



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



## **Université Amar Thelidji- Laghouat**

**FACULTE** : de Technologie

**DEPARTEMENT** : Electronique

### **MEMOIRE DE MASTER**

**Présenté par :**

**Benhamida Hadj Aissa**

**Begagra Sayeh Messelem Nacereddine**

**DOMAINE** : Technologie

**FILIERE** : Electronique

**OPTION** : Instrumentation

### **Thème**

**Etude par simulation numérique des propriétés électriques d'une cellule solaire Tandem CGS/CIGS**

Soutenu le /06/2025

#### **Jury de soutenance :**

<b>Nom et Prénom</b>	<b>Grade</b>	<b>Qualité</b>
Mr A. SGHIER	MAA	Président
Mm : W. CHATTA	MCB	Examineur
Mr : A. MOUHOUB	MCA	Rapporteur

ANNÉE UNIVERSITAIRE : 2024/2025

## **Remerciements**

*Avant toute chose, nous tenons à élever nos remerciements à Dieu, à Sa bonté et à Sa patience qui nous ont permis d'achever ce travail.*

*Nous remercions également notre encadrant, **M. Abdelhafid Mouhoub**, Maître de conférences à l'université de Laghouat pour sa contribution de qualité, son aide précieuse et sa disponibilité tout au long de ce projet. Son soutien et son accompagnement ont constitué pour nous une source de motivation et d'encouragement. C'est un réel plaisir d'avoir été encadrés par lui.*

*Nous sommes reconnaissants envers tous les professeurs et le personnel administratif du Département Électronique de l'Université Amar Telidji Laghouat pour leur soutien permanent et leur contribution à l'élévation de ce travail.*

*Nous adressons également nos plus vifs remerciements aux membres du jury, pour l'honneur qu'ils nous ont accordé en acceptant de juger ce travail, et formuler des suggestions et des orientations scientifiques adéquates.*

*Nos plus chaleureux remerciements pour tous ceux qui de près et de loin ont contribué à la réalisation de ce mémoire.*

*Nous sommes très reconnaissants à nos familles pour les encouragements, la confiance et le soutien moral dont ils ont toujours fait preuve.*

*Merci à tous.*

## Sommaire

Liste des symboles et des abréviations	I
Liste des figures	II
Liste des tableaux	III
Introduction générale.....	1

### **Chapitre I : Propriétés fondamentales des matériaux Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>**

I.1 Introduction.....	3
I.2 Étude du matériau absorbeur CuIn <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> Se <sub>2</sub> (CIGS).....	3
I.2.1 Structure du composé CIGS.....	3
I.2.2 Propriétés optiques.....	7
I.2.2.1 La bande interdite.....	7
I.2.2.2 Gap optique.....	9
I.2.3 Propriétés électriques.....	10
I.3 Défauts dans le CIGS.....	11
I.3.1. Les défauts intrinsèques.....	11
I.3.2 Les défauts extrinsèques ou défauts chimiques.....	12
I.4 Méthode de croissance du matériau CIGS.....	12
I.4.1 Croissance en massif (méthode de Bridgman).....	13
I.4.2 Croissance en couches minces.....	13
I.4.2.1 Méthode de co-évaporation.....	13
I.4.2.2 Méthode d'électrodéposition.....	14
I.4.2.3 Méthode de transport chimique en phase vapeur à courte distance.....	15
I.5 Conclusion .....	15

### **Chapitre II : Généralités sur les cellules solaires**

II.1 Introduction.....	16
II.2 Les énergies renouvelables.....	16
II.3 L'énergie solaire.....	16
II.3.1 Spectre de référence.....	17
II.4 Cellules photovoltaïques.....	17

II.4.1 L'effet photovoltaïque.....	18
II.4.2 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	18
II.4.3 Modélisation d'une cellule photovoltaïque.....	19
II.4.3.1 Cellule photovoltaïque idéale.....	19
II.4.3.2 Cellule photovoltaïque réelle.....	20
II.4.4 Les différentes caractéristiques d'une cellule solaire.....	20
II.4.4.1 Tension en circuit ouvert.....	21
II.4.4.2 Courant de court circuit.....	21
II.4.4.3 Facteur de forme $FF$ .....	22
II.4.4.4 Rendement de conversion $\eta$ .....	22
II.5 Les différentes technologies.....	22
II.5.1 Première génération (silicium cristallin mono et poly).....	22
II.5.2 Deuxième génération : CdTe, CIS/CIGS, silicium amorphe et microcristallin.....	23
II.5.3 Troisième génération (cellules organiques et multi-jonctions).....	24
II.5.3.1 Cellules organiques.....	24
II.5.3.2 Cellules multi-jonctions.....	24
II.5.3.2.1 Configuration des cellules multijonctions.....	25
II.5.3.2.2 Cellule monolithique tandem à deux terminales.....	25
II.5.3.2.3 Principe de la cellule solaire tandem à deux terminales.....	26
II.5.3.2.4 Modélisation électrique de la cellule double jonction.....	26
II.5.3.2.4.1 Modèle d'une seule diode.....	26
II.5.3.2.4.2 Modèle à deux diodes.....	27
II.6 Conclusion .....	28

### **Chapitre III Simulation numérique et interprétation des résultats**

III.1 Introduction.....	29
III.2 Présentation du logiciel SCAPS.....	29
III.2.1 Étapes de simulation avec SCAPS.....	30
III.3 Présentation de la cellule à étudier.....	31
III.3.1 Paramètres de simulation.....	32

III.3.2 Le spectre solaire utilisé .....	32
III.4 Résultats de la simulation et interprétations.....	34
III.4.1 Effet de la composition de l'absorbeur.....	34
III.4.1.1 Présentation de la structure.....	34
III.4.1.2 Caractéristique $J(V)$ .....	36
III.4.1.3 Efficacité quantique $QE$ .....	37
III.4.2 Simulation de la cellule empilée mécaniquement.....	37
III.4.2.1 Caractéristique courant-tension $J(V)$ et $P(V)$ .....	39
III.4.2.2 Efficacité quantique $QE$ .....	41
III.4.3 Cellule solaire tandem optimisée.....	41
III.4.3.1 Effet de l'épaisseur de couche CGS sur les paramètres de la cellule tandem.....	41
III.4.3.1.1 Courant de court-circuit $J_{sc}$ .....	42
III.4.3.1.2 Tension de circuit ouvert $V_{oc}$ .....	43
III.4.3.1.3 Rendement de conversion $\eta$ (%).....	43
III.4.3.1.4 Facteur de forme $FF$ .....	44
III.4.3.1.5 Caractéristique courant-tension $J(V)$ et $P(V)$ .....	45
III.4.3.1.6 Paramètres photovoltaïques simulés de la cellule tandem en fonction de l'épaisseur CGS.....	46
III.5 Conclusion.....	47
Conclusions Générale.....	48

## Liste des abbreviations

CIGS:	Cu(In,Ga)Se <sub>2</sub> ,
CGS:	CuGaSe <sub>2</sub> ,
PENREE:	Programme Algérien de Développement des Énergies Renouvelables et de l'Efficacité Énergétique
SCAPS:	Solar Cell Capacitance Simulator,
AM1.5G:	Spectre solaire standard « Air Mass 1.5 Global », 1000 W/m <sup>2</sup>
TCO:	Transparent Conductive Oxide (oxyde conducteur transparent).

## Liste des symboles

$J-V$ :	Caractéristique courant-tension
$V_{oc}$ :	Tension en circuit ouvert (Open-circuit voltage)
$J_{sc}$	Densité de courant de court-circuit (short-circuit current)
$FF$ :	Facteur de forme (fill factor)
$\eta$ :	Rendement de conversion (efficiency)
$R_s$ :	Résistance série
$R_{sh}$ :	Résistance shunt
$I_p$ :	Courant photonique généré par la cellule (photocurrent)
$I_0$ :	Courant de saturation de la diode (diode saturation current)
$I_{pv}$ :	Courant délivré par la cellule photovoltaïque
$I_m$ :	le courant maximal.
$V_m$ :	la Tension maximale.
$E_g$	Largeur de bande interdite (band-gap) du matériau
$\lambda$ :	Longueur d'onde.
$\nu$ :	Fréquence de la radiation.
$E_{ph}$ :	Energie du photon.
$h$ :	Constante de Planck.

## Liste des Figures

<b>Figure (I.1) :</b>	Structures du cristal : (a) chalcopryrite et (b) zinc blende	4
<b>Figure (I.2) :</b>	Structure chalcopryrite du matériau $\text{CuIn}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{Se}_2$	5
<b>Figure (I.3) :</b>	Variation des paramètres de maille 2a et c du CIGS en couche mince en fonction de la composition x de Ga	6
<b>Figure (I.4) :</b>	Spectre d'absorption des principaux matériaux photovoltaïques	08
<b>Figure (I.5) :</b>	Diagramme représentant l'évolution de l'énergie de gap et du paramètre de maille (a) de certaines chalcopryrites	10
<b>Figure (I.6) :</b>	Défauts ponctuels dans le réseau cristallin	12
<b>Figure (I.7) :</b>	Croissance en massif du cristal (méthode de Bridgman)	14
<b>Figure (I.8) :</b>	Technique de déposition par CSVT	15
<b>Figure (II.1) :</b>	Irradiation solaire	17
<b>Figure (II.2) :</b>	Spectre solaire	17
<b>Figure (II.3) :</b>	Description d'une photopile ou cellule photovoltaïque	18
<b>Figure (II.4) :</b>	Circuit électrique idéale d'une cellule photovoltaïque	19
<b>Figure (II.5) :</b>	Circuit électrique d'une cellule photovoltaïque réelle	20
<b>Figure (II.6) :</b>	Courbe caractéristique $I = f(V)$ d'une cellule	21
<b>Figure (II.7) ;</b>	Les différentes technologies photovoltaïques	22
<b>Figure (II.8) :</b>	Deux cellules solaires à base de silicium mono et polycristallin	23
<b>Figure (II.9) :</b>	Cellules solaires CIGS	23
<b>Figure (II.10) :</b>	Cellules solaires organiques	24
<b>Figure (II.11) :</b>	Schéma explicatif du principe de fonctionnement d'une cellule multi - jonctions	25
<b>Figure (II.12) :</b>	Structure d'une cellule solaire monolithique tandem à deux terminales : (a) Schéma de principe, (b) Exemple sur cellule solaire CGS /CIGS	26
<b>Figure (II.13) :</b>	Circuit équivalent du model à une seul diode	27
<b>Figure (II.14) :</b>	Circuit équivalent du model à deux diodes	27

<b>Figure (III.1) :</b>	Panneau de démarrage de SCAPS	30
<b>Figure (III.2) :</b>	Schéma de la structure de la cellule solaire CGS/CIGS tandem simulée	31
<b>Figure (III.3) :</b>	Coefficients d'absorption de CIGS, CGS, CdS et ZnO utilisés dans la simulation	33
<b>Figure (III.4) :</b>	Spectre AM 1.5G absorbé par la cellule supérieure CGS, et les spectres filtrés de la sous-cellule inférieure à base de CIGS pour différentes épaisseurs de la couche supérieure de CGS.	33
<b>Figure (III.5) :</b>	La structure de la Cellule solaire à base des composés $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ sous le programme de simulation SCAPS	34
<b>Figure (III.6) :</b>	Evolution du VOC et $j_{SC}$ et FF et $\eta$ de la cellule en fonction de la composition x dans $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$	35
<b>Figure (III.7) :</b>	La variation des caractéristiques tension-courant en fonction de la tension de polarisation pour différentes valeurs de la bande interdite	36
<b>Figure (III.8) :</b>	La variation de l'efficacité quantique externe (EQE) a différentes valeurs de la bande interdite.	37
<b>Figure (III.9) :</b>	La structure de la Cellule inférieure CIGS	38
<b>Figure (III.10) :</b>	La structure de la Cellule inférieure CIGS sous le programme de simulation SCAPS	38
<b>Figure (III.11) :</b>	La structure de la Cellule supérieure CGS	38
<b>Figure (III.12) :</b>	La structure de la Cellule supérieure CGS le programme de simulation SCAPS	39
<b>Figure (III.13) :</b>	La variation des caractéristiques tension-courant pour la cellule tandem en CGS/CIGS, la cellule inférieure en CIGS et la cellule supérieure en CGS	39
<b>Figure (III.14) :</b>	La variation de la caractéristique P(V) pour la cellule tandem en CGS/CIGS, la cellule inférieure en CIGS et la cellule supérieure en CGS	40
<b>Figure (III.15) :</b>	La variation de l'efficacité quantique externe (EQE) de la cellule inférieure en CIGS et la cellule supérieure en CGS	41

<b>Figure (III.16) :</b>	La variation de la densité de court-circuit $J_{sc}$ des cellules supérieure en CGS et inférieure en CIGS en fonction de l'épaisseur de la couche supérieure en CGS dans la cellule tandem en CGS/CIGS	42
<b>Figure (III.17) :</b>	Tensions en circuit ouvert de la cellule supérieure en CGS et inférieure en CIGS en fonction de l'épaisseur de la couche supérieure en CGS dans la cellule solaire tandem en CGS/CIGS	43
<b>Figure (III.18) :</b>	Le rendement de conversion $\eta$ de la cellule supérieure en CGS et inférieure en CIGS en fonction de l'épaisseur de la couche supérieure en CGS dans la cellule solaire tandem en CGS/CIGS.	44
<b>Figure (III.19) :</b>	Caractéristiques (J-V) et P(V) pour la cellule tandem en CGS/CIGS, la cellule inférieure en CIGS et la cellule supérieure en CGS	45
<b>Figure (III.20) :</b>	La variation des paramètres photovoltaïques simulés de la cellule tandem en fonction de l'épaisseur de la couche CGS	46

## Liste des tableaux

<b>Tableau (III.1) :</b>	Les paramètres utilisés dans la simulation.	32
<b>Tableau (III.2) :</b>	Valeurs de la largeur de la bande interdite et de l'affinité électrique en fonction de la teneur en Ga pour le $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ .	34
<b>Tableau (III.3) :</b>	Paramètres photovoltaïques des cellules solaires (supérieure, inférieure).	40

# Introduction Générale

### **Introduction générale**

Dans le monde entier, la production d'électricité est en constante progression de nombreuses recherches sont à l'œuvre, afin de recourir à des solutions plus respectueuses de l'environnement. Les énergies renouvelables, comme l'énergie solaire, éolienne ou hydraulique, apparaissent comme des alternatives aux ressources énergétiques fossiles conventionnelles (charbon, pétrole, gaz naturel), par le biais desquelles les ressources naturelles sont mises à contribution dans le cadre d'enjeux de durabilité débarrassés d'une excessive intervention humaine et d'émissions polluantes [1].

D'après l'Agence internationale de l'énergie, plus de 20 % de la population de la planète vit encore sans électricité (qui concerne 80 % des populations rurales isolées) [2]. Dans ce cadre, l'Algérie a lancé le Programme Algérien de Développement des Énergies Renouvelables et de l'Efficacité Énergétique (PENREE), qui projette la mise en œuvre de 22000 MW à partir d'énergies renouvelables pour l'horizon 2030 [3]. L'énergie solaire, de par le potentiel d'ensoleillement inégalé du territoire algérien, constitue un axe stratégique phare de ce programme.

Pratiquement toutes les cellules photovoltaïques, dite solaires, que l'on trouve sur le marché, sont en silicium cristallin, avec des performances qui se situent entre 17 et 23 % certes, mais à un coût de production élevé. Pour les compenser, il convient de mentionner, de façon non exhaustive, les cellules en couches minces à base de matériaux chalcopyrites tels que CIGS ( $\text{Cu(In,Ga)Se}_2$ ) et CGS ( $\text{CuGaSe}_2$ ) qui, du fait de leur bonne efficacité, de leur flexibilité mécanique, tout en consommant moins de matière, apparaissent comme des solutions prometteuses. C'est pour améliorer encore les performances photovoltaïques que des structures de type tandems, constituées de deux cellules solaires superposées, sont apparues depuis peu, exploitées en tandem, avec des gaps d'énergie différents afin de mieux exploiter la bande passante spectrale de la lumière solaire [4].

Le présent travail s'intéresse à une cellule tandem CGS/CIGS où chaque sous-cellule joue un rôle complémentaire dans la conversion de la lumière incidente. Dans le but de prédire et d'optimiser le fonctionnement de ces dispositifs, la simulation numérique constitue un outil essentiel. Le logiciel SCAPS (Solar Cell Capacitance Simulator) permet d'étudier l'effet de nombreux paramètres physiques (épaisseur des couches absorbantes, concentration des porteurs de charge, largeur de la bande interdite) sur les performances des cellules solaires.

Le travail que nous présentons dans ce mémoire est composé de trois chapitres. L'organisation des chapitres est la suivante:

- ✚ Dans un premier chapitre, nous avons décrit quelques propriétés fondamentales structurelles, électriques et optiques des composés  $\text{Cu(In, Ga)Se}_2$  (CIGS) de type p qui constituent la partie essentielle pour la cellule photovoltaïque (la couche absorbante) que nous utilisons dans la simulation numérique. Ensuite nous avons terminé cette présentation par la description des techniques les plus sollicitées pour l'élaboration des couches minces en général et le CIGS en particulier de qualité électronique.
- ✚ Le second chapitre a été consacré à l'étude des différents paramètres photovoltaïques d'importance dans la fabrication d'une cellule solaire. Ce chapitre expose d'une façon approfondie la méthode de calcul de l'efficacité de conversion d'une cellule solaire. Puis on termine par une brève description des différentes filières technologiques existantes.
- ✚ Le troisième chapitre présente les différentes étapes du logiciel SCAPS, utilisé pour la simulation numérique des cellules CGS et CIGS séparément et de la cellule tandem CGS/CIGS. Les résultats obtenus ainsi sont commentés et interprétés.
- ✚ Finalement, nous concluons ce mémoire par une conclusion générale qui résumera les points considérables de notre étude pour proposer des perspectives de recherche ultérieure.

# Chapitre I

## Propriétés fondamentales des matériaux $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$

**I.1 Introduction :**

Les semiconducteurs chalcopyrites quaternaires de type CIGS permettent le dépôt des matériaux absorbeurs ayant une large bande interdite variant entre 1.0 et 1.68 eV pour des applications photovoltaïques. Les avantages principaux du CIGS par rapport aux autres matériaux photovoltaïques surgissent en raison de sa combinaison unique des propriétés telles que le coefficient d'absorption élevé, les vitesses de recombinaison et une grande absorption du rayonnement. Jusqu'à présent, des rendements de 23.4 % ont été réalisés en laboratoire avec des films de CIGS ayant une teneur en Ga de 0.3 qui possède un gap d'environ 1.18 eV. Cependant l'analyse théorique de la conversion photovoltaïque des cellules solaires à jonction simple indique que des rendements beaucoup plus élevés peuvent être obtenus. D'où les nouvelles perspectives qu'offrent ces matériaux dans le domaine de la recherche [5].

Les raisons qui limitent le rendement des cellules solaires avec des films minces à base de CIGS sont : les défauts, les résistances série et shunt. Plusieurs modèles ont été proposés pour comprendre les limites du rendement. Néanmoins, vu les propriétés des semiconducteurs ternaires et quaternaires qui varient énormément (technique de dépôt, variation de la composition etc.), plusieurs phénomènes restent inexplicables. A cet effet, il est très nécessaire de se familiariser avec ses composés.

**I.2 Etude du matériau absorbeur  $\text{CuIn}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Se}_2$  (CIGS)**

L'avantage de la technologie du CIGS est qu'elle n'utilise qu'une faible quantité de matériau (les couches ne mesurent que 2 à 3 microns). Cela réduit le coût de fabrication, le poids (plus légers), la flexibilité et le bon marché. Les nouvelles cellules photovoltaïques offrent donc de nombreuses perspectives d'applications, en particulier leur puissance spécifique de 1.5 kW/kg. Sans compter que le CIGS se révèle plus résistant aux radiations et que la souplesse des cellules permettrait d'éviter de les encastrier dans des panneaux solaires [6].

