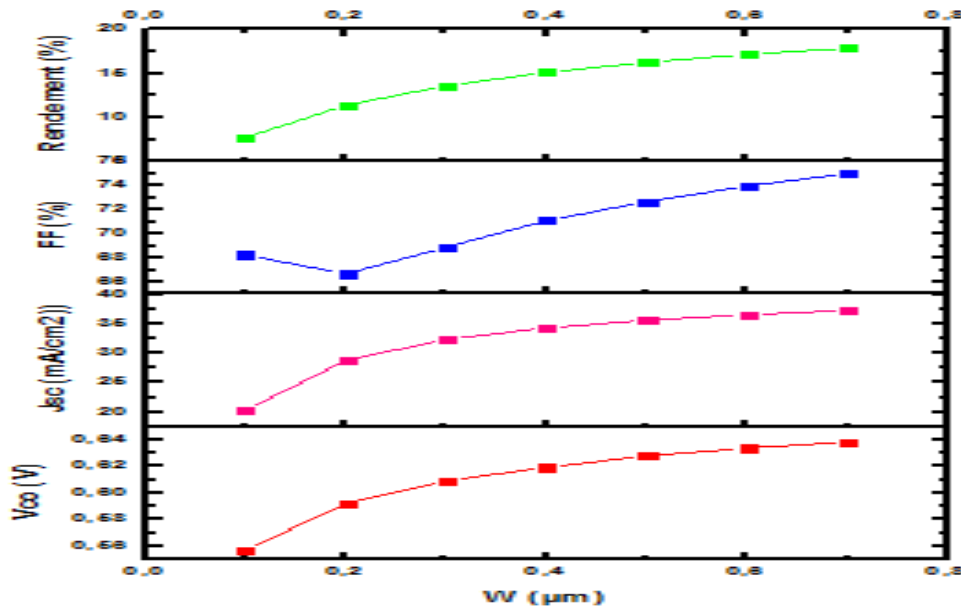
$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{cc} V_{co}}$$

- ✓ **η**: rendement de la cellule qui correspond au rapport entre la puissance électrique maximale fournie par la cellule et la puissance solaire incidente.[1]

$$\eta = \frac{P_{mp}}{P_{in}}$$

La gamme de la variation de l'épaisseur que nous avons choisie pour l'étude de l'influence de l'épaisseur de la couche CIGS et CIS sur les caractéristiques de notre cellule est comprise entre 0.1 et 0.7 μm pour le CIGS, et entre 0.1 et 0.5 pour le CIS.

**IV .4.2 Effet sur la cellule à base de CIGS**



**Figure IV.2** : Les caractéristiques Voc, Jsc, FF (%) et η (%) en fonction de l'épaisseur de la couche CIGS.

Avec l'augmentation de l'épaisseur de l'absorbeur CIGS, on observe une augmentation des caractéristiques Voc, Jsc et de rendement  $\eta$ , le facteur de forme de la cellule simulée. Ce qui est tout à fait logique, puisque c'est dans cette dernière que se passe le phénomène de captage des photons et de conversion photovoltaïque.

#### IV .4.2 Effet sur la réponse spectrale de la cellule

L'effet de la variation de l'épaisseur de la couche absorbante CIGS sur le rendement quantique observé dans l'intervalle des longueurs d'onde  $\lambda= 300$  à  $900$  nm et est montré sur la figure IV.3.

W ( $\mu\text{m}$ )	Vco(V)	Jsc ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ )	FF(%)	$\eta$ (%)
0.1	0.5567	20.272172	68.26	7.70
0.2	0.5923	28.766315	66.66	11.36
0.3	0.6092	32.327419	68.88	13.57
0.4	0.6193	34.280350	71.09	15.09
0.5	0.6279	35.580818	72.67	16.24
0.6	0.6338	36.522949	73.96	17.12
0.7	0.6385	37.237970	75.00	17.83

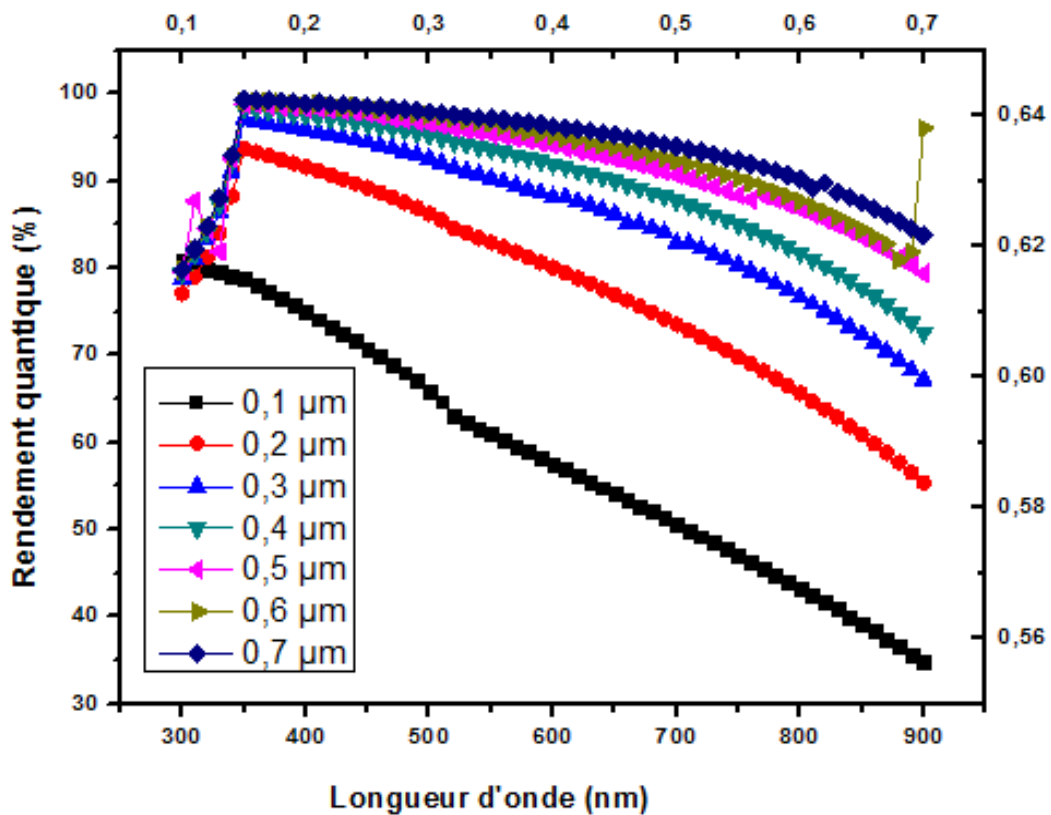


Figure IV.3 : Effet de l'épaisseur de la couche CIGS sur la réponse spectrale.

On constate une nette amélioration du rendement quantique avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche absorbeur. Ceci se traduit par l'élargissement de la plage de longueur d'onde pour lequel la réponse spectrale est maximale au fur et à mesure que la couche devient plus importante.

