

Département d'Automatique, Télécommunication et d'Electronique

## Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Electronique

Spécialité : Instrumentation

### Thème :

Optimisation des paramètres de la couche tampon d'une cellule à base du cuivre indium sélénium galium (CIGS).

Préparé par :

- BOUTELLAA Abdennour
- CHIKHOUNE Mohand Tahar

Dirigé par :

LAHRECHE Abderrezak

Examiné par :

Mme. ACHOUR

Mr. KESSI

Année universitaire : 2023/2024

## **DEDICACE**

*Je dédie ce travail à mes chers parents qui m'ont accompagné  
tout au long de mon parcours d'études.*

*A mes enseignants chacun en son nom, ceux qui m'ont encadrés  
de primaire jusqu'à l'université.*

*A mon grand-père paternel 'Mekhtar' martyr de la révolution  
tombé aux champs d'honneur le 12/06/1956.*

*A ma défunte sœur, Samira qui nous a quittée le 08/07/2022, que  
Dieu ait son âme.*

*A mes frères Cherif et Bilal.*

*A mes sœurs Karima, Nouara, Amel et Asma.*

*A mes neveux et nièces chacun en son noms.*

*Je le dédié à tous mes amis qui m'ont accompagné durant tous  
mes épreuves de l'enfance jusqu'à cet âge.*

*Comme je le dédié à mes camarades de classe qui m'ont marqué  
par leur cohabitation.*

*A mes copains de chambre, R.U Pépinière "J 404"*

*&*

*Ceux de la R.U Targua Ouzemour" J 114"*

**B.Abdennour**

## **DEDICACE**

*Je dédie ce travail de recherche à toutes les personnes qui ont marqué ma vie, à ces êtres exceptionnels et exemplaires avec qui j'ai partagé des moments précieux ou une vie entière.*

*Ce travail est dédié à la mémoire de mon défunt père, qui m'a toujours encouragé à devenir ce que je suis aujourd'hui. Qu'il repose en paix.*

*À ma mère, à qui je souhaite une longue vie, et à mes sœurs Kaltoum, Souhila, Sabrina, Ouardia, ainsi qu'à mes frères Ferhat et Salim, et à mes neveux et nièces.*

*À Nesrine Ouatah : "Le véritable amour se mesure aux sacrifices que l'on est prêt à faire."*

*Je le dédie également à mes amis, proches de cœur et de pensée, notamment à mon ami Amimeur Beramtane, Hamiche Djafar dit "Bachir", et Agawaw Mohand, ainsi qu'à tous ceux de la Pépinière J404.*

*À mes camarades de classe du Master 01, promotion 2021/2022.*

*À mes amis du village et camarades du parti.*

*À mes oncles et tantes Chikhoun Bachir, Zoubir, Saliha, et Laadja, ainsi qu'à Ouakli Yacin.*

*À mes grands-mères Aïcha Chikhoun et Baya Ait Ouakli.*

***C.Mohand Tahar***

## Remerciement

*Nous remercions d'abord le bon Dieu qui nous a donné le courage et la force nécessaires pour mener à bien ce mémoire de fin d'études.*

*Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude envers toutes les personnes qui nous ont accompagnés et guidés tout au long de notre travail de fin d'études.*

*Nous tenons à remercier notre encadrant, Monsieur Lahreche Abderrezak, pour sa disponibilité et ses conseils précieux tout au long de notre travail.*

*Nous sommes reconnaissants pour chaque conseil, chaque explication et chaque moment partagé. Vous avez non seulement facilité notre apprentissage, mais vous nous avez aussi inspirés par votre dévouement et votre professionnalisme.*

*Merci encore à toute l'équipe pour votre soutien et votre accueil chaleureux.*

# Table des matières

❖ Introduction Générale .....	1
Chapitre I : Généralités sur les panneaux photovoltaïques	
❖ I.1 Introduction .....	3
❖ I.2 Soleil .....	3
❖ I.3 Rayonnement solaire.....	4
❖ I.4 Cellule solaire photovoltaïque .....	6
➤ I.4.1 Historique.....	6
➤ I.4.2 Description .....	7
❖ I.5 Jonction PN .....	9
❖ I.6 L'effet photovoltaïque .....	11
❖ I.7 Fonctionnement d'une cellule solaire .....	12
➤ I.7.1 Interaction rayonnement/ semi-conducteur .....	14
➤ I.7.2 Génération des porteurs de charges .....	15
➤ I.7.3 Mobilité et la collecte des porteurs de charge .....	16
➤ I.7.4 Caractéristique I-V d'une Cellule Solaire.....	18
▪ I.7.4.1 Sous obscurité.....	18
▪ I.7.4.2 Sous ensoleillement .....	19
➤ I.7.5 Paramètres photovoltaïques d'une cellule solaire .....	20
▪ I.7.5.1 Le courant de court-circuit ( <b><i>I<sub>cc</sub></i></b> ) .....	21
▪ I.7.5.2 Tension en circuit ouvert <b><i>V<sub>oc</sub></i></b> .....	21
▪ I.7.5.3 Facteur de forme (FF) :.....	22
▪ I.7.5.4 Rendement photovoltaïque ( $\eta$ ) :.....	22
▪ I.7.5.5 Rendement quantique de la cellule EQE :.....	22
❖ I.8 Les différents types de perte dans une cellule solaire .....	23
➤ I.8.1 Pertes extrinsèques.....	24
➤ I.8.2 Les pertes intrinsèques.....	24
➤ I.8.3 Résistances parasites.....	25
➤ I.8.4 Résistance série.....	25
➤ I.8.5 Résistance shunt.....	26
➤ I.8.6 Recombinaison .....	27
▪ I.8.6.1 Recombinaison radiative.....	27
▪ I.8.6.2 Recombinaison indirecte (assistée par piège) .....	27
▪ I.8.6.3 Recombinaison Auger.....	28

❖	I.9 Avantages et Inconvénients de l'énergie photovoltaïque .....	28
➤	I.9.1 Avantages .....	28
➤	I.9.2 Inconvénients .....	29
❖	I.10 Conclusion .....	29
Chapitre II : Les Cellules solaires à base de Cu(In,Ga)Se <sub>2</sub> (CIGS)		
❖	II.1 Introduction .....	30
❖	II.2 Structure d'une cellule CIGS .....	30
➤	II.2.1. Le substrat .....	31
➤	II.2.2. Le contact arrière .....	32
➤	II.2.3 L'absorbeur .....	32
➤	II.2.4 La couche tampon .....	33
➤	II.2.5 La couche fenêtre .....	33
➤	II.2.6 La grille .....	34
❖	II.3 Structure cristalline .....	35
➤	II.3.1 Architecture des cellules CIGS .....	35
➤	II.3.2 Structure du matériau CIGS .....	36
➤	II.4 Propriétés optiques .....	37
❖	II.4 Avantages et Inconvénients de la cellule CIGS .....	39
➤	II.4.1 Avantages .....	39
➤	II.4.2 Inconvénients .....	40
❖	II.5 Conclusion .....	41
Chapitre III : Simulations et Résultats		
❖	III.1 Introduction .....	42
❖	III.2 Logiciel de simulation SCAPS .....	42
➤	III.2.1 Présentation SCAPS .....	42
❖	III.3 Utilisation de logiciel .....	43
➤	III.3.1 Action panel .....	43
➤	III.3.2 Définition panel (définition du problème) .....	47
➤	III.3.3 Fenêtre des résultats « Result » .....	48
❖	III.4 Protocole de simulation .....	49
❖	III.5 Présentation de la cellule étudiée .....	50
❖	III.6 Les paramètres du dispositif étudié .....	51
Tableau III.1 Les paramètres physiques des matériaux utilisées pour simuler les cellules : ZnO/CdS/CIGS ; ZnO/CdTe/CIGS ; ZnO/Cu <sub>2</sub> O/CIGS .....		
❖	III.7 Résultats de la simulation .....	51
➤	III.7.1 Effet de l'épaisseur et de dopage cas Cds .....	52
•	III.7.1.1 L'effet de l'épaisseur .....	52

▪	III.7.1.2 L'effet de dopage.....	54
➤	III.7.2 Effet de l'épaisseur et de dopage cas CdTe.....	57
▪	III.7.2.1 L'effet de l'épaisseur .....	57
▪	III.7.2.2 L'effet de dopage.....	59
➤	III.7.3 Effet de l'épaisseur et de dopage cas Cu <sub>2</sub> O.....	61
▪	III.7.3.1 Effet de l'épaisseur.....	61
▪	III.7.3.2 Effet de dopage .....	63
➤	III.7.4 Effet de l'épaisseur et de dopage cas de superposition (Cds et CdTe) .....	65
▪	III.7.4.1 Effet de l'épaisseur.....	65
▪	III.7.4.2 Effet de dopage .....	67
❖	III.8 Conclusion .....	69
	Conclusion Général.....	70

## Liste de figures

<b>Figure I.1</b> : Analyse spectrale du rayonnement solaire [1]. .....	5
<b>Figure I.2</b> : Schéma représentant le dopage d'une cellule photovoltaïque [11] .....	8
<b>Figure I.3</b> : Structure d'une jonction PN (à gauche), son diagramme de bandes (à droite) [13] .....	10
<b>Figure I.4</b> : Diagrammes schématiques montrant deux types différents d'hétérojonction. ....	10
<b>Figure I.5</b> : Mécanisme d'une cellule solaire [16] .....	12
<b>Figure I.6</b> : Principe fonctionnement d'une cellule solaire [19].....	13
<b>Figure I.7</b> : Transition bande a bande dans un conducteur (a) bande interdite directe, (b) bande interdite indirecte [21]. .....	15
<b>Figure I.8</b> : Diagramme énergétique ; (a) régions p/n isolées (b) régions p/n en contact à l'équilibre [21].....	17
<b>Figure I.9</b> : Diagramme énergétique illustrant la formation de l'hétérojonction ; (a) régions p/n isolées (b) régions p/n en contact à l'équilibre [21].. .....	18
<b>Figure I.10</b> : Schéma équivalent d'une cellule solaire dans le cas idéal [21].....	19
<b>Figure I.11</b> : Schéma équivalent d'une cellule solaire dans le cas réel [21].. .....	20
<b>Figure I.12</b> : Caractéristique et schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle [26].....	21
<b>Figure I.13</b> : Différentes pertes optiques et électriques existant dans une cellule solaire [30].....	24
<b>Figure I.14</b> : L'effet de la résistance série sur la caractéristique J-V, simulation SCAPS-1D [30]. .....	26
<b>Figure I.15</b> : Principaux mécanismes de recombinaison dans un semi-conducteur (a) radiative, (b) Auger et (c) SRH [21].....	27
<b>Figure II.1</b> : Structure en coupe d'une cellule CIGS : (a) schéma, (b) Image au microscope à balayage (MEB) [21].....	31



<b>Figure II.2</b> : Structure d'une cellule solaire à base de CIGS. (a) Schéma de l'empilement des différentes couches, (b) image d'une coupe transverse au électronique à balayage MEB [43].	35
<b>Figure II.3</b> : Comparaison des mailles élémentaires des structures cristallines du Si, du CdTe et du CIGS. Structure chalcopyrite [45].	37
<b>Figure II.4</b> : Relation entre le paramètre de maille de principaux composés chalcopyrite et leur gap optique [35].	38
<b>Figure III.1</b> : Fenêtre d'exécution « action panel » du logiciel SCAPS.	43
<b>Figure III.2</b> : Fenêtre d'exécution, de conception du dispositif et des résultats du logiciel SCAPS.	44
<b>Figure III.3</b> : Bloc working point	44
<b>Figure III.4</b> : Bloc illumination.	45
<b>Figure III.5</b> : Résistance série et parallèle.	46
<b>Figure III.6</b> : Action de bloc.	47
<b>Figure III.7</b> : Fenêtre de définition, définition panel	47
<b>Figure III.8</b> : Propriétés de la couche ajoutée.	48
<b>Figure III.9</b> : Panneau des bandes d'énergie.	49
<b>Figure III.10</b> : Schéma simplifié d'une cellule utilisée ayant la structure (Zno /Cds/CIGS)	50
<b>Figure III.11</b> : Simulation J-V pour différence valeurs de l'épaisseur de la couche de CdS.	52
<b>Figure III.12</b> : Simulation des paramètres Voc, Jsc, FF et $\eta$ en fonction de variation de l'épaisseur de la couche de CdS.	53
<b>Figure III.13</b> : Simulation J-V pour différence valeurs de la concentration du dopage de la couche CdS.	55
<b>Figure III.14</b> : Simulation des paramètres Voc, Jsc, FF et $\eta$ en fonction de variation du dopage de la couche de CdS.	56
<b>Figure III.15</b> : Simulation J-V pour différence valeurs d'épaisseur de la couche CdTe.	57
<b>Figure III.16</b> : Simulation des paramètres Voc, Jsc, FF et $\eta$ en fonction de variation de l'épaisseur de la couche de CdTe.	58
<b>Figure III.17</b> : Simulation J-V pour différence valeurs de dopage de la couche CdTe.	59

<b>Figure III.18</b> : Simulation des paramètres Voc, Jsc, FF et $\eta$ en fonction de variation du dopage de la couche de CdTe.....	60
<b>Figure III.19</b> : Simulation J-V pour différence valeurs d'épaisseur de la couche Cu <sub>2</sub> O.....	61
<b>Figure III.20</b> : Simulation des paramètres Voc, Jsc, FF et $\eta$ en fonction de variation du dopage de la couche de Cu <sub>2</sub> O.....	62
<b>Figure III.21</b> : Simulation J-V pour différence valeurs de dopage de la couche Cu <sub>2</sub> O.....	63
<b>Figure III.22</b> : Simulation des paramètres Voc, Jsc, FF et $\eta$ en fonction de variation du dopage de la couche de Cu <sub>2</sub> O.....	64
<b>Figure III.23</b> : Simulation J-V pour différence valeurs de dopage de la couche CdS/CdTe.....	65
<b>Figure III.24</b> : Simulation des paramètres Voc, Jsc, FF et $\eta$ en fonction de variation du dopage de la couche de Cu <sub>2</sub> O.....	66
<b>Figure III.25</b> : Les simulations I-V pour différence valeurs de la concentration du dopage.....	67
<b>Figure III.26</b> : Simulation des paramètres Voc, Jsc, FF et $\eta$ en fonction de variation du dopage de la couche de CdS/CdTe... ..	68

## Liste des symboles

$\mu$ . Mobilité des porteurs de charges.

$t_c$ . Temps entre deux collisions du porteur avec les atomes du cristal ou des impuretés.

$K_B$ . Constante de BoltZmann.

$T$ . Température absolue en degrés Kelvin.

$q$ . Charge élémentaire.

$A$ . Facteur d'idéalité de la diode.

$J_0$ . Densité de recombinaison des porteurs.

$D_n, D_p$ . Coefficients de diffusion des porteurs minoritaires dans les matériaux n et p.

$L_n (L_p)$  Longueurs de diffusion des électrons (trous).

$N_A, N_D$ . Concentrations de dopage dans les régions P et N.

$J_{Dark}$ . Courant sous obscurité.

$J_{ph}$ . Courant photo-généré.

$J_{sc}$ . Densité du courant de court-circuit.

$F(\lambda)$ . Densité du flux incident sur une unité de surface par unité de temps.

$R(\lambda)$ . Coefficient de réflexion.

IQE. Rendement quantique interne.

$V_{oc}$ . Tension en circuit ouvert.

$FF$ . Facteur de forme.

$P_{max}$ . Puissance maximum délivré par la cellule.

$V_{max}$ . Tension correspondant au maximum de tension délivrée par la cellule.

$J_{max}$ . Courant correspondant au maximum de la densité de courant délivrée par la cellule.

$\eta$ . Rendement photovoltaïque.

$P_{OUT}$ . Puissance générée par la cellule.

$P_{in}$ . Puissance incidente du rayonnement lumineux éclairant la cellule.

$QE$ . Rendement quantique de la cellule.

$\phi$ . Nombre de photon incident.

$E_{ph}$ . Energie de photon incident.

$E_g$ . Energie de gap.

$E_F$ . Energie de fermi.

$\tau_{(SRH,n)}, \tau_{(SRH,p)}$ . Durées de vie d'électrons et des trous.

$n_i$ . Concentration intrinsèque.

$E_R$ . Énergie associée aux centres piège.

$N_t$ . Concentration des défauts.

$\sigma_p, \sigma_n$ . Sections efficaces de capture par le trou et l'électron.

$V_{th}$ . Vitesse thermique.

$E_I$ . Niveau de Fermi intrinsèque.

$\alpha$ . Coefficient d'absorption.

## Liste des abréviations

*SRH*. Shockley-Read-Hall.

*SLG*. Soda Lim Glass.

*CBD*. Chimical Bath Deposition.

*ALD*. Atomic Layer Deposition.

*ZCE*. Zone de charge d'espace.

*Si*. Silicium.

*CIS*. Cuivre Indium Sélénium.

*CIGS*. Cuivre Indium Sélénium Gallium.

*CdTe*. Tellurure de Cadmium.

*CdS*. Soufre de Cadmium.

*GaP*. Phosphure de Gallium.

*InGaAs*. Arséniure/indium de gallium.

*SCAPS-1D*. A One Dimensionnel Solar Cell Capacitance Simulation Program.

# Introduction générale

## ❖ Introduction Générale

Depuis plusieurs années, la température moyenne de la planète ne cesse d'augmenter. Les preuves suggèrent que ce réchauffement climatique est principalement dû à la croissance démographique mondiale ainsi qu'à l'augmentation de la demande énergétique des pays émergents et en développement. Les énergies fossiles, telles que le charbon, le pétrole et le gaz naturel, constituent la majeure partie des ressources énergétiques actuelles.

Malgré leur diversité, ces ressources sont limitées et, au rythme actuel de consommation, les réserves prouvées pourraient être épuisées d'ici un siècle. De plus, leur utilisation massive génère une quantité importante de dioxyde de carbone, un gaz qui contribue largement à l'effet de serre. Les conséquences de cet effet de serre sont déjà visibles et mettent en danger de nombreuses populations à travers le monde, tout en menaçant la stabilité géopolitique de certaines régions en raison des phénomènes climatiques extrêmes [1].

Il est donc crucial de développer des sources d'énergie alternatives, principalement des énergies renouvelables non polluantes, dont l'exploitation génère peu ou pas de gaz à effet de serre. Parmi ces alternatives, l'énergie photovoltaïque est particulièrement prometteuse. Elle permet de convertir directement la lumière du soleil en électricité grâce à des matériaux semi-conducteurs. Initialement, les cellules photovoltaïques étaient majoritairement composées de matériaux inorganiques, le silicium étant encore le plus couramment utilisé aujourd'hui malgré la concurrence croissante des halogénures, de l'arséniure de gallium et d'autres matériaux [2].

Les recherches actuelles sur les cellules solaires visent à optimiser le rapport entre le rendement énergétique et le coût de production. Pour réduire le poids et le coût de ces dispositifs tout en augmentant leur surface et leur flexibilité, des cellules en couches minces ont été développées. Les cellules solaires utilisant le  $\text{Cu(In, Ga) Se}_2$  (CIGS) représentent une approche prometteuse pour la réduction

des coûts de production. Ce matériau présente l'avantage d'une élaboration facile et d'un haut rendement.

Notre étude vise à prédire les performances des cellules solaires à base de  $\text{Cu(In, Ga)Se}_2$  (CIGS), en se concentrant sur des paramètres clés tels que le courant de court-circuit ( $I_{sc}$ ), le rendement de conversion ( $\eta$ ), la tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ ), le facteur de forme (FF) et la caractéristique courant-tension (I-V). Nous utilisons le logiciel SCAPS-1D pour ces simulations.

Nous optimisons les paramètres physiques de la couche tampon de cette cellule solaire, comme le dopage et l'épaisseur, en utilisant le CdS, le CdTe et le  $\text{Cu}_2\text{O}$  comme matériau de cette couche. Nous examinons également l'effet de superposer deux couches CdS et de CdTe sur les performances de la cellules CIGS.

L'optimisation du dopage permet l'ajustement de la concentration des dopants ce qui permet d'améliorer les propriétés électriques et optiques en réduisant les recombinaisons, ce qui conduit ainsi une augmentation du courant de court-circuit. L'épaisseur optimale des couches maximise l'absorption de la lumière tout en minimisant les pertes par recombinaison.

Notre méthodologie comprend des simulations systématiques pour évaluer l'impact du dopage et de l'épaisseur sur les performances photovoltaïques de la cellule. Chaque simulation mesure des paramètres tels que  $I_{cc}$ ,  $\eta$ ,  $V_{co}$  et FF. La caractéristique I-V et la réponse spectrale fournissent des informations sur le comportement électrique sous illumination et l'efficacité de la conversion de la lumière [3].

Notre mémoire est structuré en trois chapitres.

- Dans le premier chapitre on présente les cellules solaires, principe de fonctionnement et facteurs limitent le rendement de conversion.
- Ensuite dans le second chapitre un aperçu est donné sur les cellules solaires à base de  $\text{Cu (In,Ga)Se}_2$  (CIGS).
- Le troisième chapitre présente les détails concernant le logiciel de simulation SCAPS utilisé et les résultats de simulation d'une cellule CIGS.
- En fin, une conclusion générale est exposée afin de clôturer le manuscrit.



# **Chapitre I :**

## **Généralités sur les panneaux photovoltaïques**

## ❖ I.1 Introduction

Ce chapitre est consacré aux cellules solaires, nous examinons en détail le domaine de la conversion photovoltaïque, mettant en lumière les principes de fonctionnement ainsi que les facteurs qui influent sur leurs performances. Ces dispositifs utilisent le soleil pour générer de l'électricité, ce qui constitue un élément essentiel de la transition vers des sources d'énergie plus durables. Le développement des cellules solaires repose sur une connaissance approfondie du soleil, des semi-conducteurs et des interactions photoniques au niveau atomique. L'objectif principal est d'analyser le fonctionnement d'une cellule solaire depuis l'interaction initiale entre le rayonnement solaire et le matériau semi-conducteur jusqu'à la génération et la collecte des porteurs de charge. Comprendre ces aspects est crucial pour orienter les avancées technologiques visant à améliorer l'efficacité et la durabilité des cellules solaires.

## ❖ I.2 Soleil

Le soleil est une étoile dont l'énergie provient des réactions thermonucléaires de fusion de l'hydrogène en se transformant en hélium. Sa température superficielle moyenne est estimée à 5800 °K. La surface lumineuse habituellement visible, ou photosphère, présente l'aspect d'un réseau à mailles irrégulières, formée par une multitude de cellules de convection, appelées granules, en perpétuelle évolution. Cette couche, d'environ 100 km d'épaisseur, est le siège de taches sombres de très grande diversité de forme et d'étendue, qui correspondent à des zones plus froides associées à un champ magnétique intense. On y observe également des facules brillantes qui sont les traces sur la photosphère de structures situées dans une couche plus élevée, la chromosphère, siège des protubérances. Au-delà de la chromosphère, épaisse d'environ 5 000 km, l'atmosphère solaire se prolonge par la couronne, qui s'étend dans l'espace jusqu'à des millions de kilomètres. Le globe solaire limité par la photosphère a un rayon égal à 696 000 km, soit environ 109 fois le rayon équatorial de la Terre. Sa densité moyenne est de 1,41, de sorte que sa masse est seulement 333 000 fois celle de la

Terre, pour un volume 1 300 000 fois plus important. Le rayonnement solaire met environ 8 minutes pour nous parvenir.

A chaque seconde, 564 millions de tonnes d'hydrogène se transforment en 560 millions de tonnes d'hélium à travers les réactions thermonucléaires qui se produisent au sein du soleil, les 4 millions de tonnes restant sont dissipées sous forme d'énergie. Cette énergie a une valeur totale de 36.1022 kW, dont la terre en reçoit 1,8.1017 kW de cette énergie pendant une seconde [1].

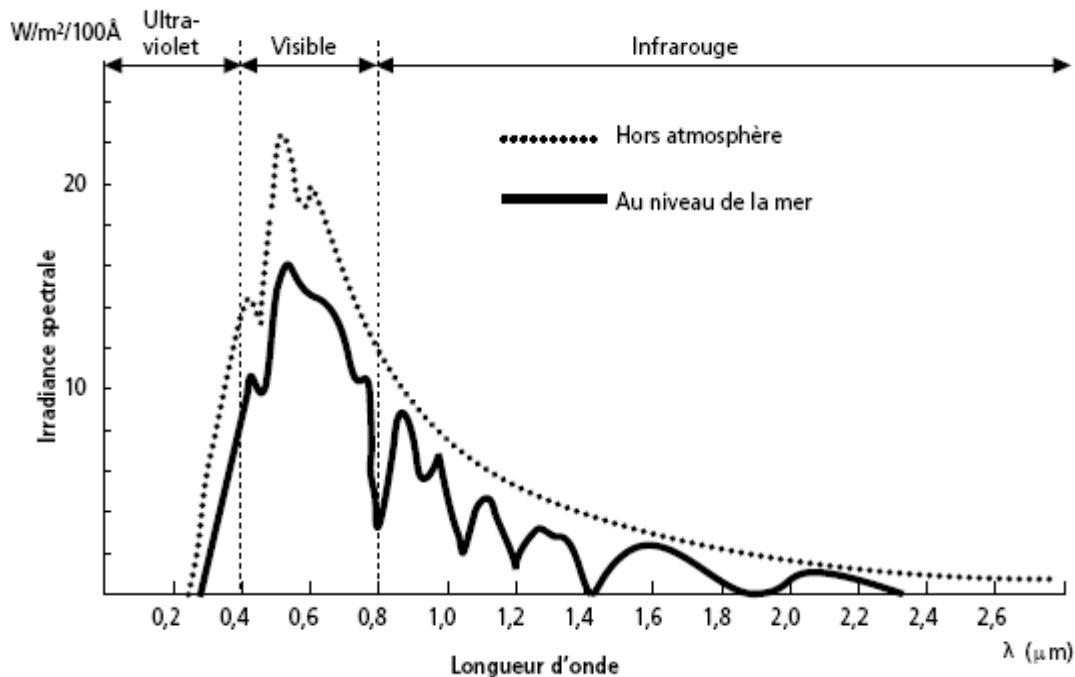
### ❖ I.3 Rayonnement solaire

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0,22  $\mu\text{m}$  à 10  $\mu\text{m}$ . La figure (I-1) représente la variation de la répartition spectrale énergétique.