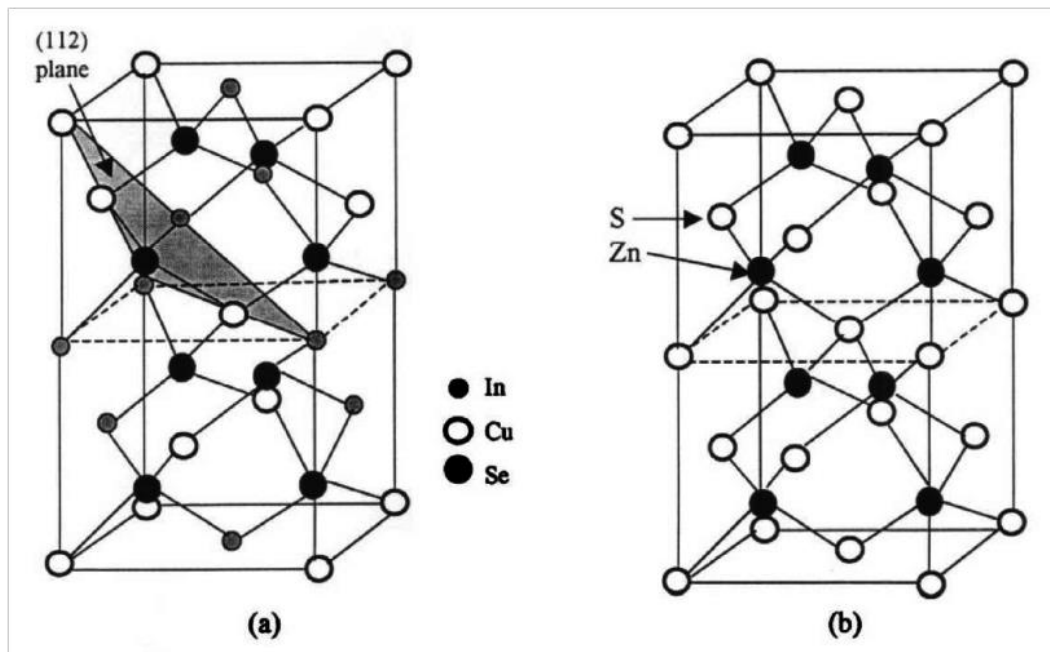
**I.2.1 Structure du composé CIGS :**

Les composés I-III-VI<sub>2</sub> peuvent cristalliser en deux formes allotropiques bien établies : la chalcopyrite et la sphalérite. La sphalérite adopte une structure cubique à faces centrées de type zinc-blende, dans laquelle la répartition des cations se fait de manière aléatoire [7]. La chalcopyrite présente une structure tétragonale ordonnée, caractérisée par une distribution régulière des cations.

Dans cette structure, chaque atome de sélénium est lié tétraédriquement à deux atomes de cuivre (Cu) et deux atomes d'indium (In), tandis que chaque cation est entouré de quatre atomes de sélénium. Cette organisation permet d'identifier clairement deux plans atomiques distincts, l'un riche en cuivre, l'autre en indium. Contrairement à cela, la sphalérite est marquée par un arrangement désordonné des cations.

Des études expérimentales ont démontré que la structure chalcopyrite est plus favorable à la conversion photovoltaïque. La structure cristallographique stable de ces matériaux leur confère une grande résistance, y compris face aux rayonnements cosmiques intenses présents dans l'espace [5,6].

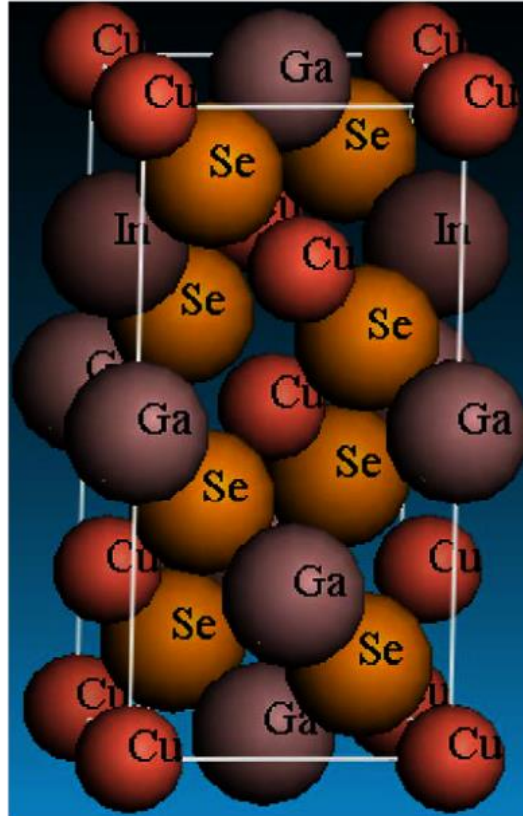
Les deux formes allotropiques sont représentées dans la Figure (I.1). La structure du  $\text{CuInSe}_2$  peut être vue comme dérivée de celle du composé II-VI  $\text{ZnSe}$ , de type zinc-blende, en remplaçant alternativement les atomes de Zn par Cu et In. La Figure (I.1-a) représente la structure chalcopyrite de l'alliage  $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ . La structure cristallographique est identifiée principalement par diffraction des rayons X.



**Figure (I.1):** Structures du cristal : (a) chalcopyrite et (b) zinc blende [5].

Jaffee et al. [14] ont classé les raies de diffraction en trois groupes pour une composition avec  $x = 0,25$  [7] :

- Groupe 1 : Les raies sont caractérisées par des indices de Miller (h, k, ℓ) tous pairs ou tous impairs, observables pour la chalcopyrite et la sphalérite.
- Groupe 2 : Les indices sont de la forme h pair, k impair, ℓ pair, ou l'inverse.
- Groupe 3 : Spécifique à la chalcopyrite, mais de faible intensité. Il faut donc une quantité suffisante de matière pour détecter ces raies. Les indices de Miller sont ici de type : h pair, k et ℓ



**Figure (I.2)** : Structure chalcopyrite du matériau  $\text{CuIn}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{Se}_2$  [7].

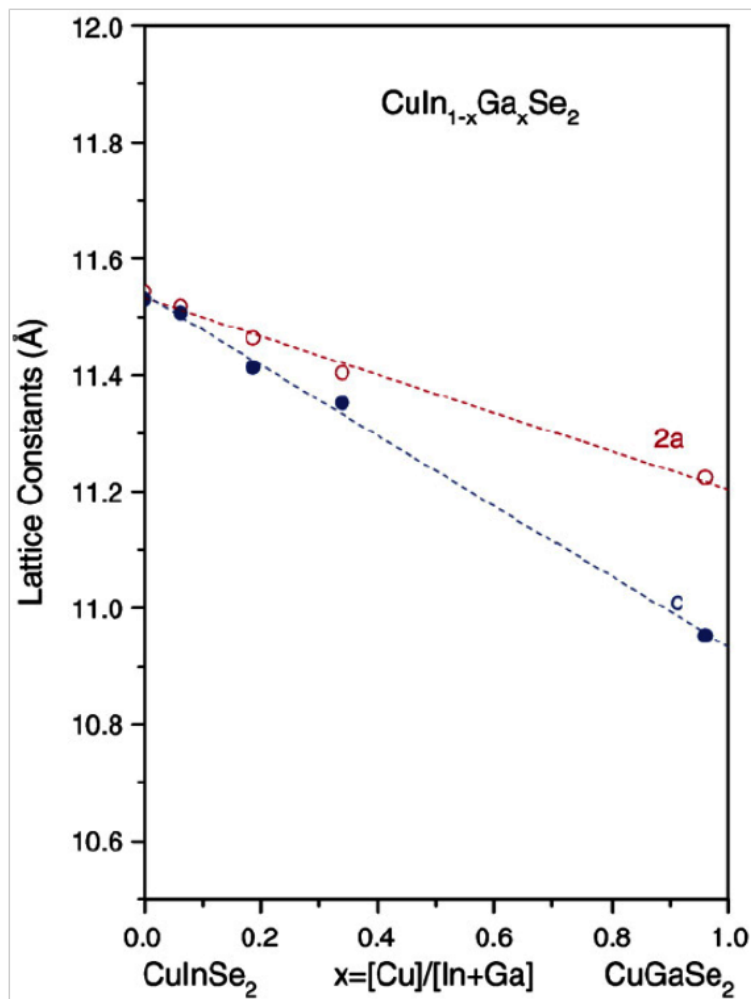
Plusieurs éléments peuvent être incorporés dans le système  $\text{CuInSe}_2$  en tant que dopants substitutionnels, qu'ils soient isovalents (ayant le même nombre de valence) ou non-isovalents. Cette incorporation constitue un moyen efficace de moduler les propriétés électroniques et structurales du matériau, grâce aux effets potentiels induits par ces éléments additionnels. En particulier, il devient possible d'altérer :

- la structure de bande électronique.
- la concentration en porteurs de charge.
- les réactions chimiques au cours de la croissance.
- ainsi que les mécanismes de croissance cristalline.

Parmi les éléments les plus prometteurs pour une intégration réussie dans le système ternaire  $\text{CuInSe}_2$ , on trouve le gallium (Ga).

La Figure I.3 illustre les variations des paramètres de maille (a et c) dans les couches minces de l'alliage  $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ . Ces paramètres diminuent de manière quasi-linéaire en fonction de la concentration en gallium (x), en raison de la substitution des atomes d'indium (In) par des atomes de gallium (Ga), qui sont de taille atomique plus petite [8].

Lorsque cette variation linéaire des paramètres de maille est respectée, on dit que la loi de Vegard [9] est vérifiée. Cela signifie que les alliages  $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$  peuvent être considérés comme des solutions solides homogènes.



**Figure (I.3) :** Variation des paramètres de maille 2a et c du CIGS en couche mince en fonction de la composition x de Ga

## I.2.2 Propriétés optiques :

### I.2.2.1 La bande interdite :

Le rapport molaire  $x = [\text{Ga}]/([\text{In}] + [\text{Ga}])$  détermine la fraction d'atomes de gallium qui remplacent les atomes d'indium dans la structure cristalline du CIGS.

Ce composé est un semi-conducteur à gap direct, et l'introduction du gallium dans le réseau cristallin permet de moduler la largeur de la bande interdite ( $E_g$ ) entre 1,011 eV (cas du CIS pur, c'est-à-dire  $x = 0$ ) et 1,68 eV (cas du CGS pur,  $x = 1$ ).

Cette variation de  $E_g$  est principalement due à un changement du minimum de la bande de conduction ( $E_c$ ) [10].

La dépendance du gap énergétique  $E_g$  avec la composition en gallium est décrite par la loi suivante [14] :

$$E_g = 1.011 + 0.664x - 0.249x(1 - x) \quad (\text{I.1})$$

La valeur optimale de la bande interdite  $E_g$  dépend de plusieurs paramètres.

- Du point de vue de l'absorption photonique, une faible valeur de  $E_g$  est préférable, car elle permet d'absorber une plus grande portion du spectre solaire (longueurs d'onde plus longues), ce qui génère un courant plus élevé dans la cellule.
- En revanche, c'est également  $E_g$  qui détermine la tension maximale que la cellule peut délivrer.

Pour maximiser le rendement de conversion, un compromis optimal entre courant et tension doit donc être recherché [11].

Enfin, l'énergie de la bande interdite ( $E_g$ ) est liée à la longueur d'onde ( $\lambda$ ) des photons absorbés selon la relation suivante [11] :

$$E_g = \frac{1,24}{\lambda(\mu\text{m})} \quad (\text{I.2})$$

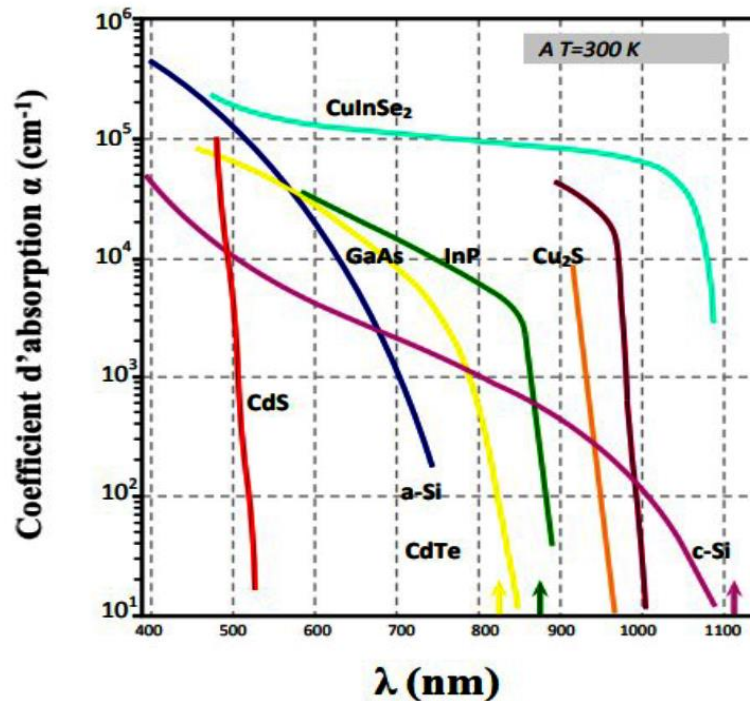
Où  $E_g$  représente l'énergie de la bande interdite exprimée en électrons-volts (eV), et  $\lambda$  la longueur d'onde de la lumière en micromètres ( $\mu\text{m}$ ). Les résultats expérimentaux publiés sur les CIGS montrent que le meilleur rendement est obtenu lorsque  $E_g$  est d'environ 1,2 eV [10].

Cela correspond à  $x = 30\%$  de gallium dans l'alliage, soit une fraction

Une absorption maximale de la lumière sur l'ensemble du spectre solaire constitue l'une des propriétés fondamentales qu'une couche absorbante doit impérativement posséder, les chalcopyrites telles que CIS, CGS et leurs alliages en couches minces se distinguent nettement des autres matériaux photovoltaïques (tels que CdTe, GaAs, CdS, etc.) par leur coefficient d'absorption optique très élevé, de l'ordre de  $10^5 \text{ cm}^{-1}$ .

Grâce à cette propriété, il est possible d'atteindre des rendements de conversion élevés avec une épaisseur de matériau très réduite, généralement comprise entre 1 et 2  $\mu\text{m}$ , ainsi, l'alliage CIGS représente une solution très avantageuse pour la fabrication de cellules solaires à faible coût, car il nécessite une faible quantité de matière première.

La (Figure I.4) illustre la comparaison du coefficient d'absorption entre différents matériaux photovoltaïques, en particulier le  $\text{CuInSe}_2$ , dans le domaine du visible et du proche infrarouge.



**Figure (I.4):** Spectre d'absorption des principaux matériaux photovoltaïques

Le coefficient d'absorption  $\alpha$  peut être calculé à partir de l'équation suivante [12] :

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \left[ \frac{(1-R^2)}{2T} + \left[ \frac{(1-R^2)^4}{4T^2} + R^2 \right]^{1/2} \right] \quad (\text{I.3})$$

Où  $d$  représente l'épaisseur de l'échantillon,  $T$  transmission de la lumière et  $R$  sa réflectivité. Le coefficient d'absorption  $\alpha$  est directement lié à l'énergie de la bande interdite  $E_g$  ainsi qu'à l'énergie des photons incidents.

Cette relation permet d'étudier les propriétés optiques du matériau à travers son comportement vis-à-vis du rayonnement lumineux [13] :

$$\alpha = \frac{A(h\nu - E_g)^\beta}{h\nu} \quad (\text{I.4})$$

Où  $E_g$  est l'énergie de la bande interdite, A est une constante, h la constante de Planck,  $\nu$  est la fréquence d'irradiation et  $\beta = 1/2, 3/2$  et 2, correspondant, respectivement, à une transition directe permise, une transition directe interdite et une transition indirecte permise

### I.2.2.2 Gap optique :

L'un des paramètres cruciaux pour l'optimisation des performances des cellules solaires CIGS consiste en l'incorporation ciblée du gallium (Ga) dans le matériau et idéalement étant également pris en compte le profil de concentration dans toute l'épaisseur du matériau absorbant.

En effet, l'incorporation dans le matériau des atomes de gallium (Ga) au lieu des atomes d'indium (In) entraîne deux effets significatifs :

- la promotion du dopage de type P par augmentation de l'énergie de formation des défauts donneurs [14,15]
- le réglage de la largeur de la bande interdite (gap) du matériau.

La fraction molaire en Ga,  $[\text{Ga}]/([\text{Ga}]+[\text{In}])$  détermine la valeur de son gap, pouvant prendre des valeurs entre 1,01 eV ( $\text{CuInSe}_2$ ) et 1,68 eV ( $\text{CuGaSe}_2$ ), comme représenté par la (Figure I.5). Cela étant, lorsqu'on augmente le rapport de la teneur en Ga :

- le niveau supérieur de la bande de valence diminue légèrement.
- le niveau inférieur de la bande de conduction augmente.

En conséquence, le gap  $E_g$  s'élargit, permettant ainsi une augmentation de  $V_{oc}$  des cellules, la dépendance du gap en fonction de x peut être décrite par la relation empirique suivante [15,16].

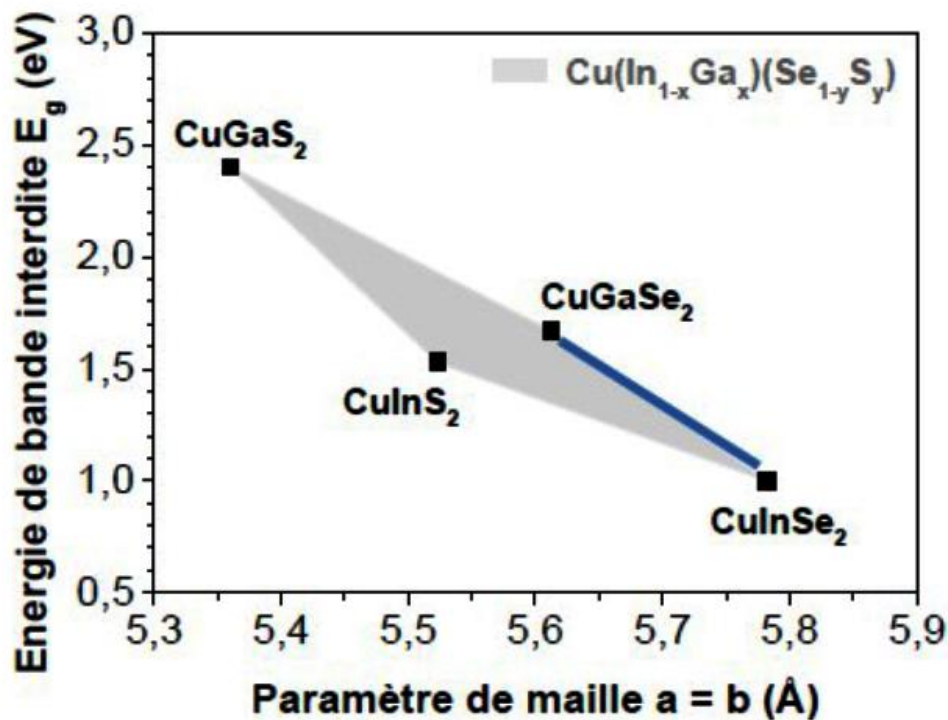
$$E_g^{CIGS}(x) = (1 - x)E_g^{CIS} + E_g^{CGS} - b(1 - x) \quad (\text{I.4})$$

En termes d'énergie :

$$E_g^{CIGS}(x) = 1,01(1 - x) + 1,68x - 0,2(1 - x) \text{ [eV]} \quad (\text{I.5})$$

Dans la relation empirique du gap du CIGS, b est un coefficient de pente, dont la valeur se situe entre 0,15 et 0,24, pour les couches de type CIGS pur ( $y = 0$ ), les meilleures

performances photovoltaïques ont été observées lorsque la largeur de bande interdite  $E_g$  est comprise entre 1,1 et 1,2 eV, ce qui correspond à une fraction molaire de gallium  $x \approx 0,3$  [17].