### IV .4.3 Effet sur la cellule à base de CIS

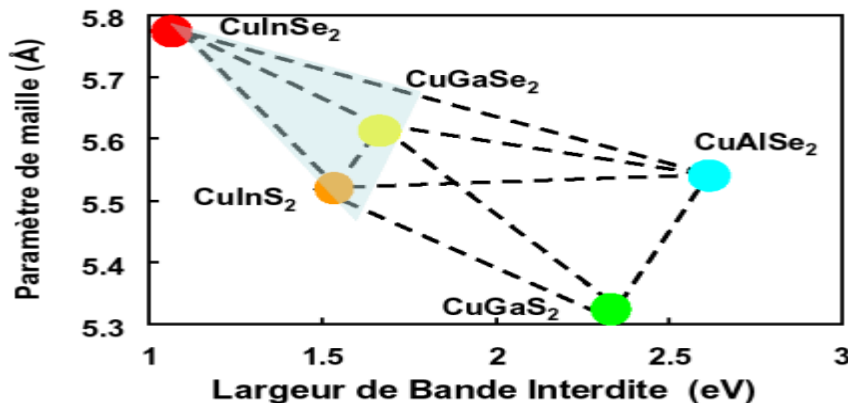
#### IV .4.3.1 Présentation des matériaux absorbeur CIS

##### IV .4.3.1.1 Introduction

Les matériaux utilisés pour la conversion photovoltaïque sont des semi-conducteurs dont la largeur de bande interdite peut se situer dans l'intervalle 1-1,8 eV. Les matériaux actuellement utilisés ou étudiés sont ensuite passés en revue en commençant par le silicium cristallin massif puis en décrivant le vaste secteur des couches minces: silicium amorphe, composées poly-cristallins, silicium cristallisé en couches minces. Les développements attendus dans chacune de ces filières sont présentés ainsi que les recherches en cours sur d'autres types des matériaux et de structure.

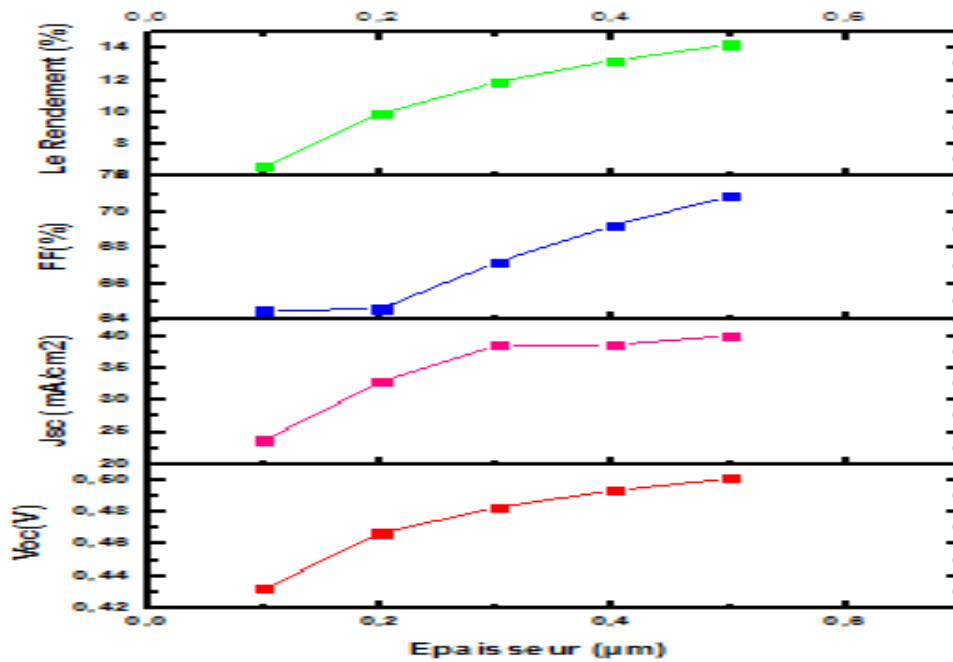
##### IV .4.3.1.2 Le matériau ternaire $\text{CuInSe}_2$

Le  $\text{CuInSe}_2$  est un composé ternaire de type I-III-VI<sub>2</sub> suscite un intérêt grandissant depuis quelques années. C'est un matériau prometteur en vue d'obtention des couches minces absorbantes pour les cellules photovoltaïques. Sa largeur de bande interdite est variée entre 0,6 de 1,08 eV, en effet en bon accord avec le spectre solaire, ce qui fait que ce matériau est particulièrement bien adapté à la conversion photovoltaïque. [3]



**Figure IV.4 :** Energies de bande pour différentes semi-conductrices chalcopyrites en fonction du paramètre cristallin « a » [3].

IV .4.3.1.3 Effet sur la cellule à base de CIS



**Figure IV.5 :** Les caractéristiques Voc, Jsc, FF (%) et η (%) en fonction de l'épaisseur de la couche CIS.

Avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche absorbeur, on observe une augmentation des caractéristiques Voc, Jsc et de rendement η,

IV .4.3.1.4 Effet sur la réponse spectrale de la cellule

L'effet de l'épaisseur de la couche CIS sur la réponse spectrale est représenté sur la figure IV.6.

W (μm)	Vco(V)	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	FF(%)	η (%)
0.1	0.4322	23.743931	64.52	6.62
0.2	0.4669	32.855889	64.63	9.91
0.3	0.4831	38.588442	67.22	11.88
0.4	0.4936	38.687032	69.27	13.23
0.5	0.5011	40.071383	70.88	14.23