L'énergie associée au rayonnement solaire se décompose approximativement à trois bandes :

- 9% dans la bande des ultraviolets ( $<0,4 \mu\text{m}$ ),
- 47% dans la bande visible (0,4 à 0,8  $\mu\text{m}$ ),
- 44% dans la bande des infrarouges ( $>0,8 \mu\text{m}$ ).

L'atmosphère terrestre reçoit ce rayonnement à une puissance moyenne de 1,37 kilowatt au mètre carré ( $\text{kW}/\text{m}^2$ ), à plus ou moins 3 %, selon que la terre s'éloigne ou se rapproche du soleil dans sa rotation autour de celui-ci. L'atmosphère en absorbe toutefois une partie, de sorte que la quantité d'énergie atteignant la surface terrestre dépasse rarement  $1200 \text{ W}/\text{m}^2$ . La rotation et l'inclinaison de la terre font également que l'énergie disponible en un point donné varie selon l'altitude, l'heure et la saison. Enfin, les nuages, le brouillard, les particules atmosphériques et divers autres phénomènes météorologiques causent des variations horaires et quotidiennes qui tantôt augmentent, tantôt diminuent le rayonnement solaire et le rendent diffus.



**Figure I.1** : Analyse spectrale du rayonnement solaire [1].

L'utilisation du rayonnement solaire comme source d'énergie pose un problème bien particulier. En effet, le rayonnement solaire n'est pas toujours disponible, on ne peut ni l'emmagasiner ni le transporter. Le concepteur d'un système qui emploie le rayonnement solaire comme source d'énergie doit donc déterminer la quantité d'énergie solaire disponible à l'endroit visé ainsi que le moment où cette énergie est disponible [2,3].

Il y a quatre types de rayonnement [4] :

- 1) **Rayonnement direct** : c'est le rayonnement reçu directement du soleil. Il peut être mesuré par un **Pyrhélio-mètre**.
- 2) **Rayonnement diffus** : c'est le rayonnement provenant de toute la voûte céleste. Ce rayonnement est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire par l'atmosphère ainsi qu'à sa réflexion par les nuages. Il peut être mesuré par un **pyromètre** avec écran masquant le soleil.
- 3) **Rayonnement solaire réfléchi (Albédo du sol)** : c'est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige).
- 4) **Rayonnement global** : c'est la somme de tous les rayonnements reçus, y compris le rayonnement réfléchi par le sol et les objets qui se trouvent à sa surface. Il est mesuré par un **pyromètre** ou un **Solari-mètre** sans écran.

À noter que certains capteurs solaires concentrent le rayonnement solaire afin d'augmenter le rendement du capteur par rapport à une surface donnée. Ces capteurs à concentration ne peuvent être utilisés que si le rayonnement est direct. Dans les endroits avec une forte proportion d'ensoleillement diffus, ces capteurs ne peuvent pas fonctionner efficacement car l'ensoleillement diffus ne peut être concentré en un point.

## ❖ I.4 Cellule solaire photovoltaïque

### ➤ I.4.1 Historique

- Découverte :

En 1839, les français Antoine Becquerel découvrent l'effet photovoltaïque. C'est en 1883, que la découverte de Becquerel a été utilisée par l'Américain Charles Fritts pour produire la première cellule photovoltaïque. L'effet photovoltaïque fut compris et présenté pour la première fois en 1887 [5].

En 1905, Albert Einstein étudie l'effet photovoltaïque et propose une explication théorique grâce au concept de "quanta d'énergie" et reçoit le prix Nobel de physique en 1921.

En 1954, trois chercheurs américains des laboratoires Bell, Gerald Pearson, Darryl Chapin et Calvin Fuller, développent un panneau solaire avec les premières cellules efficaces en silicium "dopé" fonctionnant avec un rendement de 6%.

A partir de 1958, ces cellules, fixées à l'extérieur, sont utilisées pour alimenter les satellites.

---

Le choc pétrolier en 1971 relance l'intérêt d'envisager de nouveaux moyens de produire de l'énergie renouvelable. Ainsi, le Dr Elliot Berman met au point un procédé permettant de concevoir une cellule solaire à moindre coût.[6]

---

- Evolution des années 2000 à Aujourd'hui :

Au début des années 2000, l'instauration de tarifs d'achat de l'électricité photovoltaïque permet l'essor de l'énergie solaire. En effet, entre 2000 et 2010, la

production de panneau est multipliée par 100 à l'échelle mondiale. On observe une énorme croissance de l'énergie solaire photovoltaïque.

D'après EDF, en 2014, 6% de la production d'électricité en France était produite grâce à l'énergie solaire ; ce qui correspond à une croissance de +27,5% par rapport à 2013.

En 2016, l'énergie solaire photovoltaïque représentait 1,6% de la production mondiale et produisait 375 TWh contre 246 TWh en 2015. L'énergie solaire photovoltaïque se développe davantage chaque année.

En 2017, la production atteignait 500 TWh. Son aspect renouvelable est un attrait conséquent. L'Agence internationale de l'énergie prévoit que l'énergie solaire photovoltaïque produite atteigne 16% de la production mondiale d'électricité en 2050 [7,6].

#### ➤ I.4.2 Description

Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui produit de l'électricité à partir de la lumière du soleil. Elle est généralement composée de 2 couches d'un semi-conducteur de type différent.

Comme on peut le voir sur la figure I.2 ; la première couche est dite de type N ou dopée N. Cela signifie qu'on a augmenté la densité des électrons dans cette couche. Pour réaliser cela, il faut doper le semi-conducteur avec un atome qui a plus d'électrons de valence. Pour le silicium par exemple, il a 4 électrons de valence. On va donc chercher à inclure des atomes avec 5 électrons de valence comme le phosphore. Ainsi, le 5<sup>ème</sup> électrons sera libre et, n'étant pas un électron de liaison, il pourra facilement être excité vers la bande de conduction.

La deuxième couche est dite de type P ou dopée P. Cela signifie qu'on a baissé la densité des électrons dans cette couche. C'est le principe inverse du dopage N, et il faut donc doper le semi-conducteur avec un atome qui a moins d'électrons de valence. Pour le silicium, il faudra inclure des atomes avec 3 électrons de valence comme le Bore. Celui-ci ne pourra créer que 3 liaisons covalentes. Il y aura alors un "trou" dans la structure [8].

Au voisinage de l'interface entre les deux couches, le déplacement des électrons entraîne une recombinaison entre les trous et les électrons (l'électron mobile va venir combler le trou). Ce phénomène produit une zone électriquement non neutre d'atomes de phosphore chargée positivement et une zone non neutre électriquement d'atomes de bore chargée négativement. On obtient ainsi un champ électrique au sein du semi-conducteur : cette région est appelée **jonction PN** [9].

Lorsque les rayons du soleil frappent une cellule photovoltaïque sur laquelle on a disposé deux bornes, **les photons de la lumière** transmettent leur énergie aux électrons qui sont arrachés des atomes dans lesquels ils laissent des trous. Les électrons et les trous ainsi formés vont avoir tendance à se recombiner, mais lorsque le phénomène a lieu dans, ou au voisinage de la jonction PN, le champ électrique va au contraire contribuer à séparer les charges positives et négatives. Les électrons cherchant à se combiner avec les trous sont alors obligés de passer par un circuit extérieur pour rejoindre les trous (fil électrique) créant ainsi un courant électrique continu que l'on appelle le **photo-courant** [10].

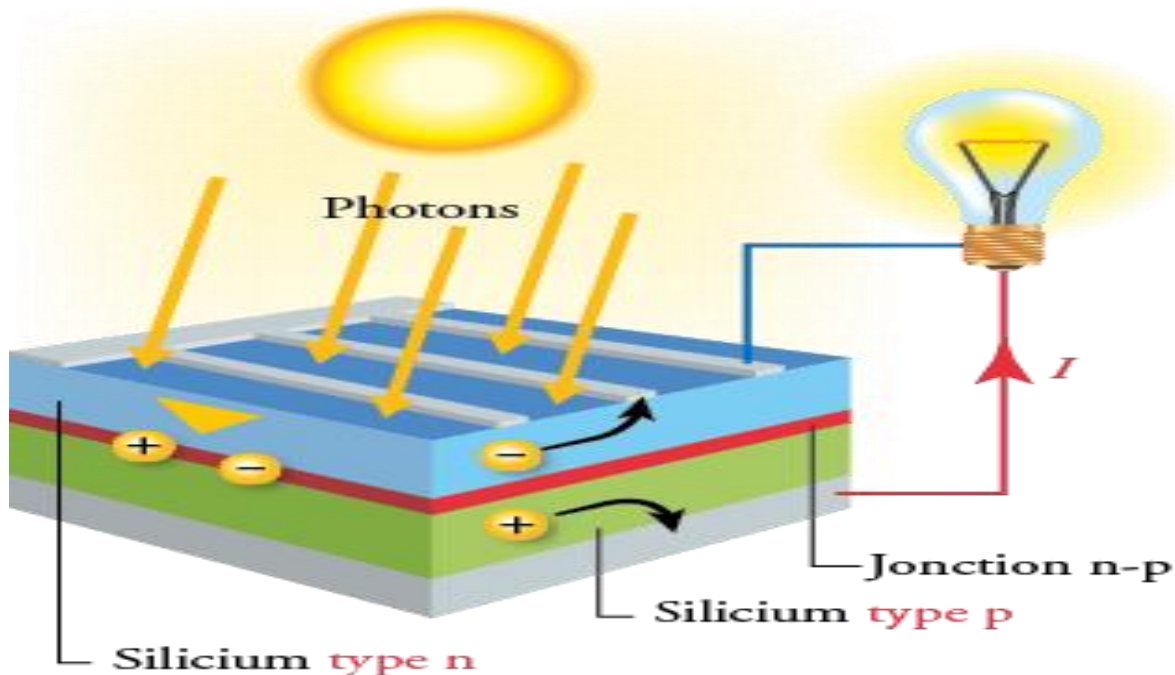


Figure I.2 : Schéma représentant le dopage d'une cellule photovoltaïque [11]

### ❖ I.5 Jonction PN

Un semi-conducteur se caractérise par une bande interdite ( $E_g$ ) de quelques eV entre la bande de valence et la bande de conduction, avec un niveau de Fermi dans la bande interdite. La position du niveau de Fermi varie en fonction de la concentration des porteurs de charges. Le semi-conducteur est de type N lorsque les électrons sont les porteurs de charge majoritaires. Dans ce cas, le niveau de Fermi se situe près de la bande de conduction. Il est de type P lorsque les trous sont les porteurs de charge majoritaires, dans ce cas le niveau de Fermi est proche de la bande de valence [9,10].

Quand deux semi-conducteurs de type P et de type N sont mis en contact, un flux d'électrons et des trous diffuse respectivement vers la zone P et N, pour uniformiser la distribution des concentrations des porteurs dans la structure.

Les trous de la région P vont diffuser vers la région N laissant derrière eux des atomes ionisés, qui constituent autant de charges négatives fixes. Il en est de même pour les électrons de la région N qui diffusent vers la région P laissant derrière eux des charges positives. La zone initialement dopée N devient chargée positivement, et la zone initialement dopée P chargée négativement.

Une zone de déplétion appelée aussi "zone de charge d'espace" (ZCE) est formée de chaque côté de l'interface. Un champ électrique est créé dans la zone de déplétion, dirigée de la région de type N vers la région de type P. Ce champ va créer une barrière de potentiel, qui va empêcher les porteurs électrons et trous de diffuser respectivement vers la région P et la région N [12].



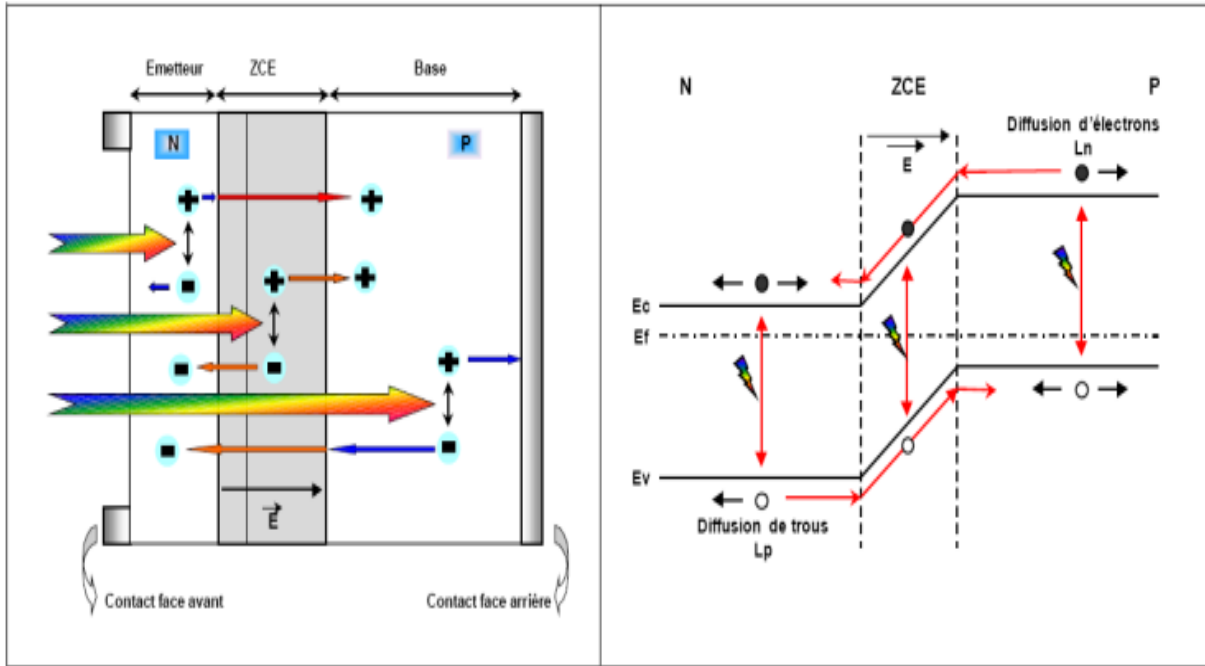


Figure I.3 : Structure d'une jonction PN (à gauche), son diagramme de bandes (à droite) [13].

On appelle « homojonctions » les jonctions formées par la mise en contact de deux régions différentes dopées d'un même semi-conducteur. Par contre, si les jonctions sont réalisées par la juxtaposition de deux matériaux différents, on les appelle "hétérojonctions". [14]

Le schéma de Figure 1-4 donne une description schématique des décalages de bandes de conduction et de valence pour deux types d'hétérojonction.

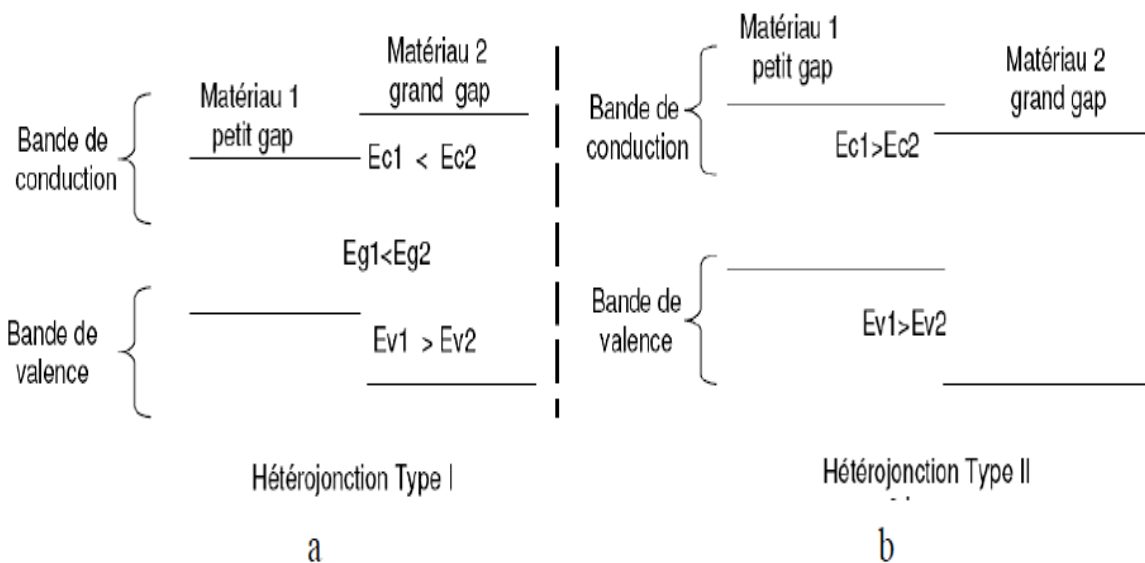


Figure I.4 : Diagrammes schématiques montrant deux types différents d'hétérojonction.

Pour l'hétérojonction de type I (Figure I-4.a), les offsets de bande pour la bande de conduction et de valence agissent comme des barrières de potentiel, et gardent les électrons et les trous dans le matériau de plus petite bande interdite. Une énergie est donc nécessaire pour faire déplacer les porteurs du matériau petite bande interdite au matériau grande bande interdite [14, 9].

Les hétérojonctions de type II (Figure I-4. b), dites "à bande interdite décalée" favorisent le déplacement d'un seul type de porteurs.

Selon le type de dopage utilisé pour les semi-conducteurs, deux hétérojonctions se distinguent :

- i. L'hétérojonction iso-types, pour lesquelles les deux semi-conducteurs sont de même type de dopage, les porteurs qui diffusent dans la zone de charge d'espace sont majoritaires, donc le courant total est celui des porteurs majoritaires.
- ii. L'hétérojonction aniso-types, pour lesquelles les deux semi-conducteurs sont dopés différemment, les porteurs qui sont émis thermiquement à l'interface d'un semi-conducteur, deviennent dans l'autre des porteurs minoritaires [14].

## ❖ I.6 L'effet photovoltaïque

Les cellules solaires utilisent le principe de l'effet photovoltaïque qui consiste à convertir directement l'énergie lumineuse du soleil en électricité (figure I.5). Cela se produit suite à la génération et au transport de charges électriques positives et négatives dans un matériau semi-conducteur sous l'influence de la lumière [15].

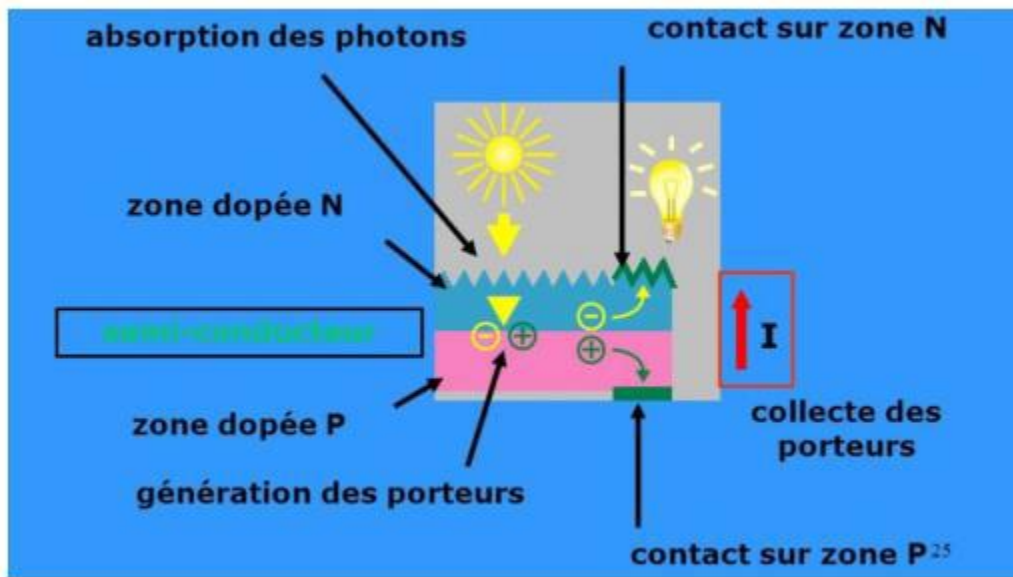


Figure I.5 Mécanisme d'une cellule solaire [16].

Ce phénomène repose sur trois principes majeurs qui agissent de manière quasi-simultanée pour convertir l'énergie solaire en électricité :

- L'absorption de photons.
- La conversion de cette énergie absorbée en charges électriques libres.
- La collecte de ces charges dans un circuit électrique externe.

Ainsi, un dispositif photovoltaïque doit être composé de :

- Un matériau capable d'absorber la lumière solaire et de présenter au moins une transition énergétique possible.
- Une structure de collecte présentant une résistance électrique minimale

Le matériau utilisé dans les cellules photovoltaïques doit donc posséder des niveaux d'énergie appropriés et une conductivité suffisante pour faciliter le passage du courant, ce qui explique l'importance des semi-conducteurs dans l'industrie photovoltaïque [17].

### ❖ I.7 Fonctionnement d'une cellule solaire

Une cellule solaire fonctionne grâce à l'effet photovoltaïque, qui consiste à transformer l'énergie lumineuse en électricité. Les principales étapes du fonctionnement d'une cellule solaire sont les suivantes [18] :

- 1) **Absorption de la lumière** : Lorsque la lumière du soleil frappe la surface d'une cellule solaire, les photons transportant de l'énergie sont absorbés par le matériau semi-conducteur de la cellule.
- 2) **Génération de paires électron-trou** : L'énergie des photons absorbés peut libérer des électrons liés dans le matériau semi-conducteur, créant ainsi des paires électron-trou. Un électron est libéré dans la bande de conduction, tandis qu'un trou est créé dans la bande de valence.
- 3) **Séparation des charges** : Les électrons libérés dans la bande de conduction et les trous restants dans la bande de valence sont alors séparés par le champ électrique présent dans la cellule solaire. Ce champ électrique est créé par la structure de la cellule solaire, généralement une jonction pn.
- 4) **Flux de courant** : Les électrons libérés peuvent alors circuler dans un circuit externe, produisant un courant électrique. Ce courant peut être utilisé pour alimenter des appareils électriques ou être stocké dans des batteries pour une utilisation ultérieure.
- 5) **Recombinaison** : Il est important de noter que certains électrons et trous peuvent se recombiner avant d'être collectés, ce qui réduit l'efficacité de la cellule solaire. Des techniques de conception et de fabrication sont utilisées pour minimiser ce phénomène.

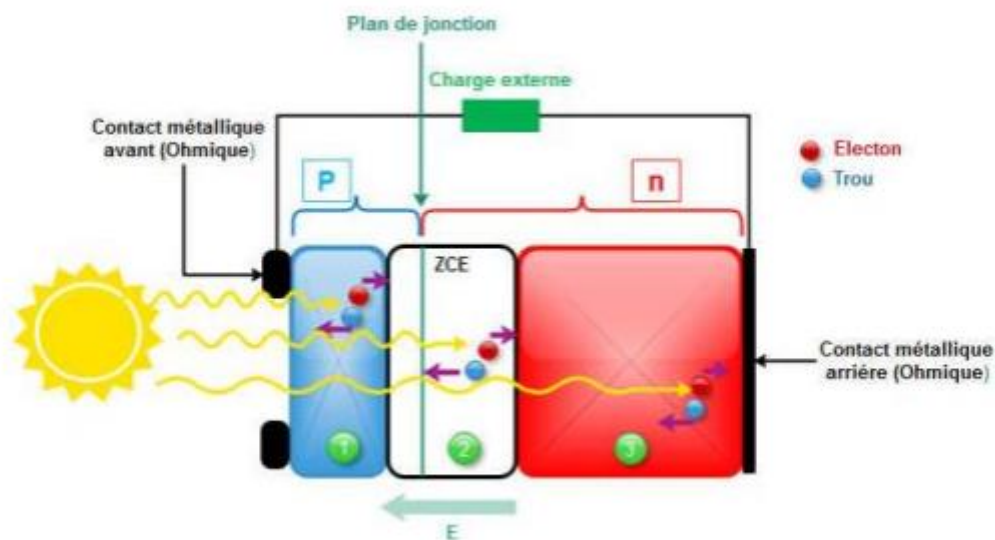


Figure I.6 : Principe fonctionnement d'une cellule solaire [19]

En résumé, le fonctionnement d'une cellule solaire repose sur la conversion de l'énergie lumineuse en électricité grâce à l'effet photovoltaïque, qui implique l'absorption de la lumière, la création de paires électron-trou, leur séparation et la collecte des charges pour produire un courant électrique.

### ➤ I.7.1 Interaction rayonnement/ semi-conducteur

Dans le cas de tous les semi-conducteurs inorganiques, l'indice de réfraction ( $n$ ) se situe généralement entre 3 et 4, ce qui signifie qu'environ 30 % du rayonnement incident est réfléchi. Lors de l'interaction entre le rayonnement et le semi-conducteur, trois processus peuvent se produire :

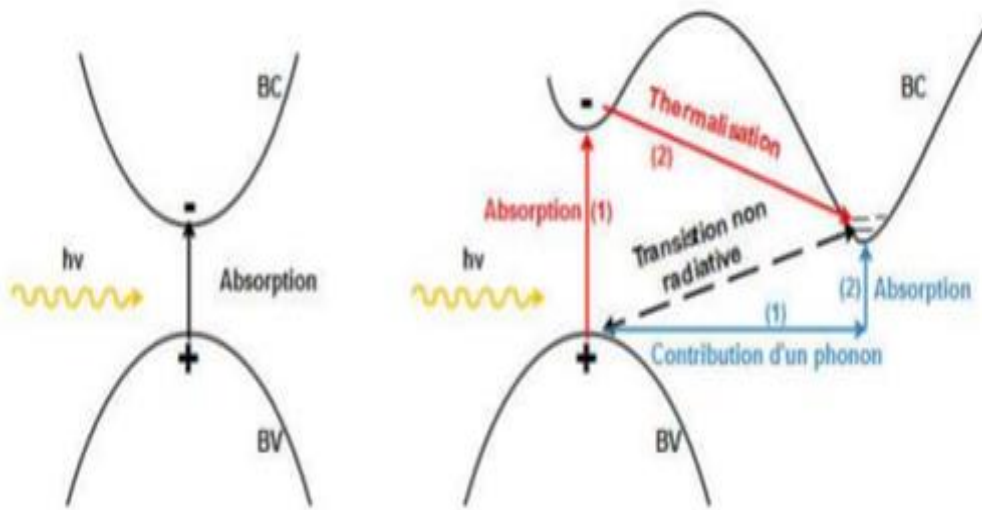
- L'absorption fondamentale, qui correspond au passage d'un électron d'un état occupé de la bande de valence à un état vide de la bande de conduction après l'absorption d'un photon.
- L'émission instantanée, qui se produit lorsque l'électron retourne de la bande de conduction à la bande de valence, libérant ainsi un photon.
- L'émission stimulée, où un électron passe de la bande de conduction à la bande de valence après l'absorption d'un photon, émettant ainsi un deuxième photon.