**Figure (I.5) :** Diagramme représentant l'évolution de l'énergie de gap et du paramètre de maille ( $a$ ) de certaines chalcopyrites d'après [18].

### I.2.3 Propriétés électriques :

Les propriétés des matériaux semi-conducteurs sont très influencées par les impuretés et les défauts cristallins. Ces défauts peuvent être introduits intentionnellement pour améliorer la conductivité électrique, ou involontairement, comme les défauts intrinsèques ou les impuretés résiduelles. Impuretés et défauts génèrent des niveaux d'énergie autorisés dans la bande interdite, qui peuvent être peu profonds (proches d'un bord de bande) ou profonds. Généralement, les défauts profonds contribuent aux phénomènes de recombinaison et de piégeage des photoporteurs nuisant alors au rendement de la cellule.

Dans les composés ternaires de type chalcopyrite, la caractérisation des défauts est nécessaire pour identifier le type de conductivité du matériau ; elle n'est pas toujours aisée car leur diversité est importante.

Les publications de Zhang et al. [19] ont permis d'atteindre les résultats suivants concernant la physique de ces défauts dans le  $\text{CuInSe}_2$  :

- ❖ L'énergie de formation des défauts est très dépendante des conditions de croissance et des potentiels chimiques des éléments.
- ❖ Les lacunes de cuivre ( $V_{\text{Cu}}$ ) ont une énergie de formation faible.
- ❖ Ces  $V_{\text{Cu}}$  fournissent des niveaux accepteurs peu profonds, expliquant la conduite de type p dans le  $\text{CuInSe}_2$ .

D'après des études récentes sur le monocristal, la bande interdite a été trouvée entre 1 eV et 1.68 eV [1].

Les concentrations des porteurs n et p se situent dans la gamme de  $5 \times 10^{15}$  et  $5 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$  respectivement à une température ambiante.

L'adoucissement dans le Zn et Cd vaporisé (donneurs) permet d'avoir les valeurs de l'ordre  $3 \times 10^{18}$  et de  $10^{18} \text{cm}^{-3}$  respectivement [7].

La mobilité des électrons a été trouvée à une température ambiante de l'ordre de 140 à  $700 \text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$  pour le type n et de 4 à  $60 \text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$  pour le type p. Des valeurs exceptionnelles de 800 à  $900 \text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$  (type n) et plus de  $300 \text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$  ont été obtenues [5].

### I.3 Défauts dans le CIGS :

#### I.3.1 Les défauts intrinsèques :

Les défauts intrinsèques sont liés aux défauts dans le réseau cristallin, ce qui entraîne généralement l'introduction de niveaux d'énergie probablement peu profonds dans la bande interdite. Dans les solides ternaires du type  $\text{CuInSe}_2$ , les défauts intrinsèques importants peuvent être classés en trois catégories :

- Les lacunes : ce défaut correspond à la présence d'un atome manquant à un site normalement occupé. Dans le système ternaire A–B–C, on notera les défauts  $V_A$ ,  $V_B$ ,  $V_C$  (lacunes de l'atome A, B ou C) ;
- Les interstitiels : ce sont des atomes occupant des positions interstitielles (c'est-à-dire normalement vides dans la structure cristalline)  $A_i$ ,  $B_i$ ,  $C_i$  ;
- Les antisites (défauts substitutionnels) : ce sont des défauts dans lesquels un atome remplace un autre atome au sein du réseau, notés respectivement  $A_B$  (un atome A sur le site de l'atome B),  $B_C$  ou  $C_A$  pour la même raison.

#### I.3.2 Les défauts extrinsèques ou défauts chimiques :

Les impuretés peuvent pénétrer dans le matériau soit de manière non intentionnelle

lors de la synthèse du cristal ou lors de son recuit, soit intentionnellement lors de ses opérations de dopage. Leur présence peut effectivement modifier certaines propriétés physiques du cristal de manière significative.

La figure I.6 montre les différents types de défauts ponctuels qui peuvent apparaître dans un réseau cristallin à l'échelle nanométrique, constitué par deux types d'atomes caractérisés A et B. De plus, la présence de défauts cristallins étendus comme les dislocations, défauts d'empilement, macles etc.. n'est souvent pas souhaitable car ils peuvent abimer les performances des dispositifs photovoltaïques.

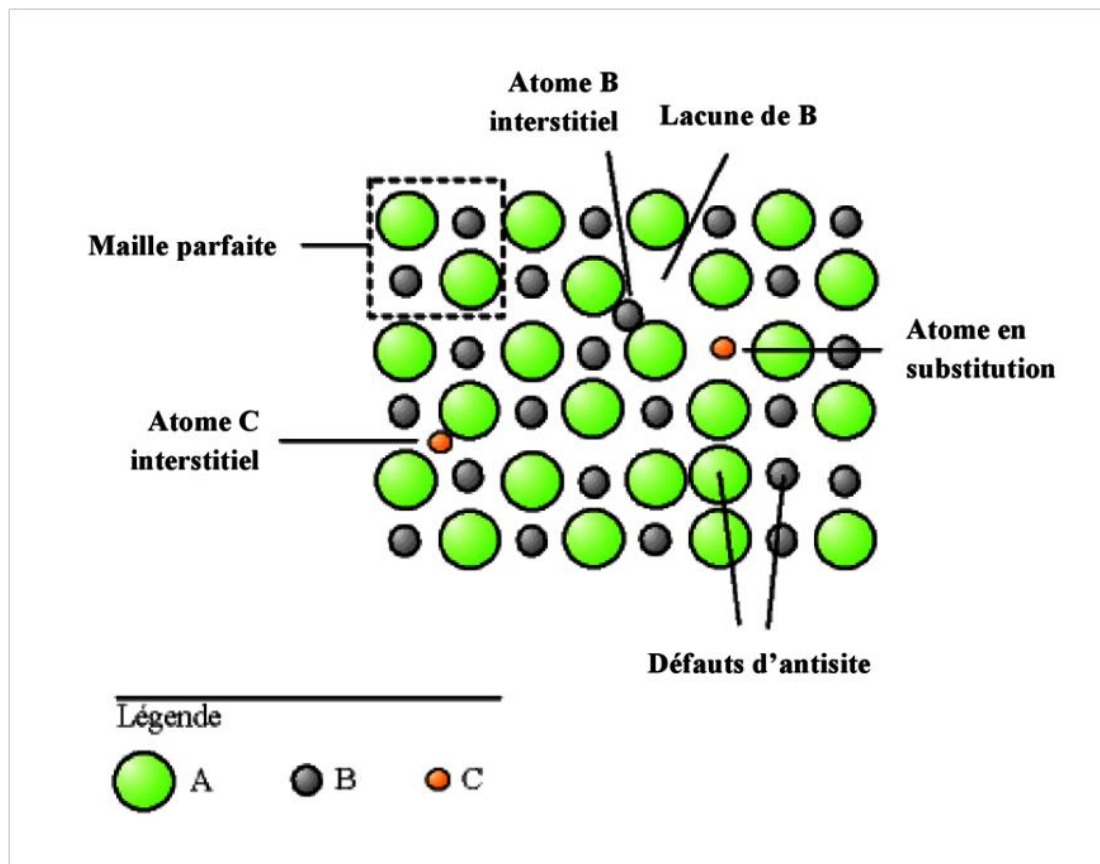


Figure (I.6) : Défauts ponctuels dans le réseau cristallin.

#### I.4 Méthode de croissance du matériau CIGS

Pendant plusieurs années, des méthodes à faible coût ont été développées pour la croissance du matériau CIGS. Ces couches minces ont été déposées en utilisant différentes techniques telle que la co-évaporation des éléments, la C.S.V.T, l'électrodéposition et la technique de Bridgman [20].

L'élaboration se fait soit en massif soit en couches minces.

### **I.4.1 Croissance en massif (méthode de Bridgman)**

Le creuset doit être placé dans un gradient thermique où le matériau est contenu dans le creuset à la fusion. Ensuite, l'abaissement progressif de la température du four permet la cristallisation de ce matériau. Si la vitesse de cristallisation dépend du gradient de température  $S_1$  et  $S_2$  ( $S_1$  et  $S_2$  points à l'interface solide-liquide respectivement). On a donc la vitesse de croissance qui est donnée par :

$$\text{Vitesse de croissance} = \frac{\text{Vitesse de refroidissement}}{\text{Gradient de température}}$$

Dans le cas des matériaux volatils, on opère dans une enceinte fermée telles que les ampoules scellées. La température du point le plus froid de l'ampoule détermine la tension de vapeur de l'élément volatil.

Pour obtenir des résultats convenables avec cette méthode, il est nécessaire d'avoir dans le four des surfaces isotherme les plus planes possibles ou encore légèrement connexes afin que la surface du solide soit connexe par rapport au liquide. Il est aussi important que la vitesse de cristallisation soit la plus lente possible pour éviter les surfusions constitutionnelles. Les vitesses utilisées en général sont inférieures à 0.5 cm par heure.

La croissance des matériaux (CIGS) se fait à partir d'éléments de grande pureté Cu (99.999%), In (99.99%), Ga (99.9999%) et Se (99.999%) généralement à 1100 °C pendant 24 heures, suivie d'une diminution à 950 °C pour 24 heures. Un taux de refroidissement de 25 °C par heure doit être appliqué de 950 °C jusqu'à la température ambiante. La structure cristalline et la constante du réseau du cristal (CIGS) obtenues peuvent être déterminées par la méthode de diffractométrie des poudres des rayons X [20].

### **I.4.2 Croissance en couches minces**

#### **I.4.2.1 Méthode de co-évaporation**

Cette technique est utilisée pour la croissance de la couche d'absorbeur CIGS et pour développer la cellule solaire de type (superstrate) [20].

Le problème réside dans la réalisation des conditions favorables pour l'obtention des couches homogènes. Parmi ces conditions :

- La nature de la température du substrat.
- La pression régnant dans l'enceinte.

L'avantage de cette méthode est la possibilité d'obtenir des couches très minces et l'inconvénient est la difficulté de contrôle de cette qualité et aussi la petite taille des

monocristaux [5].

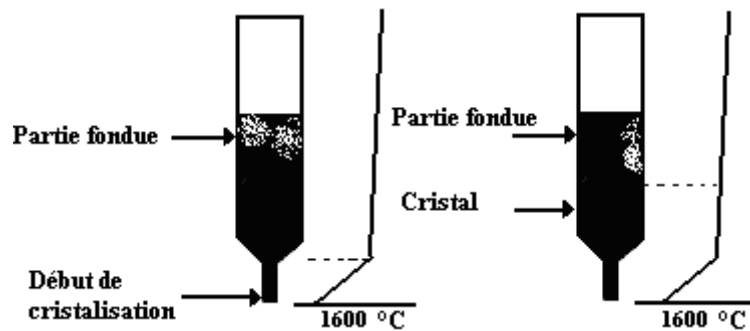


Figure (I.7) : croissance en massif du cristal (méthode de Bridgman) [20].

#### I.4.2.2 Méthode d'électrodéposition

Les couches minces du CIGS peuvent être obtenus à la température ambiante par la technique de déposition électrochimique dans un milieu aqueux. Les dispositifs photovoltaïques dont l'absorbeur est préparé par électrodéposition ont atteint des rendements de l'ordre de 7.9 %. Le complément de Ga dans le matériau et la combinaison de techniques de croissance (électrodéposition et co-évaporation) a permis l'amélioration du rendement jusqu'à 14.1 % [5-9].

Dans une nouvelle méthode employant un nouveau processus d'électrodéposition à deux étapes, qui implique l'électrodéposition d'un film, se fait par un précurseur Cu-Ga sur un substrat molybdène, suivi par l'électrodéposition de Cu-In-Se en couche mince. Le composé CuGa/CuInSe résultant est alors recuit à 600 °C pendant 60 minutes dans un atmosphère d'argon pour former une couche mince de CIGS [20].

La méthode d'électrodéposition a été démontrée comme une méthode efficace pour la production des couches minces en grandes surfaces et pourrait être facilement contrôlée jusqu'à un processus commercial à un coût faible. Les propriétés structurales et stœchiométriques des couches minces peuvent être étudiées en employant XRD et EDS, etc.

#### I.4.2.3 Méthode de transport chimique en phase vapeur a courte distance (CSVST)

Cette méthode est basée sur le transport en phase vapeur à courte distance (CSVST). Le transport est effectué par l'agent de transport qui est de l'iode dans un réacteur vertical (ou horizontal) fermé sous vide comme le représente la figure I.8. La pression d'iode dépend de la

température du point le plus froid dans le réacteur. Des couches quasi-stœchiométriques avec des épaisseurs de plusieurs micromètres peuvent être obtenues durant un dépôt de 15 minutes aux températures de l'ordre de 500 °C et pour des distances substrat-source d'environ 1mm.

Dans la gamme de quasi-stœchiométrie, la conductivité des couches de CIGS peut varier du type  $p^+$  jusqu'au  $p^-$ , ou même de type  $n$  [21.22].

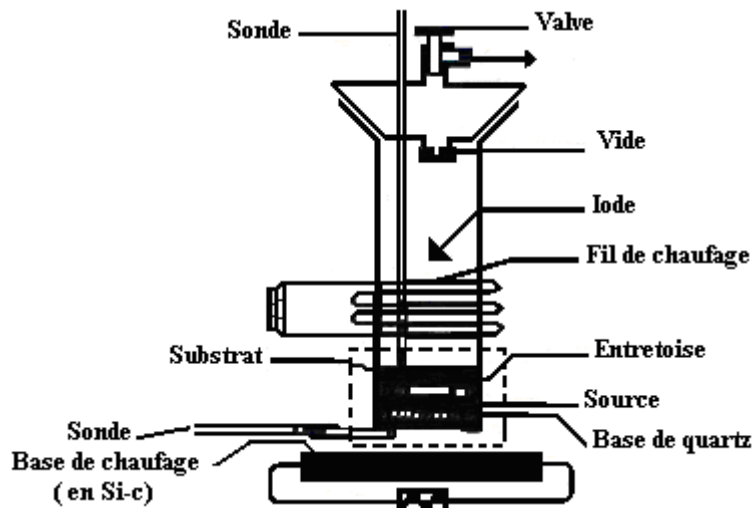


Figure (I.8) : Technique de dépôt par CSVT [21].

### I.5 Conclusion :

Dans ce chapitre, on a revu les propriétés physiques de la couche absorbante à base des composés CIGS. Ces propriétés sont d'une importance cruciales dans la modélisation des dispositifs à base des ces composées. Parmi les obstacles ralentissant l'utilisation de ces composés dans dispositifs commerciaux on cite les défauts intrinsèques. Pour que ces composés soient utilisables, il faut comprendre comment ces défauts se forment, et comment ils affectent les propriétés des dispositifs à base de ces composés.

## Chapitre II

# Généralités sur les cellules solaires

## II.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 des énergies renouvelables et l'énergie solaire. Ensuite son principe de fonctionnement, puis on va présenter les paramètres caractérisant les performances d'une cellule solaire et à la fin du chapitre nous allons évoquer les différentes technologies y compris la cellule tandem qui fait l'objet de ce travail.

## II.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 poursuivies 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 [23].

## II.3 L'énergie solaire :

Le Soleil émet une énergie très importante, dont une petite fraction atteint la Terre, soit environ  $367 \text{ W/m}^2$  en moyenne, connue sous le nom de constante solaire. Cette énergie est influencée par plusieurs facteurs comme l'absorption atmosphérique, la position du Soleil, le climat et les saisons. L'énergie des photons solaires est donnée par la relation suivante.

$$E_{ph} = h \frac{c}{\lambda} \quad (\text{II.1})$$

Et la quantité reçue varie selon la masse d'air

$$AM \approx \frac{1}{\sin \theta} \quad (\text{II.2})$$

$AM$  dépend de l'angle du Soleil. Le spectre solaire standard le plus utilisé est AM1.5, avec une puissance de  $1000 \text{ W/m}^2$ , et il contient majoritairement de la lumière visible et infrarouge. [7, 24]

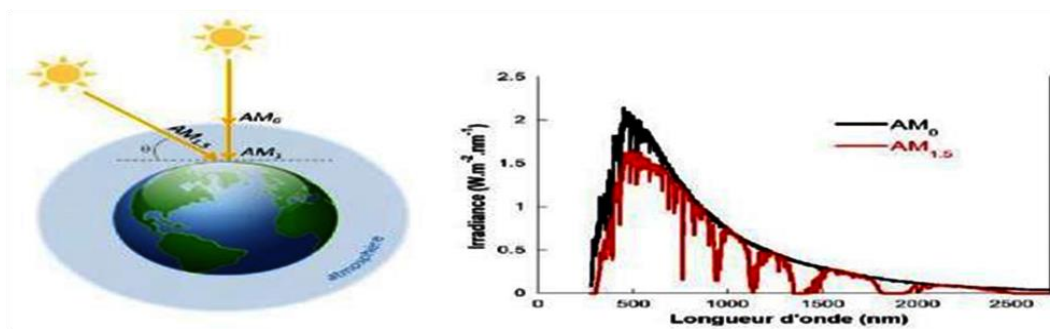


Figure (II.1) : Irradiation solaire [24].

### II.3.1 Spectre de référence :

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 inférieure à 380 nm 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. [25]

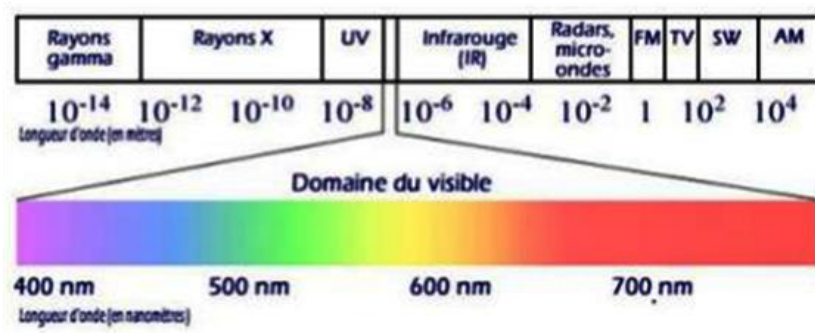


Figure II.2: Spectre solaire. [25]

### II.4 Cellules photovoltaïques :

Les cellules photovoltaïques, dont le nom vient de "photon" (particule de lumière) et "volt"(unité de tension), permettent de transformer directement la lumière du

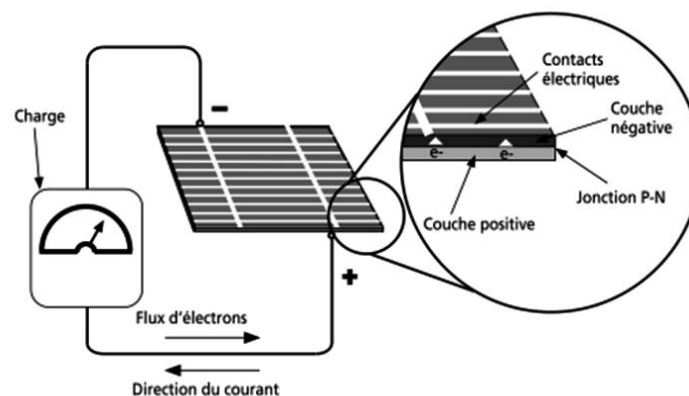
soleil en électricité sous forme de courant continu à basse tension. Étant donné que la source de lumière est le Soleil, on les appelle aussi cellules solaires [26].

#### II.4.1 L'effet photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque est un phénomène physique, qui convertit la lumière (photons) en électricité grâce à l'utilisation d'un matériau semi-conducteur. Ce dernier possède des propriétés électroniques Particulières. Pour constituer une cellule photovoltaïque il faut, à partir de ce matériau, constituer d'une jonction avec une couche supérieure présentant un excès d'électrons (zone dopée n) et une couche Inférieure comportant un déficit d'électrons (zone dopée p) ou inversement. L'exposition du semi-conducteur au rayonnement solaire, va créer un excès de charges électriques dans les deux couches, et la mise en contact de deux matériaux de propriété électronique différente, va provoquer un champ électrique [27].