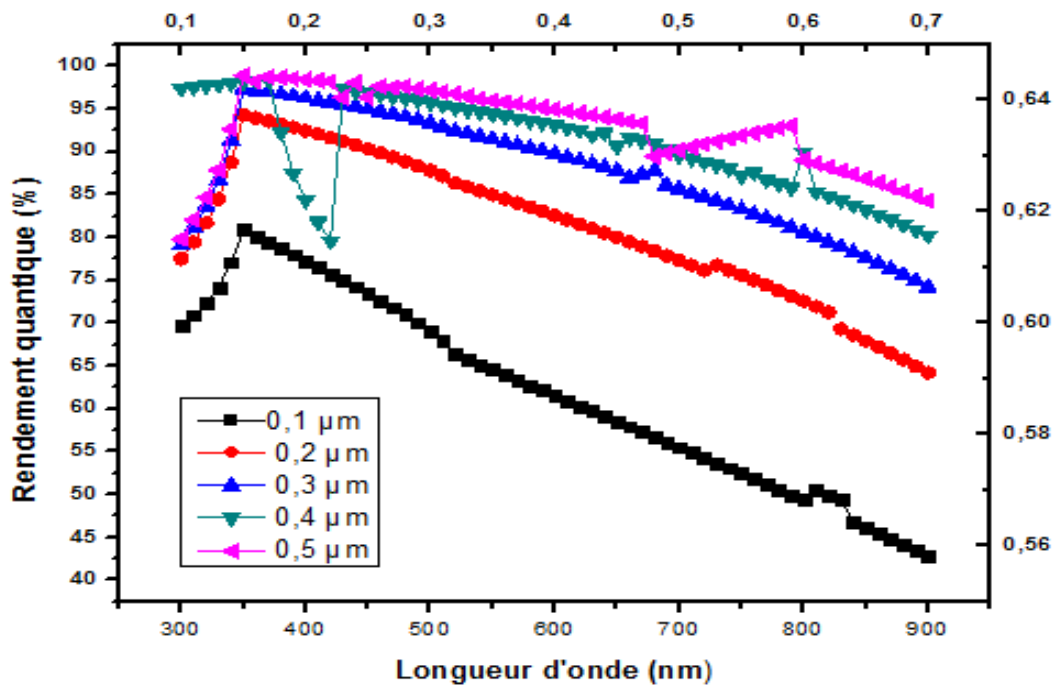


Figure IV.6 : Effet de l'épaisseur de la couche CIS sur la réponse spectrale.

On constate une nette amélioration du rendement quantique avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche absorbeur. Ceci se traduit par l'élargissement de la plage de longueur d'onde pour lequel la réponse spectrale est maximale au fur et à mesure que l'épaisseur de la couche est plus importante.

#### IV .5 Etude de l'effet des fenêtres SnO<sub>2</sub> et ITO sur les cellules solaires à base de CIGS

##### IV .5.1 Effet sur les caractéristiques principales de la cellule

Après les simulations par le code de calcul SCAPS en utilisant les paramètres enregistrés dans le tableau IV.1.

Les caractéristiques principales des deux cellules SnO<sub>2</sub> /CdS/CIGS et ITO/CdS/CIGS sont données dans le tableau comparatif IV.2.



Caractéristiques principales	Avec couche SnO <sub>2</sub> (0.3 μm)	Avec couche ITO (0.3 μm)
Voc (V)	0.6092	0.6092
J <sub>sc</sub> (mA/cm <sup>2</sup> )	32.292921	32.313681
FF (%)	68.88	68.89
Rendement η (%)	13.55	13.56

D'après ce tableau, on remarque que les grandeurs photovoltaïques Voc, FF et η de la cellule solaire ITO/CdS/CIGS sont nettement meilleures que celles de la cellule SnO<sub>2</sub>/CdS/CIGS. L'amélioration est enregistrée surtout dans le facteur de forme Avec l'utilisation d'une couche fenêtre de type ITO, on obtient un facteur de forme 68.89% au lieu de 68.88% pour une fenêtre de type SnO<sub>2</sub>. c'est une amélioration non significative et qui nous laisse penser que l'utilisation des deux couches comme fenêtres donne les mêmes performances.

#### IV .5.2 Effet sur la réponse spectrale de la cellule

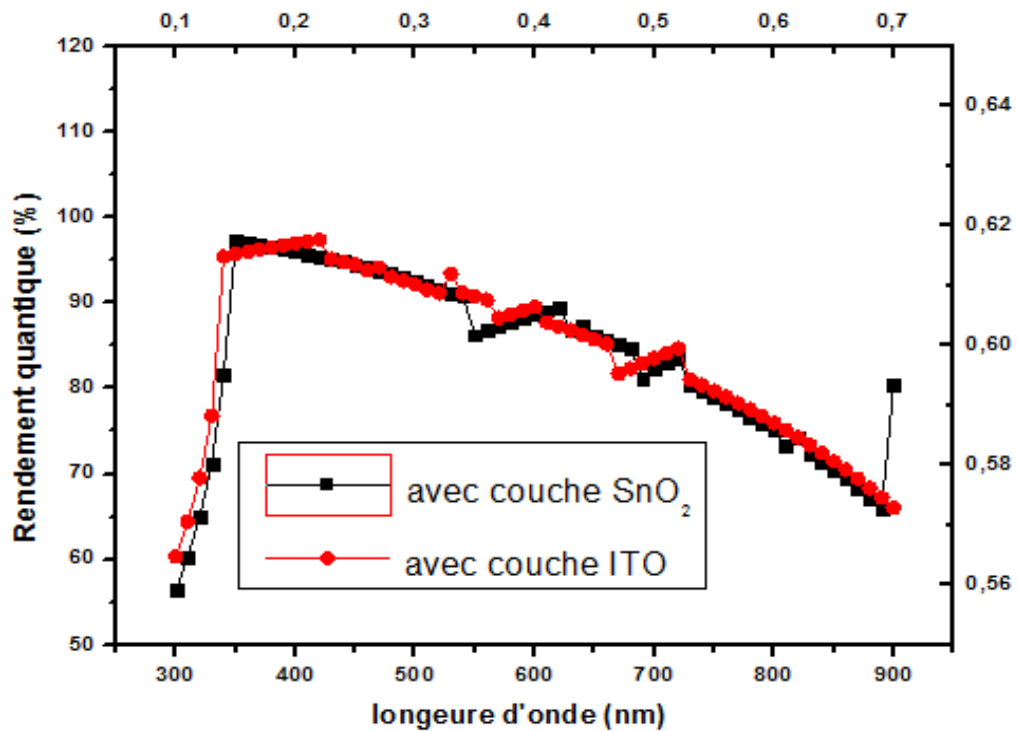


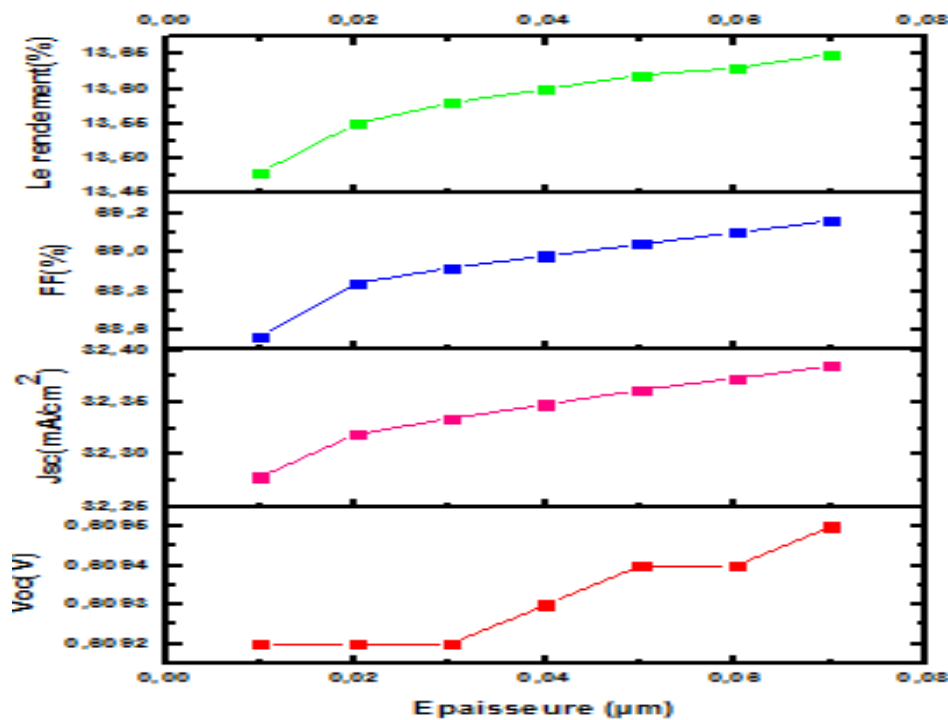
Figure IV.7: L'influence des couches SnO<sub>2</sub> et ITO sur la réponse spectrale.