Ces mécanismes varient selon le type de semi-conducteur. On distingue les semi-conducteurs à bande interdite directe et ceux à bande interdite indirecte. Un semi-conducteur est considéré comme à bande interdite directe lorsque le minimum de la bande de conduction (électrons) et le maximum de la bande de valence (trous) sont atteints pour une même valeur du vecteur d'onde  $k$ . Dans ce cas, les transitions électroniques bande à bande sont radiatives (émission spontanée) et favorisées, notamment dans les applications optoélectroniques (matériaux III-V tels que le GaAs, CdTe, etc...).

En revanche, un semi-conducteur est à bande interdite indirecte lorsque le minimum de la bande de conduction est décalé par rapport au maximum de la bande de valence dans l'espace des vecteurs d'onde  $k$ . Les transitions bande à bande impliquent un changement de vecteur d'onde  $k$  et sont donc non radiatives. Dans ce cas, un troisième aspect entre en jeu, lié aux vibrations du réseau

cristallin, appelé "phonon" d'énergie  $\Omega$ . Cette caractéristique s'applique à des matériaux tels que le silicium, le germanium, le GaP, etc... [18]

Ces phénomènes expliquent pourquoi l'absorption optique dans les semi-conducteurs à bande interdite directe est considérablement plus élevée que dans les semi-conducteurs à bande interdite indirecte. Cependant, la durée de vie des porteurs de charge est plus courte dans les premiers, ne dépassant pas  $10^{-8}$  s, tandis que dans les seconds, elle est 1000 fois plus longue [20].



**Figure I.7 :** Transition bande a bande dans un conducteur (a) bande interdite directe, (b) bande interdite indirecte [21].

### ➤ I.7.2 Génération des porteurs de charges

Lorsque le semi-conducteur absorbe un photon avec une énergie supérieure à  $E_g$  (pour les semi-conducteurs à bande interdite directe) ou à  $E_g + \Omega$  (pour les semi-conducteurs à bande interdite indirecte), une paire électron-trou est créée. Ces charges électriques (électron et trou) demeurent liées par une force coulombienne et forment ce que l'on appelle un "exciton".

Pour générer un courant électrique, les excitons doivent se dissocier en électrons et trous libres avant de subir une recombinaison. Cette dernière peut prendre principalement deux formes [22].

Le premier type de recombinaison résulte d'un processus physique d'émission spontanée (recombinaison radiative).

Le deuxième mécanisme de recombinaison est celui qui se produit via des pièges, pouvant être des impuretés ou des défauts présents dans le matériau. Ces impuretés introduisent des niveaux d'énergie dans la bande interdite, créant ainsi des centres de recombinaison [18].

### ➤ I.7.3 Mobilité et la collecte des porteurs de charge

Une fois que les paires électron-trou se sont dissociées, les charges libres doivent se diffuser jusqu'aux électrodes pour être collectées. La mobilité des porteurs de charges détermine la capacité des électrons ou des trous à se déplacer à l'intérieur d'un matériau, exprimée en  $cm^2V^{-1}s^{-1}$  [23,24].

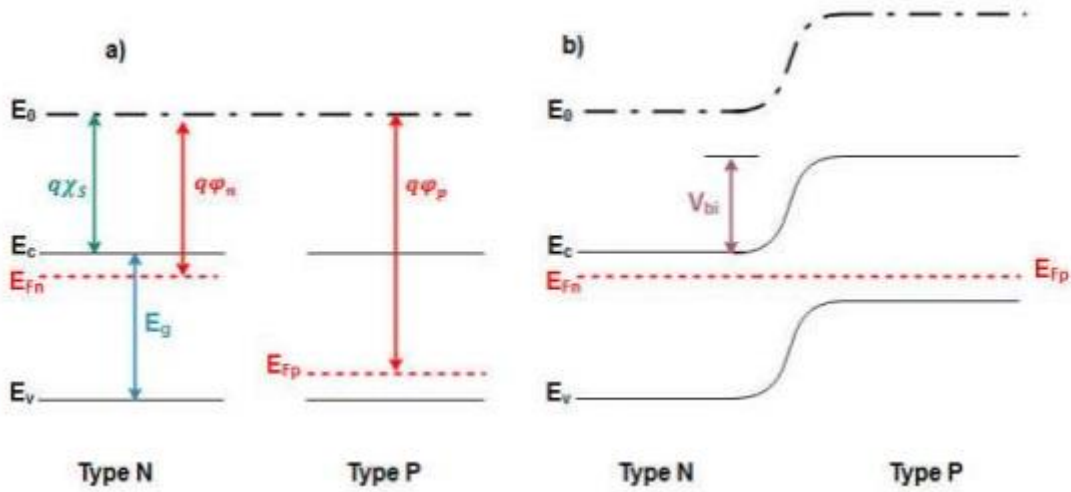
Cette mobilité est généralement calculée selon l'expression suivante :  $\mu = |q\tau / m|$ , où  $\tau$  représente le temps moyen entre deux collisions du porteur avec les atomes du cristal ou des impuretés, et  $m$  la masse effective du porteur de charge (électron ou trou) [23,24].

Pour que les paires électron-trou soient séparées, le dispositif de collecte nécessite un champ électrique élevé. Ce champ peut être généré en plaçant le semi-conducteur en contact étroit avec un métal (barrière Schottky) ou avec un autre semi-conducteur (jonction pn). Dans ce dernier cas, les semi-conducteurs peuvent être du même matériau mais dopés différemment (homojonction) ou provenir de matériaux différents (hétérojonction)[18,24].

- **Homojonction**

L'homojonction consiste à mettre en contact deux matériaux semi-conducteurs de même nature mais de types différents : l'un de type P et l'autre de type N. La formation de cette jonction est illustrée dans la figure I.11.

Cette union engendre des courants de diffusion d'électrons et de trous au voisinage de la jonction, créant ainsi une barrière de potentiel. Cette barrière s'oppose aux courants de diffusion des porteurs majoritaires de chaque région et dépend uniquement des travaux de sortie des deux zones ( $V_{bi}$  représente la différence entre les niveaux de Fermi).

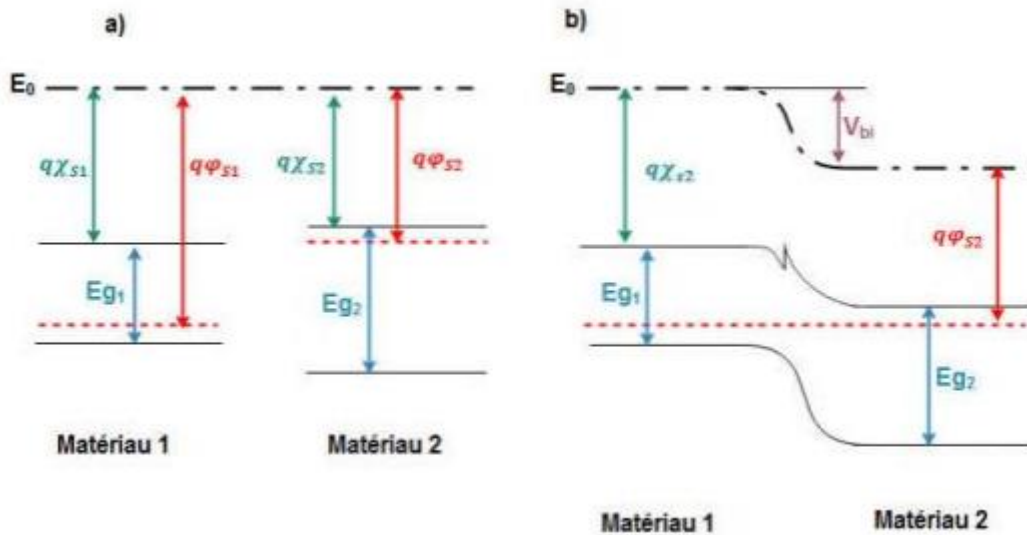


**Figure I.8 :** Diagramme énergétique ; (a) régions p/n isolées (b) régions p/n en contact à l'équilibre [21]

- **Hétérojonction**

Elle se forme au contact de deux matériaux semi-conducteurs possédant des valeurs de gaps différentes (Figure I-12. a). Contrairement à l'homojonction, l'hétérojonction laisse apparaître un pic dans la bande de conduction (Figure I-12. b) qui peut également survenir dans la bande de valence selon la nature et le dopage des deux semi-conducteurs. Dans ce cas la barrière d'énergie dépend du gap, de l'affinité électronique et de la concentration des dopants des deux semi-conducteurs [24].





**Figure I.9 :** Diagramme énergétique illustrant la formation de l'hétérojonction ;  
 (a) régions p/n isolées (b) régions p/n en contact à l'équilibre [21].

### ➤ I.7.4 Caractéristique I-V d'une Cellule Solaire

#### ▪ I.7.4.1 Sous obscurité

En l'absence de lumière, la cellule solaire ne génère aucun courant. La densité de courant totale traversant la cellule solaire dans l'obscurité,  $J_D$  ( $J_{Dark}$ ) est déterminée par :

$$J_D = J_0 \left[ \exp\left(\frac{qV}{AK_B T} - 1\right) \right] \quad (I.1)$$

Ou par le courant :

$$I_D = I_0 \left[ \exp\left(\frac{qV}{AK_B T} - 1\right) \right] \quad (I.2)$$

Dans ces équations  $K_B$ , représente la constante de Boltzmann ( $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ),  $T$  la température absolue en Kelvin,  $q$  la charge élémentaire ( $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$ ),  $A$  le facteur d'idéalité de la diode et  $J_0$  la densité de courant de saturation son expression est donnée par :

$$J_0 = q \left( \frac{D_p n_i^2}{L_p N_D} + \frac{D_n n_i^2}{L_n N_A} \right) \quad (I.3)$$

Où  $D_n$  et  $D_p$  sont respectivement les coefficients de diffusion des porteurs minoritaires dans les matériaux n et p ;  $n_i$  représente la concentration intrinsèque ;  $L_n$  et  $L_p$  sont les longueurs de diffusion des minoritaires dans les régions n et p ;  $N_A$  et  $N_D$  sont les concentrations de dopage dans les régions P et N. [25]

▪ **I.7.4.2 Sous ensoleillement**

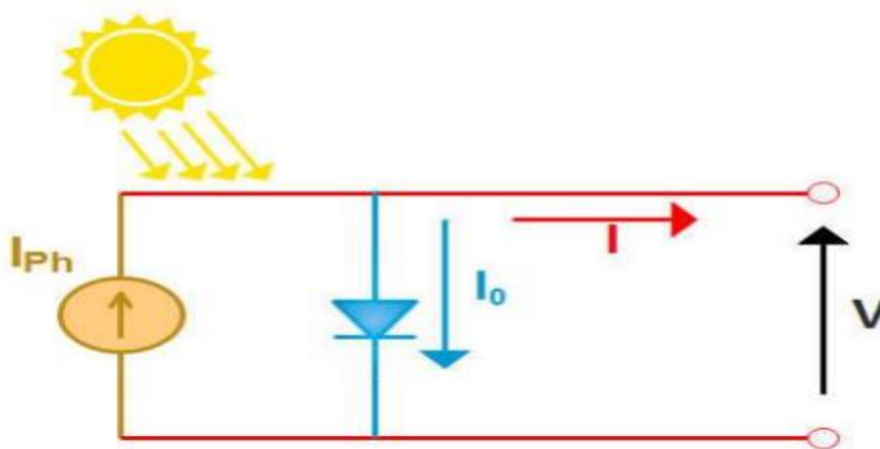
La caractéristique d'une cellule solaire peut être évaluée selon deux scénarios : le cas idéal, où les pertes sont négligeables, et le cas réel, où l'impact des résistances parasites est pris en compte [25].

**Cas idéal**

Dans ce cas, lorsqu'une cellule solaire est exposée à un flux lumineux, un certain nombre de photons transportant une quantité d'énergie sont absorbés, entraînant la génération d'un photo-courant aux bornes de la cellule. Ce photo-courant généré est proportionnel au flux lumineux. La caractéristique courant-tension (J-V) correspondante dans ce cas est représentée par l'équation (I.4), où le premier terme représente le courant en l'absence de lumière  $J_D(J_{Dark})$  et le deuxième terme  $J_{ph}$  représente le courant photo-généré.

$$J = J_0 \left[ \exp \left( \frac{qV}{AK_B T} - 1 \right) \right] - J_{ph} \quad (I.4)$$

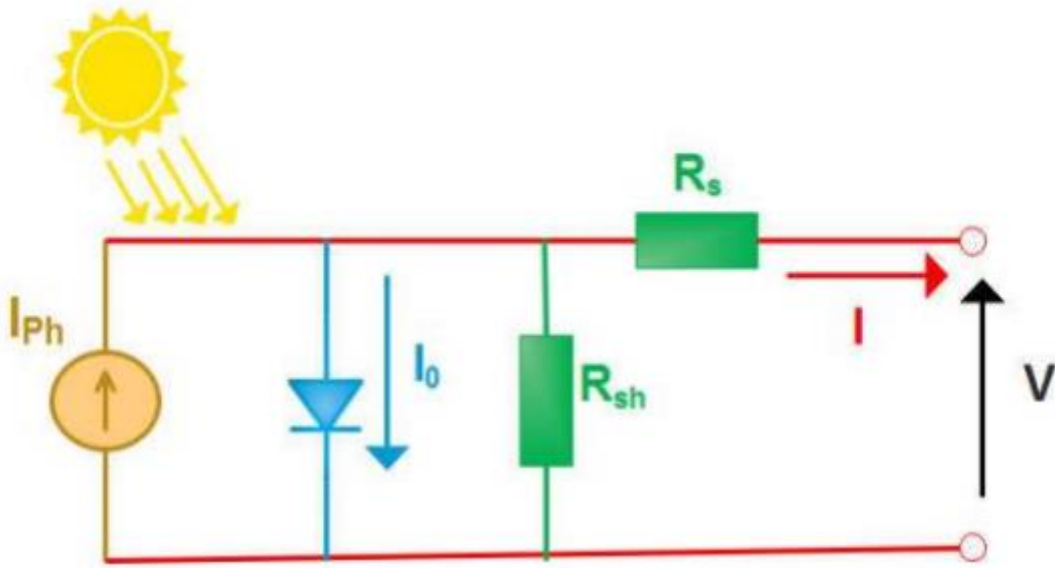
La figure I.13 représente le schéma électrique équivalent de la cellule solaire.



**Figure I.10** : Schéma équivalent d'une cellule solaire dans le cas idéal [21].

### Cas réel

Dans le cas réel, le fonctionnement de la cellule solaire peut être assimilé à celui d'un générateur de courant comportant une diode en parallèle. Cette diode représente le comportement de la cellule en l'absence de lumière (jonction PN), tout en tenant compte des deux résistances parasites, Série  $R_s$  et parallèle  $R_{sh}$  afin de prendre en considération les pertes dans la cellule.



**Figure I.11** : Schéma équivalent d'une cellule solaire dans le cas réel [21].

Le schéma illustré dans la figure I-11 est exprimé une courbe mathématiquement par l'équation (I.5) suivante :

$$J = J_{ph} - J_0 \left[ \exp \left( \frac{q(V + JR_s)}{AK_B T} \right) - 1 \right] - \left( \frac{V + JR_s}{R_{sh}} \right) \quad (I.5)$$

#### ➤ I.7.5 Paramètres photovoltaïques d'une cellule solaire

##### ▪ Caractéristique :

La caractéristique réelle et le schéma équivalent de la cellule sont représentés sur la figure I-12 :

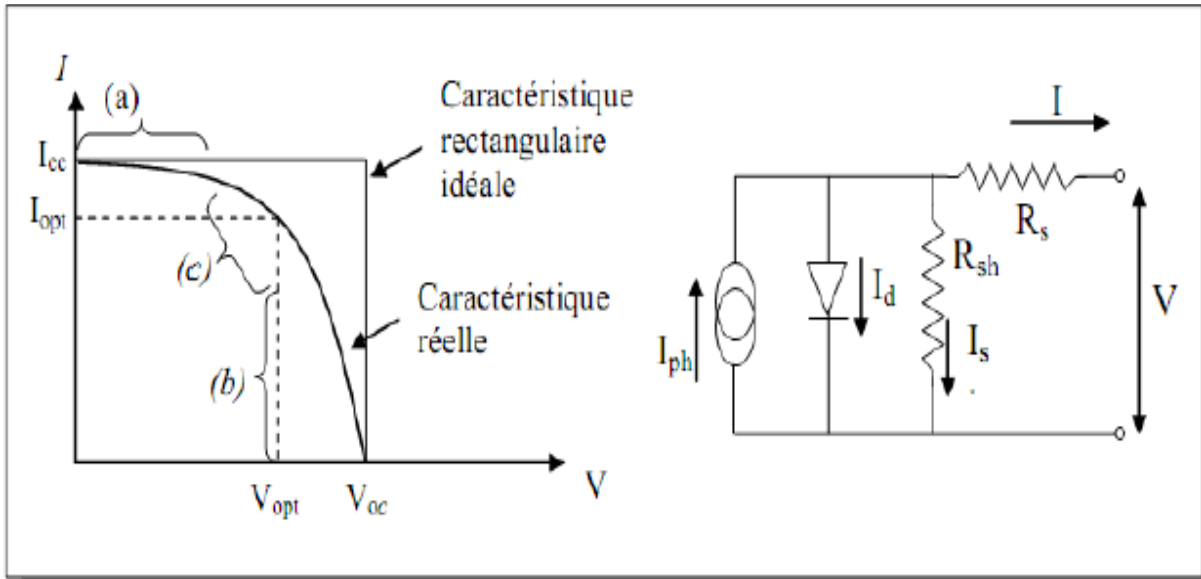


Figure I.12 : Caractéristique et schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle [26].

La caractéristique se divise en trois parties :

- La zone (a) où la cellule se comporte comme un générateur de courant  $I_{cc}$  proportionnel à l'éclairement
- La zone (b) où la cellule se comporte comme un générateur de tension  $V_{oc}$ .
- La zone (c) où l'impédance interne du générateur varie rapidement.

#### ▪ I.7.5.1 Le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ )

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 cellule éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température.

#### ▪ I.7.5.2 Tension en circuit ouvert $V_{oc}$

La tension à circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend de la barrière d'énergie et de la résistance shunt. Elle décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse [27].

$$V_{oc} = \frac{AKT}{q} \ln \left( \frac{J_{ph}}{J_0} + 1 \right) \quad (I.6)$$

- **I.7.5.3 Facteur de forme (FF) :**

Le facteur de forme est le rapport entre la puissance optimale  $P_m$  et puissance maximale que peut avoir la cellule ; il est défini par la relation suivante :

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} \times J_{sc}} = \frac{V_{max} \times J_{max}}{V_{oc} \times J_{sc}} \quad (I.7)$$

- **I.7.5.4 Rendement photovoltaïque ( $\eta$ ) :**

Le rendement  $\eta$ , des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente [27].

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{V_{oc} \times J_{sc} \times FF}{P_{in}} \quad (I.8)$$

$P_{in}$  : Puissance incidente =  $P_{solaire} = 100 \text{ W/cm}^2$

La densité de la puissance incidente égale à  $P_{in}/A$ .

$A$  : Section de la cellule.

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

- **I.7.5.5 Rendement quantique de la cellule EQE :**

Le rendement quantique, noté EQE (external quantum efficiency) est appelé aussi IPCE (incident photon to current conversion efficiency), il définit le rapport entre le nombre d'électrons dans le circuit externe et le nombre de photons

incidents. Ce rendement ne prend pas en considération les photons réfléchis et transmis [28]. Il est donné par la relation suivante :

$$EQE = \frac{J_{cc}(\lambda)}{\phi} \cdot \frac{E_{ph}(\lambda)}{e} \cdot \frac{bc}{e} \cdot \frac{J_{cc}(\lambda)}{\phi(\lambda) \cdot \lambda} = 1,24 \cdot \frac{J_{cc}(\lambda)}{\phi(\lambda) \cdot \lambda} \quad (I.9)$$

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

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

$$EQE = SR(\lambda) \cdot \frac{hc}{e\lambda} \quad (I.10)$$

Le rendement quantique dépend du coefficient d'absorption des matériaux utilisés, de l'énergie d'ionisation, du largeur de la zone de déplétion et de l'efficacité de collecte. Il est mesuré en fonction de la longueur d'onde émise par une source monochromatique. Le rendement de 100% dans le cas idéal (sans pertes) correspond à la récolte par les électrodes d'une paire électron-trou par photon incident. Des valeurs de 50% et 80% en été calculés pour les matériaux organiques et inorganiques respectivement [29].

### ❖ I.8 Les différents types de perte dans une cellule solaire

Les diverses pertes affectant le rendement d'une cellule solaire sont classées en deux catégories : intrinsèques et extrinsèques, ou optiques et électriques.

➤ **I.8.1 Pertes extrinsèques**

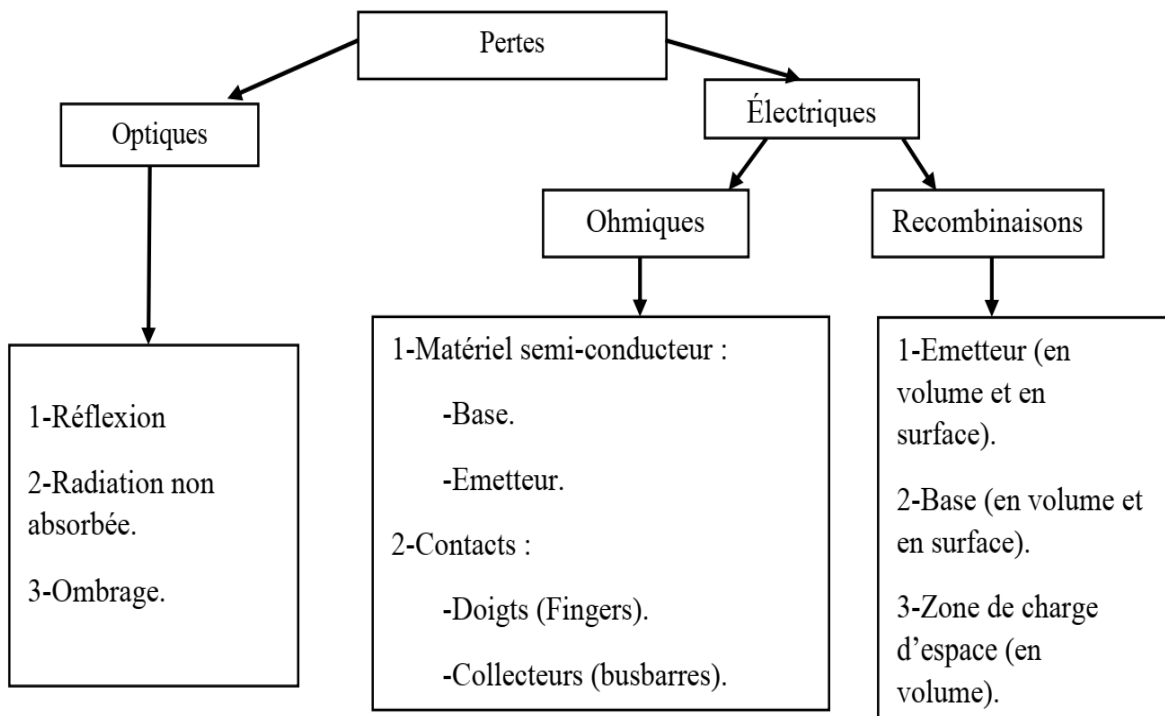
Les pertes extrinsèques sont celles qui sont potentiellement évitables. Elles englobent la réflexion, l'ombrage causé par les contacts, la résistance en série, la collecte partielle des porteurs de charge générés, l'absorption dans la couche fenêtre et la recombinaison non radiative.

➤ **I.8.2 Les pertes intrinsèques**

Sont principalement attribuables aux phénomènes suivants [21] :

- La thermalisation pour les photons ayant une énergie supérieure au seuil de bande interdite ( $E_g$ ) :  $E_g < E_{ph}$ .
- La transparence de la cellule pour les photons ayant une énergie inférieure au seuil de bande interdite ( $E_g$ ) :  $E_{ph}$ .

La figure I.13 présente les différentes sources de perte optique et électrique.



**Figure I.13** : Différents pertes optiques et électriques existant dans une cellule solaire [30].

➤ **I.8.3 Résistances parasites**

La perfection n'est jamais atteinte dans une cellule photovoltaïque en raison de la présence de résistances parasites, comme illustré dans la figure I-14. Ces résistances dissipent une fraction de la puissance générée par la cellule solaire sous forme de pertes électriques. Leur impact varie en fonction de la géométrie de la cellule et de la technologie de fabrication.

➤ **I.8.4 Résistance série**

La résistance série ( $R_s$ ) est une mesure de la résistance aux interfaces résultant de l'impédance des électrodes (grille métallique et face arrière) et du dopage insuffisant dans les régions presque neutres (émetteur et base). Pour maximiser le facteur de forme (FF), cette résistance doit être maintenue aussi basse que possible (inférieure à  $1 \Omega$ ) [42]. Son influence sur la caractéristique J-V est démontrée dans la figure I.18, où l'on observe que la résistance  $R_s$  réduit le courant de court-circuit  $J_{sc}$ , soulignant ainsi l'importance de l'épaisseur de l'émetteur et de la surface du contact métal-semi-conducteur dans l'optimisation du rendement de la cellule [31].