#### II.4.2 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :

La photopile, qu'on appelle aussi cellule solaire ou photovoltaïque, est fabriquée à l'aide de matériaux semi-conducteurs comme les transistors ou les puces dans un ordinateur. On peut la représenter comme une diode plate qui est sensible à la lumière [28].



**Figure (II.3) :** Description d'une photopile ou cellule photovoltaïque.

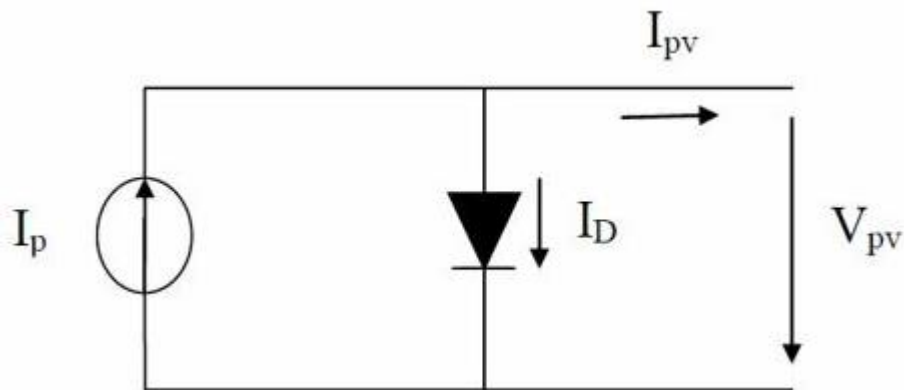
Quand un photon de lumière, d'énergie suffisante, heurte un atome sur la partie négative de cette diode, il excite un électron et l'arrache de sa structure moléculaire, créant ainsi un électron libre sur cette partie. Une photopile est fabriquée de manière à ce que cet électron libre ne puisse se recombiner facilement avec un atome à charge positive, avant qu'il n'ait accompli un travail utile en passant dans un circuit extérieur. Comme une pile chimique (c'est-à-dire une batterie), la cellule photovoltaïque produira de l'électricité à courant continu (DC), mais son énergie produite sera fonction principalement de la lumière reçue par la

photopile.

**II.4.3 Modélisation d'une cellule photovoltaïque :**

**II.4.3.1 Cellule photovoltaïque idéale :**

On peut représenter de façon simplifiée une cellule photovoltaïque comme une source idéale de courant, délivrant un courant  $I_P$  proportionnel à l'intensité de la lumière reçue. Cette source est associée en parallèle à une diode, qui modélise le comportement électrique du matériau semi-conducteur [8].



**Figure II.4:** Circuit électrique idéal d'une cellule photovoltaïque [7].

Avec :

$I_P$  : courant photonique.

$I_D$  : courant de la diode.

D : diode caractérisant la jonction PN.

$V_{PV}$  : tension délivrée par la cellule.

$I_{PV}$  : courant délivré par la cellule.

Les équations représentant ce modèle sont :

$$I_{PV} = I_P - I_D \tag{II.3}$$

La diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique Courant-Tension est donnée par la relation suivante :

$$I_D = I_0 \left( \exp \left( q \frac{V_D}{V_t} \right) - 1 \right) \tag{II.4}$$

Avec :

$I_0$  : courant de saturation de la diode.

$q$  : charge de l'électron,

$V_t = KT/q$  : représente le potentiel thermique,

$T$  : la température absolue en °K.

En remplaçant  $I_D$  par son expression dans l'équation (I.1), on aura :

$$I_{pv} = I_p - I_0 \left( \exp\left(q \frac{V_D}{V_t} - 1 \right) \right) \quad (II.5)$$

### II.4.3.2 Cellule photovoltaïque réelle :

En réalité, le travail de la cellule photovoltaïque est accompagné de certaines pertes sous forme d'une chute de tension de sortie et de l'apparition d'un courant de fuite. Les lois de base ne prennent pas en compte ces phénomènes. Afin de rendre le comportement réel de la cellule plus précis, on ajoute une résistance en série  $R_s$  pour modéliser les pertes de tension internes et une résistance en shunt  $R_{sh}$  en parallèle, ce qui reflète les courants de fuite [29].

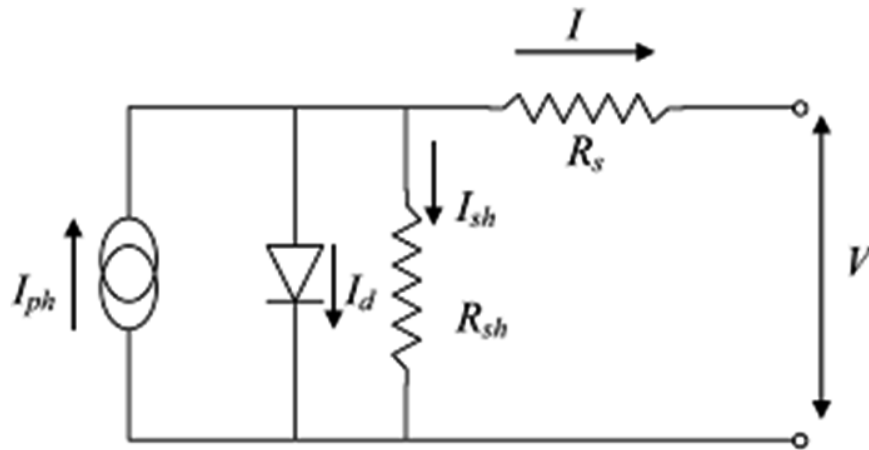


Figure (II.5): Circuit électrique d'une cellule photovoltaïque réelle [29].

À partir du schéma équivalent présenté, le courant fourni par le module photovoltaïque peut être déterminé en appliquant la loi de Kirchhoff des courants.

Le courant à la sortie de la cellule peut s'écrire :

$$I_{PV} = I_P - I_D - I_{sh} \quad (II.6)$$

le courant de saturation qui traversant la diode :

$$I_D = I_0 \left( \exp\left(q \frac{(V_{pv} + R_s * I)}{A * K * T_c} - 1 \right) \right) \quad (II.7)$$

Le courant qui traversant la résistance shunt :

$$I_{sh} = \frac{(V_{pv} + R_s * I_{pv})}{R_{sh}} \quad (II.8)$$

En remplaçant chaque courant par son expression, on aura l'équation suivante :

$$I_{PV} = I_{ph} - I_0 \left( \exp\left(q \frac{(V_{pv} + R_s * I)}{A * K * T_c} - 1 \right) \right) - \frac{(V_{pv} + R_s * I_{pv})}{R_{sh}} \quad (II.9)$$

Dou :

$I_p \approx I_{cc}(\frac{G}{1000})$  est le Photo courant créé par la cellule (proportionnel au rayonnement incident)

$q$  : la Charge de l'électron ( $1.60 * 10^{-19}C$ )

$K$  : Constante de Boltzmann ( $1.381 * 10^{-23}J/k$ )

$T$  : Température effective de la cellule en degré Kelvin.

$A$  : le facteur d'idéalité de la jonction ( $1 < A < 2$ ).

$G$  : l'ensoleillement en  $W/m^2$

#### II.4.4 Les différentes caractéristiques d'une cellule solaire :

A partir de la caractéristique courant-tension, d'une cellule sous obscurité et sous éclairément, on peut évaluer les performances ainsi que le comportement électrique de la cellule photovoltaïque

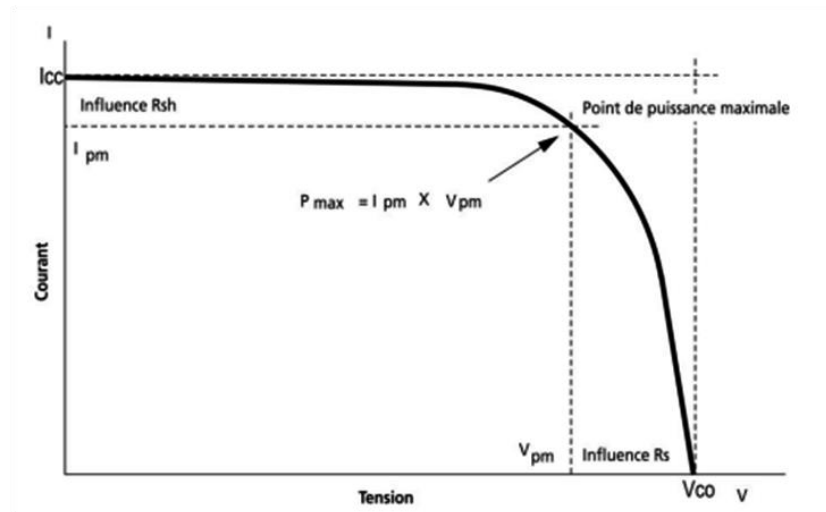


Figure (II.6) : Courbe caractéristique  $I = f(V)$  d'une cellule [30].

##### II.4.4.1 Tension en circuit ouvert $V_{oc}$ :

C'est la tension mesurée aux bornes de la cellule et pour laquelle le courant débité par la cellule solaire est nul, elle est donnée par la relation :

$$V_{co} = V_{th} \ln(1 + \frac{I_p}{I_s}) \quad (II.10)$$

##### II.4.4.2 Courant de court circuit :

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule en prenant  $V=0$  dans le schéma équivalent. Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température.

**II.4.4.3 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:

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{co.Icc}} \tag{II.11}$$

**II.4.4.4 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  $P_{in}$ . [30,31].

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{FF.V_{co.Icc}}{P_{in}} \tag{II.12}$$

Avec :

$P_{in}$  : puissance d'éclairage reçue par unité de surface.

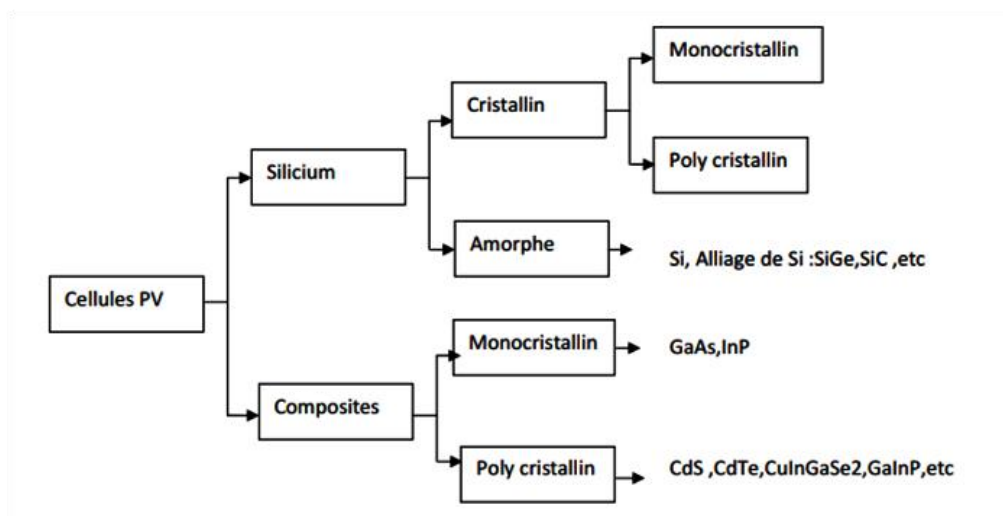
**Puissance maximale :**

La puissance délivrée par une cellule solaire est maximum quand le produit I.V est maximum [12]

$$P_{max} = I_{max} \cdot V_{max} \tag{II.13}$$

**II.5 Les différentes technologies :**

Il existe un grand nombre de technologies mettant en œuvre l'effet photovoltaïque. Beaucoup sont encore en phase de recherche et développement.

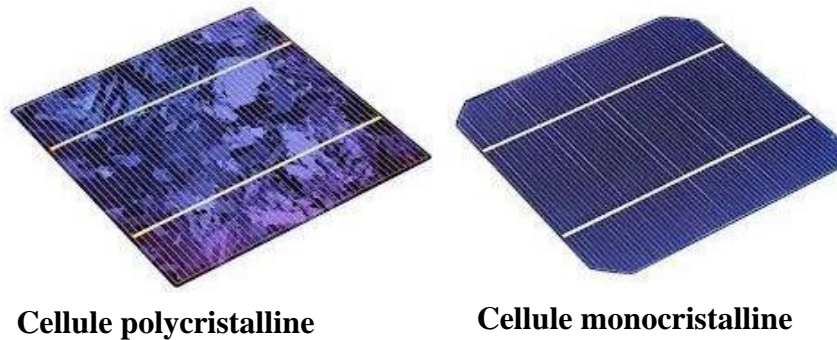


**Figure (II.7) :** Les différentes technologies photovoltaïques [32].

Les principales technologies industrialisées en quantité à ce jour sont : le silicium mono ou poly-cristallin (plus de 80% de la production mondiale) et le silicium en couche mince à base de silicium amorphe ou CIS (Cuivre Indium Sélénium) [5].

### II.5.1 Première génération (silicium cristallin mono et poly) :

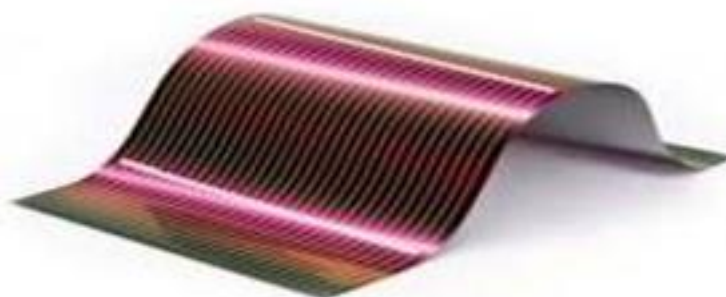
Cette génération repose sur les wafers de silicium cristallin, dont le matériau doit avoir une pureté élevée et contenir 99.99999% de silicium. Les cellules cristallines se subdivisent en 2 catégories : mono et poly cristallin selon le type et structure de procédé de purification et de solidification différent (processus Czochralski Cz et processus Siemens) et se distinguent aussi par rapport à leur plan de coupe qui est différent.[32].



**Figure II.8 :** Deux cellules solaires à base de silicium mono et polycristallin [32].

### II.5.2 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).



**Figure II.9 :** cellules solaires CIGS [11].

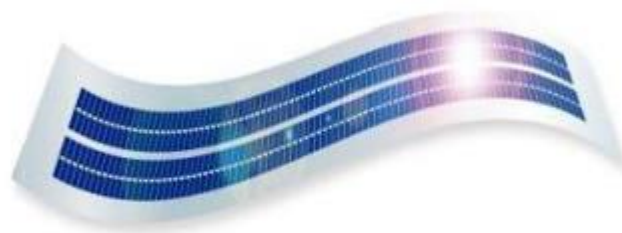
L'épaisseur de la couche varie entre quelques nanomètres à des dizaines de micromètres ces technologies qui étaient initialement chère, étaient réservé aux applications spatiales et technologies de concentration avec l'augmentation des volumes de production, le prix de revient de ces technologies a baissé pour devenir compétitif avec les technologies cristallines de la première génération [11].

### **II.5.3 Troisième génération (les cellules organiques et les cellules multi-jonctions) :**

#### **II.5.3.1 Cellules organiques :**

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 (II.10) :** cellules solaires organiques [11].

#### **II.5.3.2 Cellules multi jonctions :**

Les cellules solaires à jonctions multiples (MJ) sont des cellules solaires dotées de plusieurs jonctions p-n constituées de différents matériaux semi-conducteurs. La jonction p-n de chaque matériau produira un courant électrique en réponse à différentes longueurs d'onde de la lumière. L'utilisation de plusieurs matériaux semi-conducteurs permet d'absorber une gamme de longueurs d'ondes plus large, améliorant l'efficacité de la conversion de l'énergie solaire. Les rendements de ce type de technologies ont dépassé les 46% à base de matériaux (III-V) avec concentration [33], or ce type de technologie est destiné aux applications spatiales à cause de leurs prix très élevés.

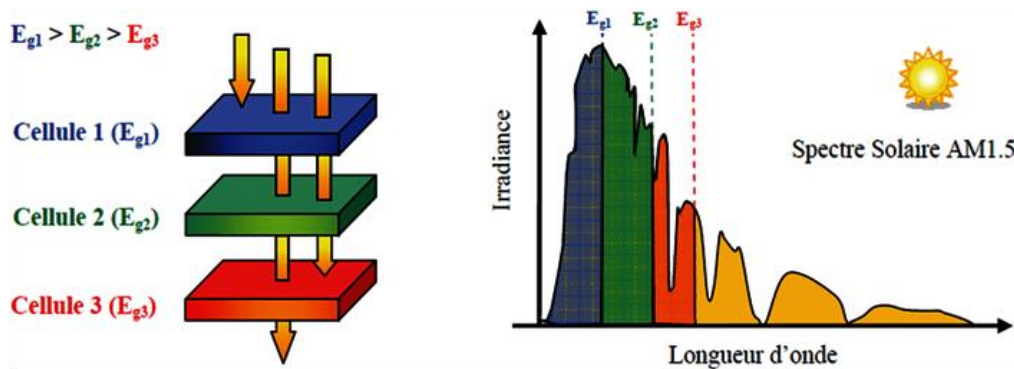


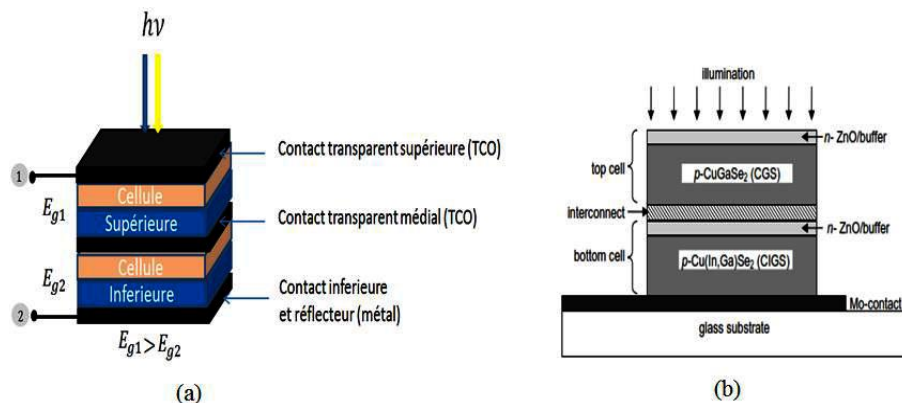
Figure (II.11) : Schéma explicatif du principe de fonctionnement d'une cellule multi-jonctions [11].

### II.5.3.2.1 Configuration des cellules multijonctions

Les cellules solaires à multijonctions peuvent augmenter le rendement de la cellule en introduisant un autre semi-conducteur capable de réduire une partie des pertes par thermalisation ou par transmission. Dans cette approche quatre configurations existent : les cellules solaires à quatre terminales, les cellules solaires monolithiques à deux terminales et à trois terminales, et le système à décomposition spectrale [11]

### II.5.3.2.2 Cellule monolithique tandem à deux terminales

La configuration de la cellule solaire tandem monolithique à deux terminales est basée sur l'empilement de cellules (supérieure et inférieure) en série et sur le même trajet optique avec un ordre décroissant des différents gaps (Figure II.12). Cette configuration nécessite que les sous-cellules soient de la même polarité et que les photocourants entre des sous-cellules soit le même courant (Current- matching) car les performances de toute la cellule tandem sont limitées par la cellule qui débite le moins de courant [11]. En plus de la condition imposée sur l'égalité du courant, le choix du gap de chaque cellule doit être précis pour avoir un maximum de rendement. La croissance de toutes les couches sur un seul substrat et la couche conductrice transparente (TCO) est remplacée par une jonction tunnel ou par une jonction de recombinaison [10] (pour assurer une bonne connexion électrique entre les couches).



**Figure (II.12):** Structure d’une cellule solaire monolithique tandem à deux terminales : (a) Schéma de principe, (b) Exemple sur cellule solaire CGS /CIGS [11].