D'après la figure, la cellule à base de CIGS qui contient une fenêtre optique de matériau ITO présente une réponse spectrale supérieure à celle de la cellule à base de CIGS qui contient une fenêtre de  $\text{SnO}_2$ . On peut constater que la réponse est meilleure pour un plage de longueurs d'ondes comprise entre 350 et 430 nm et puis elle se dégrade graduellement jusqu'à atteindre 70% uniquement pour 900 nm.

#### IV .6 Effet de la variation de l'épaisseur de la couche buffer CdS

La gamme de la variation de l'épaisseur que nous avons choisie pour l'étude de l'influence de l'épaisseur de la couche buffer CdS sur les caractéristiques de notre cellule solaire est comprise entre 0.01 et 0.07  $\mu\text{m}$ .

##### IV .6.1 Effet sur les caractéristiques principales de la cellule



**Figure IV.8:** Les caractéristiques Voc, Jsc, FF (%) et  $\eta$  (%) en fonction de l'épaisseur de la couche CdS.

Avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche buffer CdS, on observe une augmentation des caractéristiques Voc, Jsc et de rendement  $\eta$ . Cependant, cette variation est minime et ne peut être considérée comme un gain qui mérite de gaspiller davantage du

matériau CdS en passe par exemple de 0.01 à 0.07  $\mu\text{m}$  le rendement passe de 13.48 à 13.65 et donc un gain de 0.17% uniquement.

#### IV .6.2 Effet sur la réponse spectrale de la cellule

L'effet de l'épaisseur de la couche buffer CdS sur la réponse spectrale est représenté sur la figure IV.9.

W ( $\mu\text{m}$ )	Vco(V)	Jsc ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ )	FF(%)	$\eta$ (%)
0.01	0.6092	32.278813	68.57	13.48
0.02	0.6092	32.319402	68.84	13.55
0.03	0.6092	32.334715	68.92	13.58
0.04	0.6093	32.348067	68.98	13.60
0.05	0.6094	32.3620809	69.04	13.62
0.06	0.6094	32.373048	69.10	13.63
0.07	0.6095	32.384811	69.16	13.65

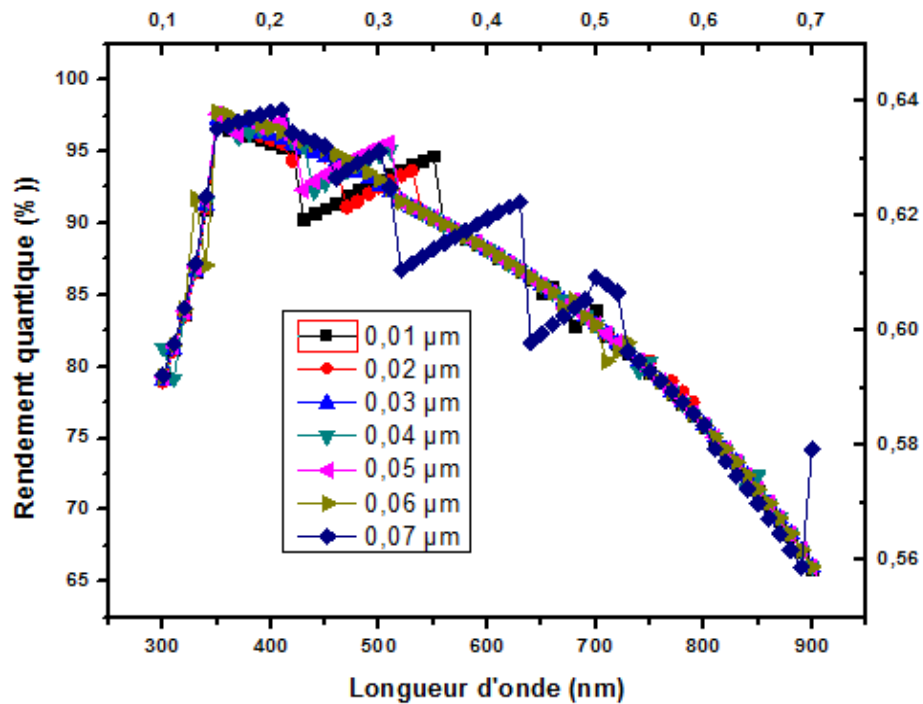


Figure IV.9: Effet de l'épaisseur de la couche CdS sur la réponse spectrale.

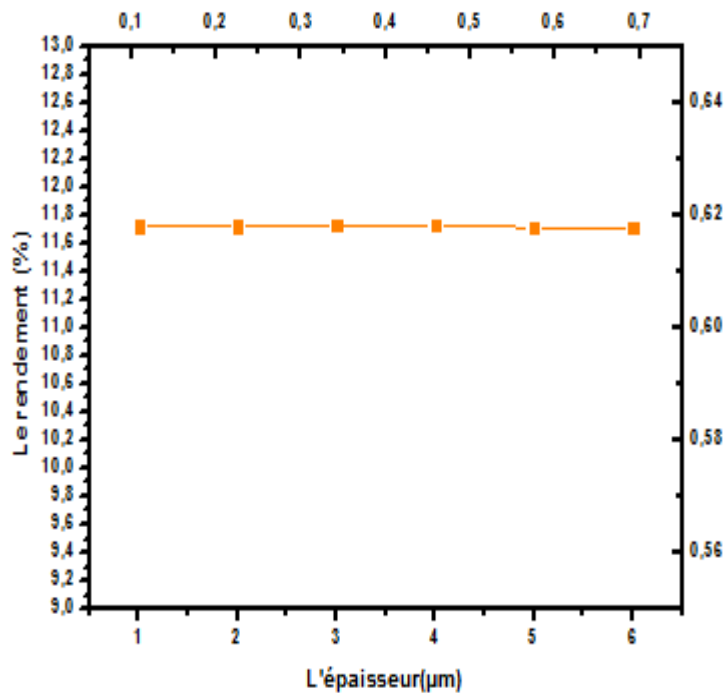
On peut noter que plus la couche du buffer CdS est importante, le réponse semble fluctuante et instable, ce qui nous laisse penser que des valeurs faibles donnent des performances meilleures.