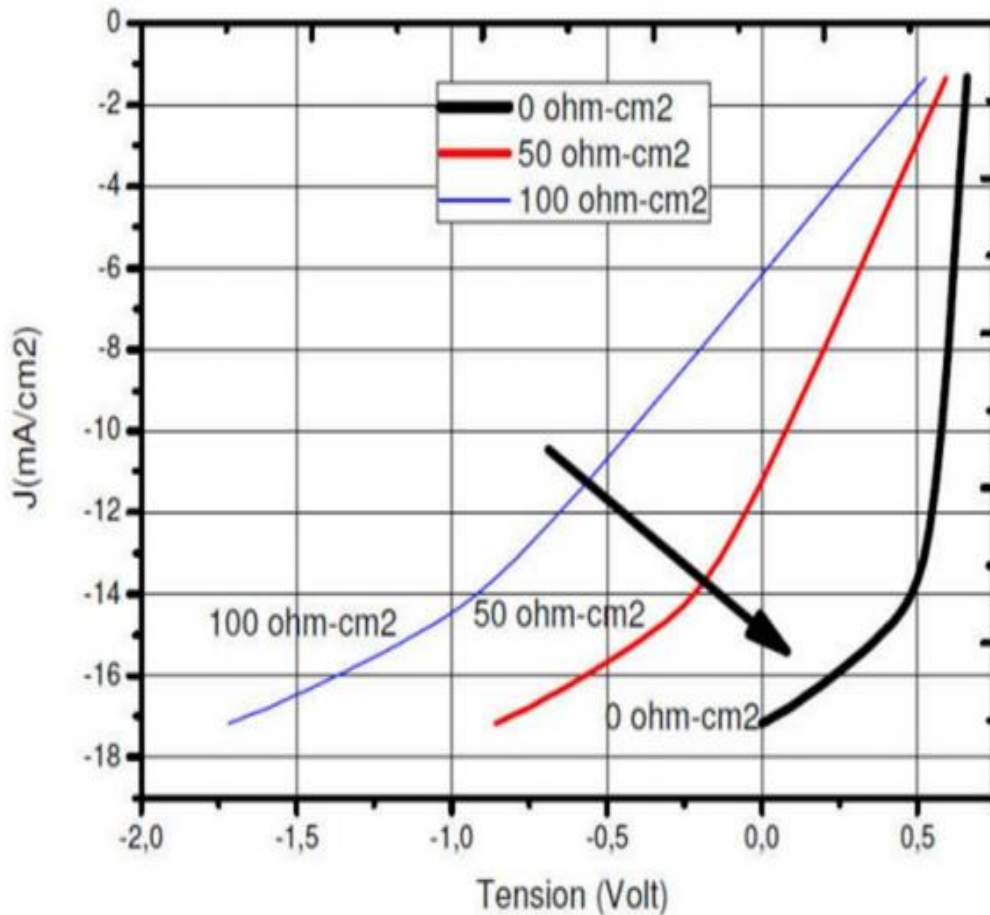


Figure I.14 : L'effet de la résistance série sur la caractéristique J-V, simulation SCAPS-1D [30].

#### ➤ I.8.5 Résistance shunt

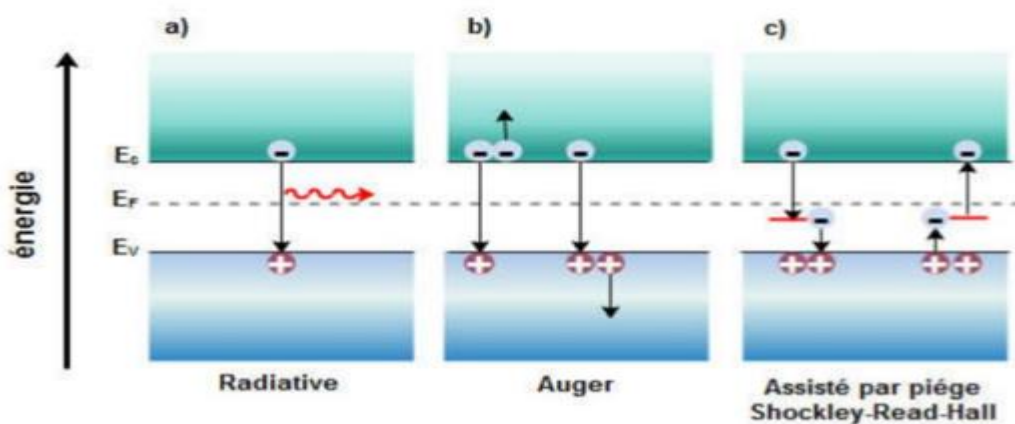
- Les éléments contrôlant la résistance parallèle (shunt) comprennent principalement :
- Les défauts de fabrication, tels que la diffusion des contacts dans les matériaux formant la jonction PN [32].
- La réduction de l'épaisseur de la cellule dans la technologie des couches minces [43].

Pour assurer un bon fonctionnement de la cellule solaire, la résistance shunt doit être maintenue au-dessus de  $10^4 \Omega$  [30].

### ➤ I.8.6 Recombinaison

Un phénomène de recombinaison est défini par son taux de recombinaison  $R$ , qui représente le nombre de recombinaisons par unité de temps et par unité de volume du matériau semi-conducteur.

Trois mécanismes principaux sont identifiés : l'effet Auger, la recombinaison radiative (de bande à bande) et la recombinaison assistée par un piège dans la bande interdite, également connue sous le nom de recombinaison Shockley-Read-Hall (SRH) [18].



**Figure I.15** : Principaux mécanismes de recombinaison dans un semi-conducteur (a) radiative, (b) Auger et (c) SRH [21].

#### ▪ I.8.6.1 Recombinaison radiative

Les semi-conducteurs à bande directe sont généralement associés à ce type de recombinaison, où un électron de la bande de conduction se recombine avec un trou dans la bande de valence, émettant ainsi un photon dont l'énergie correspond au gap de la bande interdite du matériau. Ce processus se distingue par la courte durée de vie des porteurs de charge [18].

#### ▪ I.8.6.2 Recombinaison indirecte (assistée par piège)

À la différence du premier phénomène, ce type de recombinaison se produit dans les semi-conducteurs à bande indirecte. La recombinaison assistée par un piège dans la bande interdite, également connue sous le nom de recombinaison Shockley-Read-Hall (SRH), est

causée par des impuretés ou la structure cristalline du matériau. Les emplacements les plus favorables pour les pièges, facilitant cette transition, se trouvent généralement au milieu de la bande interdite. Le taux résultant de recombinaison-génération  $R$  peut être déterminé par l'équation I.13, tandis que la densité des porteurs libres est représentée par l'équation I.14 [31].

$$R_{SRH} = \frac{pn - n_i^2}{\tau_{SRH,n} \left( p + n_i \exp\left(\frac{E_R - E_{Fi}}{kT}\right) \right) + \tau_{SRH,p} \left( n + n_i \exp\left(\frac{E_R - E_{Fi}}{kT}\right) \right)} \quad (I.11)$$

$\tau_{SRH,n}$ ,  $\tau_{SRH,p}$  : sont respectivement les durées de vie d'électrons et des trous.

$n_i$  : la concentration intrinsèque.

$E_R$  : l'énergie associée aux centres piège.

$E_{Fi}$  : le niveau de Fermi intrinsèque.

$V_{th}$  : la vitesse thermique.

$N_t$  : la concentration des défauts.

### ▪ I.8.6.3 Recombinaison Auger

Ce phénomène se manifeste en présence d'une concentration élevée de porteurs libres, comme c'est le cas dans les semi-conducteurs à bande indirecte [31]. L'énergie libérée lors de cette recombinaison propulse un électron vers un niveau supérieur de la bande de conduction, tandis qu'un trou est déplacé vers un niveau plus profond de la bande de valence.

## ❖ I.9 Avantages et Inconvénients de l'énergie photovoltaïque

### ➤ I.9.1 Avantages

- Une fiabilité élevée car la majorité des fabricants des modules photovoltaïques garantissent leurs produits jusqu'à 25 ans.
- L'option modulaire que les panneaux photovoltaïques facilitent l'adaptation du montage avec des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt.

- Coût de fonctionnement et d'entretien réduits.
- Cette technologie possède un impact positif sur le plan écologique [33].

### ➤ I.9.2 Inconvénients

- Coût de fabrication de certaines filières photovoltaïques reste élevé à cause de son investissement.
- Les installations solaires nécessitent des surfaces énormes pour leur fonctionnement.
- Le rendement reste relativement faible jusqu'à présent (28% sur le marché).
- Faible compétition entre les générateurs solaires face aux générateurs Diesel ou à Gaz naturel.
- Le point le plus crucial est le stockage d'énergie qui nécessite des batteries, ce qui influe sur le cout de l'installation [34].

### ❖ I.10 Conclusion

Ce chapitre nous a permis tout d'abord de fournir une description détaillée de l'énergie solaire, en explorant ses diverses gammes de rayonnement. Nous avons également offert un aperçu historique des cellules solaires et de leur évolution, en mettant en lumière les différentes technologies utilisées. Ensuite, nous avons clarifié des concepts fondamentaux liés à l'effet photovoltaïque. Par la suite, nous avons examiné en détail le fonctionnement intrinsèque des cellules solaires, en détaillant les multiples paramètres qui les régissent. Enfin, nous avons identifié et analysé les divers phénomènes qui impactent le rendement des cellules solaires, notamment les pertes électriques et optiques, les résistances parasites, ainsi que la recombinaison.

# Chapitre II :

Les Cellules solaires à base de  
 $\text{Cu(In,Ga)Se}_2$  (CIGS)

## ❖ II.1 Introduction

Les cellules solaires en couches minces à base de CIGS sont des cellules à hétérojonction. Le CIGS, un semi-conducteur de type p, agit comme absorbeur, générant des paires électron-trou lorsqu'il est exposé à la lumière. La jonction se forme avec le CdS/ZnO, des semi-conducteurs de type n, où le ZnO, connu comme la couche fenêtre, permet le passage du rayonnement jusqu'à l'absorbeur.

Ce chapitre vise à présenter le CIGS et ses propriétés générales. Nous expliquerons ce qu'est une couche mince et décrirons la structure d'une cellule en couche mince CIGS.

## ❖ II.2 Structure d'une cellule CIGS

Les dispositifs photovoltaïques utilisant la technologie CIGS adoptent une configuration en "couches minces", caractérisée par un empilement de films de différentes épaisseurs, allant de quelques nanomètres à quelques micromètres.

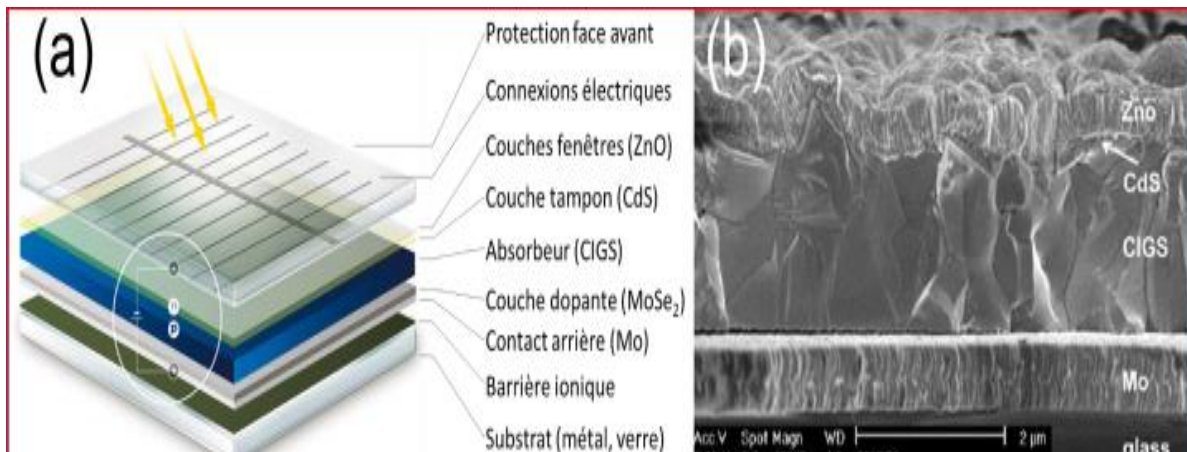
La configuration standard d'une cellule solaire CIGS est illustrée dans la Figure II-1.

Cette structure comprend initialement une électrode arrière, constituée d'un substrat (verre, métal ou polymère) revêtu d'une fine couche métallique ( $\sim 0,5 \mu\text{m}$ ) agissant comme un contact arrière.

Ensuite, la jonction pn est formée par une couche de CIGS ( $1-2 \mu\text{m}$ ) suivie d'une couche de sulfure de cadmium (CdS) de 50 nm, puis une électrode avant comprenant des couches transparentes conductrices et des connexions électriques.

Pour protéger le dispositif des éléments extérieurs et prolonger sa durée de vie, un revêtement en verre ou en polymère est ajouté en haut de l'empilement.

Dans ce qui se suit, nous allons nous intéresser à la description de chaque couche qui forme ce "sandwich" photovoltaïque, en mettant en lumière les aspects critiques et les propriétés individuelles de chaque couche, avec un accent particulier sur la couche d'absorption de CIGS [35, 42].



**Figure II.1** : Structure en coupe d'une cellule CIGS : (a) schéma, (b) Image au microscope à balayage (MEB) [21]

### ➤ II.2.1. Le substrat

Le substrat d'une cellule à couches minces CIGS ( $\text{Cu(In,Ga)Se}_2$ ) est la base sur laquelle les différentes couches de matériaux sont déposées pour former la cellule solaire.

Il fournit un support structurel et influence également les propriétés physiques et électriques de la cellule solaire.

Dans le contexte des cellules solaires à couches minces CIGS, le substrat est généralement constitué de verre sodo-calcique (SLG pour soda-lime glass).

Ce type de verre est choisi en raison de sa disponibilité à grande échelle, de son coût relativement bas et de sa compatibilité thermique avec les processus de fabrication des cellules CIGS.

Il sert de base sur laquelle sont déposées les différentes couches constituant la cellule solaire CIGS, notamment les couches de matériau absorbant la lumière ( $\text{Cu(In,Ga)Se}_2$ ), les couches de jonction pn et les contacts métalliques. Il fournit également une surface plane et stable pour le dépôt des couches de matériaux et aide à assurer une bonne adhérence entre les différentes couches [37].

### ➤ II.2.2. Le contact arrière

En général, le contact arrière est établi en déposant une couche de molybdène (Mo) sur le substrat à l'aide de la technique de pulvérisation cathodique (PVD) en courant continu.

Les paramètres de dépôt sont essentiels car, ils influencent le niveau de contrainte dans la couche, assurant ainsi une bonne adhérence entre les deux couches et permettant également de réguler indirectement la diffusion du sodium provenant du substrat.

Malgré l'étude d'autres métaux, le molybdène demeure le matériau privilégié en raison de sa compatibilité chimique et mécanique avec les autres procédés de dépôt [36].

Il présente une grande conductivité, un coefficient d'expansion thermique approprié et une faible résistance de contact avec l'absorbeur, attribuée à la formation du composé  $\text{MoSe}_2$  à l'interface entre les deux matériaux lors de la formation de l'absorbeur.

Le  $\text{MoSe}_2$  est semi-conducteur avec un gap de 1,42 eV, se présente sous forme d'une structure laminaire pouvant être alignée perpendiculairement ou parallèlement au substrat en fonction des propriétés de la couche de Mo et des conditions de recuit.

L'orientation des couches de Mo et de  $\text{MoSe}_2$  joue un rôle crucial dans le contrôle de l'orientation préférentielle du CIGS pendant sa croissance. L'épaisseur de la couche de  $\text{MoSe}_2$  peut être ajustée en utilisant des couches barrières, en modifiant la densité de la couche de Mo déposée, ou en variant la méthode de formation de la couche d'absorbeur [38].

### ➤ II.2.3 L'absorbeur

L'absorbeur est la partie de la cellule où les photons sont transformés en paires électron-trou. Généralement elle formée par le dépôt d'une couche semi-conductrice de type P. Le matériau utilisé pour former cette couche appartenant à la famille I-III-VI. Les différentes variantes déjà étudiées de ce semi-conducteur mènent à la formule générale suivante :  $(\text{Cu, Ag})(\text{In, Ga, Al})(\text{Se, S, Te})_2$ . Remplacer le cuivre par de l'argent, l'indium par du gallium ou de l'aluminium, et le sélénium



par du soufre ou du tellure permet de modifier les propriétés du matériau, telles que sa largeur de bande interdite. Le composé le plus avancé en recherche et en industriel est le  $\text{Cu(In,Ga)Se}_2$  [38].

#### ➤ II.2.4 La couche tampon

La couche tampon est un semi-conducteur de type N, dont le gap doit être supérieur à celui de l'absorbeur et dont l'épaisseur avoisine les 50 nm. Elle remplit principalement deux rôles : un rôle électrique et un rôle de protection. Électriquement, elle optimise l'alignement des bandes entre le CIGS et la couche fenêtre, et limite les recombinaisons des porteurs à l'interface de ces deux couches. Elle protège également la surface de l'absorbeur lors du dépôt par pulvérisation cathodique de la couche de ZnO, qui peut créer des défauts sur la surface du CIGS.

Différents semi-conducteurs de type N ont été utilisés comme couche tampon, le plus courant étant le CdS déposé par bain chimique (CBD), offrant jusqu'ici les meilleurs rendements. Cependant, sa faible largeur de bande interdite de 2,4 eV provoque des pertes optiques pour les longueurs d'onde inférieures à 500 nm. En raison de ces pertes et des contraintes liées à son utilisation (le Cd est un métal lourd, très polluant et réglementé), de nombreuses études cherchent à remplacer le CdS par d'autres matériaux. Parmi ceux-ci, on trouve  $\text{In}_2\text{S}_3$ , InS, le ZnO, le ZnS, ou le ZnSe. Plusieurs méthodes de dépôt peuvent être employées pour ces couches, adaptées à la synthèse du CIGS [38].

Les techniques sous vide sont préférées pour les dépôts de  $\text{Cu(In,Ga)Se}_2$  effectués sous vide, permettant d'enchaîner les étapes sans interrompre le vide. Cependant, les meilleurs rendements semblent être obtenus avec les méthodes de dépôt chimiques (Chemical Bath Deposition (CBD), Atomic Layer Deposition (ALD), Ion Layer Gas Reaction (ILGAR)), en comparaison aux méthodes de dépôt physiques comme l'évaporation et la pulvérisation cathodique [39].

#### ➤ II.2.5 La couche fenêtre

La couche fenêtre utilisée se compose d'une couche d'oxyde de zinc intrinsèque (i-ZnO) d'une épaisseur de 80 nm et d'une couche d'oxyde de zinc dopé à l'aluminium ( $\text{ZnO:Al}$ ) d'environ 400 nm. Ces couches sont déposées par pulvérisation cathodique en RF. La couche i-ZnO vise à limiter les pertes électriques causées par les inhomogénéités dans l'absorbeur, en empêchant les

défauts du CIGS de dominer le Voc. D'autre part, le dopage de la couche de ZnO avec de l'aluminium permet d'augmenter sa conductivité sans altérer la largeur de bande interdite. Ainsi, avec des largeurs de bande interdite comprises entre 3,30 et 3,50 eV, elle contribue à réduire les pertes dans l'ultraviolet [40].

### ➤ II.2.6 La grille

Les cellules solaires à base de  $\text{Cu(In,Ga)Se}_2$  (CIGS) sont de plus en plus considérées comme une solution prometteuse pour la production d'énergie photovoltaïque, offrant un rendement élevé et une bonne stabilité à long terme. Cependant, pour exploiter pleinement le potentiel de ces cellules, il est essentiel de perfectionner les composants clés tels que la grille de rétrodiffusion.

La grille de rétrodiffusion, une structure métallique stratégiquement déposée sur le contact avant de la cellule solaire, joue un rôle crucial dans la réduction des pertes de tension et l'optimisation de l'efficacité de conversion. Son concept repose sur deux principaux mécanismes d'amélioration des performances des cellules solaires à base de CIGS [41].

Tout d'abord, la grille de rétrodiffusion assure une distribution uniforme du courant électrique collecté sur toute la surface de la cellule solaire. Cette uniformité de courant permet de minimiser les pertes de tension internes, améliorant ainsi l'efficacité globale de la cellule.

Ensuite, la grille agit comme une barrière réfléchive, permettant à la lumière réfléchie de rebondir et d'interagir à nouveau avec l'absorbeur CIGS. Ce processus augmente les chances d'absorption de la lumière par l'absorbeur, ce qui se traduit par une augmentation de l'efficacité de conversion globale de la cellule solaire.

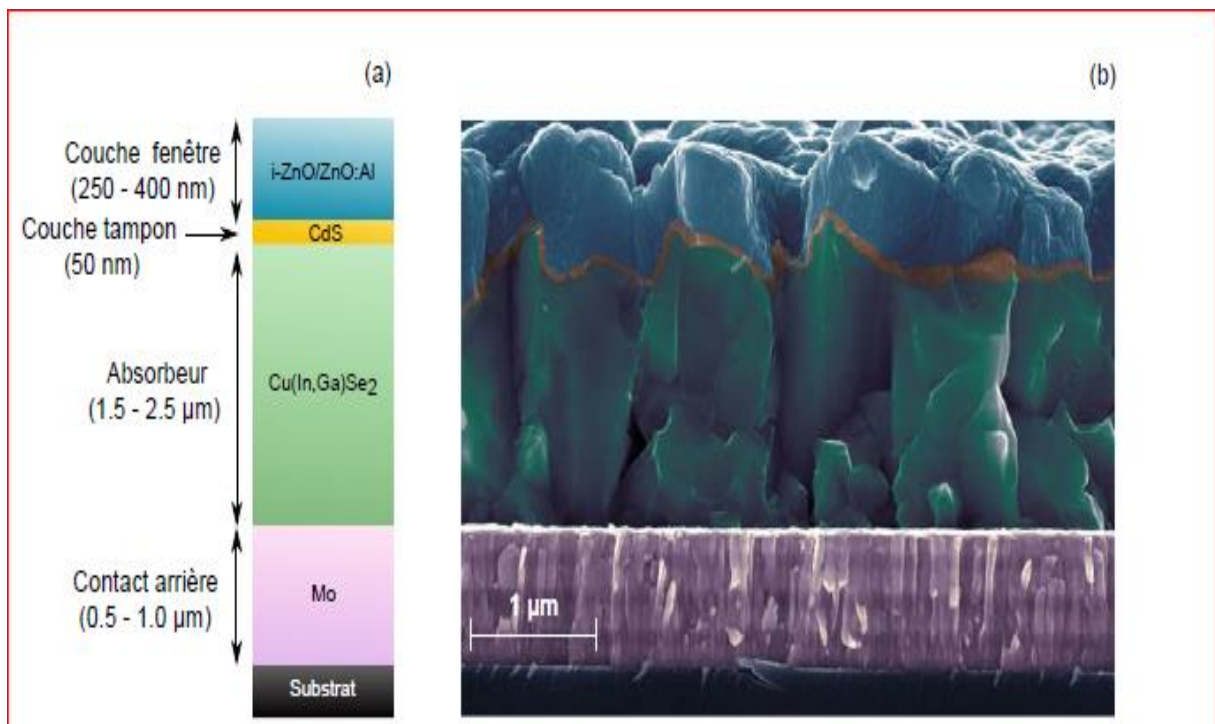
Il convient de noter que la conception de la grille de rétrodiffusion est un aspect critique pour maximiser ses performances. Différentes configurations et matériaux peuvent être envisagés pour optimiser ses propriétés en fonction des caractéristiques spécifiques de la cellule solaire et des exigences de fabrication. Des études approfondies sur les paramètres de conception tels que la taille, la forme, l'épaisseur et le matériau de la grille sont nécessaires pour atteindre les meilleures performances possibles [42].

### ❖ II.3 Structure cristalline

La structure cristalline du matériau CIGS ( $\text{CuInGaSe}_2$ ) est essentielle pour comprendre ses propriétés physiques et ses performances en tant que matériau semi-conducteur utilisé dans les cellules solaires. Voici une description de la structure cristalline typique du CIGS.

#### ➤ II.3.1 Architecture des cellules CIGS

Les cellules solaires basées sur le composé CIGS adoptent une architecture à hétérojonction type 2, composée de plusieurs couches minces. L'arrangement des couches le plus fréquemment rencontré pour de telles cellules est illustré sur la Figure II-2. Dans ce schéma, le composé CIGS agit en tant que semi-conducteur de type P et fonctionne comme l'absorbeur de la cellule, c'est-à-dire la couche où les paires d'électrons-trous sont engendrées suite à l'absorption des photons. Cette couche présente une épaisseur d'environ  $2 \mu\text{m}$ . Vu sa forte absorption, cette épaisseur est amplement suffisante pour absorber la majeure partie des photons dont l'énergie dépasse son gap [43].



**Figure II.2** : Structure d'une cellule solaire à base de CIGS. (a) Schéma de l'empilement des différentes couches, (b) image d'une coupe transverse au électronique à balayage MEB [43].

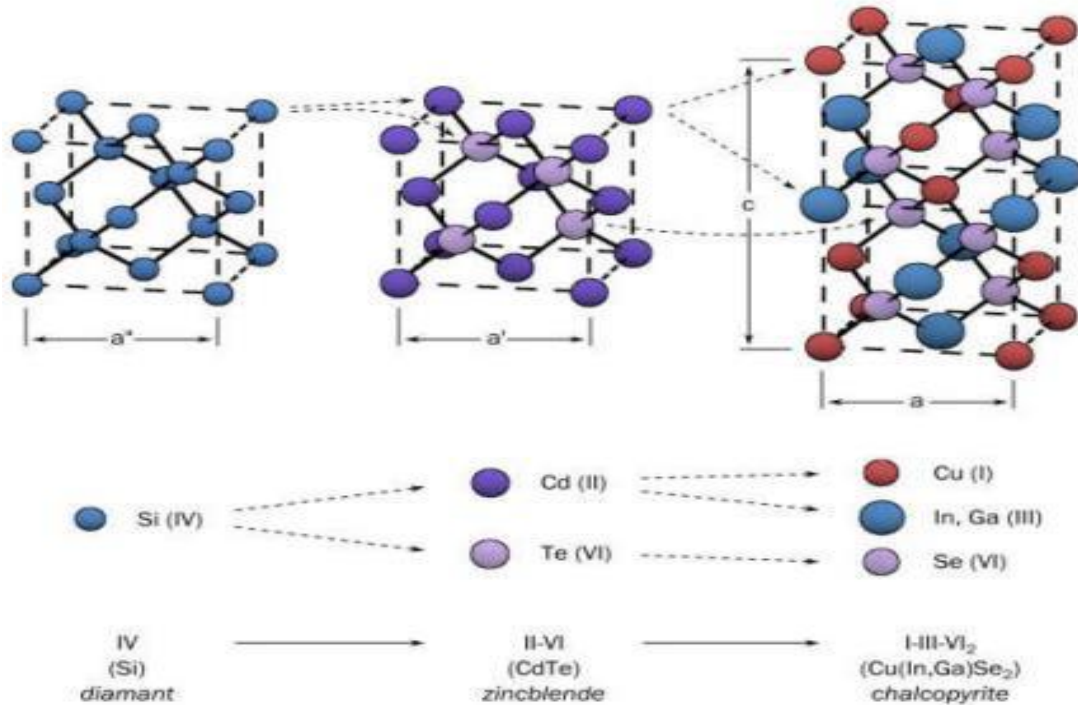
Ces cellules sont également composées d'une couche de molybdène de 0,5 - 1,0 $\mu\text{m}$  déposée sur un substrat de verre sodocalcique de 2 à 3 mm. La couche de molybdène joue le rôle de contact ohmique arrière. De l'autre côté, à la surface de l'absorbeur, l'hétérojonction est complétée avec un semi-conducteur de type n, contenant une couche de CdS et une couche fenêtre de ZnO. Le rôle de cette dernière est de laisser passer un maximum de lumière jusqu'à l'absorbeur. Il est à noter que le sulfure de cadmium (CdS) qui constitue la couche intermédiaire ou couche tampon (~50 nm), est un matériau présentant une grande bande interdite (2,4 eV), afin de limiter l'absorption et ainsi permettre une meilleure collecte des porteurs. Ce composé peut être remplacé également par d'autres composés moins toxiques, comme par exemple le ZnS ou l' $\text{In}_2\text{S}_3$ . La couche fenêtre contient une couche d'oxyde de zinc intrinsèque (i-ZnO) de 50 - 100 nm de haute résistivité et une couche d'oxyde de zinc dopé [43, 44].