### II.5.3.2.3 Principe de la cellule solaire tandem à deux terminales

Dans une cellule solaire tandem à deux terminales, la cellule supérieure (top) et la cellule inférieure (bottom) sont électriquement en série. Si nous utilisons les notations suivantes :

- $J_{sc\ tandem}, V_{oc\ tandem}$  : La densité du courant et le voltage de la cellule solaire tandem.
- $J_{sc\ sup}, V_{oc\ sup}$  : La densité du courant et le voltage de la cellule solaire supérieure.
- $J_{sc\ inf}, V_{oc\ inf}$  : La densité du courant et le voltage de la cellule solaire inférieure.
- La tension en circuit ouvert de la cellule solaire tandem est égale la somme des tensions en circuit ouvert des deux cellules supérieure et inférieure ( $V_{oc\ tandem} = V_{oc\ sup} + V_{oc\ inf}$ )
- La densité de courant de court-circuit de la cellule solaire tandem sera donnée par le plus petite valeur des deux densités de courant de court-circuit des cellules solaires supérieure et inférieure ( $J_{sc\ tandem} = \min [J_{sc\ sup}, J_{sc\ inf}]$  ).
- Le facteur de forme et le rendement son calculer par :

$$FF_{Tandem} = \frac{(V_{oc} - A \times V_{th}) \times \ln \left( \frac{V_{oc}}{A \times V_{th}} + 0.72 \right)}{V_{oc} + A \times V_{th}} \tag{II.14}$$

$$\eta_{Tandem} = \frac{FF \times V_{oc} \times J_{sc}}{P_{in}} \tag{II.15}$$

### II.5.3.2.4 Modélisation électrique de la cellule double jonction

#### II.5.3.2.4.1 Model d’une seule diode

Un modèle de circuit équivalent à une seule diode est schématisé sur la figure ci-dessous. L’expression mathématique de I(v) des sous cellules est donnée par [34]:

$$I_{PV} = I_{P,i} - I_{0,i} \left( \exp \left( q \frac{(V_{pv,i} + R_s i)}{A * K * T_c} \right) - 1 \right) - \frac{(V_{pv,i} + R_s i * I_{pv})}{R_{sh,i}} \tag{II.16}$$

Où : i représente le numéro de la sous cellules (1 : supérieur, 2 : inférieure);

$I_p$ ,  $I_0$ ,  $I_{PV}$  : sont le photocourant, courant de saturation de la diode et le courant qui circule dans la charge, respectivement ;  $A$  le facteur d'idéalité de la diode (typiquement entre 1 et 2) ;  $q$  la charge électrique ;  $V$  la tension ;  $K$  le constant de Boltzmann ;  $T$  la température ambiante ;  $R_s$  et  $R_{sh}$  sont les résistances série et parallèles respectivement.

La tension aux bornes de la cellule est étant la somme des tensions de chaque cellule.

$$V = V_1 + V_2 \quad i \tag{II.17}$$

Donc en écrit pour chaque cellules :

$$V_{co,i} = V_{th} \ln\left(1 + \frac{I_{ph,i}}{I_{s,i}}\right) \tag{II.18}$$

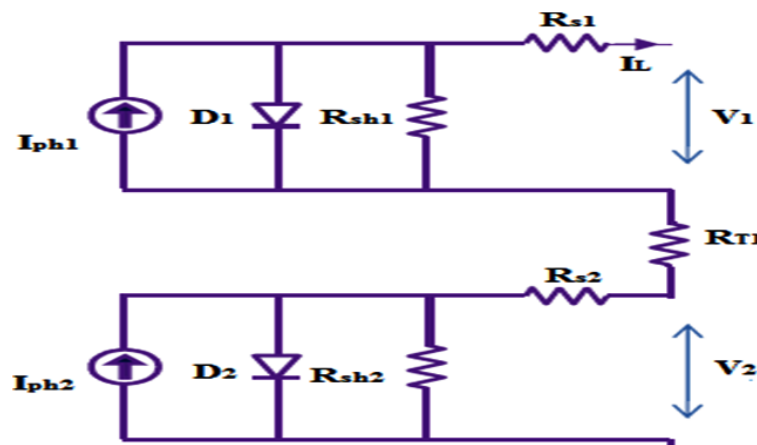


Figure (II.13) : Circuit équivalent du model à une seul diode [34].

#### II.5.3.2.4.2 Model à deux diodes:

Le modèle à une seule diode regroupe les deux termes de courant de saturation dans un seul terme, pour une forme plus général. Ces termes sont séparés de telle sorte que le circuit équivalent comporte deux diodes qui modélisent les deux phénomènes de recombinaison et diffusion, comme il est illustré sur la figure (II.14).

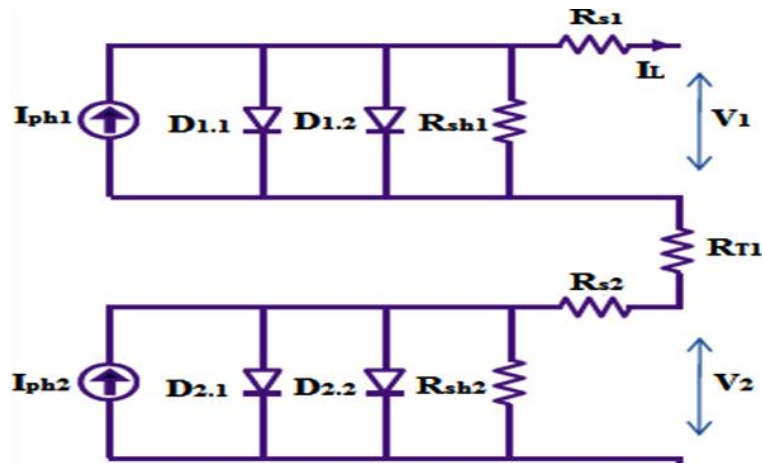


Figure (II.14) : Circuit équivalent du model à deux diodes [34].

## II.6 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons vu c'est quoi une l'énergie renouvelable et cellule solaire et son principe de fonctionnement, nous avons également abordé ses propriétés caractéristiques qui nous permettent de distinguer et de classer les cellules photovoltaïques par rapport à leurs performances, et à la fin du chapitre nous avons présenté les différentes technologies.

## Chapitre III

# Simulation numérique et interprétation des résultats

### III.1 Introduction:

Dans ce chapitre nous allons présenter les résultats de la simulation numérique par le logiciel SCAPS de la cellule solaire tandem en CGS/CIGS et l'interprétation des résultats trouvés.

Nous avons d'abord étudié la variation des paramètres caractéristiques (courant de court-circuit  $J_{cc}$ , la tension à circuit ouvert  $V_{co}$ , ainsi que le rendement  $\eta$  et le facteur de forme  $FF$ ) en fonction des épaisseurs pour les deux cellules séparément, ensuite, nous avons optimisé la cellule CGS/CIGS tandem de telle sorte que les courants délivrés par les deux cellules soient égaux, et enfin nous avons déduit les caractéristiques de la cellule photovoltaïque à double jonction optimisée.

### III.2 Présentation du logiciel SCAPS:

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 Degrave. 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) [35]. 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 continuité des électrons et des trous et sur l'équation de poisson. Il est très facile à l'utiliser [36].

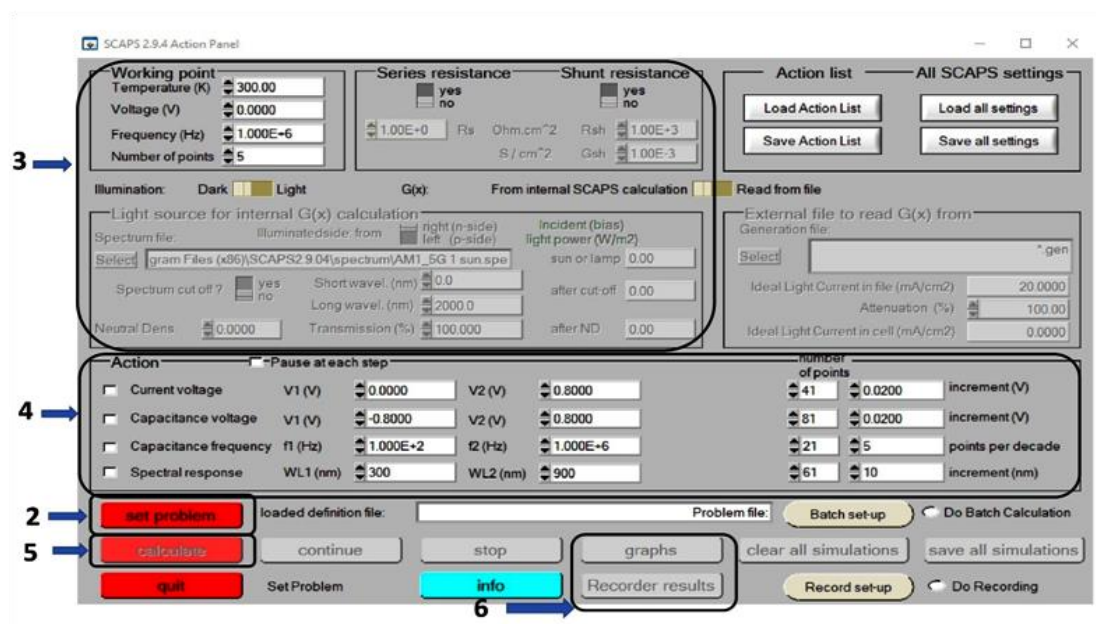
Un aperçu de ses caractéristiques principales est donné ci-dessous:

- Il est possible de simuler des structures constituées d'un nombre définis de couches (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  $\text{CuInSe}_2$  et  $\text{CdTe}$ . 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) [37].

### III.2.1 Etapes de simulation avec SCAPS

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.

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

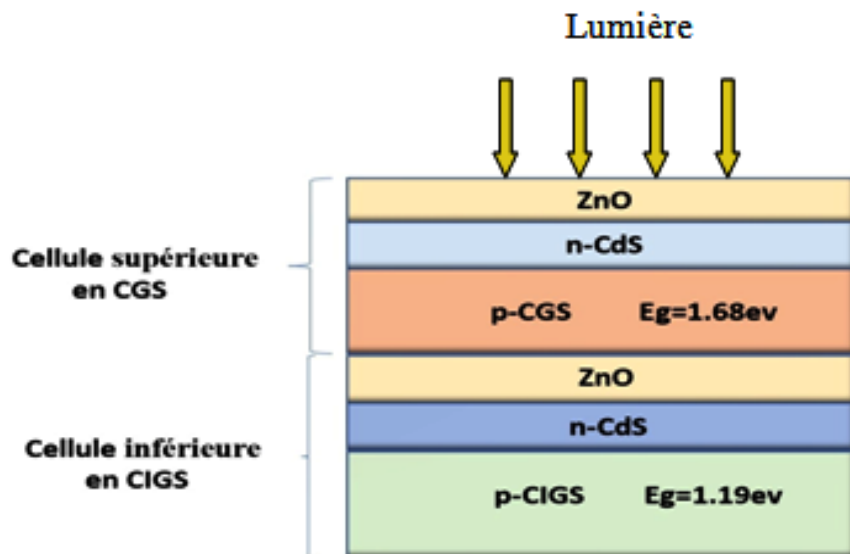
1. Lancer SCAPS.

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.

### III.3 Présentation de la cellule à étudier :

La structure simulée se compose de deux cellules solaires, la cellule supérieure en CGS avec une large bande interdite ( $E_g=1.68$  eV) dont l'épaisseur sera réglable, et une cellule inférieure en CIGS avec une petite bande interdite ( $E_g=1.19$  eV) dont l'épaisseur sera optimale. Le but de cette structure double jonction est de convertir une large gamme de photons incidents sur la cellule pour qu'elle génère plus de puissance.

La Figure (III.2) ci-dessous montre la structure de la cellule CGS/CIGS tandem simulée, donc la cellule supérieure et la cellule inférieure sont des hétéros jonctions n-CdS/p-CGS et n-CdS/p-CIGS respectivement, connectées par la couche de ZnO qui servira d'oxyde conducteur transparent (TCO), précédées par une couche fenêtre également en ZnO.



**Figure (III.2) :** Schéma de la structure de la cellule solaire CGS/CIGS tandem simulée.

La cellule tandem est soumise à un éclairage de spectre solaire AM1\_5G d'une densité de puissance de  $1000$  W/m<sup>2</sup>, on supposera également que les rayons solaires sont

normaux à la surface.

### III.3.1 Paramètres de simulation :

Les paramètres des différentes couches utilisées dans la simulation de la cellule CGS/CIGS tandem sont regroupés dans le tableau (III -1) :

**Tableau III -1** : Les paramètres utilisés dans la simulation [38,39].

Couche		n-ZnO	n-CdS	p-CGS	p-CIGS
Propriété de couche	Symbole				
Épaisseur	$W (\mu m)$	200	50	0.1 à 1	2
Permittivité	$\varepsilon/\varepsilon_0$	9	10	13,6	13,6
Mobilité des électrons	$\mu_e (cm^2/Vs)$	100	100	100	100
Mobilité des trous	$\mu_h (cm^2/Vs)$	25	25	25	25
Densité des électrons	$N_A (cm^{-3})$	0	0	$2 \times 10^{16}$	$2 \times 10^{16}$
Densité des trous	$N_D (cm^{-3})$	$10^{18}$	$10^{17}$	0	0
Bande interdite	$E_g (eV)$	3,3	2,4	1.68	1.20
Densité équivalente d'états dans la BdC	$N_c (cm^{-3})$	$2,2 \times 10^{18}$	$2,2 \times 10^{18}$	$2,2 \times 10^{18}$	$2,2 \times 10^{18}$
Densité équivalente d'états dans la BdV	$N_v (cm^{-3})$	$1,8 \times 10^{19}$	$1,8 \times 10^{19}$	$1,8 \times 10^{19}$	$1,8 \times 10^{19}$
Affinité des électrons	$\chi (eV)$	4.0	3.8	4.08	4.35

### III.3.2 Le spectre solaire utilisé :

La cellule supérieure a été simulée selon la norme Spectre AM 1,5 G représenté dans la figure III.4, La cellule inférieure a été simulée par le spectre filtré AM 1,5 G (Figure III.4) obtenu à partir de la relation suivante [36]:

$$\delta(\lambda) = \delta_0(\lambda) \cdot \exp\left(\sum_{i=1}^4 -(\alpha_{material-i}(\lambda) \cdot d_{material-i})\right) \quad (III.1)$$

Tel que :

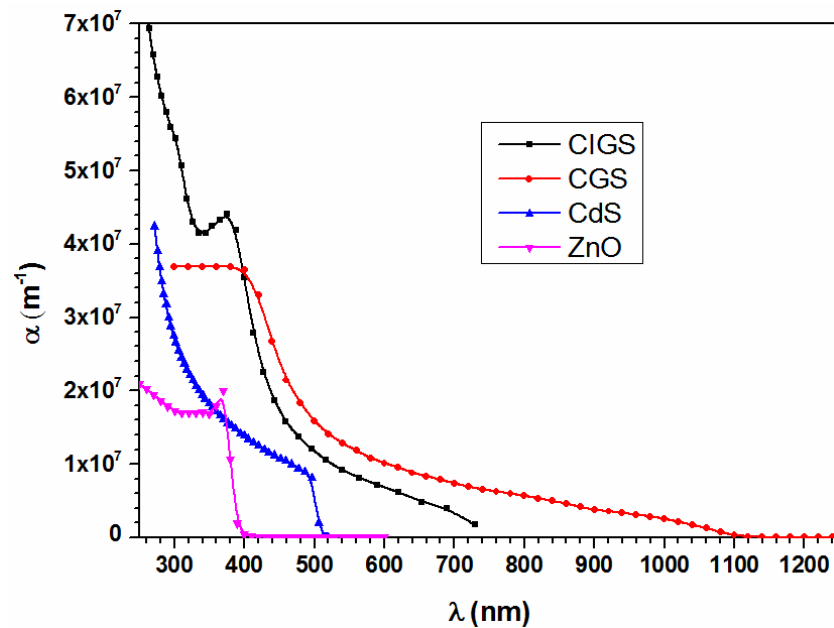
$\delta(\lambda)$  : Puissance du spectre filtré (Watt/m<sup>2</sup>) à différentes longueurs d'onde.

$\delta_0(\lambda)$  : Puissance spectrale AM 1,5 G (Watt/m<sup>2</sup>) à différentes longueurs d'onde.

$\alpha_{material-i}(\lambda)$  : Coefficient d'absorption de différents matériaux à différentes longueurs d'onde.

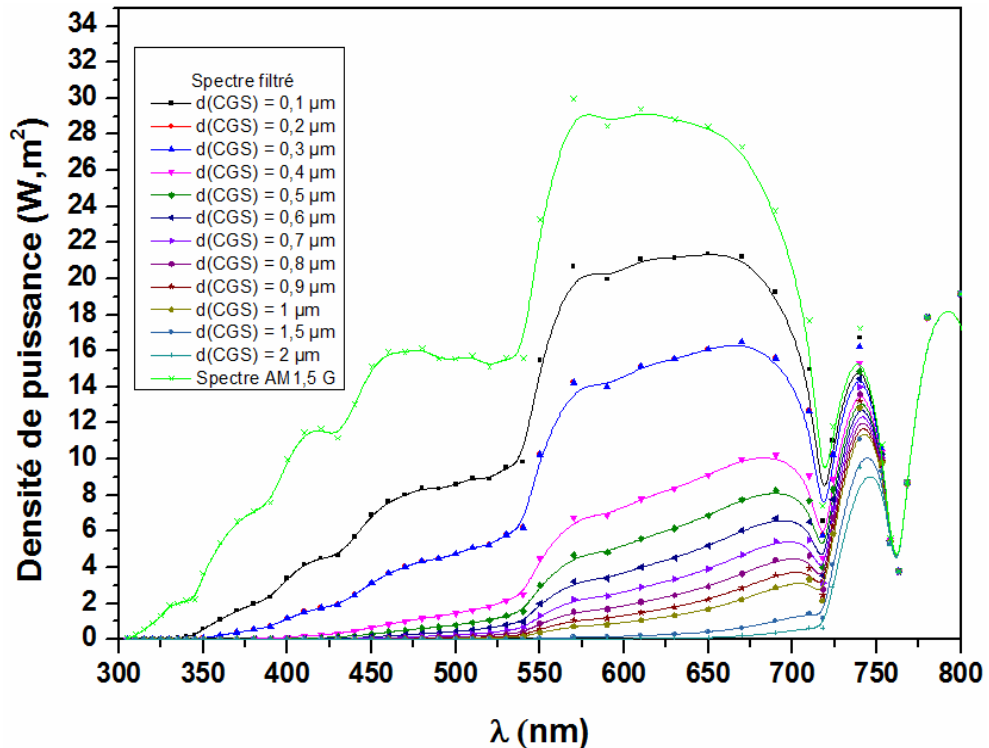
$d_{material-i}$  : Épaisseur de différents matériaux.

Les coefficients d'absorption de différents matériaux sont représentés dans la figure (III.3).



**Figure (III.3) :** Coefficients d'absorption de CIGS, CGS, CdS et ZnO utilisés dans la simulation

La figure III.4 représente les spectres filtrés de la sous-cellule inférieure de CIGS à différentes épaisseurs de la couche supérieure à base de CGS.



**Figure (III.4) :** Spectre AM 1.5G absorbé par la cellule supérieure CGS, et les spectres filtrés de la sous-cellule inférieure à base de CIGS pour différentes épaisseurs de la couche supérieure de CGS.