### IV .7 Effet de l'introduction des défauts sur les caractéristiques principales et la réponse spectrale de la cellule SnO<sub>2</sub>/(n) CdS/(p) /CIGS

Pour voir l'influence de l'introduction des défauts de la base CIGS nous avons procédé à introduire les paramètres de défauts présentés dans le tableau IV.1. Nous avons introduit les défauts sur les couches SnO<sub>2</sub>/CdS/CIGS, par l'étude de la variation de l'épaisseur de la couche absorbante CIGS.

La gamme de la variation de l'épaisseur que nous avons choisie pour l'étude de l'influence de l'épaisseur de la couche CIGS est comprise entre 1 et 6  $\mu\text{m}$ .

#### IV .7.1 Effet sur le rendement ( $\eta\%$ ) de la cellule



**Figure IV.10:** variation du rendement ( $\eta\%$ ) en fonction de la variation de l'épaisseur de la couche absorbante CIGS.

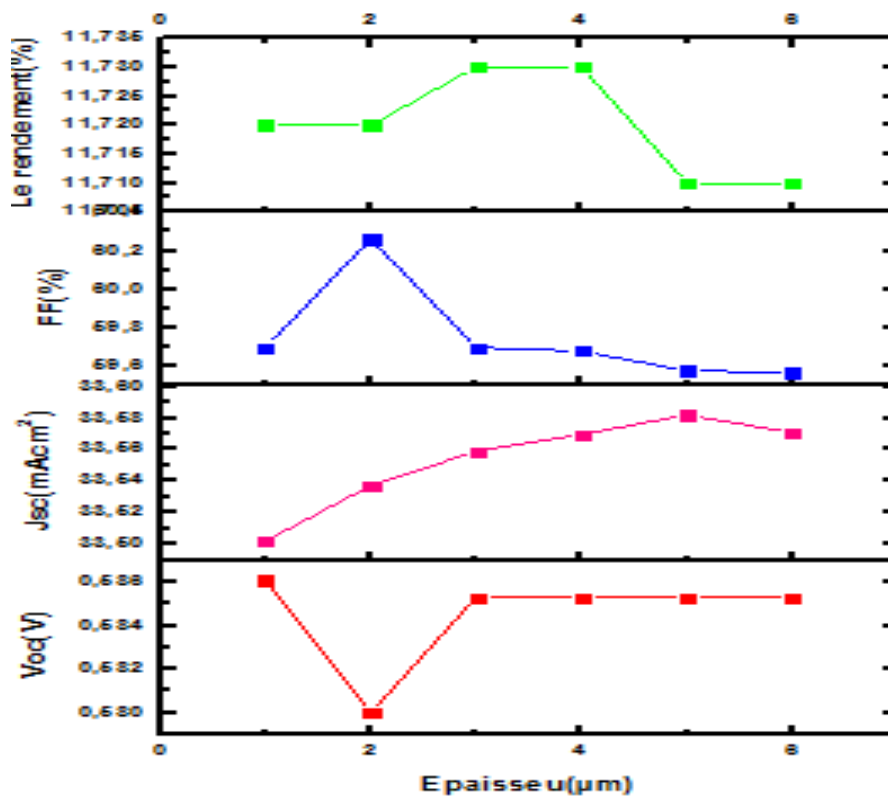
D'après la figure IV.10 on observe qu'aucun changement significatif n'est observé.

-Pour bien comprendre l'influence des défauts sur le rendement ( $\eta\%$ ) on compare entre les résultats obtenus lors de la variation de la couche absorbante sans défauts et avec les défauts.

	Sans défauts	Avec défauts
<b>Le meilleur rendement (<math>\eta\%</math>)</b>	16.50%	11.73%

D'après le tableau comparatif, on remarque que le rendement obtenu par la simulation de la cellule sans défauts est plus élevé que celui obtenu après l'introduction des défauts. L'introduction des défauts gêne le mouvement des électrons et ainsi provoque la diminution du rendement de conversion photovoltaïques.

#### IV .7.2 Effet sur les caractéristiques principales de la cellule



**Figure IV.11 :** Les caractéristiques Voc, Jsc, FF (%) et  $\eta$  (%) en fonction de l'épaisseur de la couche absorbante CIGS.

Les caractéristiques principales de la cellule simulée augmentent avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche absorbante CIGS, on remarque cette amélioration notamment avec les caractéristiques Voc et Jsc, alors qu'on observe une diminution de FF et le rendement.

**IV .7.3 Effet sur la réponse spectrale de la cellule**

- comparaison entre les résultats obtenus lors la variation de l'épaisseur de la couche absorbante CIGS sans défauts et avec les défauts

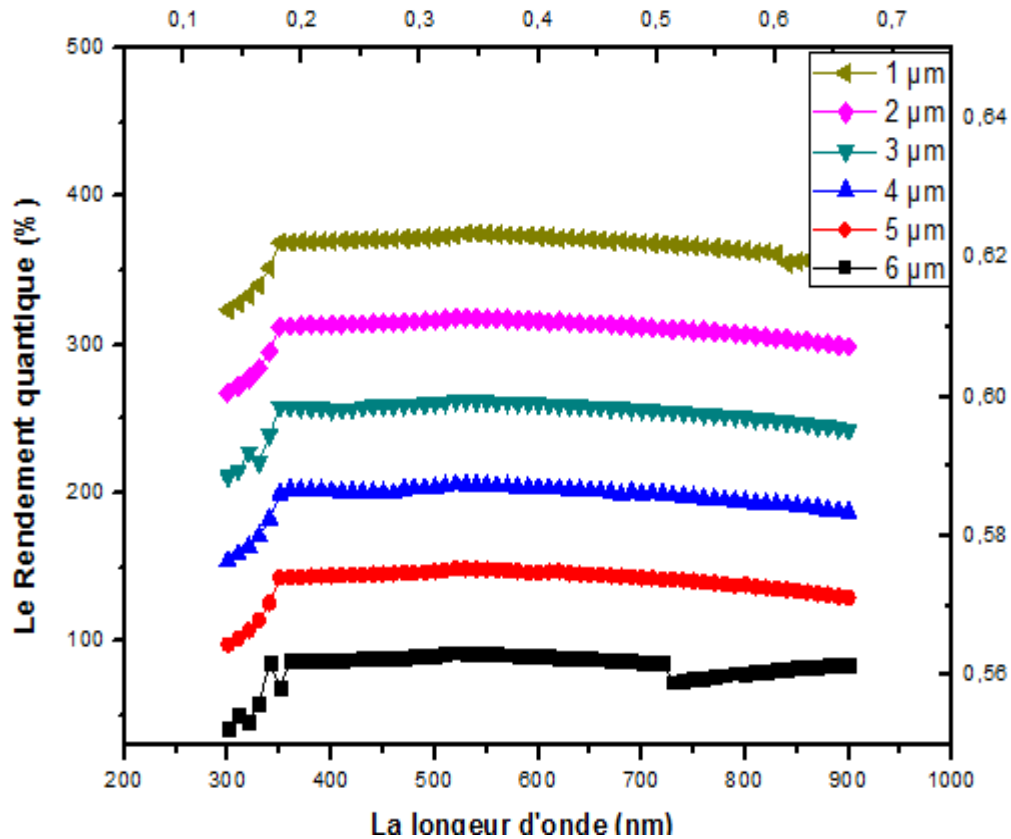
W (µm)	Vco(V)	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	FF(%)	η (%)
0.1	0.5567	20.272172	68.26	7.70
0.2	0.5923	28.766315	66.66	11.36
0.3	0.6092	32.327419	68.88	13.57
0.4	0.6193	34.280350	71.09	15.09
0.5	0.6279	35.580818	72.67	16.24
0.6	0.6338	36.522949	73.96	17.12
0.7	0.6385	37.237970	75.00	17.83