### ➤ II.3.2 Structure du matériau CIGS

Le matériau de départ du CIGS est le CIS ( $\text{CuInSe}_2$ ), un semi-conducteur I-III-VI<sub>2</sub> avec une structure cristalline de type chalcopyrite. Cette structure tétragonale peut être considérée comme une superposition de deux structures zinc-blende interpénétrées, avec des anions et cations cubiques à faces centrées. Dans cette configuration, les sites tétraédriques sont occupés par des atomes du groupe III (Se) (anions), tandis que les autres sites sont occupés de manière ordonnée par des atomes des groupes I (Cu) et II (In) (cations) [45]. La Figure II-3 illustre les différentes structures cristallines des trois matériaux semi-conducteurs utilisés dans le photovoltaïque : Si, CdTe et CIGS.

Un paramètre crucial lors de la fabrication des cellules CIGS est l'orientation cristalline du CIGS, qui dépend fortement des conditions de fabrication [46] et des propriétés du substrat [47]. La majorité des études indiquent que l'orientation (220/204) permet d'obtenir de meilleures performances photovoltaïques. Bien que l'explication de cet effet ne soit pas encore claire, il a été observé qu'une orientation préférentielle en (220/204) facilite une meilleure diffusion des atomes de Cd dans le CIGS lors du dépôt de la couche de CdS. Cela pourrait créer une couche d'inversion dans le CIGS (jonction enterrée), améliorant ainsi la qualité de la diode

[48]. Bien que cette hypothèse soit contestée [45], d'autres recherches suggèrent que l'orientation (220/204) permet de former une interface CdS/CIGS avec moins de défauts [49,50].



**Figure II.3** : Comparaison des mailles élémentaires des structures cristallines du Si, du CdTe et du CIGS. Structure chalcopyrite [45].

#### ➤ II.4 Propriétés optiques

Une couche de 2 micromètres d'épaisseur de  $\text{CuInSe}_2$  présente un coefficient d'absorption élevé, permettant d'absorber 95% du rayonnement solaire incident [50]. Comme pour tous les semi-conducteurs, les propriétés optiques du  $\text{CuInSe}_2$  sont influencées par sa structure cristalline. Selon la loi de Vegard [51], l'insertion d'atomes dans sa maille cristallographique entraîne des modifications de ses paramètres de maille et une variation de son gap énergétique ( $E_g$ ) [52]. Cette dépendance, en particulier vis-à-vis du taux de gallium présent, peut être exprimée de manière empirique par l'équation suivante :

$$E_g = 1.01 + 0.626x_{Ga} - bx_{Ga}(1 - x_{Ga}) \quad (II.1)$$

avec  $x_{Ga} = \frac{[Ga]}{[Ga]+[In]}$  et le rapport molaire du gallium et  $b$  une constante optique théoriquement égale à 0.21 mais dont la valeur expérimentale varie entre 0.11 et 0.26 [53].

L'ajout de soufre qui se substitue à des atomes de sélénium, permet lui aussi de modifier le gap du matériau. Ainsi une large gamme de gap optique peut être obtenue en jouant sur les proportions de quatre matériaux : CuInSe<sub>2</sub>, CuGaSe<sub>2</sub>, CuInS<sub>2</sub> et CuGaS<sub>2</sub>. La relation entre le paramètre de maille et le gap optique des principaux composés chalcopyrite est illustrée sur la Figure II-4 ainsi que les rendements de conversion théoriques [54] :

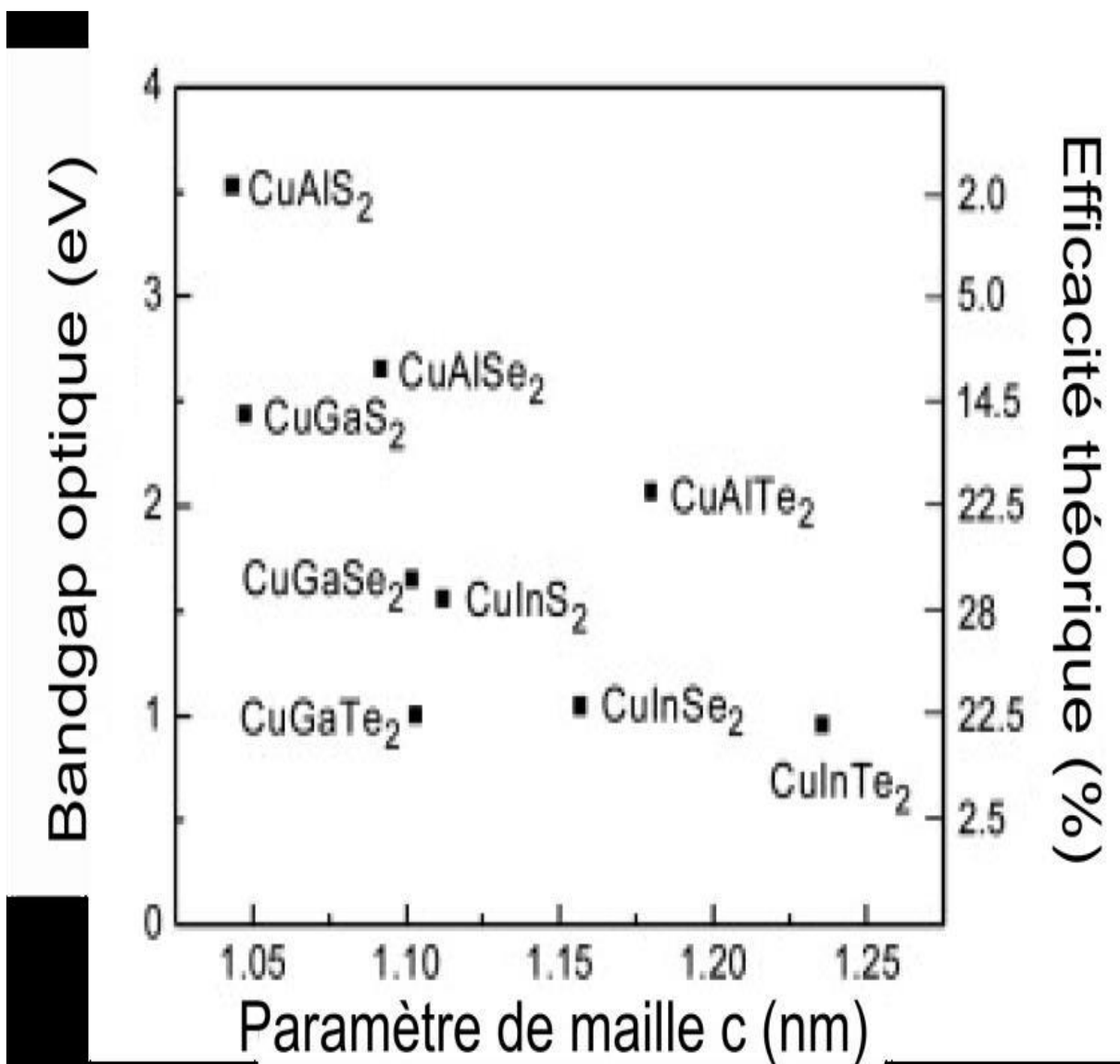


Figure II.4 : Relation entre le paramètre de maille de principaux composés chalcopyrite et leur gap optique [35].



## ❖ II.4 Avantages et Inconvénients de la cellule CIGS

L'utilisation croissante des matériaux à base de  $\text{CuInGaSe}_2$  (CIGS) dans les technologies solaires a suscité un intérêt considérable en raison de leurs performances prometteuses en conversion photovoltaïque. Cette recherche vise à analyser de manière approfondie les avantages et les inconvénients associés au matériau CIGS dans le contexte des cellules solaires. Comprendre ces aspects est crucial pour évaluer le potentiel et les défis de cette technologie en vue de son application à grande échelle dans le domaine de l'énergie solaire [55,56].

### ➤ II.4.1 Avantages

- 1) **Efficacité de conversion élevée** : Les cellules solaires CIGS affichent une efficacité de conversion photovoltaïque élevée, pouvant dépasser 20 %, rivalisant avec les technologies solaires conventionnelles.
- 2) **Absorption efficace de la lumière** : Le CIGS absorbe efficacement la lumière du soleil sur une large gamme de longueurs d'onde, même avec des couches minces, ce qui permet une utilisation efficace des matériaux.
- 3) **Flexibilité de conception** : Le matériau CIGS peut être déposé sur divers substrats, y compris des surfaces flexibles, ouvrant la voie à des applications telles que les cellules solaires flexibles et légères.
- 4) **Ressources abondantes et durabilité** : Les éléments constitutifs du CIGS (cuivre, indium, gallium, sélénium) sont relativement abondants et durables, réduisant les préoccupations liées à la disponibilité des matériaux.
- 5) **Potentiel de réduction des coûts** : Les procédés de fabrication du CIGS sont en évolution constante pour réduire les coûts de production, ce qui en fait une option compétitive pour l'énergie solaire.
- 6) **Performances à faible luminosité** : Les cellules solaires CIGS présentent de bonnes performances même dans des conditions de faible luminosité ou de ciel nuageux, ce qui les rend adaptées à divers environnements.
- 7) **Longue durée de vie** : Les cellules solaires CIGS ont une durée de vie prévue de plusieurs décennies avec peu de dégradation, assurant une production d'énergie stable sur une longue période.

- 8) **Réponse spectrale étendue** : Le CIGS a une réponse spectrale étendue, ce qui signifie qu'il peut absorber efficacement la lumière solaire sur une large gamme de longueurs d'onde, y compris la lumière indirecte.
- 9) **Faible impact environnemental** : Comparé à d'autres technologies solaires, le CIGS a un faible impact environnemental tout au long de son cycle de vie, de l'extraction des matériaux à la fin de vie du système.
- 10) **Adaptabilité aux climats chauds** : Les cellules solaires CIGS peuvent bien fonctionner dans des environnements chauds et ensoleillés, ce qui en fait une solution idéale pour les régions à fort ensoleillement.

#### ➤ II.4.2 Inconvénients

- 1) **Coûts initiaux de fabrication** : Bien que les coûts de production aient diminué, le CIGS nécessite toujours des investissements initiaux importants en raison de la complexité des procédés de fabrication.
- 2) **Sensibilité à l'environnement** : Le CIGS peut être sensible à l'humidité et à l'oxydation, ce qui peut affecter sa durabilité à long terme dans certains environnements.
- 3) **Stabilité à long terme** : Des efforts de recherche continus sont nécessaires pour améliorer la stabilité à long terme du CIGS et minimiser la dégradation des performances au fil du temps.
- 4) **Disponibilité de l'indium** : L'indium, l'un des composants clés du CIGS, peut devenir un facteur limitant en raison de sa disponibilité limitée sur le marché.
- 5) **Complexité des procédés** : Les techniques de fabrication du CIGS peuvent être complexes et nécessitent une expertise spécifique, ce qui peut limiter son adoption à grande échelle.
- 6) **Taille de marché limitée** : Le marché des cellules solaires CIGS reste relativement petit par rapport aux technologies solaires plus établies, ce qui peut limiter les investissements et l'innovation.
- 7) **Sécurité des matériaux** : Certains éléments du CIGS peuvent présenter des risques pour la santé lors de la manipulation ou du recyclage, nécessitant des précautions appropriées.



- 8) **Variabilité des performances** : La qualité et les performances du CIGS peuvent varier en fonction des processus de fabrication et des conditions environnementales, nécessitant un contrôle de qualité strict.
- 9) **Cycle de vie complet** : Bien que le CIGS soit considéré comme écologique, il est important de considérer l'ensemble du cycle de vie du matériau, y compris l'extraction des matériaux et le recyclage en fin de vie.
- 10) **Concurrence avec d'autres technologies** : Le CIGS doit faire face à une concurrence intense avec d'autres technologies solaires émergentes telles que le silicium cristallin et les cellules solaires à pérovskite.

### ❖ II.5 Conclusion

Ce chapitre est dédié aux cellules solaires fabriquées à partir de matériaux semi-conducteurs de type CIGS. Il est structuré en trois grandes parties. La première partie décrit le matériau CIGS et les propriétés de ses différentes compositions. La deuxième partie offre un bref aperçu des techniques de fabrication du CIGS. Enfin, la troisième partie présente la structure d'une cellule solaire en couche mince CIGS.

# **Chapitre III :**

**Simulations et Résultats.**

## ❖ Chapitre III : Simulations et Résultats

### ❖ III.1 Introduction

Dans le troisième chapitre on examine, à travers des simulations en utilisant le logiciel SCAPS, l'impact du choix du semi-conducteur de la couche tampon, son épaisseur et son dopage sur les performances des cellules solaires à base de CIGS. Nous étudions trois scénarios : le CdS, le CdTe et le Cu<sub>2</sub>O ainsi qu'une combinaison de CdS et CdTe comme couche tampon. Pour chaque cas, nous analysons l'effet des variations de dopage et d'épaisseur sur le fonctionnement de la cellule. Les résultats obtenus permettront d'optimiser la conception et d'améliorer l'efficacité des dispositifs photovoltaïques. Cette étude vise à fournir des pistes concrètes pour la fabrication de cellules solaires plus performantes.

### ❖ III.2 Logiciel de simulation SCAPS

#### ➤ III.2.1 Présentation SCAPS

SCAPS-1d est un logiciel de simulation unidimensionnel pour simuler les cellules solaires, développé par le département des systèmes électroniques et informatiques (ELIS) de l'Université de Gent en Belgique. Plusieurs chercheurs, dont Marc Burgelman, Koen Decock, Johan Verschraegen, Alex Niemegeers, et Stefaan Degraeve, ont contribué à son développement.

En premier lieu, ce logiciel a été développé pour modéliser des systèmes photovoltaïques comprenant des semi-conducteurs CuInSe<sub>2</sub> et de CdTe. Par la suite, ce programme a été élargi pour d'autres cellules à base de semi-conducteurs cristallins et amorphes [56,57].

Il permet ainsi de simuler des cellules solaires constituées au maximum de sept couches ayant chacune des propriétés différentes tel-que le profil de dopage, l'épaisseur, la distribution énergétique des niveaux donneurs ou accepteurs, l'absorption optique ...etc. Il calcule les bandes d'énergie, les concentrations et les

courants, les caractéristiques J-V, les caractéristiques alternatives (la capacité C en fonction de V et / ou de f) et la réponse spectrale (QE).

### ❖ III .3 Utilisation de logiciel

La page principale de ce code et illustrée sur la figure III-1

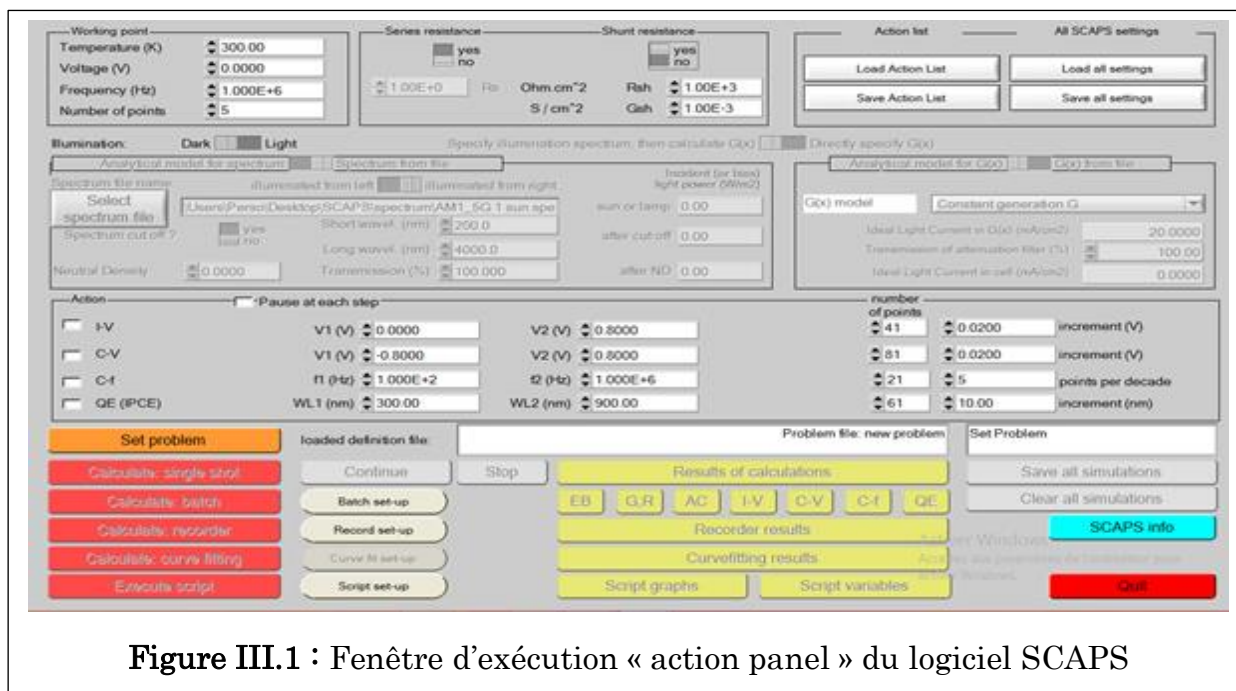


Figure III.1 : Fenêtre d'exécution « action panel » du logiciel SCAPS

#### ➤ III .3.1 Action panel

En premier lieu en lançant l'application, la fenêtre d'exécution qui est le menu principal s'ouvre (figure III-1).

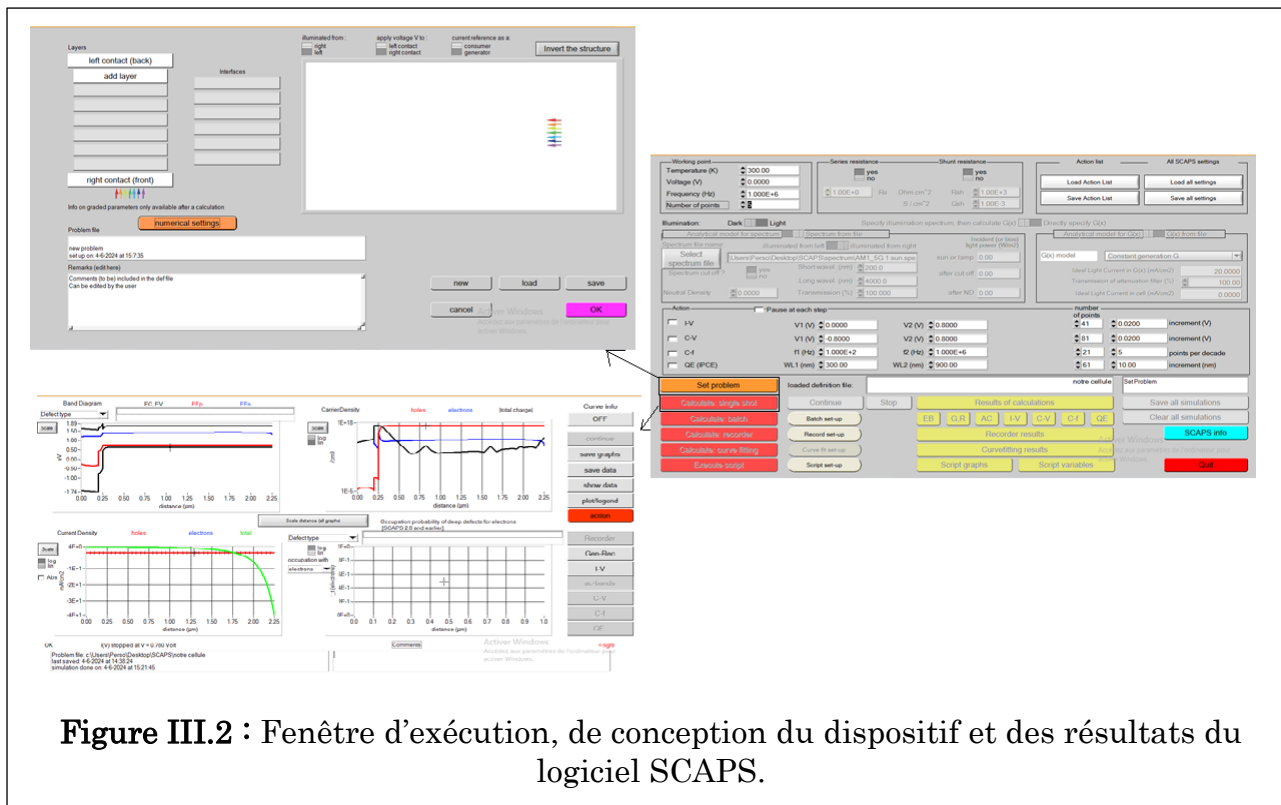


Figure III.2 : Fenêtre d'exécution, de conception du dispositif et des résultats du logiciel SCAPS.

dessus. En cliquant soit sur le bouton "set problem", ou bien "calculated".

La fenêtre d'exécution contient également trois blocs qui permettent de fixer les conditions de simulation : Bloc «working point», «illumination» et «séries and shunt résistance», présenté sur la figure III-3, III-4 et III-5 respectivement, plus un bloc pour la(les) grandeurs qu'on veut calculer « Bloc Action ».

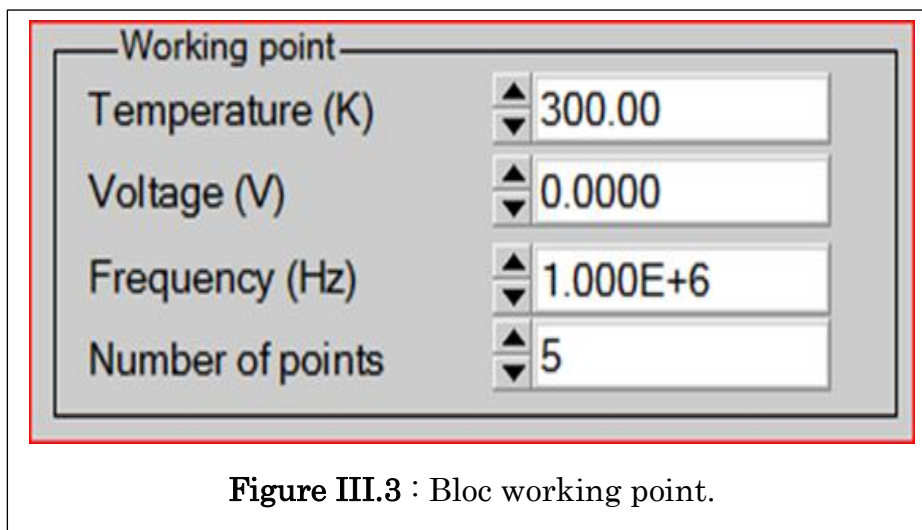


Figure III.3 : Bloc working point.

- **Bloc working point** : permet de spécifier les conditions de l'expérience et

les points de fonctionnement, ses principaux champs sont :

- ✓ **La température** : la température de la cellule, ou bien le dispositif photovoltaïque. Dans SCAPS, seulement  $N_c(T)$ ,  $N_v(T)$ , les vitesses thermiques, le voltage thermique  $kT$  et tous leurs dérivés sont les seuls variables qui ont une dépendance thermique explicite; on doit saisir manuellement, pour chaque valeur  $T$ , les paramètres du matériau correspondant.
  - ✓ **Le voltage  $V$**  : il ne concerne pas les simulations I-V et C-V. C'est le voltage de la polarisation DC dans une simulation C-f et  $QE(\lambda)$ . SCAPS commence toujours à 0V, et s'exécute au voltage du point de fonctionnement par un nombre d'étapes qu'on doit aussi spécifier.
  - ✓ **La fréquence  $f$**  : elle ne concerne pas les simulations I-V,  $QE(\lambda)$  et C-f. C'est la fréquence pour laquelle la caractéristique C-V est simulée.
- **Bloc illumination** : on peut contrôler les paramètres de l'illumination à travers des champs spécifiques à savoir : activation de la source lumineuse, le spectre monochromatique ou polychromatique et les longueurs d'onde y compris solaire etc...