III.4 Résultats de la simulation et interprétations

III.4.1 Effet de la composition de l'absorbeur ( $x = \frac{Ga}{Ga + In}$ )

III.4.1.1 Présentation de la structure :

La figure III.5 représente la structure individuelle de la cellule supérieure à base des composés  $CuIn_{1-x}Ga_xSe_2$  (CIGS) sous le programme de simulation SCAPS,

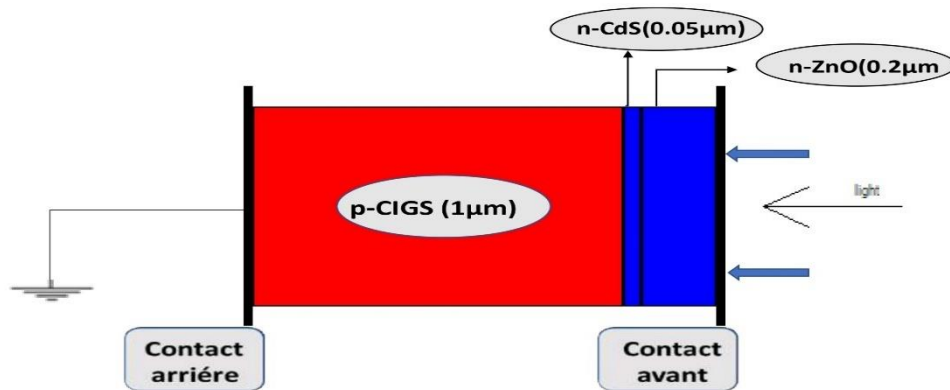


Figure (III.5) : La structure de la Cellule solaire à base des composés  $CuIn_{1-x}Ga_xSe_2$  sous le programme de simulation SCAPS,

A partir de la cellule de référence décrit plus haut. Dans ce travail, on discutera de l'effet de la teneur en Ga  $x=Ga/(Ga+In)$  dans la couche absorbante sur le rendement de la cellule et l'origine des différentes pertes. On présentera ensuite les résultats obtenus. Pour cela, on a besoin de connaître la variation de la largeur de bande interdite ( $E_g$ ) et de l'affinité électronique ( $\chi$ ) en fonction de la composition de l'alliage  $CuIn_{1-x}Ga_xSe_2$  dans la structure de la cellule solaire. La dépendance de ces paramètres en fonction de x est donnée par l'équation suivante []:

$$E_g = 1.02 + 0.66x - bx(1-x), \text{ où } b = (0.11) \tag{III.2}$$

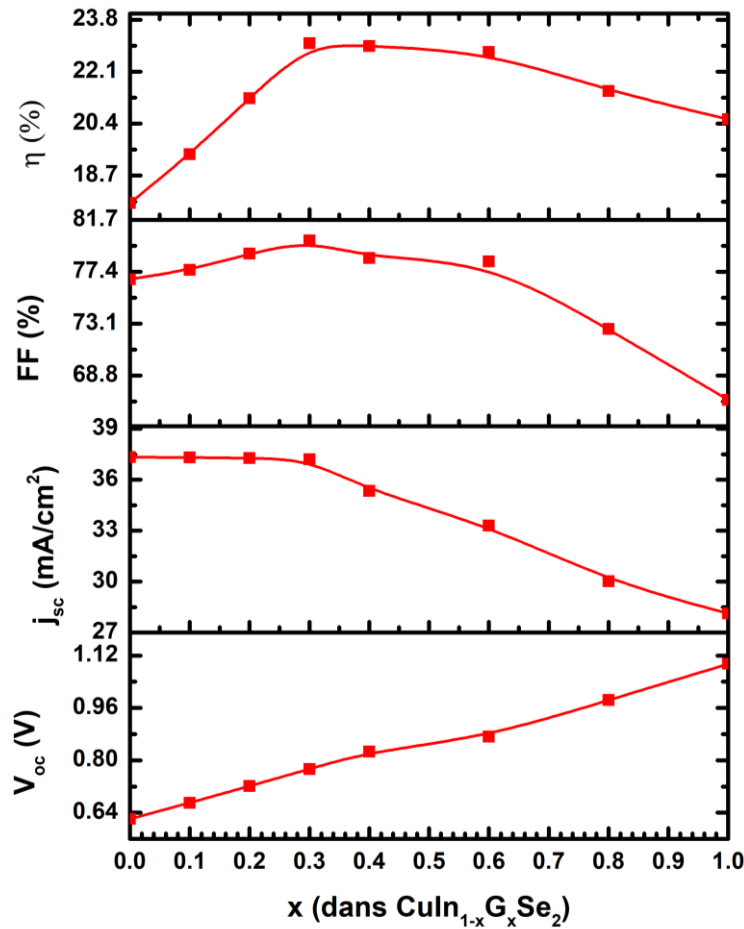
$$\chi = 4.35 - 0.421x - 0.244x^2 \tag{III.3}$$

Les valeurs sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau (III.2) : Valeurs de la largeur de la bande interdite et de l'affinité électrique en fonction de la teneur en Ga pour le  $CuIn_{1-x}Ga_xSe_2$ .

x	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
$E_g$ (eV)	1.02	1.07	1.13	1.19	1.25	1.32	1.38	1.45	1.53	1.60	1.68
$\chi$ (eV)	4.35	4.30	4.25	4.20	4.14	4.07	4.00	3.93	3.85	3.77	3.68

La figure III.6 représente l'évolution du rendement, du courant de court-circuit, le facteur de forme et la tension de circuit ouvert de la cellule en fonction de la composition  $x$  dans  $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$



**Figure (III.6) :** Evolution du  $V_{oc}$  et  $j_{sc}$  et FF et  $\eta$  de la cellule en fonction de la composition  $x$  dans  $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$

On remarque que le rendement ( $\eta$ ) augmente progressivement avec l'augmentation de  $x$ , atteignant un maximum d'environ 22.8 % pour  $x \approx 0.3$  à 0.4, avant de diminuer au-delà de cette valeur. Cette amélioration est due à l'élargissement de la bande interdite ( $E_g$ ) avec l'ajout de gallium, ce qui permet d'augmenter  $V_{oc}$ . Toutefois, lorsque  $E_g$  devient trop élevée, l'absorption des photons à faible énergie diminue, ce qui réduit  $J_{sc}$  et donc  $\eta$ .

Le facteur de forme (FF) montre un comportement similaire, il augmente légèrement jusqu'à atteindre un maximum vers  $x = 0.3$ , puis il décroît de manière significative pour des valeurs plus élevées de  $x$ , Probablement en raison d'une dégradation des propriétés de transport de charge.

Le courant de court-circuit ( $J_{sc}$ ) reste élevé pour les faibles valeurs de  $x$  ( $\approx 37\text{mA}/\text{cm}^2$ ), puis décroît continuellement à partir de  $x > 0.2$ . Cette diminution est principalement liée à

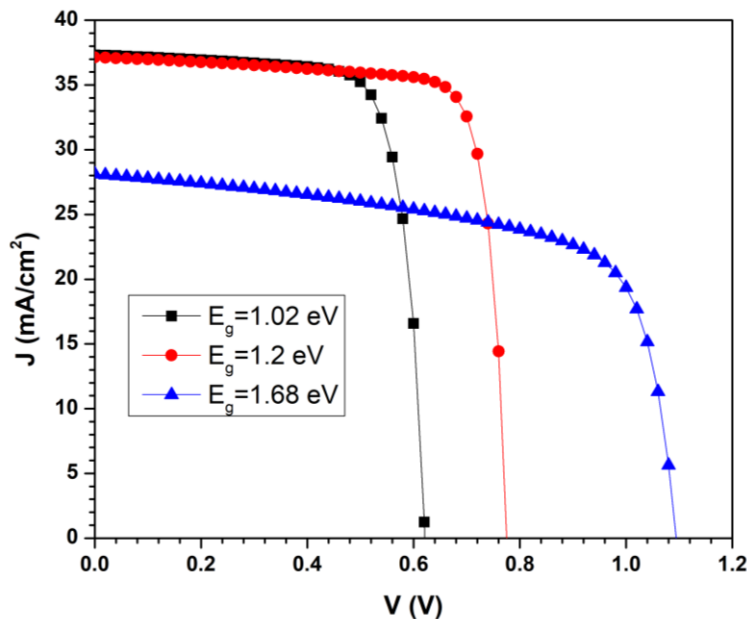
la réduction de l'absorption du spectre solaire due à l'augmentation de la bande interdite.

En revanche, la tension de circuit ouvert ( $V_{oc}$ ) augmente de manière quasi linéaire avec  $x$ , passant de 0.64 V à environ 1.12 V pour  $x = 1$ , ce qui est cohérent avec l'augmentation de  $E_g$ , car  $V_{oc}$  est directement proportionnelle à cette dernière.

En conclusion, une composition optimale en gallium se situe entre  $x = 0.3$  et  $x = 0.4$ , où l'on obtient un bon compromis entre rendement élevé, facteur de forme optimal, courant de court-circuit satisfaisant et tension en circuit ouvert importante. Cette plage constitue donc une zone idéale pour maximiser les performances des cellules solaires à base de CIGS.

#### III.4.1.2 Caractéristique J(V) :

La figure (III.7) représente la variation de la densité de courant en fonction de la tension de polarisation pour différentes valeurs de la bande interdite de CIGS.



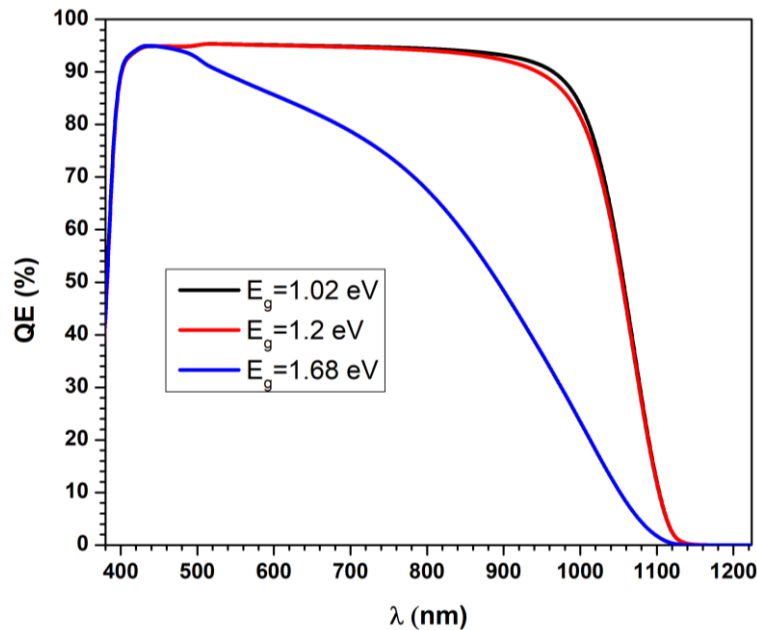
**Figure (III.7) :** La variation des caractéristiques tension-courant en fonction de la tension de polarisation pour différentes valeurs de la bande interdite

La figure (III.7) montre l'effet positif introduit par le Ga dans le CIS se traduit par l'amélioration du photovoltage ( $V_{co}$ ) qui se traduit par une augmentation de la puissance fournie par la cellule à base de l'hétérostructure ZnO/CdS/CIGS. En raison de la mobilité importante du cuivre dans le CIS qui provoque des défauts de type vacance et interstitielle, le Ga occupe les sites vacants du Cu et réduit par conséquent le courant de recombinaison.

L'augmentation de la concentration en gallium réduit d'une manière considérable la densité de courant de court-circuit ( $J_{sc}$ ). Cela peut être dû à la structure cristallographique du CIGS qui présente des défauts simple et complexes, variables en fonction du taux de gallium.

### III.4.1.3 Efficacité quantique $QE$ :

La figure (III.8) représente la variation de l'efficacité quantique externe (EQE) pour différentes valeurs de la bande interdite.



**Figure (III.8) :** La variation de l'efficacité quantique externe (EQE) à différentes valeurs de la bande interdite.

La figure (III.8) montre que l'EQE diminue lorsque la bande interdite  $E_g$  augmente. Une valeur plus élevée de  $E_g$  limite l'absorption aux courtes longueurs d'onde, ce qui réduit la réponse spectrale de la cellule. Ainsi, une cellule avec  $E_g = 1.68$  eV capte moins de photons que celles avec  $E_g = 1.2$  eV ou  $E_g = 1.02$  eV, ce qui impacte négativement son rendement global.

### III.4.2 Simulation de la cellule tandem CGS/CIGS empilée mécaniquement

La structure étudiée repose sur une cellule solaire tandem de type CGS (supérieure) /CIGS (inférieure).

Le spectre solaire AM1.5G est utilisé pour la couche supérieure, tandis qu'un spectre filtré, variant avec l'épaisseur de la couche supérieure, est appliqué à la cellule inférieure.

La cellule inférieure est composée de la structure : p-CIGS/n-CdS/n-ZnO, avec une bande interdite  $E_g$  (CIGS) de 1,19 eV qui représente le gap optimal.

La figure (III.9) représente la structure de la Cellule inférieure en CIGS avec une large bande interdite dont l'épaisseur est fixée à 2  $\mu\text{m}$ .

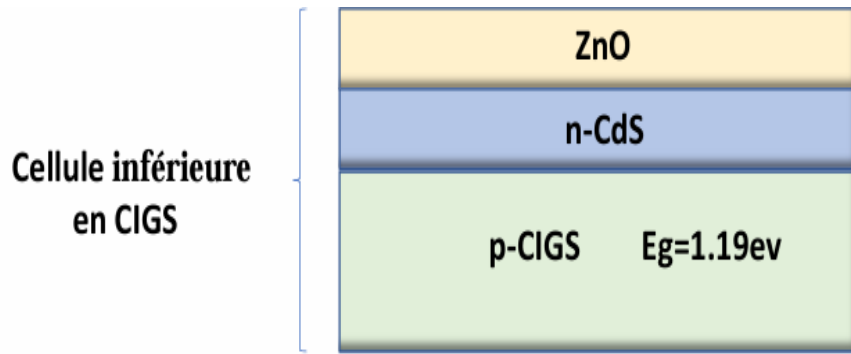


Figure (III.9) : La structure de la Cellule inférieure CIGS.

La figure (III.10) représente la structure de la Cellule inférieure CIGS sous le programme de simulation SCAPS, après la saisie des paramètres des matériaux cellulaires.

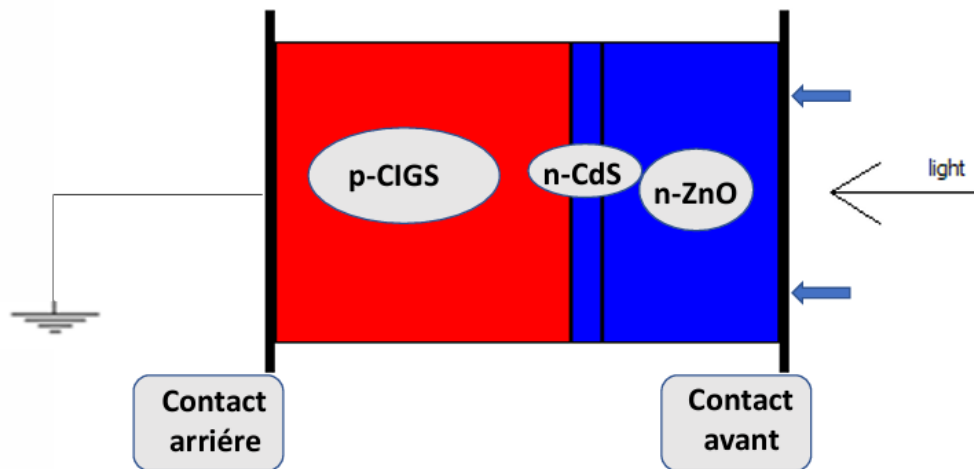


Figure (III.10) : La structure de la Cellule inférieure CIGS sous le programme de simulation SCAPS.

La figure (III.11) représente la structure de la Cellule supérieur en CGS avec une large bande interdite ( $E_g = 1.68\text{ eV}$ ) dont l'épaisseur varie de 0.1 à 1  $\mu\text{m}$ .

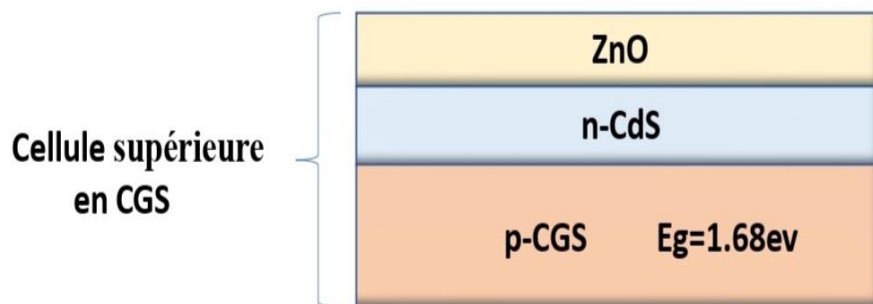
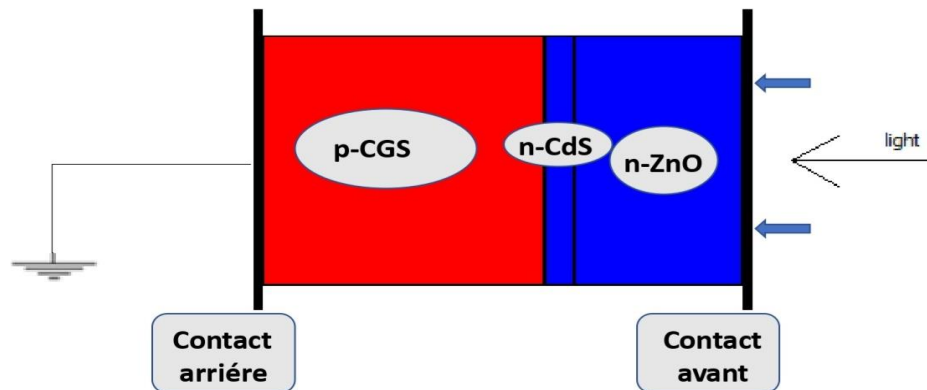


Figure (III.9) : La structure de la Cellule supérieure CGS.

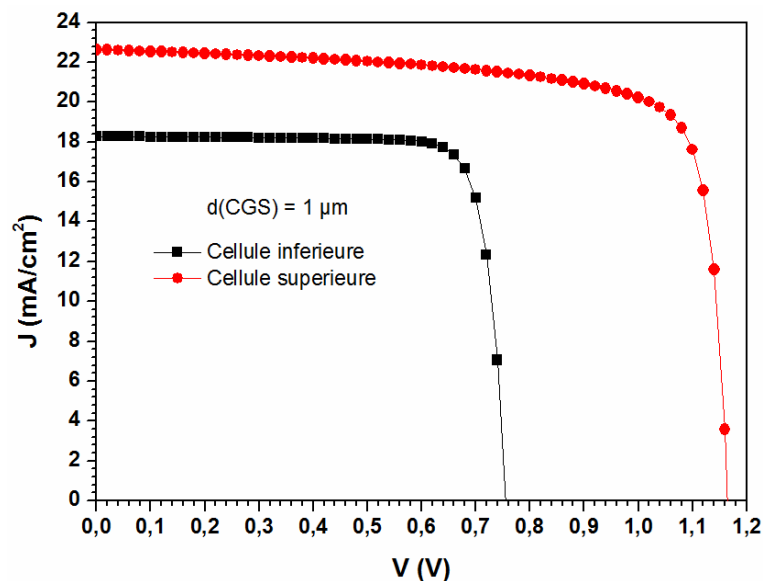
La figure (III.10) représente la structure de la Cellule supérieure CGS sous le programme de simulation SCAPS, après le saisie des paramètres des matériaux cellulaires.