**Tableau VI.2:** les résultats des caractéristique principale de la cellule obtenus lors de la variation da l'épaisseur de la couche absorbante CIGS sans défauts.

W (µm)	Voc(V)	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	FF%	Le rendement %
1	0.5861	33.502385	59.70	11.72
2	0.5800	33.537169	60.26	11.72
3	0.5853	33.559022	59.70	11.73
4	0.5853	33.569468	59.68	11.73
5	0.5853	33.581983	59.58	11.71
6	0.5853	33.570791	59.57	11.71

**Tableau VI.3:** les résultats des caractéristique principale de la cellule obtenus lors de la variation da l'épaisseur de la couche absorbante CIGS avec défauts.

D'après les deux tableaux VI.2, VI-3 on observe que les valeurs des caractéristiques principales de la cellule avant l'introduction des défauts sont nettement meilleures que celles de la cellule après l'introduction des défauts. Ce constat est logique, car les défauts jouent le rôle d'obstacle à la conduction électronique.



**Figure IV.12:** Effet de la variation de l'épaisseur de la couche absorbante CIGS sur la réponse spectrale.

D'après la figure IV.12, on observe l'amélioration du rendement quantique de la cellule avec la diminution de l'épaisseur pour atteindre sa valeur maximale pour une longueur d'onde 360 nm.

#### IV.4 CONCLUSION

Dans ce travail on a étudié, en premier lieu, l'effet de la variation de l'épaisseur de la couche absorber, dans les deux types de matériaux CIGS et CIS, sur les performances d'une cellule à base de CIGS et CIS, et on a constaté que la meilleure structure est celle dont la couche absorber est de type CIGS .

D'autre part on a étudié l'influence des fenêtres SnO<sub>2</sub> et ITO sur les cellules solaires à base de CIGS et on a constaté que les grandeurs photovoltaïques Voc, FF et η de la cellule solaire ITO/CdS/CIGS sont nettement meilleures que celles de la cellule SnO<sub>2</sub>

/CdS/CIGS. Ce qui nous a conduit à conclure que l'ITO comme couche fenêtre n'est peut être pas adapté pour cette structure de cellule photovoltaïque.

Ensuite, on a étudié effet de la variation de l'épaisseur de la couche buffer CdS, et on trouvé que l'augmentation de l'épaisseur est suivie par une amélioration des grandeurs physique de notre cellule solaire.

Finalement, l'étude de l'impact de l'introduction des défauts sur les caractéristiques principales et la réponse spectrale de la cellule  $\text{SnO}_2\text{(n) CdS(p) /CIGS}$ , nous a permis de conclure que les performances de la cellule sans défauts sont parfaitement meilleure que celles avec défauts, ce qui est tout à fait logique et prévisible.



## BIBLIOGRAPHIE

- [1] Hamidouche Mohamed et Belaggoune Hicham," Étude de L'effet Des Couches Minces De  $\text{SnO}_2$  et ITO sur les caractéristiques des cellules solaires à base de CdTe et CIGS", Mémoire De Master, Université Mohamed El Bachir Elibrahimi –Bordj Bou Arreridj, Soutenu le : 19 Juin 2013, p62.
- [02] BENABED Karima," Etude et simulation d'une cellule solaire à base de chalcopyrites  $\text{CuInSe}_2$  avec TCAD - SILVACO", mémoire de master, Université Abdelhamid Ibn Badis – Mostaganem, le 22/05/2017, p43.
- [03] Linda SAAD HAMIDECHE," Etude des propriétés du matériau ternaire  $\text{CuInSe}_2$  à base de Cu de la famille des chalcopyrites  $\text{Cu-III-VI}_2$  ", thèse de doctorat, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA, p11/12.



# **Conclusion Générale**

L'objectif de notre travail était d'étudier l'intégration des cellules solaires à base des matériaux semi-conducteurs CIGS dans la technologie photovoltaïque et leur influence. L'objectif du présent travail était d'étudier et de prédire en utilisant la simulation numérique basée sur le logiciel SCAPS -1D, des caractéristiques de cellules photovoltaïques à base de deux matériaux absorbeurs de type CIS et CIGS.

L'optimisation et la simulation ont été faites par le logiciel SCAPS -1D, pour étudier les performances des cellules solaires à base de (CIGS).

Les caractéristiques principale des cellules étudiées sont : le courant de court-circuit, la tension en circuit ouvert, le facteur de forme FF et le rendement électrique  $\eta$  pour diverses structures en changeant principalement la couche fenêtre (ITO/SnO<sub>2</sub>) et aussi le matériau absorbeur (CdS/CIGS). Le rendement de la cellule solaire de référence a été évalué à partir de la caractéristique I(V) simulée.

En conclusion on peut résumer ce qui suit :

- L'effet de la variation de l'épaisseur de la couche absorbeur, dans les deux types de matériaux CIGS et CIS, sur les performances d'une cellule à base de CIGS et CIS, on a constaté que la meilleure structure est celle dont la couche absorbeur est de type CIGS.
- L'influence de la nature des couches fenêtres entre SnO<sub>2</sub> et ITO sur les cellules solaires à base de CIGS montre que les performances des cellules ITO/CdS/CIGS sont nettement meilleures que celles de la cellule SnO<sub>2</sub> /CdS/CIGS. Ce qui nous a conduit à conclure que l'ITO comme couche fenêtre n'est peut-être pas adapté pour cette structure de cellule photovoltaïque.
- L'effet de la variation de l'épaisseur de la couche buffer CdS, a montré que l'augmentation de l'épaisseur implique une amélioration des grandeurs physique de notre cellule solaire.
- L'étude de l'impact de l'introduction des défauts sur les caractéristiques principales et la réponse spectrale de la cellule, nous a permis de conclure que les performances de la cellule sans défauts sont parfaitement meilleure que celles avec défauts.