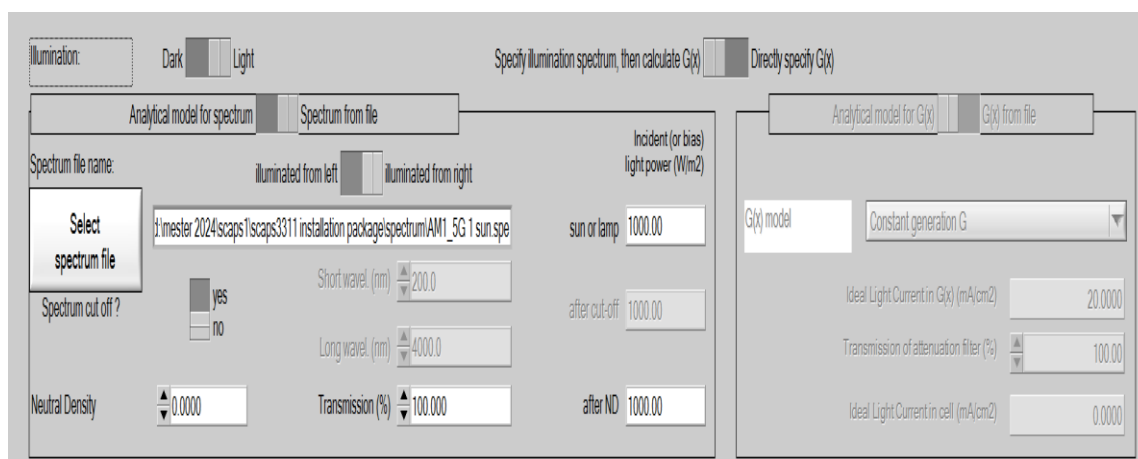
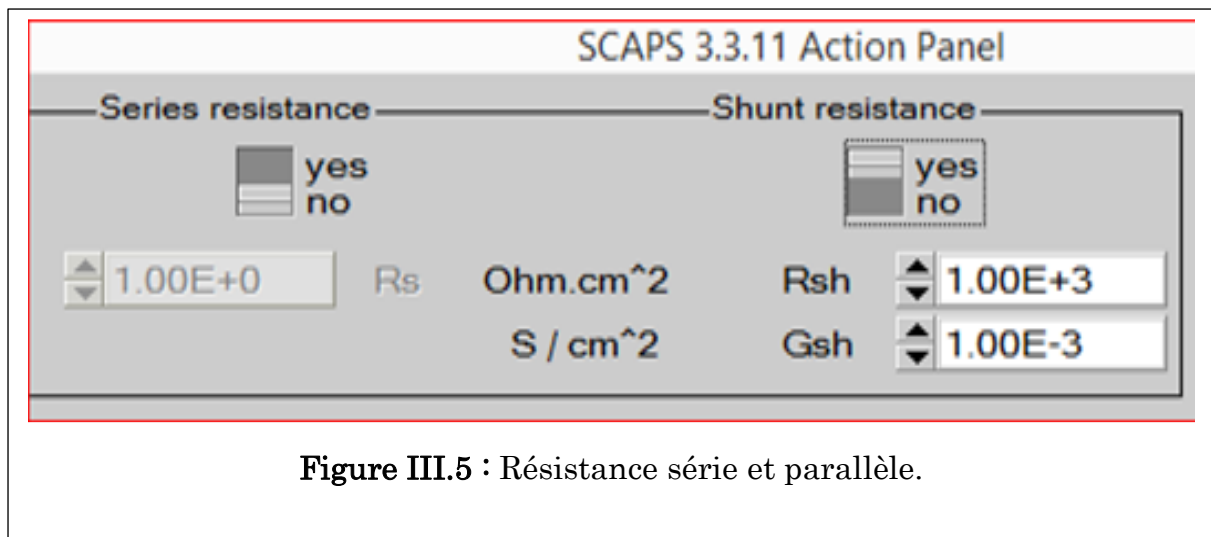


Figure III.4 : Bloc illumination.

- **Bloc Résistance série et shunt (parallèle)** : ces deux paramètres influencent sur la caractéristique I-V, elle représente les pertes ohmiques de la cellule (voir la figure III-4).



- **Bloc « Action »** :

On peut donc grâce à ce bloc sélectionner les grandeurs voulus afin de les simuler en effet :

- ✓ On peut mesurer la caractéristique I-V en replissant les champs associés : le point initial, le pas et le nombre de point qui s'affiche automatiquement.
- ✓ Idem pour la capacitance-voltage, capacitance-fréquence et la
- ✓ réponse spectrale.

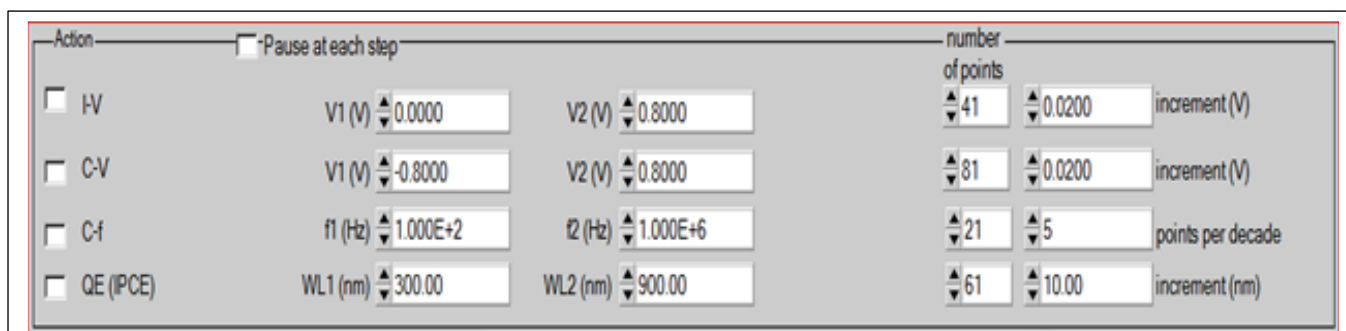


Figure III.6 : Action de bloc.

➤ III.3.2 Définition panel (définition du problème)

Cette fenêtre (voir la figure III-7) on peut définir le dispositif photovoltaïque via deux méthodes

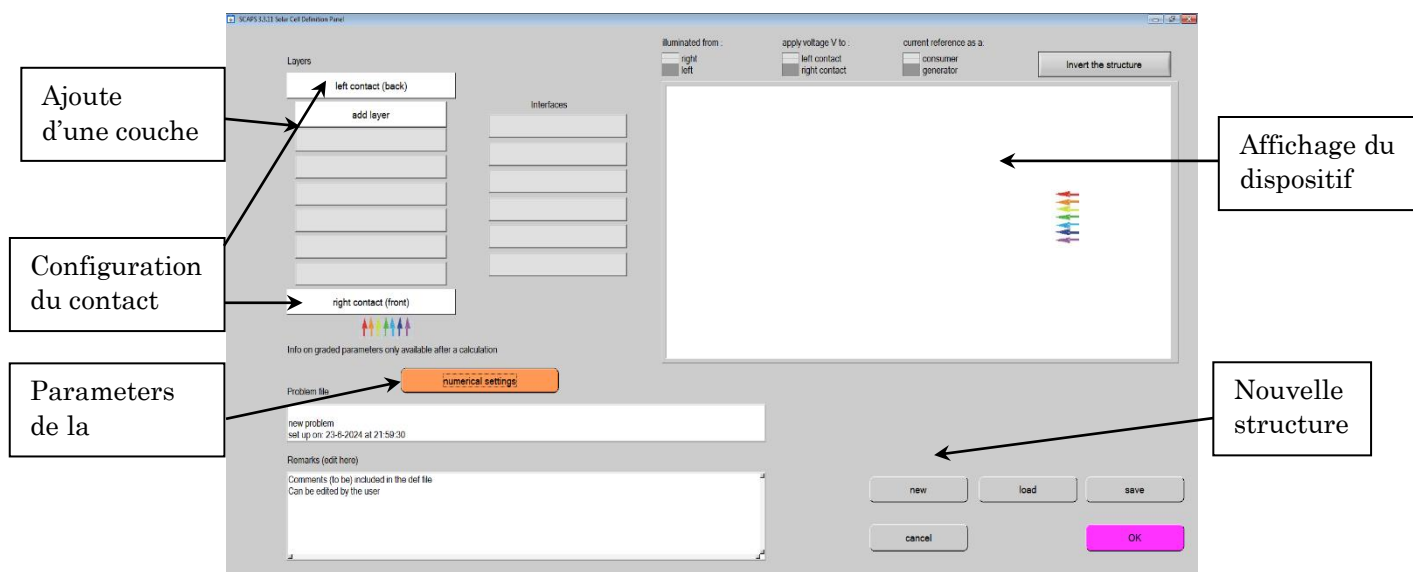


Figure III.7 : Fenêtre de définition, définition panel.

➤ New

Pour créer de nouveaux dispositifs photovoltaïques à travers des champs spécifiques, à savoir :

- **Add layer** : une fenêtre affiche lorsque l'utilisateur clique sur ce bouton. Elle contient plusieurs paramètres comme énergie de gap, permittivité électrique, l'affinité, dopage, type de dopage.



LAYER 1	CIGS
thickness ( $\mu\text{m}$ )	1.000
	uniform pure A (y=0)
The layer is pure A: y = 0, uniform	0.000
Semiconductor Property P of the pure material	pure A (y = 0)
bandgap (eV)	1.200
electron affinity (eV)	4.500
dielectric permittivity (relative)	10.000
CB effective density of states ( $1/\text{cm}^3$ )	2.000E+18
VB effective density of states ( $1/\text{cm}^3$ )	2.000E+18
electron thermal velocity (cm/s)	1.000E+7
hole thermal velocity (cm/s)	1.000E+7
electron mobility ( $\text{cm}^2/\text{Vs}$ )	5.000E+1
hole mobility ( $\text{cm}^2/\text{Vs}$ )	2.000E+1
<input type="checkbox"/> Allow Tunneling	
effective mass of electrons	1.000E+0
effective mass of holes	1.000E+0
no ND grading (uniform)	
shallow uniform donor density ND ( $1/\text{cm}^3$ )	0.000E+0
no NA grading (uniform)	
shallow uniform acceptor density NA ( $1/\text{cm}^3$ )	5.500E+15

Figure III.8 : Propriétés de la couche ajoutée.

**Right and left contact** : modifier les paramètres optiques et électriques des surfaces extérieurs droite et gauche de la cellule.

- **Numerical setting** : modifier les paramètres numériques de l'affichage des graphes, message d'erreurs et de la convergence.

#### ➤ LOAD

Pour sélectionner un dispositif déjà défini

#### ➤ III.3.3 Fenêtre des résultats « Result »

Après les calculs, SCAPS passe au panneau de bande d'énergie, présenté dans la figure III-9.

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

GRAPHS, SHOW, et les valeurs s'affichent par la suite à l'écran.

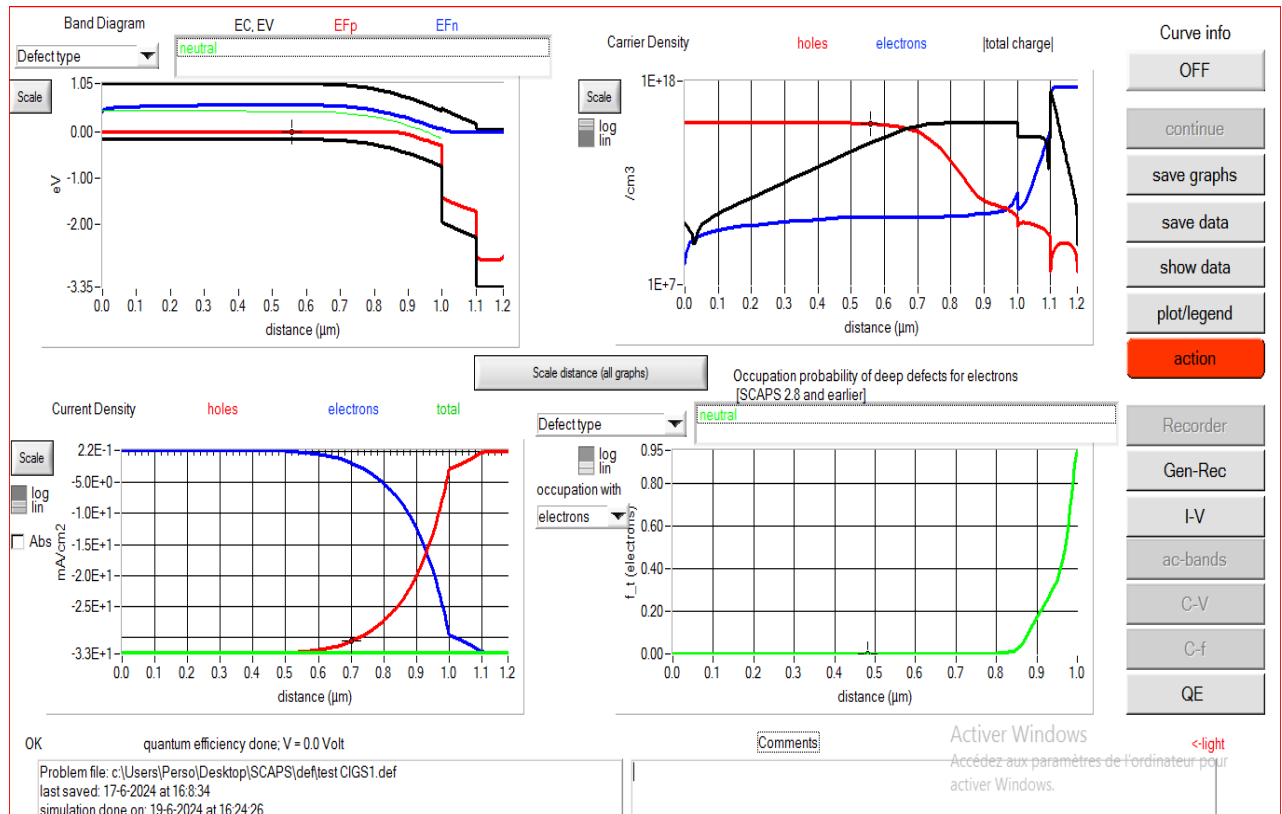


Figure III.9 : Panneau des bandes d'énergie.

Les grandeurs simulées sont :

- Caractéristique I-V.
- Capacitance en fonction de la tension « C-V ».
- Capacitance en fonction de la fréquence « C-f ».
- Rendement quantique Q-E
- Bande d'énergie « Energy band » et bande d'énergie en régime alternatif «AC Band ».

### ❖ III.4 Protocole de simulation

Le protocole de simulation d'une cellule solaire par logiciel SCAPS est comme suit :

- Etape 1 : après le lancement du logiciel et l'ouverture de la

fenêtre d'exécution on modifie les paramètres : la température, illumination...etc.

- Etape 2 : modifier la structure de la cellule à travers la fenêtre « définition panel ».
- Etape 3 : exécuter la simulation « calculate », noter les résultats de simulation ( $V_{oc}$ ,  $I_{cc}$ , FF,  $\eta$ ) dans la fenêtre « I-V panel », la caractéristique I-V. On peut encore afficher et copier ces résultats sous forme de tableau en appuyant « show »

### ❖ III.5 Présentation de la cellule étudiée

Nous utilisons une cellule solaire composée des hétérojonctions suivantes : ZnO /CdS /CdTe/ verre. Le schéma simplifié de l'hétéro structure est représenté sur la figure IV.10.

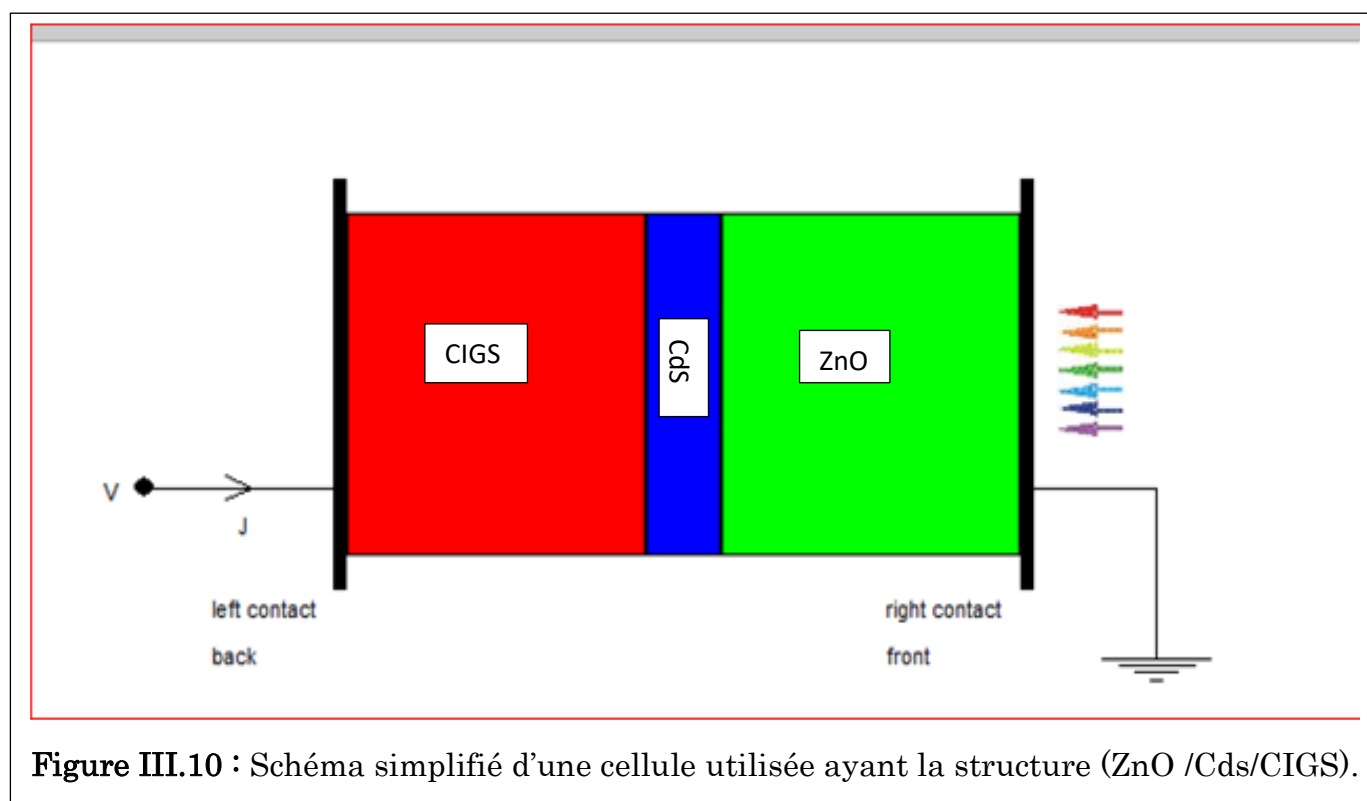


Figure III.10 : Schéma simplifié d'une cellule utilisée ayant la structure (ZnO /CdS/CIGS).

### ❖ III.6 Les paramètres du dispositif étudié

Les valeurs des constantes physique des matériaux utilisés pour lancer les calculs avec logiciel SCAPS sont prises de la littérature [38, 58, 59] et sont représentées dans le tableau III-1.

**Tableau III.1** Les paramètres physiques des matériaux utilisées pour simuler les cellules : ZnO/CdS/CIGS ; ZnO/CdTe/CIGS ; ZnO/Cu<sub>2</sub>O/CIGS.

Couche \ Propriété	Zno (pure)	n-Cds	p-CdTe	p-Cu <sub>2</sub> O	p- CIGS
Epaisseur(um)	0.05	V*	V*	V*	3
Energie de gap(eV)	3.4	2.4	1.45	2.17	1.2
Affinité électrique(eV)	4.6	4.5	4.28	3.2	4.5
Constante diélectrique	9	9	9	7.6	13.6
Densité N <sub>c</sub> (cm <sup>-3</sup> )	2.2 10 <sup>18</sup>	2.2 10 <sup>18</sup>	7.2 10 <sup>17</sup>	2.43 10 <sup>19</sup>	2.2 10 <sup>18</sup>
Densité N <sub>v</sub> (cm <sup>-3</sup> )	1.8 10 <sup>19</sup>	1.8 10 <sup>19</sup>	1.8 10 <sup>19</sup>	1.34 10 <sup>19</sup>	1.8 10 <sup>19</sup>
μ <sub>e</sub> (cm <sup>2</sup> /V.S)	100	100	500	200	100
μ <sub>h</sub> (cm <sup>2</sup> /V.S)	25	25	65	100	250
Donneur N <sub>D</sub> (cm <sup>-3</sup> )	1.0 10 <sup>17</sup>	V*	V*	V*	0
Accepteur N <sub>A</sub> (cm <sup>-3</sup> )	1.0 10 <sup>17</sup>	0	0	0	1.0 10 <sup>18</sup>

V \* : variable

### ❖ III.7 Résultats de la simulation

Pour analyser les performances des cellules solaires en fonction de l'épaisseur et du dopage des couches de matériaux on calcule la caractéristique (J-V), le potentiel de circuit ouvert (V<sub>OC</sub>), densité de courant de court-circuit (J<sub>SC</sub>),

le facteur de forme (FF) et le rendement électrique ( $\eta$ ). Les matériaux étudiés sont : Cds, CdTe, Cu<sub>2</sub>O, ainsi qu'une combinaison de Cds et CdTe.

Dans cette simulation on a négligé la présence des défauts sur les surfaces et les interfaces de la cellule. Les recombinaisons en volume ont été considérées très faibles.

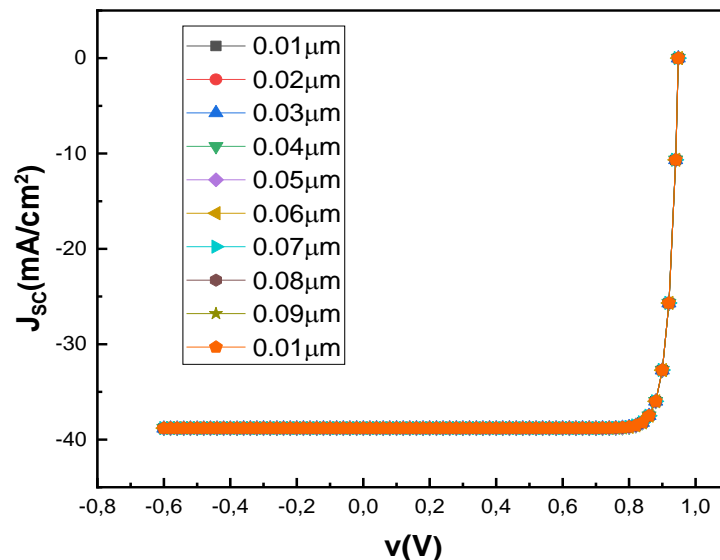
Les sections suivantes détaillent l'effet du dopage et de l'épaisseur sur le fonctionnement des cellules solaires.

### ➤ III.7.1 Effet de l'épaisseur et de dopage cas Cds

#### • III.7.1.1 L'effet de l'épaisseur

La variation de J-V pour différentes épaisseurs de la couche tampon est présentée sur la figure III-11.

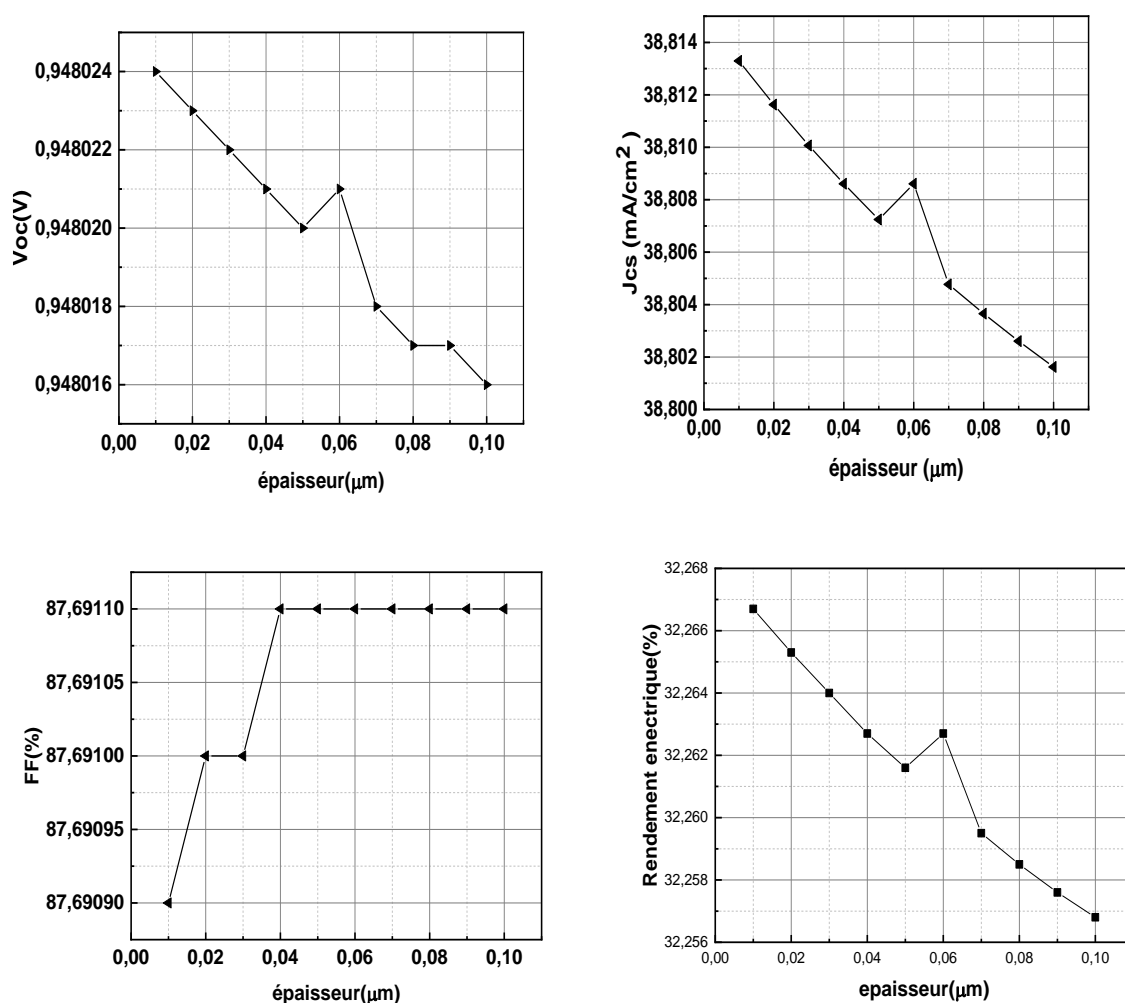
Les résultats montrent J-V est indépendant de la valeur de l'épaisseur ceci revient au négligence de la présence des défauts en surface et on volume de la cellule (y compris cette couche).



**Figure III.11 :** Simulation J-V pour différentes valeurs de l'épaisseur de la couche de CdS.

La figure III.12 montre la variation des principaux paramètres de la cellule en fonction de la couche tampon. En générale, d'après les résultats, le  $V_{OC}$ ,  $J_{SC}$ ,

FF et  $\eta$  ne dépendent pas vraiment de ce paramètre. Cependant, une légère variation de ce paramètre est constatée (ce qui peut nous permettre de prédire leur comportement si la présence des défauts est prise en compte) qu'on peu qualifiée comme suite :



**Figure III.12** : Simulation des paramètres Voc, Jsc, FF et  $\eta$  en fonction de variation de l'épaisseur de la couche de CdS.

- Le Voc et le Jsc diminuent progressivement avec l'augmentation de l'épaisseur, ce qui montre une perte d'efficacité dans la génération et la collecte des porteurs de charge.
- Le FF augmente progressivement avec l'augmentation de l'épaisseur,

jusqu'à environ  $0,04 \mu\text{m}$  reste constant jusqu'à  $0,1 \mu\text{m}$ .