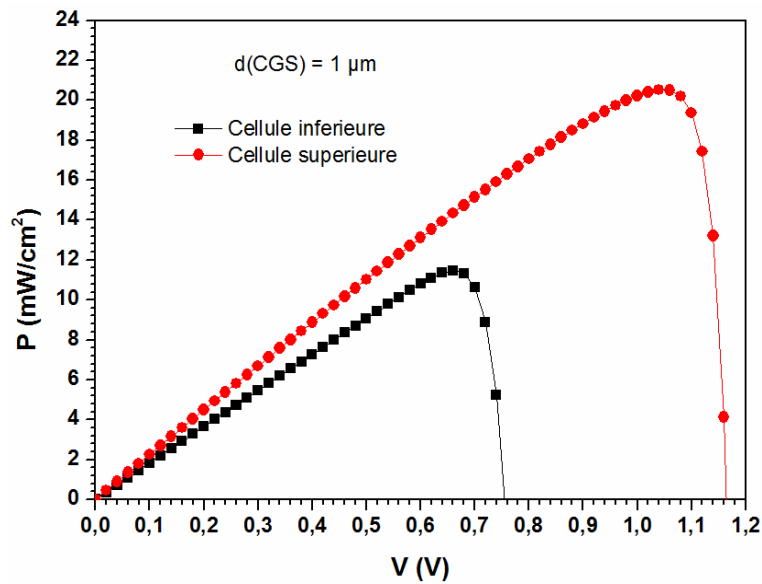
**Figure (III.10) :** La structure de la Cellule supérieure CGS le programme de simulation SCAPS

#### III.4.2.1 Caractéristique courant tension $J(V)$ et $P(V)$ :

La caractéristique électrique ( $J-V$ ) de la cellule solaire tandem CGS/CIGS avant l'optimisation, sous éclairement par le spectre solaire AM 1,5 G pour la cellule supérieure en CGS et spectre solaire filtré pour la cellule inférieure en CIGS est représentée sur la figure (III.11). La caractéristiques  $P(V)$  est représentée dans la figure (III.12)



**Figure (III.11) :** La variation des caractéristiques tension-courant pour la cellule tandem en CGS/CIGS, la cellule inférieure en CIGS et la cellule supérieure en CGS.



**Figure (III.12) :** La variation de la caractéristique  $P(V)$  pour la cellule tandem en CGS/CIGS, la cellule inférieure en CIGS et la cellule supérieure en CGS.

Nous observons que les paramètres photovoltaïques de la cellule inférieure en CIGS sont considérablement dégradés en raison des couches supérieures absorbant certaines quantités de la lumière incidente. Les résultats de la cellule supérieure en CGS dans la cellule tandem par rapport à la cellule solaire individuelle CGS, montrent plutôt de petites diminutions des paramètres photovoltaïques en raison de l'absorption de la lumière par les couches inférieures.

La densité de courant de la cellule solaire tandem est limitée par la faible densité de courant de la cellule inférieure CIGS simplement parce que le critère d'égalité du courant de court-circuit entre les cellules supérieure en (CGS) et inférieure en (CIGS) n'est pas satisfait (current matching), ce qui entraîne un rendement de conversion de la cellule tandem relativement faible.

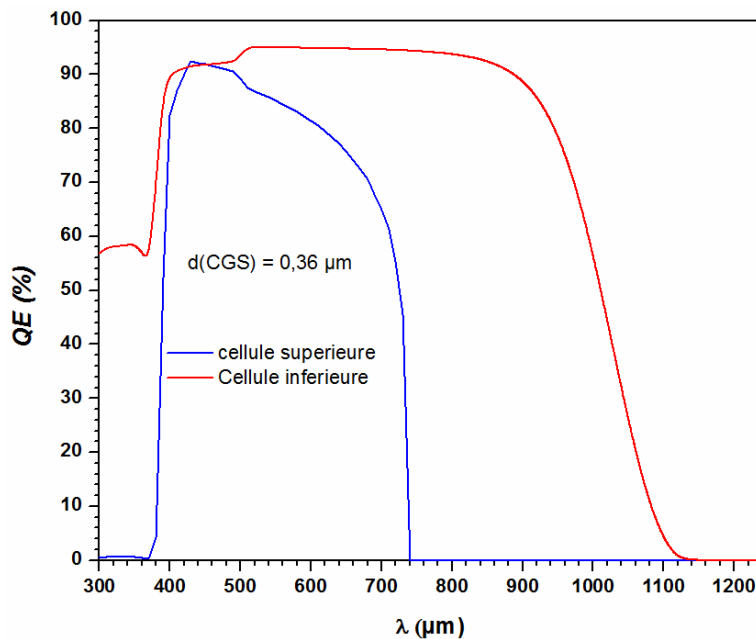
Les paramètres photovoltaïques déduits de ces caractéristiques sont indiqués dans le tableau (III.3).

**Tableau III.3:** Paramètres photovoltaïques des cellules solaires (supérieure, inférieure).

paramètres / Type de cellule	$V_{oc}$ (V)	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$FF$ (%)	$\eta$ (%)	$V_{MPP}$ (V)	$J_{MPP}$ (mA/cm <sup>2</sup> )
Cellule inférieure	0.75	18.28	83.08	31.87	0.66	17.35
Cellule supérieure	1.16	22.62	77.87	20.53	1.04	19.62

### III.4.2.2 Efficacité quantique $QE$ :

Les courbes du rendement quantique externe (EQE) par rapport à la longueur d'onde pour les cellules supérieures et inférieures dans la cellule solaire tandem sont représentées sur la Figure (III.13). Nous avons simulé EQE en mode court-circuit. La cellule supérieure à un maximum en EQE autour de 450 nm, tandis que la cellule inférieure montre un maximum en EQE à 800 nm.



**Figure (III.16) :** la variation de l'efficacité quantique externe (EQE) de la cellule inférieure en CIGS et la cellule supérieure en CGS.

Les courtes longueurs d'onde inférieures à 700 nm sont principalement absorbées par la cellule supérieure alors que l'intervalle de longueurs d'onde compris entre 500 et 1100 nm sont absorbés par la cellule inférieure.

### III.4.3 Cellule solaire tandem optimisée

Pour optimiser notre cellule tandem, nous avons modifié l'épaisseur de la cellule inférieure de CIGS et les spectres filtrés à partir d'un changement d'épaisseur de la cellule supérieure à base de CGS en utilisant l'équation III.1,

#### III.4.3.1 Effet de l'épaisseur de couche en CGS de la cellule supérieure sur les paramètres photovoltaïques de la cellule tandem.

Avant de diminuer l'épaisseur de la couche CGS, la densité de courant de court-circuit de la cellule inférieure  $J_{cc-inf}$  est inférieure à la densité de courant de court-circuit  $J_{cc-sup}$  de la cellule supérieure, l'épaisseur de la cellule supérieure peut être réduite pour assurer le critère d'égalité du courant de court-circuit entre les cellules inférieure et supérieure où  $J_{cc-inf} = J_{cc-sup}$

Étant donné que la densité de courant de la cellule tandem  $J_{cc}$  est limitée par la plus faible valeur des densités de courant  $J_{cc-inf}$  et  $J_{cc-sup}$ . Par conséquent, la densité de courant de court-circuit de la cellule tandem et le rendement de la cellule sera maximal lorsque l'épaisseur de la cellule supérieure diminue pour atteindre cette condition ( $J_{cc-inf} = J_{cc-sup}$ ).

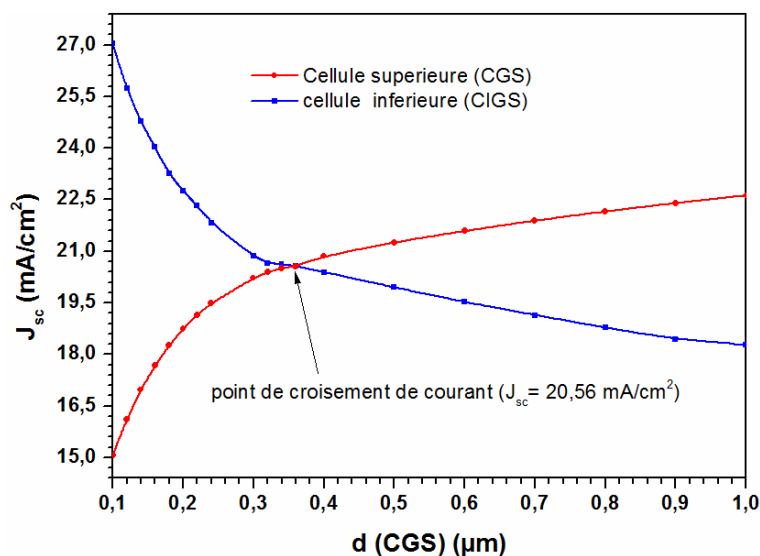
Pour assurer le critère d'égalité du courant de court-circuit entre la cellule supérieure en CGS et la cellule inférieure en CIGS, on fait varier l'épaisseur de la couche CGS de la cellule supérieure entre 0.1  $\mu\text{m}$  et 1  $\mu\text{m}$  dans la cellule tandem en CGS/CIGS tout en maintenant l'épaisseur de la cellule inférieure en CIGS fixée à 2  $\mu\text{m}$ .

Les paramètres de simulation sont indiqués dans les figures suivantes :

#### III.4.3.1.1 Courant de court-circuit $J_{sc}$ :

Les densités de courant de court-circuit des cellules supérieure et inférieure en fonction de l'épaisseur de la couche CGS sont indiquées dans la figure (III.17).

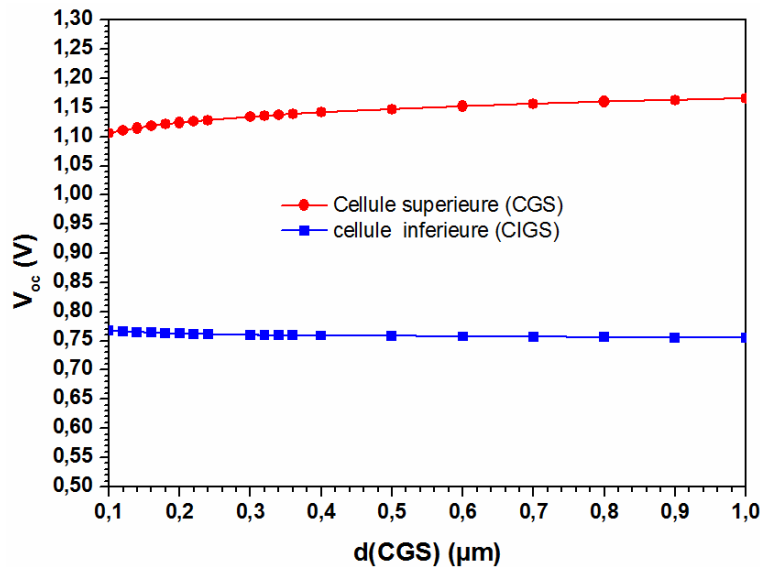
Quand l'épaisseur de la couche CGS dans la cellule supérieure augmente, le courant  $J_{cc-sup}$  de la cellule supérieure augmente et le courant  $J_{cc-inf}$  de la cellule inférieure diminue. C'est simplement parce que la cellule supérieure absorbe plus de lumière, laissant passer moins de lumière à la cellule inférieure et en revanche, si la cellule supérieure absorbe moins de lumière, laissant transmettre plus de lumière à la cellule inférieure. Avec l'augmentation progressive de la couche CGS dans la cellule supérieure, le courant  $J_{cc-sup}$  croît et le courant  $J_{cc-inf}$  décroît se croisent à une épaisseur CGS optimale de 0.36  $\mu\text{m}$  où le critère d'égalité du courant de court-circuit entre les cellules inférieure et supérieure est réalisé ( $J_{cc-inf} = J_{cc-sup} = 20.56 \text{ mA/cm}^2$ ).



**Figure (III.17) :** La variation de la densité de court-circuit  $J_{sc}$  des cellules supérieure en CGS et inférieure en CIGS en fonction de l'épaisseur de la couche supérieure en CGS dans la cellule tandem en CGS/CIGS.

### III.4.3.1.2 Tension de circuit ouvert $V_{oc}$ :

Dans la figure (III.18), nous avons représenté les tensions du circuit ouvert des cellules supérieure et inférieure en fonction de l'épaisseur de la couche supérieure en CGS.



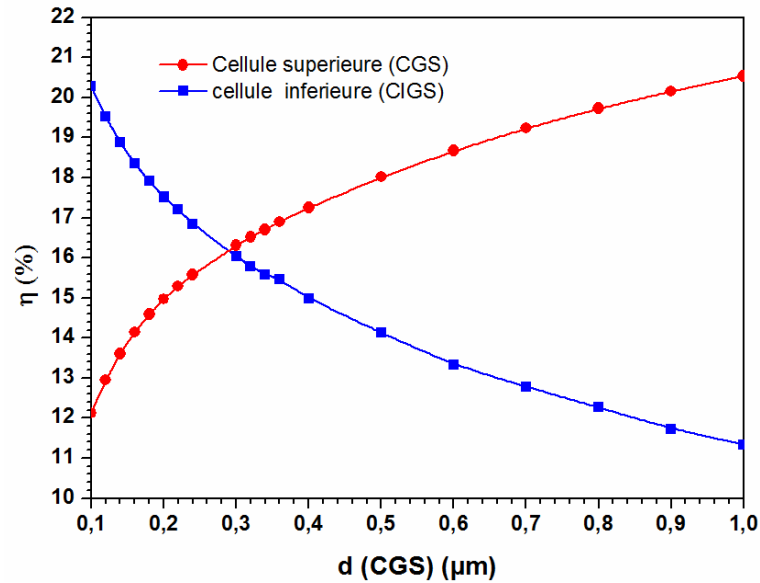
**Figure (III.18) :** Tensions en circuit ouvert de la cellule supérieure en CGS et inférieure en CIGS en fonction de l'épaisseur de la couche supérieure en CGS dans la cellule solaire tandem en CGS/CIGS.

Nous remarquons que la de la cellule supérieure augmente avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche CGS. Plus l'épaisseur de cette couche augmente, plus de photons ayant des longueurs d'onde plus longues peuvent être collectées dans la couche absorbante. Par la suite, ceci contribuera à plus de génération de paires d'électron-trou et par conséquent une augmentation de la tension en circuit ouvert. Cependant, celui de la cellule inférieure reste presque indépendant de la variation de l'épaisseur de la couche CGS.

### III.4.3.1.3 Le rendement de conversion $\eta$ (%) :

La figure (III.19) montre que les épaisseurs de la couche du CGS modifient le rendement conversion de la cellule solaire supérieure et inférieure d la même manière que le courant  $J_{sc}$ . Les performances de la cellule inférieure sont moins bonnes que celles obtenues en cellule solaire supérieure. Pour les couches épaisses de l'absorbeur CGS, le processus de génération est produit.

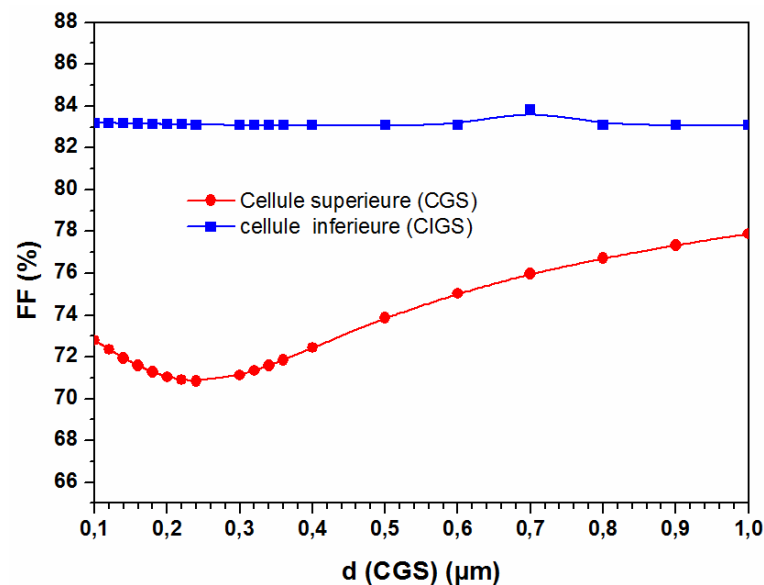
On constate que la probabilité de génération plus élevée dans un absorbeur d'épaisseur supérieure à 0,3 µm Cela est dû en partie à une importante de l'absorption à la surface arrière de l'absorbeur CGS et très élevée.



**Figure (III.19) :** Le rendement de conversion  $\eta$  de la cellule supérieure en CGS et inférieure en CIGS en fonction de l'épaisseur de la couche supérieure en CGS dans la cellule solaire tandem en CGS/CIGS.

#### III.4.3.1.4 Facteur de forme FF :

La variation du facteur de forme en fonction des épaisseurs de la couche absorbante CGS dans la cellule supérieure est représentée dans la figure (III.20).



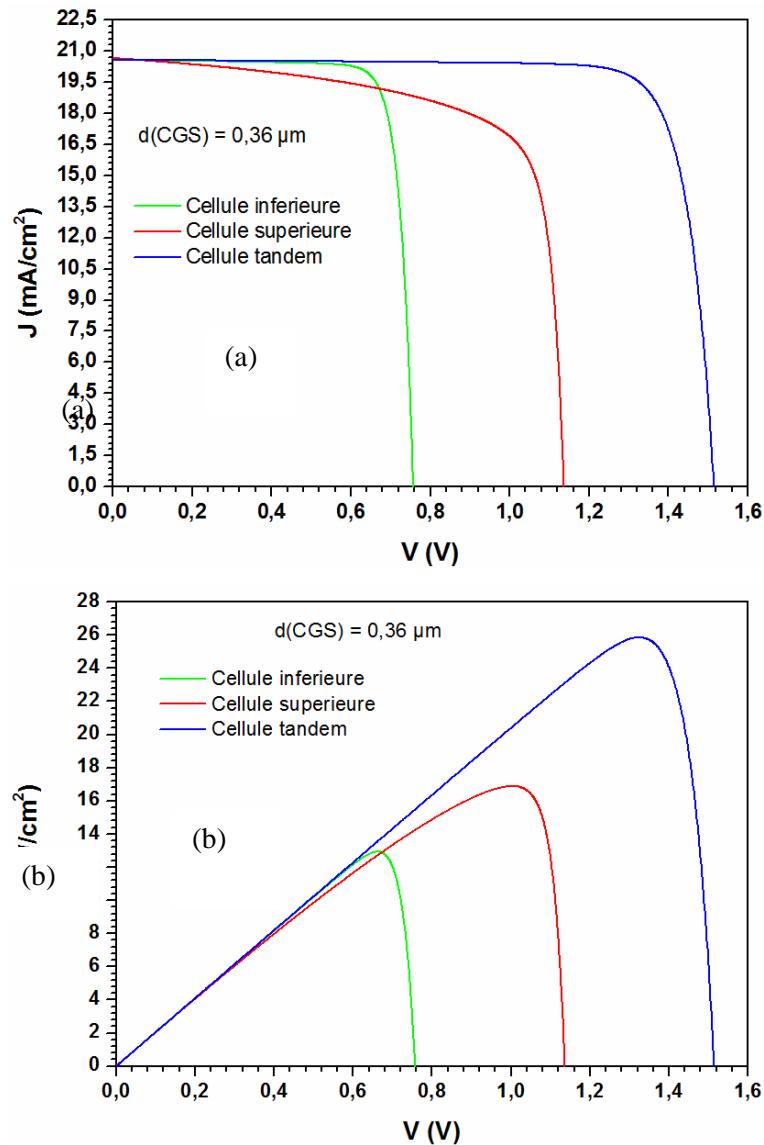
**Figure (III.20) :** La variation du facteur de forme FF de la cellule supérieure en CGS et inférieure en CIGS en fonction de l'épaisseur de la couche supérieure en CGS dans la cellule solaire tandem en CGS/CIGS.

On constate une augmentation rapide du FF de la cellule supérieure avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche CGS dans la gamme supérieure à 0.36 μm. Cela dû

à la diminution de la résistance shunt qui provoque des défauts au volume de l'absorbeur, ainsi que l'augmentation de la résistance série  $R_s$ . Pour de faibles épaisseurs de la couche CGS, Cependant, celui de la cellule inférieure est presque indépendante de la variation de l'épaisseur de la couche CGS.

#### III.4.3.1.5 Caractéristique courant tension $J(V)$ et $P(V)$ :

La caractéristique (J-V) et P (V) des cellules supérieure et inférieure après l'optimisation sont représentée par la figure (III.21-a et b).