## Listes des symboles et abréviations

Symboles	Signification
<b>A</b>	la surface génératrice.
<b>AM</b>	Nombre de masse.
<b>AM0</b>	Nombre de masse hors atmosphère.
<b>AM1.5</b>	Nombre de masse de l'air.
<b>c</b>	Célérité de la lumière dans le vide
<b>c<sub>0</sub></b>	Concentration de l'équilibre des électrons ou trous au contact du dos.
<b>E<sub>A</sub></b>	Perak énergie
<b>E<sub>c</sub></b>	Energie de la bande de conduction
<b>E<sub>D</sub></b>	Energie de gap.
<b>E<sub>g</sub></b>	Energie de la bande de valence.
<b>E<sub>v</sub></b>	La surface génératrice.
<b>G</b>	L'ensoleillement.
<b>I</b>	Courant de la cellule.
<b>I<sub>cc</sub></b>	Courant de court circuit.
<b>I<sub>m</sub></b>	Courant correspond à la puissance maximale
<b>I<sub>ph</sub></b>	Courant photogénérées.
<b>j<sub>c</sub></b>	Courant de porteurs majoritaires.
<b>k</b>	Vecteur d'onde
<b>η</b>	Rendement de la cellule.
<b>N<sub>a</sub></b>	Concentration de l'accepteur peu profonde..
<b>N<sub>AG</sub></b>	Densité des défauts d'accepteur.
<b>N<sub>c</sub></b>	Densité d'état dans la bande de conduction.
<b>N<sub>D</sub></b>	Concentration des donneurs
<b>N<sub>d</sub></b>	Densité des défauts de donneur.
<b>N<sub>DG</sub></b>	Concentration des donneurs peu profonde
<b>N<sub>v</sub></b>	L'angle que fait le soleil avec son zénith.
<b>Θ</b>	Densité de l'état dans la bande de valence.
<b>P</b>	La puissance.
<b>P<sub>inc</sub></b>	Puissance lumineuse incidente.
<b>P<sub>m</sub></b>	Puissance maximale fournie par la cellule.
<b>q</b>	Charge élémentaire.
<b>QE</b>	Rendement quantique externe.
<b>QI</b>	Rendement quantique interne.
<b>R</b>	Réfectivité de la cellule.
<b>R<sub>p</sub></b>	Résistance de court circuit.
<b>RS</b>	Réponse spectrale
<b>R<sub>s</sub></b>	Résistance série.
<b>S</b>	La surface.
<b>Sc</b>	Vélocité de surface de recombinaison des électrons.
<b>Se</b>	Vélocité de surface de recombinaison des porteurs minoritaires.
<b>Sn</b>	Vélocité de recombinaison de l'interface n.
<b>Sp</b>	Vélocité de recombinaison de l'interface p.
<b>St</b>	Vélocité de surface de recombinaison des trous.
<b>T</b>	La température

## Listes des symboles et abréviations

$\mu_e$	Mobilité des électrons.
$\mu_h$	Mobilité des trous.
V	Le voltage.
V <sub>c</sub>	Le pas du voltage sur le contact.
V <sub>cc</sub>	Tension de circuit ouvert
V <sub>oc</sub>	Tension de court circuit
$v_{th}$	Vélocité thermique.
W	Épaisseur.
G	Déviatoin standard.
W	L'affinité électronique.
$\chi$	Conductivité électrique.
$\sigma$	Longueur d'onde
$\lambda$	Une dimension.
$\phi_B$	Largeur de la bande interdite des contacts avant et arrière.
$\phi_m$	Travail de sortie du métal.
$\sigma_e$	Cross- section électron.
$\sigma_h$	Cross- section trous.
$\sigma_n$	Conductivité électrique de l'interface n
$\sigma_p$	Conductivité électrique de l'interface p.
<b>Constants</b>	<b>Signification</b>
h	Constante de Planck
K <sub>b</sub>	Constante de potentiel de barrière.
$\alpha$	Constant d'absorption quantique.
$\epsilon$	Constant diélectrique
<b>abréviations</b>	<b>Signification</b>
CA	Courant alternatif.
CC	Courant continue.
CdS	Sulfure de cadmium.
CIGS	Diséléniure de cuivre et d'indium et de galium.
CIS	Diséléniure de cuivre et d'indium.
ITO	Oxyde d'indium dopé étain.
OVC	Ordered vacancy compounds.
PECVD	Dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma micro-onde.
PV	Photovoltaïque.
SCAPS	Solar Cell Capacitance Simulator.
TCO	Oxyde conducteur transparent.
ZnO	Oxyde de zinc.
AM 1.5	spectre de la lumière solaire
CPS	Système photovoltaïque connecté au réseau.
ZCE	Zone de charge d'espace.
ZQN	Zones Quasi-Neutres
GaAs	L'arséniure de gallium
SR	réponse spectrale

## Listes des symboles et abréviations

---

<b>PVD</b>	dépôt physique en phase vapeur
<b>PLD</b>	Pulsed Laser Deposition
<b>L.B.A.D</b>	Ion Beam Assited Deposition
<b>Sol-Gel</b>	solution- gélification
<b>CBD</b>	Déposition par bain chimique (Chemical Bath deposition).

# Liste Des Figures

## LISTE DES FIGURES

Figure	Titre	Page
<b>Chapitre I : Généralités sur les cellules solaires</b>		
<b>I.1</b>	Irradiation solaire	<b>5</b>
<b>I.2</b>	Le rayonnement solaire	<b>6</b>
<b>I.3</b>	Spectre solaire	<b>7</b>
<b>I.4</b>	Diagramme des longueurs d'onde absorbées par les semi-conducteurs	<b>9</b>
<b>I.5</b>	Niveaux électroniques dans un atome isolé et dans un cristal	<b>10</b>
<b>I.6</b>	Présentation schématique du silicium dopé n	<b>12</b>
<b>I.7</b>	Présentation schématique du silicium dopé p	<b>12</b>
<b>I.8</b>	Schéma d'une jonction p-n	<b>14</b>
<b>I.9</b>	Principe de l'effet photovoltaïque dans la cellule solaire en silicium.	<b>15</b>
<b>I.10</b>	Principe de fonctionnement d'une cellule solaire	<b>16</b>
<b>I.11</b>	modèle de cellule photovoltaïque idéal	<b>17</b>
<b>I.12</b>	modèle de cellule photovoltaïque	<b>18</b>
<b>I.13</b>	cellules solaires en silicium	<b>19</b>
<b>I.14</b>	cellules solaires CIGS	<b>19</b>
<b>I.15</b>	cellules solaires organiques	<b>20</b>
<b>Chapitre II : Les cellules solaires à base de CIGS</b>		
<b>II.1</b>	Maille élémentaire du composé CIS	<b>25</b>
<b>II.2</b>	(a) Structure de la maille élémentaire du zinc-blende, (b) Structure de la maille élémentaire de la chalcopyrite du $\text{CuInSe}_2$	<b>28</b>
<b>II.3</b>	Représentation schématique du bâti de dépôt par Co-évaporation utilisé pour la synthèse des couches de CIGS	<b>31</b>