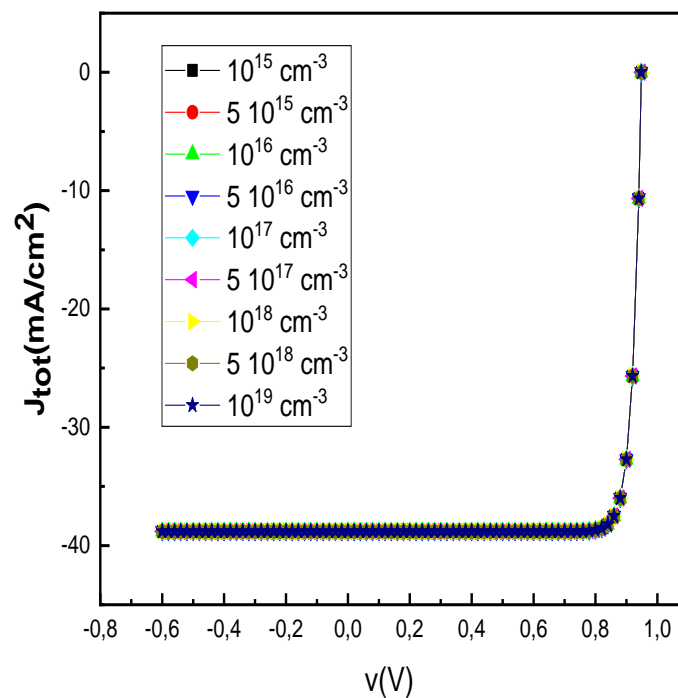
- Le Rendement électrique montre une diminution continue avec l'augmentation de l'épaisseur de l'absorbeur.

Ces observations suggèrent qu'il est crucial de contrôler l'épaisseur de l'absorbeur dans les cellules solaires de CdS pour optimiser leur performance, en évitant des épaisseurs trop importantes qui augmenteraient les pertes internes et diminueraient l'efficacité globale.

### III.7.1.2 L'effet de dopage

En général le dopage influe sur les caractéristiques de la cellule car il fait varier le niveau de Fermi et aussi il altère l'activité électrique des défauts.

Vu la négligence la négligence de la présence des défauts la caractéristique J-V obtenue dans notre varie pas avec la variation du dopage comme le montre la figure III-13.



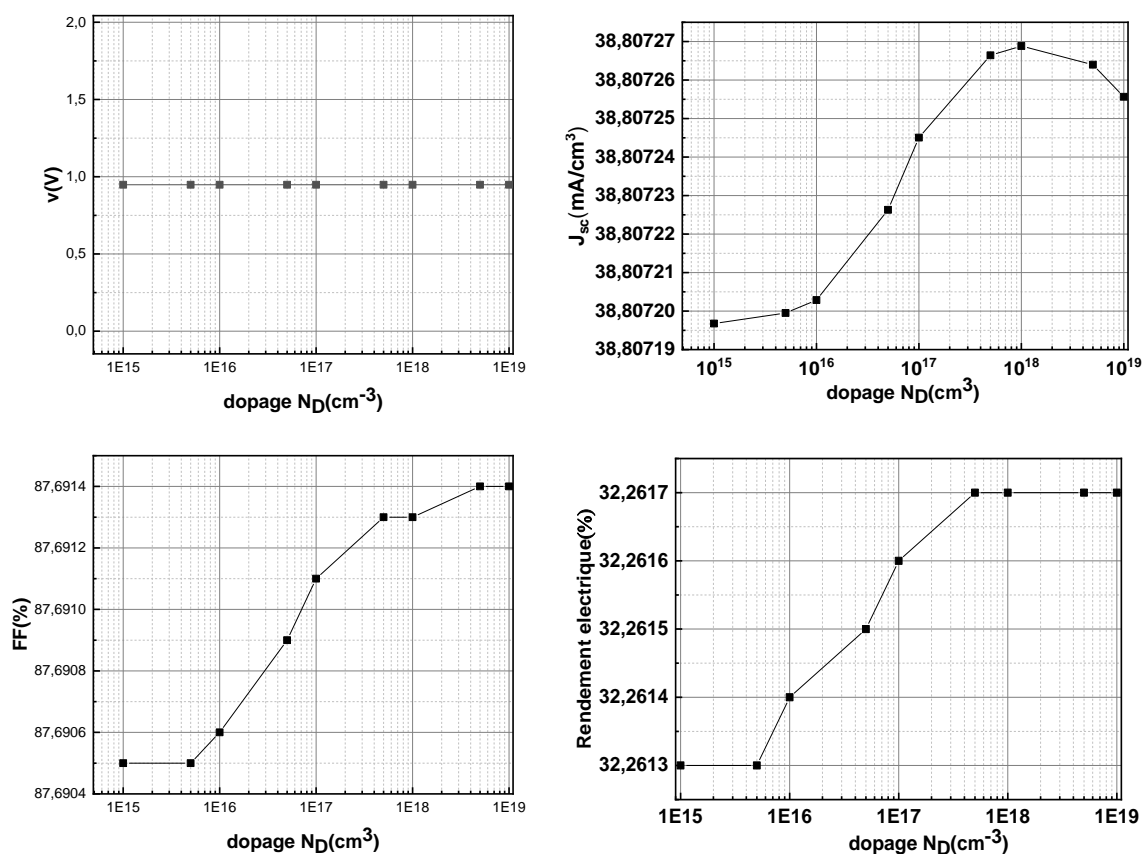
**Figure III.13 :** Simulation J-V pour différentes valeurs de la concentration du dopage de la couche CdS.

La superposition des courbes pour différentes concentrations de dopage indique que, dans la plage de tensions et de dopages étudiée, la concentration de dopage n'a pas un effet significatif sur le comportement J-V.

La variation de  $V_{OC}$ ,  $J_{SC}$ , FF et  $\eta$  en fonction du dopage de la couche tampon est présenté sur la figure III-14. La variation de ces paramètres peut être exprimée comme suite :

- **$V_{OC}$**  reste quasiment constante à environ 0.95 V, indépendamment de la variation de la concentration de dopage ( $N_D$ ).
- **$J_{SC}$**  augmente avec la concentration de dopage jusqu'à environ  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  et atteint un pic à environ  $38.80727 \text{ mA/cm}^2$ , puis commence à diminuer légèrement.
- **FF** augmente progressivement avec l'augmentation de la concentration de dopage, atteignant un maximum d'environ 87.6914% aux plus hautes concentrations de dopage.
- **$\eta$**  : suit une tendance similaire au FF, augmentant avec la concentration de dopage jusqu'à atteindre un pic d'environ 32.2617% pour les concentrations les plus élevées.





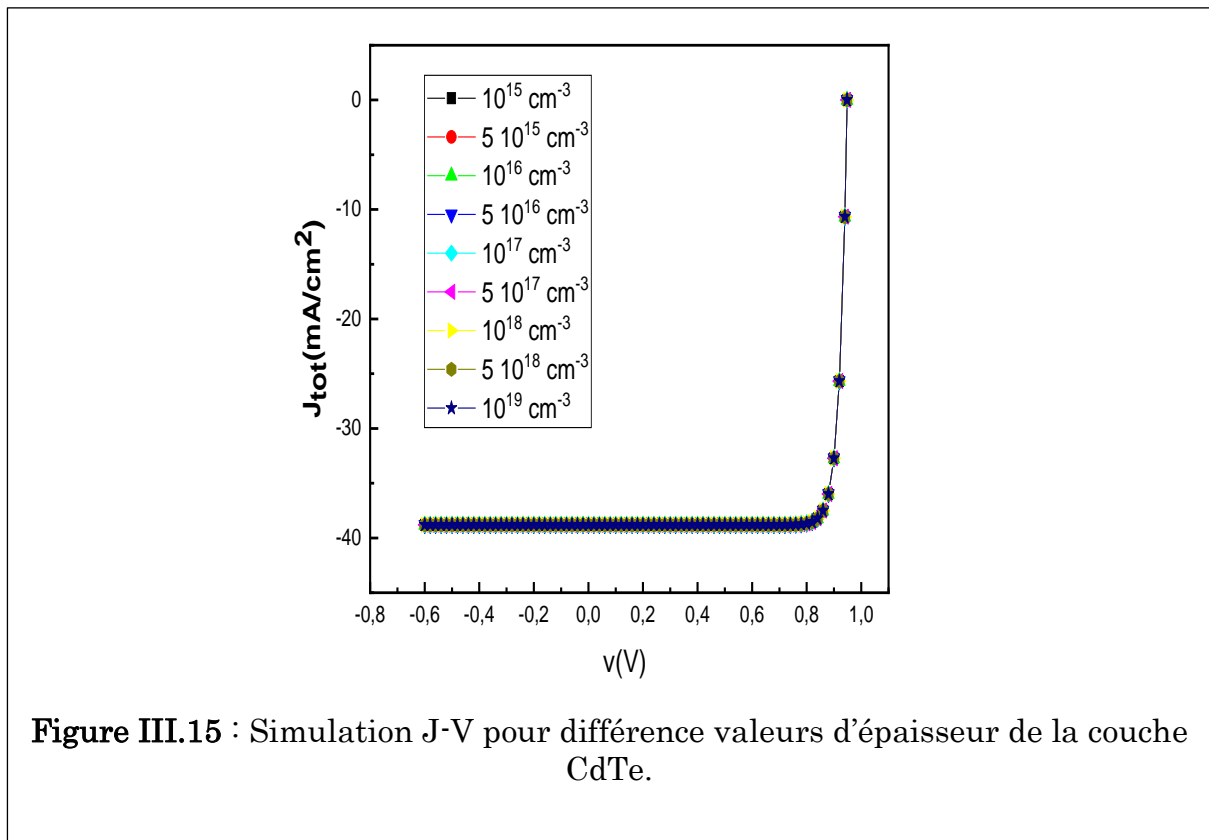
**Figure III.14 :** Simulation des paramètres  $V_{oc}$ ,  $J_{sc}$ , FF et  $\eta$  en fonction de variation du dopage de la couche de CdS.

Ces observations montrent que la performance de la cellule solaire en termes de  $J_{sc}$ , FF, et rendement électrique ( $\eta$ ) est influencée par la concentration de dopage de la couche de CdS, et le meilleur rendement est obtenu avec les fortes valeurs de concentration de dopant.

### ➤ III.7.2 Effet de l'épaisseur et de dopage cas CdTe

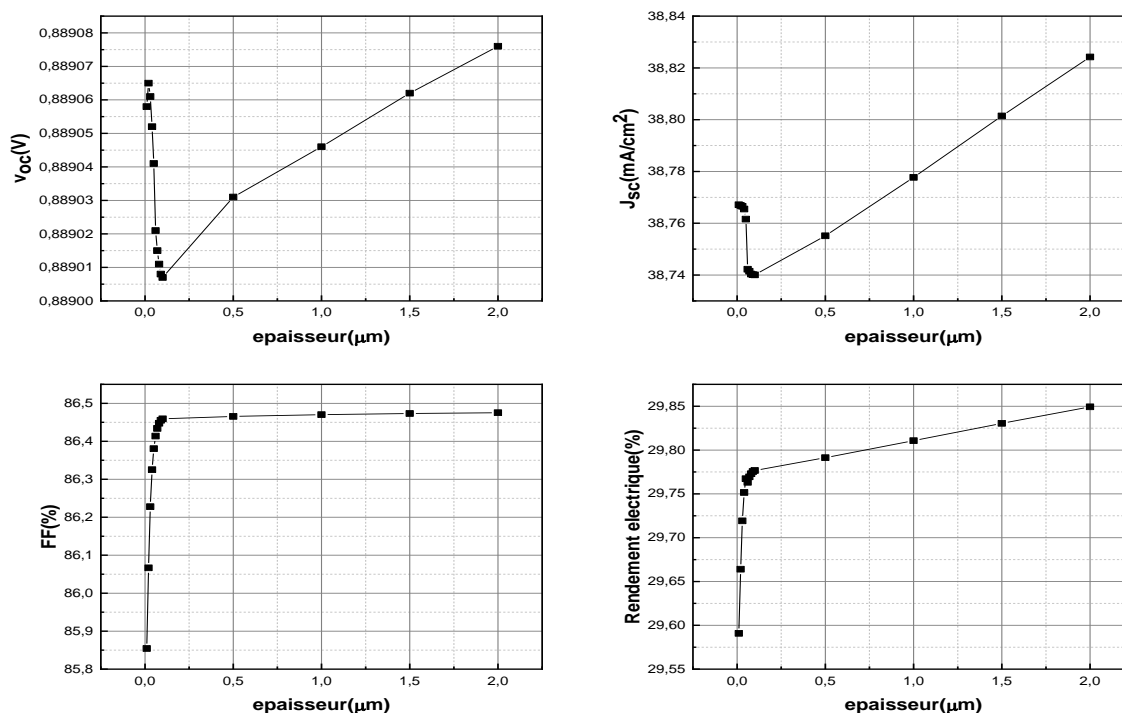
#### ▪ III.7.2.1 L'effet de l'épaisseur

Les variations d'épaisseur du CdTe dans cette étude n'ont qu'un effet marginal sur les caractéristiques I-V des cellules solaires (figure III.15). Cela suggère que pour des applications où une réduction d'épaisseur est nécessaire pour des raisons de coût ou de matériaux, les performances électriques peuvent rester pratiquement stables. Les épaisseurs les plus faibles (0,01 à 0,1  $\mu\text{m}$ ), il y a un léger décalage des courbes J-V pour les faibles tensions de polarisations, suggérant une légère diminution de  $J_{sc}$  due à une collecte moins efficace des porteurs de charge.



La dépendance de  $V_{OC}$ ,  $J_{SC}$ , FF et  $\eta$  en fonction du dopage de la couche tampon est présentée sur la figure III-15. La variation pour le cas du CdTe et plus

Prononcer par rapport à celui de Cds. De manière générale la variation de ces paramètres en fonction de l'épaisseur peut être exposée comme suite :



**Figure III.16** : Simulation des paramètres Voc, Jsc, FF et  $\eta$  en fonction de variation de l'épaisseur de la couche de CdTe.

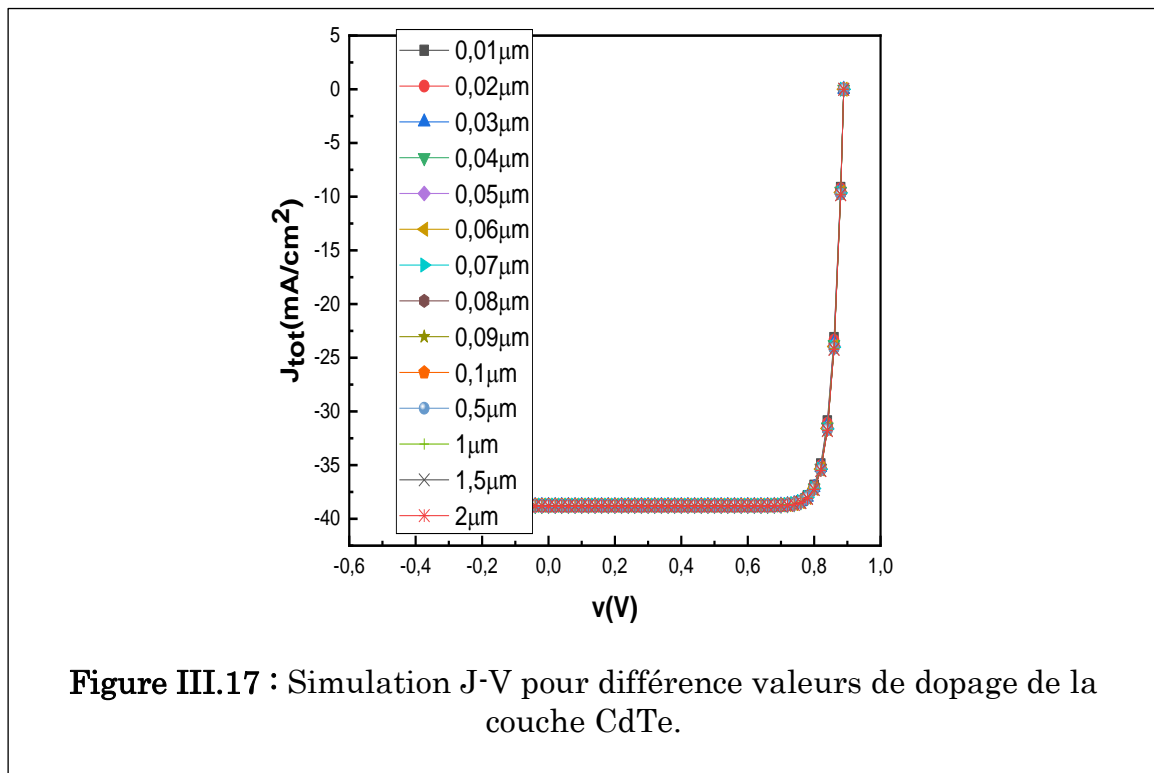
- **Jsc** : Une augmentation significative de Jsc est observée, passant de 38,74 mA/cm<sup>2</sup> à environ 38,84 mA/cm<sup>2</sup> lorsque l'épaisseur de l'absorbeur augmente. Cela est attribuable à une meilleure absorption de la lumière avec une épaisseur accrue, augmentant ainsi la génération de porteurs de charge.
- **FF** : Reste pratiquement constant, avec une légère augmentation. Cela suggère que les pertes résistives et les mécanismes de recombinaison aux contacts restent stables malgré les variations d'épaisseur de l'absorbeur.
- **$\eta$**  : Montre une amélioration notable, passant de 29,65 % à environ 29,85 % en fonction de l'augmentation de l'épaisseur. Cette amélioration est

principalement due à l'augmentation de  $J_{sc}$ , puisque  $V_{oc}$  et  $FF$  montrent des variations relativement modestes.

Pour optimiser les performances des cellules solaires de CdTe, augmenter l'épaisseur de l'absorbeur est une stratégie efficace pour augmenter  $J_{sc}$  et le rendement global.

### III.7.2.2 L'effet de dopage

Les courbes J-V ne présentent pas de dépendance avec le dopage de la couche tampon pour le cas de CdTe (figure III-17).

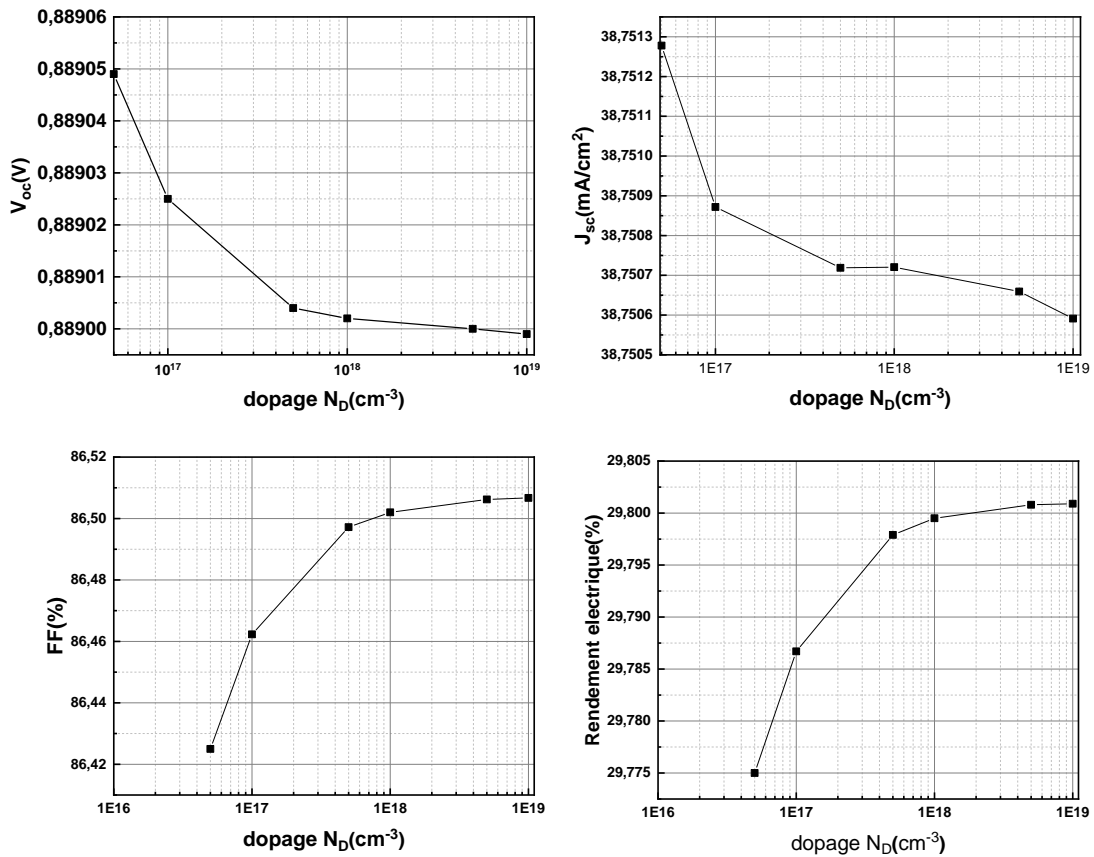


De même pour les valeurs  $V_{oc}$ ,  $J_{sc}$ ,  $FF$  et  $\eta$  une légère variation est observée pour le cas des faibles valeurs de dopage (figure III-18). Néanmoins, on observe une amélioration du  $FF$  avec l'augmentation du dopage ce qui a conduit à une amélioration du rendement. De manière générale la variation des différents paramètres est comme suit :

- **$V_{oc}$**  (Tension en circuit ouvert) : La tension  $V_{oc}$  diminue légèrement avec l'augmentation de la concentration de dopage, passant de 0.88905 V à des

concentrations plus faibles à environ 0.88900 V à des concentrations plus élevées.

- $J_{sc}$  (Densité de courant de court-circuit) : La densité de courant  $J_{sc}$  diminue également avec l'augmentation de la concentration de dopage, passant de 38.7513 mA/cm<sup>2</sup> à environ 38.7506 mA/cm<sup>2</sup> pour les concentrations les plus élevées.



**Figure III.18 :** Simulation des paramètres Voc, Jsc, FF et  $\eta$  en fonction de variation du dopage de la couche de CdTe.

- **FF :** Le facteur de remplissage FF augmente avec la concentration de dopage, atteignant un maximum d'environ 86.52% aux plus hautes concentrations de dopage.
- **$\eta$  :** Le rendement électrique augmente avec la concentration de

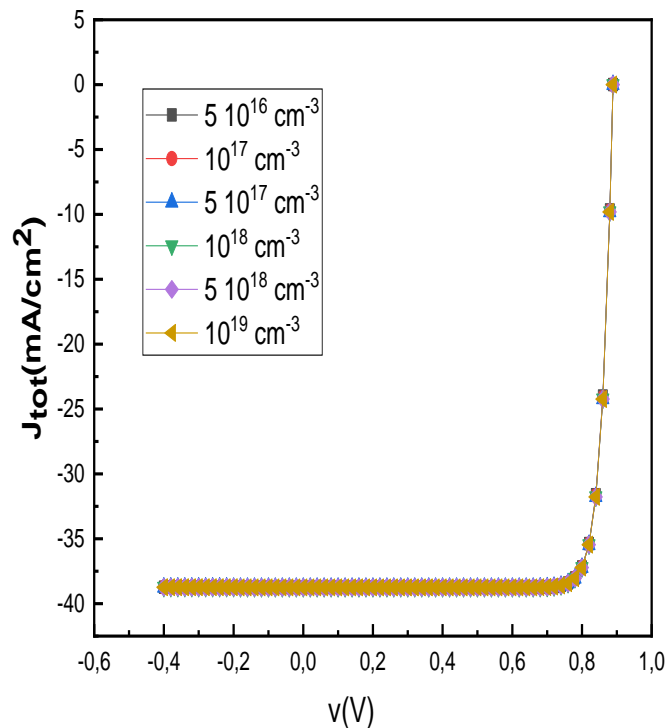
dopage, passant de 29.775% à des concentrations plus faibles à environ 29.800% à des concentrations plus élevées.

Ces observations montrent que la performance de la cellule solaire en termes de **Voc**, **Jsc**, **FF**, et rendement électrique ( $\eta$ ) est significativement influencée par la concentration de dopage de la couche de **CdTe**. Le rendement est obtenu avec les fortes concentrations de dopant.

### ➤ III.7.3 Effet de l'épaisseur et de dopage cas $\text{Cu}_2\text{O}$

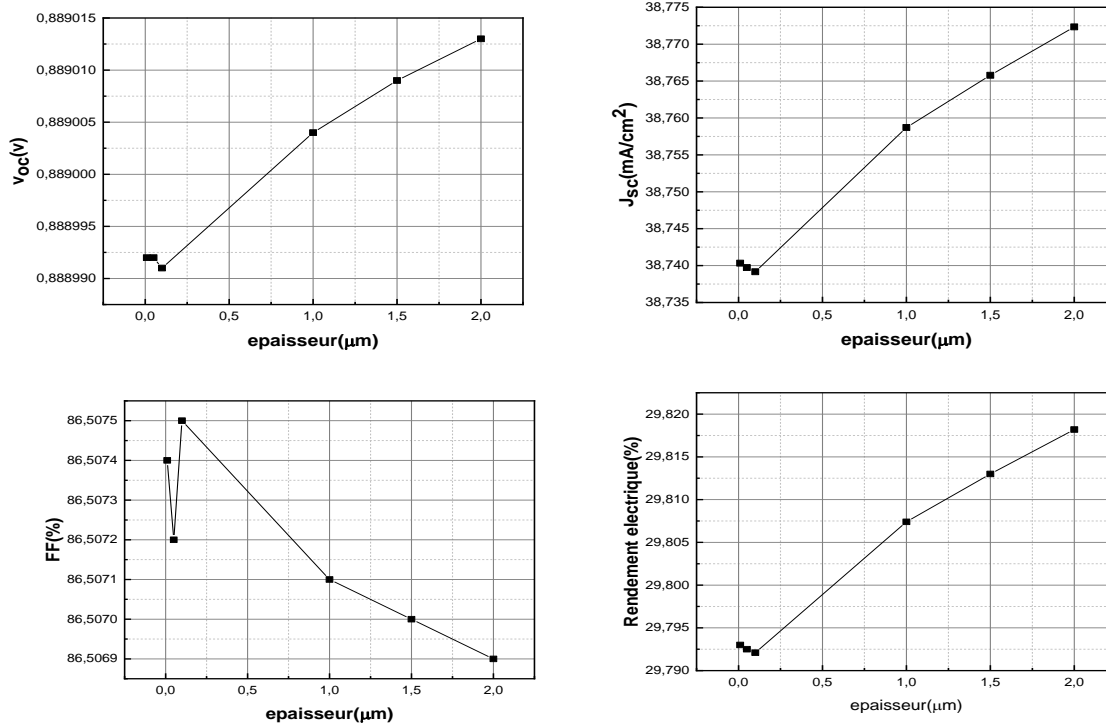
#### ▪ III.7.3.1 Effet de l'épaisseur

Les courbes J-V ne présentent pas de variation avec l'épaisseur de la couche tampon pour le cas de  $\text{Cu}_2\text{O}$  (figure III-19).