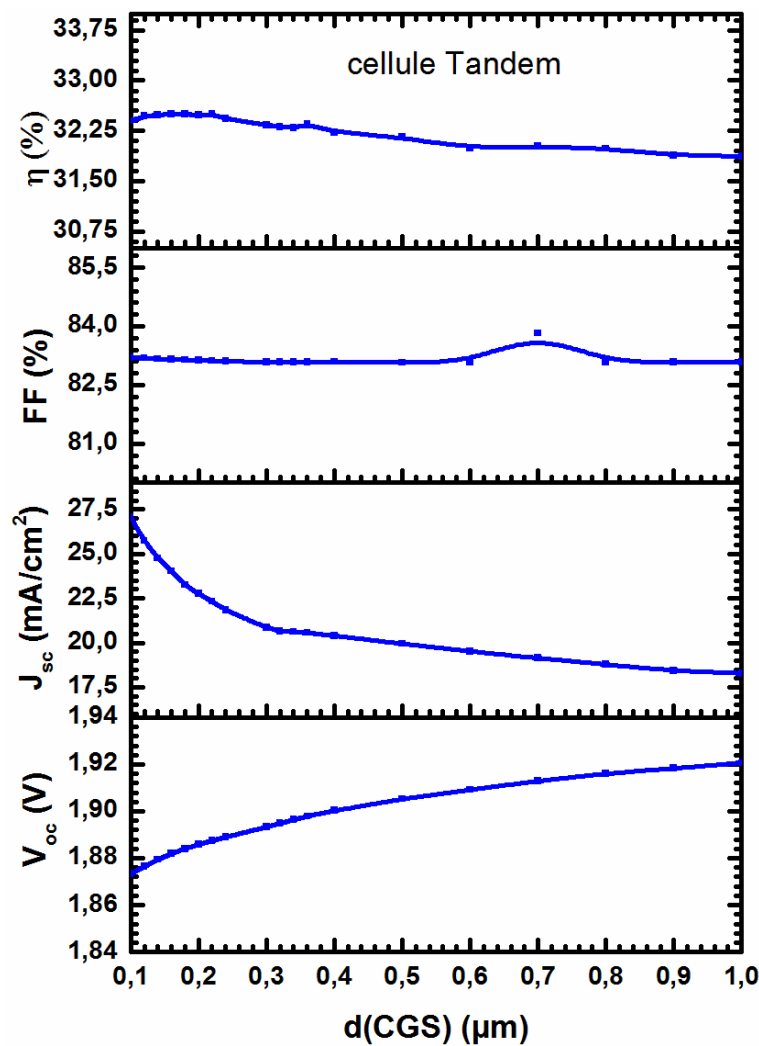
**Figure (III.21) :** Caractéristiques ( $J-V$ ) et  $P(V)$  pour la cellule tandem en CGS/CIGS, la cellule inférieure en CIGS et la cellule supérieure en CGS.

Les paramètres électriques correspondant à la cellule tandem CGS/CIGS sont résumés comme suit :

- Les densités de courant de court-circuit des cellules supérieure, inférieure et tandem sont toutes égales à la valeur maximale de égale à  $20.56 \text{ mA/cm}^2$ .
- La tension en circuit ouvert de la cellule tandem de  $1.52 \text{ V}$  est égale à la somme des cellules supérieure ( $1.16 \text{ V}$ ) et inférieure ( $0.76 \text{ V}$ ).

#### III.4.3.1.6 Les paramètres photovoltaïques simulés de la cellule tandem en fonction de l'épaisseur de la couche CGS

La figure (III.22) présente les paramètres photovoltaïques simulés de la cellule tandem en fonction de l'épaisseur de la couche CGS.



**Figure (III.25) :** La variation des paramètres photovoltaïques simulés de la cellule tandem en fonction de l'épaisseur de la couche CGS.

Les résultats de la simulation ont montré que :

- ✓ La cellule tandem atteint un maximum de  $20.56 \text{ mA/cm}^2$  pour l'épaisseur de la couche CGS optimale, correspondante à la condition d'égalité du courant de court-circuit entre les cellules inférieure et supérieure. Le  $J_{sc}$  de la cellule tandem est contrôlée par la densité de courant de la cellule inférieure pour des épaisseurs de la couche CGS supérieures à  $0.36 \mu\text{m}$ .
- ✓ l'augmentation de l'épaisseur de la couche CGS conduit à l'augmentation de  $V_{co}$  de la cellule tandem.
- ✓ le  $FF$  présente un minimum de 0.83 à l'épaisseur du CGS optimale de  $0.36 \mu\text{m}$ .
- ✓ Le rendement  $\eta$  de la cellule tandem CGS/CIGS est maximum de l'ordre de 32.35 % pour le point d'égalité des courants à  $d(\text{CGS}) = 0.36 \mu\text{m}$ .

### **III.5 Conclusion**

Dans ce troisième, les performances optimales des cellules tandem à base de CGS et de CIGS ont été déterminées par simulation avec le logiciel SCAPS.

Les résultats de la simulation ont clairement montré que l'épaisseur des couches absorbantes de la cellule et ses paramètres (épaisseur de couche) jouent un rôle important dans les performances des cellules solaires.

Des résultats de simulation sont attendus. L'efficacité de conversion est d'environ 20,23 % de la cellule CGS dont la cellule solaire individuelle à base de CIGS est d'environ 23,51%.

Après l'optimisation, on utilisant la méthode de (Current matching). La simulation de la cellule tandem a donné un rendement de 32,35%.

# Conclusion Générale

### Conclusions Générale

La recherche contenue dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre d'une étude par simulation numérique des performances des cellules solaires tandem à base de matériaux CGS ( $\text{CuGaSe}_2$ ) et CIGS ( $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ ) au moyen du simulateur solaire SCAPS.

L'objectif général de ce travail portait sur la modélisation des propriétés électriques de ces cellules en prédisant par simulation leur comportement en fonction de certaines variations de paramètres physiques critiques, pour les optimiser. En effet, dans une structure tandem, deux absorbeurs à gap différent sont associés dans le but d'optimiser l'exploitation de l'ensemble du spectre solaire.

Dans un premier temps, nous avons donc étudié séparément les performances des cellules simples à base de CGS (cellule supérieure) et de CIGS (cellule inférieure), puis dans un second temps, nous avons étudié la cellule tandem CGS/CIGS complète sans optimisation particulière pour avoir un point de départ de comparaison. Dans un second temps, les résultats de simulation concernant l'épaisseur des couches absorbantes s'avèrent déterminants pour l'optimisation des performances de la cellule tandem.

Pour obtenir un rendement de conversion maximal dans la cellule solaire tandem, il faut optimiser la structure de cellule tandem. Pour cela, nous avons varié l'épaisseur de la cellule supérieure CGS de  $0.1 \mu\text{m}$  à  $1 \mu\text{m}$  dans la cellule tandem en (CGS/CIGS). L'épaisseur de la cellule inférieure CIGS étant fixée à  $2 \mu\text{m}$

Les résultats de la simulation obtenus ont montré que :

- ✚ Quand l'épaisseur de la couche CGS dans la cellule supérieure augmente, le courant  $J_{sc-sup}$  de la cellule supérieure augmente et le courant  $J_{sc-inf}$  de la cellule inférieure diminue. C'est simplement parce que la cellule supérieure absorbe plus de lumière et laisse passer moins de lumière à la cellule inférieure.
- ✚ Avec l'augmentation progressive de l'épaisseur de la couche CGS de la cellule supérieure, le courant  $J_{sc-sup}$  croît et le courant  $J_{sc-inf}$  décroît se croisent à une épaisseur CGS optimale de  $0.36 \mu\text{m}$  où la condition d'égalité des courants (current matching condition) est réalisée  $J_{sc-sup} = J_{sc-inf} = 20.56 \text{ mA/cm}^2$ .
- ✚ La tension  $V_{co}$  de la cellule solaire supérieure augmente avec l'épaisseur de la couche CGS. Ceci est principalement dû au fait que la couche absorbante CGS absorbe plus de

photons et sensible aux photons à longueurs d'onde faible, ce qui contribue à la génération de paires électron-trou. Cependant, le  $V_{co}$  de la cellule inférieure est presque indépendant de la variation de l'épaisseur de la couche CGS. Avec une épaisseur fixe de la couche inférieure (couche CIGS) à  $2\mu\text{m}$ ,

- ✚ la valeur maximale de rendement de la cellule tandem en (CGS/CIGS) à 32.35% est obtenue à une épaisseur optimale de la couche supérieure (couche CGS) de  $0.36\mu\text{m}$ .
- ✚ Ainsi, les résultats obtenus mettent en avant la pertinence de la simulation numérique pour la compréhension et l'optimisation des cellules solaires à couches minces, Cette démarche constitue une base solide ouvrant la voie à l'étude d'autres paramètres physiques influençant le rendement de la cellule, tels que la température, les défauts d'interface.

Plusieurs perspectives peuvent être avancées à l'issue de cette étude, telles que:

Nous souhaitons simuler et modéliser des cellules photovoltaïques Triple jonctions à base de (CIS, CGS et CIGS) avec couche tampon en ZnS et  $\text{SnO}_2$  comme une couche d'oxyde conducteur transparent (TCO). Ceci constitue certainement une voie de recherche d'avenir.

### Bibliographies

- [1] International Energy Agency (IEA), World Energy Outlook, 2023.
- [2] Ministère de l'Énergie et des Mines, Programme national des énergies renouvelables (PENREE), Algérie, 2012.
- [3] M. Green et al., "Solar cell efficiency tables (Version 59)," Prog. Photovolt: Res. Appl., 2022.
- [3] T. Nakada, "CIGS-based thin film solar cells: Present status and future outlook," Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 93, pp. 1071–1075, 2009.
- [4] F. Dimroth et al., "Tandem solar cells: Concepts, efficiencies, and challenges," IEEE J. Photovoltaics, vol. 6, no. 1, pp. 343–349, 2016.
- [5] W. N. Shafarman, S. Siebentritt and L. Stolt, Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> Solar Cells, A. Luque, S. Hegedus, Handbook of photovoltaic science and engineering: John Wiley & Sons Ltd, (2011) 546–599.
- [6] J. E. Jaffe and A. Zunger, Theory of the band-gap anomaly ABC<sub>2</sub> chalcopyrite compounds, Phys. Rev. B 29 (1984) 1882–1906.
- [7] A. Mouhoub, Optimisation des absorbeurs CIGS en couches minces pour des cellules solaires bifaciales, Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas, Setf1, 2018.
- [8] J. E. Jaffe and A. Zunger; Phys. Rev. B 28 (1983) 5822. world Conf. and Exhi. on PV. Sol. Ener. Conver., Vienna, (1998) 3586.
- [9] M. Chandramohan, S. Velumani, T. Venkatachalam, Materials Science and Engineering B 174 (2010) 205
- [10] C. Roger, Développement de cellules photovoltaïques à base de CIGS sur substrats métalliques, Université de Grenoble, 2013.
- [11] E. Mourad, "Etude par simulation numérique d'une cellule solaire en CIGS à multi-jonction par le logiciel Tcad Silvaco", Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, 2018.
- [12] S. H. Wei, S. B. Zhang, and A. Zunger, "Effects of Ga addition to CuInSe<sub>2</sub> on its electronic, structural, and defect properties," Appl. Phys. Lett., vol. 72, no. 24, pp.3199–3201, 1998.
- [13] J.B. Stanbery, "Copper indium selenides and related materials for photovoltaic devices," Critical reviews in solid state and materials sciences, vol. 27, no. 2, pp. 73-117, 2002.
- [14] M. V. Yakushev et al, "Influence of growth conditions on the structural quality of

- Cu(InGa)Se<sub>2</sub> and CuInSe<sub>2</sub> thin films,” *Thin Solid Films*, vol. 451, pp. 133–136, 2004.
- [15] M. A. Contreras, M. J. Romero, and R. Noufi, “Characterization of Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> materials used in record performance solar cells,” *Thin Solid Films*, vol. 511, pp. 51–54, 2006.
- [16] J. E. Jaffe and A. Zunger, “Theory of the band-gap anomaly in ABC<sub>2</sub> chalcopyrite semiconductors,” *Phys. Rev. B*, vol. 29, no. 4, pp. 1882, 1984.
- [17] S. B. Zhang, S.H. Wei, A. Zunger, and H. Katayama-Yoshida, “Defect physics of the CuInSe<sub>2</sub> chalcopyrite semiconductor,” *Phys. Rev. B*, vol. 57, no. 16, pp.9642, 1998.
- [18] T. Tinoco, C. Rincon. M. Quintero, G. Sanchez Perez, Phase diagram and optical energy gaps for CuIn<sub>1-y</sub>Ga<sub>y</sub>Se<sub>2</sub>, *Phys. Stat. Sol. (a)* 124 (1991) 427–434.
- [19] P. D. Paulson, R. W. Birkmire, and W. N. Shafarman, Optical characterization of CuIn<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>Se<sub>2</sub> alloy thin films by spectroscopic ellipsometry, *J. Appl. Phys.* 94(2) (2003) 879–888.
- [20] I. Bouchama, "Contribution à l'amélioration des performances des cellules solaires CuIn<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>Se<sub>2</sub> ", Thèse de doctorat, Université de Sétif, 2012.
- [21] Z. Kao, "Elaboration of ultrathin Copper Indium Gallium Di-Selenide based Solar Cells", Thèse de doctorat de l'Université Paris Sud-Orsay (Paris XI) , (2012).
- [22] B. Khireddine, Elaboration et caractérisation des couches minces CuInS<sub>2</sub>, thèse de magister, Université D'Oran, 2014.
- [23] J.P.Joly."Focus Technique Photovoltaïque Un Nouvel Éclairage". L'Institut National de l'Énergie Solaire (INES) Paris, mars 2011.
- [24] E. Becquerel, Mémoire sur les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires, *C. R. Acad. Sci.* 9 (1836) 561–567.
- [25] B. Cheikh O, Biteur, Étude et réalisation d'un système de poursuite du point de puissance maximale en utilisant les réseaux de neurones artificiels - Application au système photovoltaïque -.mémoire de master Université Kasdi Merbah Ouargla. 2018.
- [26] O. Amina, "étude et simulation d'une cellule solaire à base couches minces". Mémoire de Master, Université Saad Dahlab de Blida, 2019.
- [27] J. M. Huacuz, J. Agredano, and L. Gunaratne, Photovoltaics and Development, In *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, 2<sup>nd</sup> Edition 2011.
- [28] B. 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, 2016.
- [29] N. Achouak, B. Zineb, " Etude de l'effet de la couche mince CdZnS dans la cellule solaire CZTS ", Mémoire de Master, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, 2017.
- [30] A. Bouraiou, élaboration et caractérisation des couches minces CuInSe<sub>2</sub>, Thèse de doctorat, Université de Constantine (2009).
- [31] A. Ricaud, Photopiles solaires : De la physique de la conversion photovoltaïque aux filières, matériaux et procédés, 1<sup>ère</sup> Edition, Presses polytechniques et universitaires romandes (1997).
- [32] F. Abdo, Croissance de couches minces de silicium par épitaxie en phase liquide à basse température pour applications photovoltaïque, Thèse de doctorat, Institut des nanotechnologies de Lyon (INL) à l'INSA de Lyon, France (2007).
- [33] T. Nakada , Y. Hirabayashi, T. Tokado, D. Ohmori, and T. Mise, Novel device structure for Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> thin film solar cells using transparent conducting oxide back and front contacts, Sol. Energy 77 2004.
- [34] G. Segev, G. Mittelman, A. Kribus, "Equivalent circuit models for triple-junction concentrator solar cells", Solar Energy Materials&Solar Cells, Vol 98, 2012.
- [35] A. Darga. Formation : Introduction a la simulation de celles photovoltaïques. Thèse Doctorat. Université Sorbon, France. 2015.
- [36] P. Lin, L. Lin, J. Yu, S. Cheng, P. Lu and Q. Zheng. Numerical Simulation of Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> Based Solar Cells with In<sub>2</sub>S<sub>3</sub> Buffer Layers by SCAPS-1D, Journal of Applied Science and Engineering, 17, 383-390, 2014.
- [37] M. Burgelman, A. De Vos, and A. Niemegeers, Device simulation of polycrystalline heterojunction solar cells. In Proceedings of the 12<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference, Amsterdam 1994.
- [38] B. Boualem, Simulation et Optimisation des Cellules Solaires Monolithiques à Double Hétérojonction, à Base de CIGS, Utilisant le Logiciel Atlas-Silvaco. These Doctorat, Université Djilali Liabes, Sidi Bel Abbes, 2020.
- [39] A. Bouzidi, I. Bouchama, M. Hadjab, M. A. Saeed, Numerical simulation of tandem solar cells based- CIGS and C-Si sub-cells using SCAPS-1D. International Journal Of Advanced Studies in Ccomputer Science and Engineering IJASCSE V 11, 2022.

## Résumé

Dans le cadre de ce projet, nous nous sommes attachés à simuler les propriétés électriques d'une cellule solaire tandem CGS/CIGS par SCAPS.

En effet, notre objectif principal consiste à optimiser les performances photovoltaïques et étudier la variation de différents paramètres physiques comme l'épaisseur de la couche absorbante, largeur de bande interdite (gap) de ces matériaux.

L'idée d'une cellule tandem, à deux absorbants présentant deux gaps différents, est de mieux utiliser le spectre solaire, et donc d'optimiser le rendement global.

Les résultats de la simulation ont clairement montré que l'épaisseur des couches absorbantes de la cellule et ses paramètres (épaisseur de couche) jouent un rôle important dans les performances des cellules solaires. Des résultats de simulation sont attendus. L'efficacité de conversion est d'environ 20,23 % de la cellule CGS dont la cellule solaire individuelle à base de CIGS est d'environ 23,51%. Après l'optimisation, en utilisant la méthode de (Current matching). La simulation de la cellule tandem a donné un rendement de 32,35%.

Nous avons montré l'intérêt de la simulation numérique pour modéliser et améliorer ces cellules en couches minces.

**Mots clés :** simulation numérique, cellule tandem, CGS, CIGS, couche mince, rendement, SCAPS.

## Abstract

As part of this project, we focused on simulating the electrical properties of a CGS/CIGS tandem solar cell using SCAPS software.

Indeed, our main objective is to optimize photovoltaic performance and study the variation of several physical parameters, such as absorber layer thickness, the bandgap width of these materials.

The idea of a tandem cell, with two absorbers having different bandgaps, is to better utilize the solar spectrum and thus improve overall efficiency.

The simulation results clearly showed that the thickness of the cell's absorbing layers and its parameters (layer thickness) play an important role in the performance of solar cells. Simulation results are awaited. The conversion efficiency is about 20.23% of the CGS cell of which the individual CIGS-based solar cell is about 23.51%. After optimization, using the (Current matching) method. The simulation of the tandem cell gave an efficiency of 32.35%.

We have shown the interest of numerical simulation for modeling and improving these cells in thin layers.

**Keywords :** numerical simulation, tandem cell, CGS, CIGS, thin film, efficiency, SCAPS.

## ملخص

في إطار هذا المشروع، سعينا إلى محاكاة الخصائص الكهربائية لخلية شمسية ترادفية من نوع CGS/CIGS باستخدام برنامج SCAPS.

في الواقع، يتمثل هدفنا الرئيسي في تحسين الأداء الكهروضوئي ودراسة تغيير عدة معلمات فيزيائية مثل سماكة الطبقة الممتصة، تركيز المستقبلات أو عرض فجوة الحزمة لهذه المواد.

فكرة الخلية الترادفية، المعتمدة على طبقتين ممتصتين لهما فجوتان مختلفتان، تهدف إلى الاستخدام الأفضل للطيف الشمسي، وبالتالي تحسين الكفاءة العامة.

أظهرت نتائج المحاكاة بوضوح أن سماكة الطبقات الماصة للخلية ومعاملها (سمك الطبقة) تلعب دورا هاما في أداء الخلايا الشمسية. ومنتظرون نتائج المحاكاة. تبلغ كفاءة التحويل حوالي 20.23% من خلية CGS والتي تبلغ نسبة الخلية الشمسية الفردية المعتمدة على CIGS حوالي 23.51%. بعد التحسين باستخدام طريقة (المطابقة الحالية). أعطت محاكاة الخلية الترادفية كفاءة قدرها 32.35%. لقد أظهرنا من خلال هذا العمل أهمية المحاكاة الرقمية في نمذجة وتحسين هذا النوع من الخلايا الرقيقة.

**الكلمات المفتاحية :** المحاكاة الرقمية، الخلية الترادفية، CGS، CIGS، الطبقة الرقيقة، الكفاءة، SCAPS.