## Liste Des Figures

<b>II.4</b>	Structure d'une cellule solaire à base de CIGS. (a) schéma de l'empilement des différentes couches, (b) image MEB de la tranche d'une cellule	<b>32</b>
<b>II.5</b>	Structure de bande d'une cellule solaire Cu (In, Ga) Se <sub>2</sub>	<b>35</b>
<b>Chapitre III : Simulation numérique des Cellules solaires à base de CIGS</b>		
<b>III.1</b>	Panneau de démarrage de SCAPS, le panneau d'action ou principal	<b>40</b>
<b>III.2</b>	Définir le problème	<b>41</b>
<b>III.3</b>	Points de fonctionnement (point de travail)	<b>42</b>
<b>III.4</b>	Panneau des bandes d'énergie	<b>43</b>
<b>III.5</b>	Panneau d'affichage des courbes I-V à l'obscurité et sous éclairement	<b>44</b>
<b>III.6</b>	Définition de la structure d'une cellule solaire	<b>45</b>
<b>III.7</b>	Panneau des propriétés des contacts	<b>45</b>
<b>III.8</b>	Propriétés de la couche ajoutée	<b>46</b>
<b>III.9</b>	Définition des types des défauts et de recombinaison présents	<b>47</b>
<b>Chapitre IV : Résultats de simulation et Discussions</b>		
<b>IV.1</b>	Le schéma de la cellule typique introduit au simulateur à base de CIGS	<b>49</b>
<b>IV.2</b>	Les caractéristiques Voc, Jsc, FF (%) et $\eta$ (%) en fonction de l'épaisseur de la couche CIGS	<b>51</b>
<b>IV.3</b>	Effet de l'épaisseur de la couche CIGS sur la réponse spectrale	<b>52</b>
<b>IV.4</b>	Energies de bande pour différentes semi-conductrices chalcopyrites en fonction du paramètre cristallin « a »	<b>53</b>
<b>IV.5</b>	Les caractéristiques Voc, Jsc, FF (%) et $\eta$ (%) en fonction de l'épaisseur de la couche CIS	<b>54</b>
<b>IV.6</b>	Effet de l'épaisseur de la couche CIS sur la réponse spectrale	<b>55</b>
<b>IV.7</b>	L'influence des couches SnO <sub>2</sub> et ITO sur la réponse spectrale	<b>56</b>



## Liste Des Figures

---

<b>IV.8</b>	Les caractéristiques Voc, Jsc, FF (%) et $\eta$ (%) en fonction de l'épaisseur de la couche CdS	<b>57</b>
<b>IV.9</b>	Effet de l'épaisseur de la couche CdS sur la réponse spectrale	<b>58</b>
<b>IV.10</b>	variation du rendement ( $\eta$ %) en fonction de la variation de l'épaisseur de la couche absorbante CIGS	<b>59</b>
<b>IV.11</b>	Les caractéristiques Voc, Jsc, FF (%) et $\eta$ (%) en fonction de l'épaisseur de la couche absorbante CIGS	<b>60</b>
<b>IV.12</b>	Effet de la variation de l'épaisseur de la couche absorbante CIGS sur la réponse spectrale	<b>62</b>

## Liste des tableaux

---

<b>Tableau</b>	<b>Titre</b>	<b>page</b>
<b>Chapitre II : Les cellules solaire à base de CIGS</b>		
<b>II.1</b>	Propriétés physiques et chimiques des éléments Cu, In, Ga et Se.	<b>27</b>
<b>II.2</b>	La classification périodique des éléments constituants la famille I-III-VI 2.	<b>27</b>
<b>Chapitre IV : Résultats et discussions</b>		
<b>IV.1</b>	Les paramètres physiques de la simulation	<b>50</b>
<b>IV.2</b>	les résultats des caractéristique principale de la cellule obtenus lors de la variation da l'épaisseur de la couche absorbante CIGS sans défauts	<b>61</b>
<b>IV.3</b>	les résultats des caractéristique principale de la cellule obtenus lors de la variation da l'épaisseur de la couche absorbante CIGS avec défauts	<b>61</b>

## المخلص:

يتكون عملنا من محاكاة أداء الخلية الشمسية على أساس أشباه الموصلات (Cu (In, Ga) Se<sub>2</sub> (CIGS). معلمات الخلية بشكل أساسي هو: الكفاءة الكمية والخصائص الأساسية للخلية: الكفاءة ( $\eta$ ٪)، عامل الشكل (FF)، جهد الدائرة المفتوحة (V<sub>co</sub>)، كثافة التيار القصير دائرة (J<sub>sc</sub>) تمت دراسة ومناقشة تأثيرات تباين عدة معاملات مثل: طبيعة طبقة النافذة، المادة الماصة، سماكة الطبقات المختلفة، وجود العيوب، ... الخ.

أظهرت هذه الدراسة أيضًا أن برنامج SCAPS-1D المستخدم هو أداة عملية للغاية ويسمح بمتابعة تطور أداء الخلية بنجاح.

الكلمات المفتاحية:

الضوء، الامتصاصي، الضياع، الطاقة المتجددة، الطاقة الشمسية، تحويل الضوئية، متطلبات الطاقة.

## Résumé

Notre travail consiste en la simulation des performances d'une cellule solaire à base de **semi-conducteurs Cu (In, Ga) Se<sub>2</sub>(CIGS)**. Les paramètres de la cellule sont principalement : le rendement quantique et les caractéristiques essentielles de la cellule : le rendement ( $\eta$ ٪)، le facteur de forme (FF)، la tension de circuit ouvert (V<sub>co</sub>)، la densité de courant de court-circuit (J<sub>sc</sub>) Les effets de la variation de plusieurs paramètres tels que : la nature de couche fenêtre، le matériau absorbeur، l'épaisseur des différentes couches، la présence de défauts، ... etc.، ont été étudiés et discutés.

Cette étude a montrée également que le logiciel **SCAPS-1D** utilisé est un outil très pratique et permet de suivre l'évolution des performances des cellules avec succès.

### Mots clés :

La Lumière، L'absorbance، CIGS، Energie Renouvelable، Energie Solaire، Conversion Photovoltaïque

## Abstract

Our work consists of simulating the performance of a solar cell based on Cu (In, Ga) Se<sub>2</sub> (CIGS) semiconductors. The parameters of the cell are mainly: the quantum efficiency and the essential characteristics of the cell: the efficiency ( $\eta$ ٪)، the form factor (FF)، the open circuit voltage (V<sub>co</sub>)، the short current density circuit (J<sub>sc</sub>) The effects of the variation of several parameters such as: the nature of the window layer، the absorber material، the thickness of the different layers، the presence of defects،... etc.، have been studied and discussed.

This study also showed that the SCAPS-1D software used is a very practical tool and allows following the evolution of cell performance successfully.

### Keywords:

Light، absorbance، losses renewable، energies solar، energy conversion.