**Figure III.19 :** Simulation J-V pour différentes valeurs d'épaisseur de la couche  $\text{Cu}_2\text{O}$ .

La figure III.20 illustre la variation de  $V_{oc}$ ,  $J_{sc}$ , FF et  $\eta$  en fonction du dopage de la couche tampon. La dépendance pour le cas du  $Cu_2O$  n'est pas significative à cause de négligence de la présence des défauts.



**Figure III.20** : Simulation des paramètres  $V_{oc}$ ,  $J_{sc}$ , FF et  $\eta$  en fonction de variation De l'épaisseur de la couche de  $Cu_2O$ .

En générale, on peut présenter la variation de ces paramètres en fonction de l'épaisseur comme suit.

- **$V_{oc}$**  : présente une légère augmentation avec l'épaisseur, passant de 0,888992 V pour une épaisseur de 0,01  $\mu\text{m}$  à environ 0,889013 V pour une épaisseur de 2  $\mu\text{m}$ . L'augmentation n'est pas strictement linéaire.
- **$J_{sc}$**  : augmente progressivement avec l'épaisseur, passant de 38,735  $\text{mA}/\text{cm}^2$  pour une épaisseur de 0,01  $\mu\text{m}$  à environ 38,775  $\text{mA}/\text{cm}^2$  pour 2  $\mu\text{m}$ . Cette variation est relativement linéaire et continue.
- **FF** : diminue légèrement avec l'augmentation de l'épaisseur. Cette

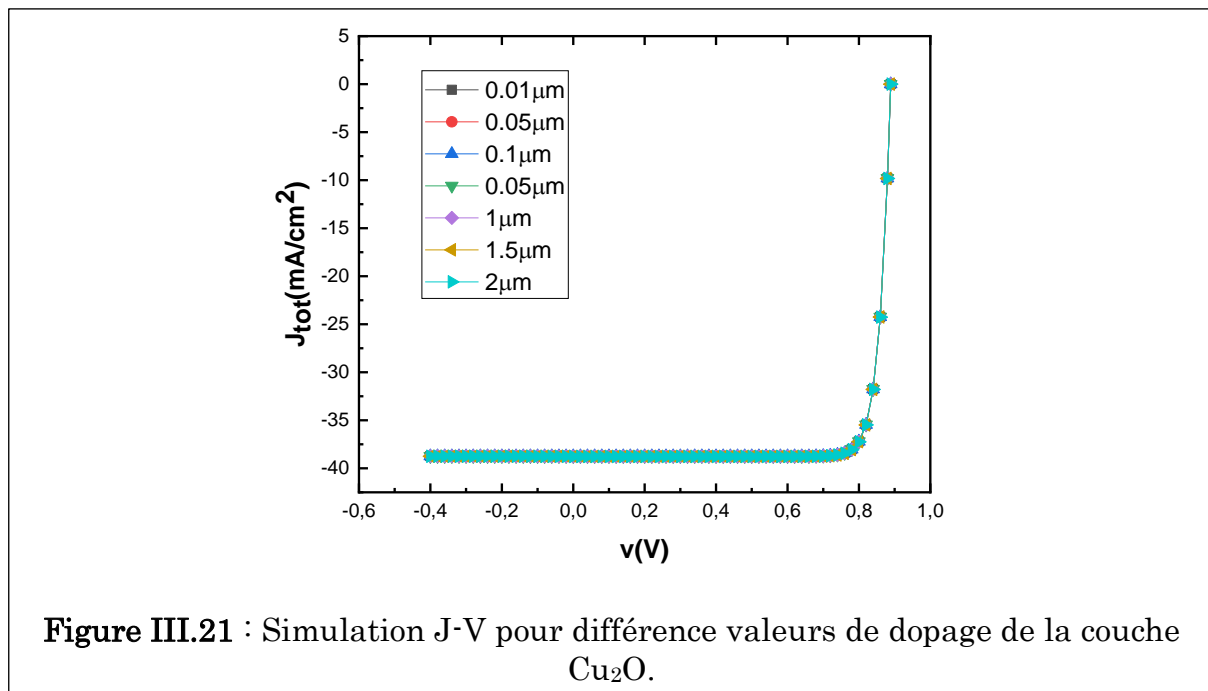
diminution, bien que faible, devient plus notable à partir de 1  $\mu\text{m}$ .

- $\eta$  : augmente avec l'épaisseur, passant de 29,795 % pour une épaisseur de 0,01  $\mu\text{m}$  à environ 29,820 % pour une épaisseur de 2  $\mu\text{m}$ . Cette augmentation est continue et quasi linéaire.

L'augmentation de l'épaisseur de l'absorbeur  $\text{Cu}_2\text{O}$  améliore globalement les performances des cellules solaires en augmentant la tension de circuit ouvert et le courant de court-circuit, ce qui conduit à un meilleur rendement de conversion.

### III.7.3.2 Effet de dopage

Pour le cas de  $\text{Cu}_2\text{O}$ , les courbes J-V ne sont pas sensible à la variation de la valeur du dopage de la couche tampon (figure III.21).



Comme dans les situations antérieures, la dépendance de  $V_{OC}$ ,  $J_{SC}$ ,  $FF$  et  $\eta$  en fonction du dopage de la couche tampon n'est pas significative à cause de la négligence de la présence des défauts (La figure III.22). La variation de ces paramètres en fonction du dopage peut être présentée de manière suivante :



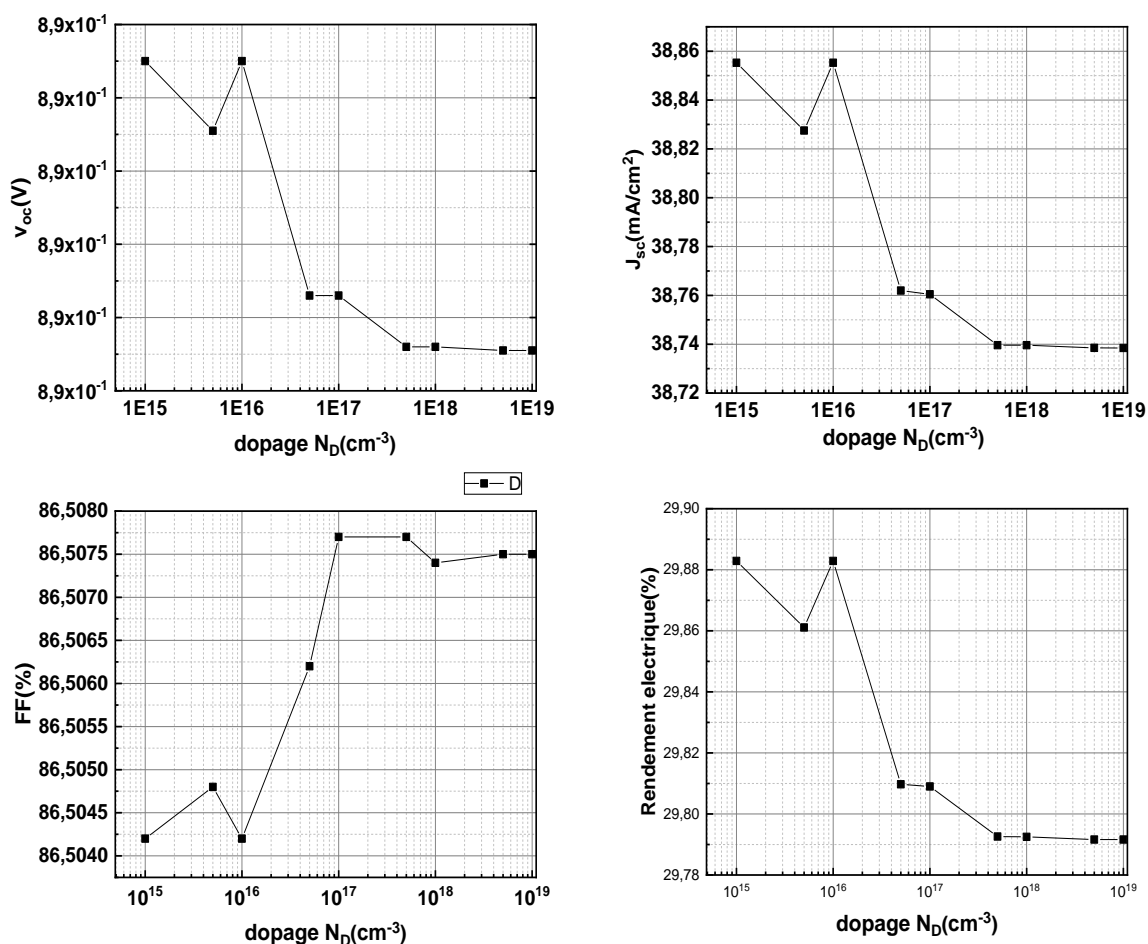


Figure III.22 : Simulation des paramètres  $V_{oc}$ ,  $J_{sc}$ , FF et  $\eta$  en fonction de variation du dopage de la couche de  $\text{Cu}_2\text{O}$ .

- $V_{oc}$ , diminue avec l'augmentation de  $N_D$ , ensuite il se stabilise pour le cas de forte concentration.
- $J_{sc}$  suit la même tendance de  $V_{oc}$ . Elle diminue avec l'augmentation de  $N_D$  et elle est stable pour les fortes valeurs de ce dernier.
- FF commence à augmenter avec l'augmentation de la concentration de dopage, atteignant un pic à environ  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , puis se stabilise.
- $\eta$  diminue progressivement avec l'augmentation de la concentration de dopage.

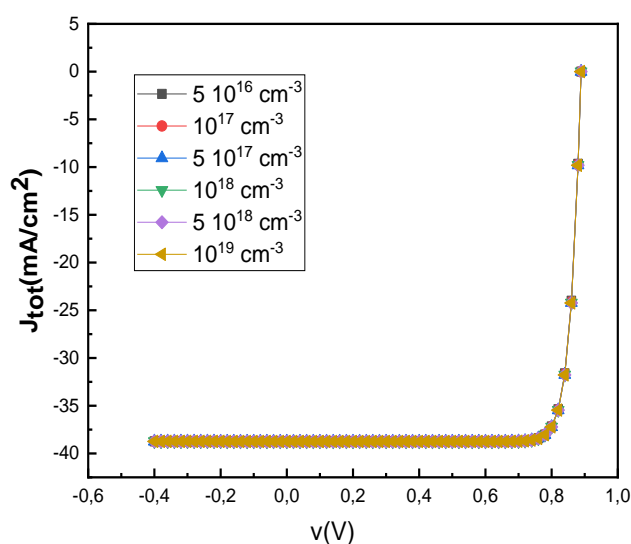
Ces résultats montrent que la performance de la cellule solaire en termes de **Voc**, **Jsc**, **FF**, et rendement électrique ( $\eta$ ) est significativement influencée par la concentration de dopage de la couche de **Cu<sub>2</sub>O**. Les meilleures performances sont obtenues avec les faibles dopages.

### ➤ III.7.4 Effet de l'épaisseur et de dopage cas de superposition (Cds et CdTe)

Dans le but d'optimiser les performances de la cellule, On propose de créer une couche tampon en superposant deux couches de CdS/CdTe. Il s'agit de créer un gradient dans la bande interdite de la cellule qui permettra d'améliorer l'efficacité d'absorption du spectre optique d'une part et d'autre, afin d'obtenir un bon alignement du niveau de Fermi.

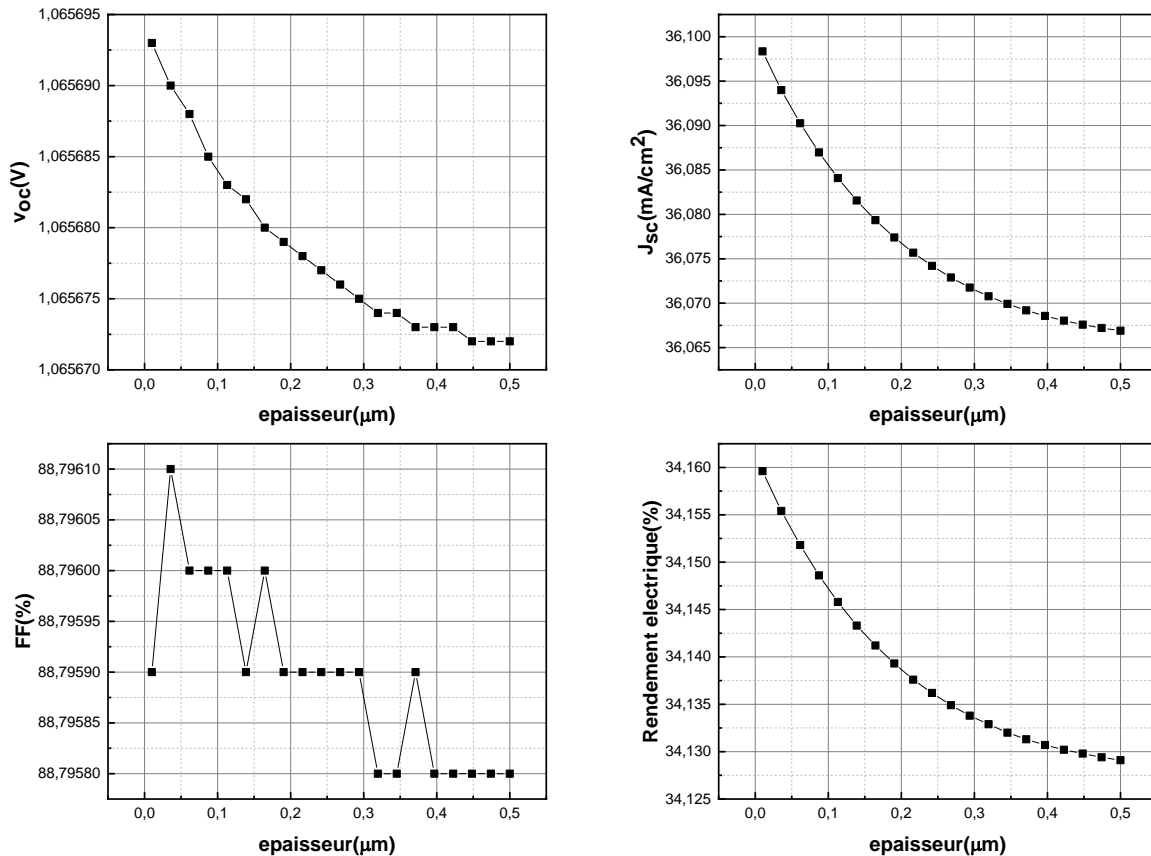
#### ▪ III.7.4.1 Effet de l'épaisseur

Les courbe J-V dans ce cas aussi ne présentent pas variation sensible la variation de l'épaisseur de la couche tampon en variant l'épaisseur de la couche CdTe (figure III.23).



**Figure III.23** : Simulation J-V pour différentes valeurs de l'épaisseur de la couche CdS/CdTe.

Comme précédemment, la dépendance du  $V_{oc}$ ,  $J_{sc}$ ,  $FF$  et  $\eta$  avec la concentration du dopage de la couche tampon n'est pas significative en raison des idéalizations de la cellule imposées (Figure III-22). De manière générale, on peut présenter la variation de ces paramètres en fonction du dopage de la façon suivante :



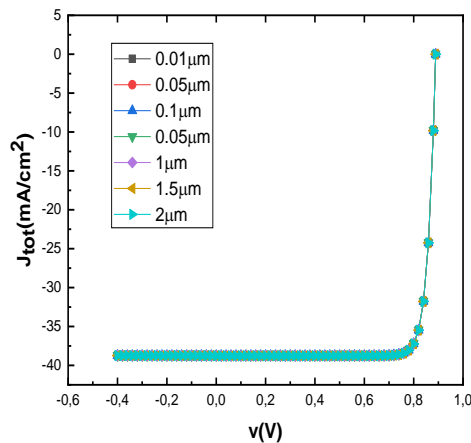
**Figure III.14 :** Simulation des paramètres  $V_{oc}$ ,  $J_{sc}$ ,  $FF$  et  $\eta$  en fonction de variation de l'épaisseur de la couche de Cds/CdTe.

- **$V_{oc}$**  : diminue avec l'augmentation de l'épaisseur.
- **$J_{sc}$**  : diminue également de manière que  $V_{oc}$  avec l'augmentation de l'épaisseur.
- **$FF$**  : fluctue légèrement avec l'augmentation de l'épaisseur, mais globalement, il reste relativement stable autour de 88.79580%.
- **$\eta$**  : diminue avec l'augmentation de l'épaisseur. Le rendement passe de près de 34.160% pour les épaisseurs les plus faibles à environ 34.129% pour une épaisseur de 0.5  $\mu\text{m}$ .

De manière générale, les performances de la cellule se dégradent avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche tampon.

#### III.7.4.2 Effet de dopage

La figure III-25 présente la variation J-V pour différentes valeurs de la concentration de dopant de la couche tampon (on varie le dopage des deux couches au même temps). Pour ce cas aussi, la variation de J-V avec le dopage est négligeable.



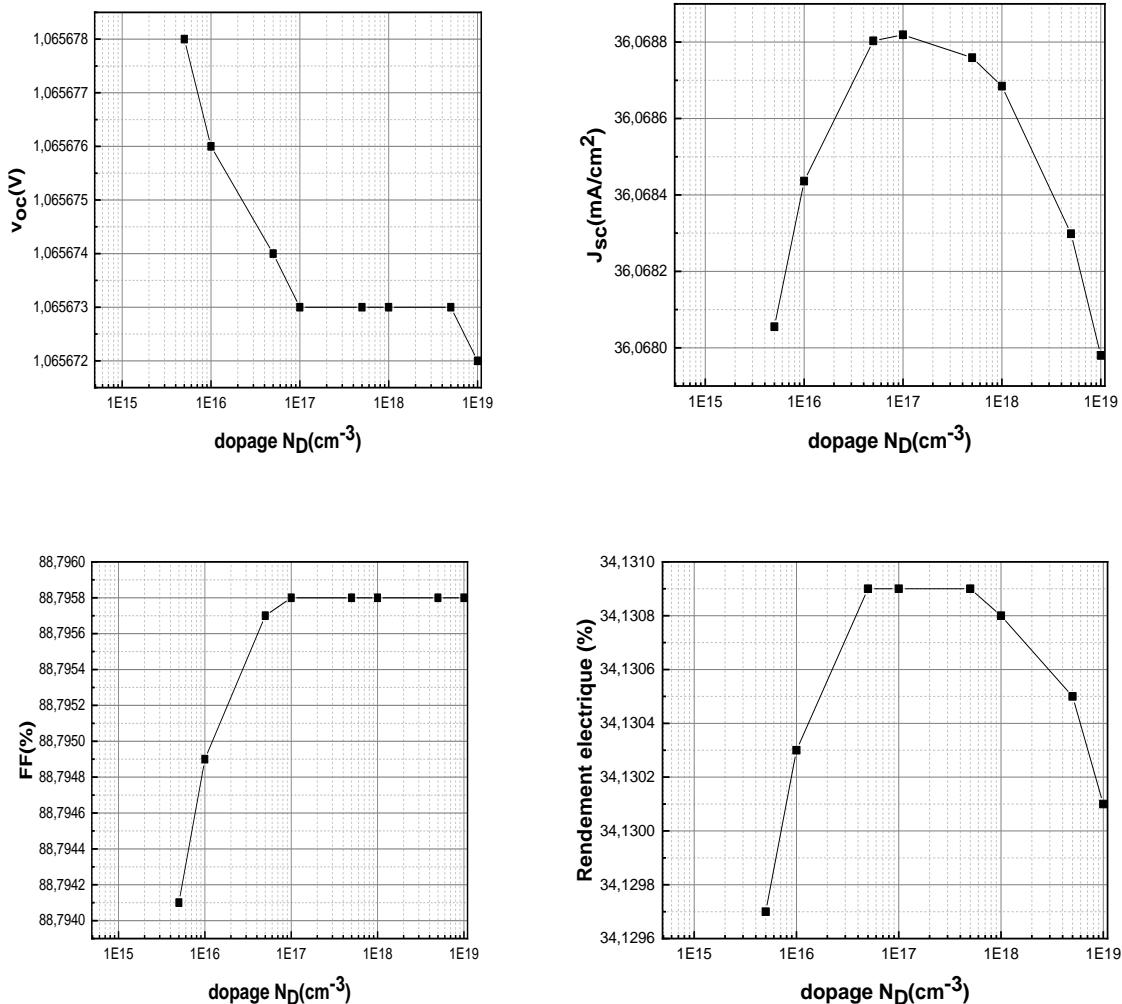
**Figure III.25 :** Les simulations J-V pour différentes valeurs de la concentration du dopage.

La figure III-26 présente la variation de  $V_{OC}$ ,  $J_{SC}$ ,  $FF$  et  $\eta$  en fonction du dopage de la couche tampon. La dépendance pour ce cas n'est pas significative. En général, la variation de ces paramètres en fonction du dopage peut être résumée comme suit :

- $V_{OC}$  diminue avec l'augmentation de  $N_d$ . Il se stabilise lorsque le dopage est compris entre  $10^{17}$  et  $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , puis diminue à nouveau.
- $J_{SC}$  augmente avec le dopage jusqu'à  $N_d = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , puis diminue avec une augmentation supplémentaire de  $N_d$ . Un dopage trop élevé peut augmenter la recombinaison des porteurs de charge, réduisant ainsi le courant de court-

circuit. Cela indique qu'un dopage optimal est nécessaire pour maximiser  $J_{sc}$ .

- FF augmente avec l'augmentation du dopage et se stabilise pour les valeurs élevées de ce dernier.
- $\eta$  augmente avec le dopage, atteignant un plateau entre  $10^{17}$  et  $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , puis diminue. Cela suggère qu'un dopage optimal pour maximiser l'efficacité électrique,  $J_{sc}$  et le facteur de remplissage se situe autour de  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , tandis que  $V_{oc}$  reste constant.



**Figure III.26 :** Simulation des paramètres  $V_{oc}$ ,  $J_{sc}$ , FF et  $\eta$  en fonction de variation du dopage de la couche de CdS/CdTe.

Ces résultats soulignent l'importance de l'optimisation du dopage pour maximiser les performances des cellules solaires **CdS/CdTe**, en particulier pour améliorer **Jsc**, **FF**, et le rendement global de conversion.

### ❖ III.8 Conclusion

Dans ce chapitre on a étudié par des simulations SCAPS, l'impact de l'épaisseur et du dopage des couches tampons sur les performances des cellules solaires à base de CGIS avec différentes couches tampon. En explorant divers scénarios avec Cds, CdTe, Cu<sub>2</sub>O et une combinaison (CdS et CdTe), nous avons identifié des configurations optimales pour chaque cas. Les résultats obtenus permettent d'optimiser la conception et d'améliorer l'efficacité des dispositifs photovoltaïques. Cette étude offre des pistes concrètes pour fabriquer des cellules solaires plus performantes.

# Conclusion Général

## ❖ Conclusion Générale

L'optimisation des paramètres de la couche absorbante revêt une importance cruciale pour augmenter l'efficacité des cellules solaires à base de  $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$  (CIGS) tout en réduisant les coûts de production. Cette étude, menée à l'aide du logiciel SCAPS-1D, explore plusieurs configurations de couches tampon, notamment CdS, CdTe,  $\text{Cu}_2\text{O}$ , ainsi qu'une combinaison CdS/CdTe, afin d'identifier celles offrant les performances optimales.

Nos recherches mettent en évidence que l'ajustement précis de la concentration de dopants et de l'épaisseur des couches de CdS, CdTe et  $\text{Cu}_2\text{O}$  peut significativement améliorer les caractéristiques électriques des cellules.

Pour le CdS, les meilleures performances sont obtenues avec une épaisseur de 40 nm et une concentration de dopant de  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . En revanche, pour le CdTe, les résultats optimaux sont obtenus avec des épaisseurs plus élevées (2000 nm) et un faible dopage ( $N_D=10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ), confirmant ainsi qu'une meilleure absorption de la lumière est obtenue avec le CdS.

Concernant la couche  $\text{Cu}_2\text{O}$ , les meilleurs rendements de conversion sont obtenus avec des épaisseurs importantes et un faible dopage. La comparaison des rendements entre différentes couches tampon montre que les cellules CIGS utilisant CdS présentent les performances les plus élevées.

Les résultats obtenus avec la couche tampon de l'oxyde de cuivre  $\text{Cu}_2\text{O}$  sont très prometteuses, Elles affichent un rendement comparable à celui du CdS et du CdTe, notamment avec des épaisseurs importantes et un faible dopage. Cependant, son application en photovoltaïque reste limitée en raison des défis associés à la synthèse de couches semi-conductrices de type N avec ce matériau.

En outre, le dépôt d'une fine couche de CdS sur le CdTe améliore significativement les performances de la cellule, faisant passer le rendement de 29,88 % pour le CdTe seul à 32,26 %.



En conclusion, l'optimisation conjointe de l'épaisseur et du dopage des couches tampon CdS, CdTe et Cu<sub>2</sub>O est indispensable pour maximiser l'efficacité énergétique et la rentabilité des cellules solaires CIGS. Cette approche intégrée permet de relever les défis actuels du secteur photovoltaïque en assurant des performances optimales tout en maintenant la compétitivité sur le marché mondial.

## ❖ Résumé

Ce mémoire explore l'optimisation des paramètres de la couche absorbante des cellules solaires à base de  $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$  (CIGS) pour améliorer leur efficacité et réduire les coûts. En utilisant le logiciel SCAPS-1D, l'étude montre que l'ajustement précis du dopage et de l'épaisseur des couches, notamment avec des matériaux comme  $\text{CdS}$  et  $\text{Cu}_2\text{O}$ , augmente significativement le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ), la tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ ) et le rendement global ( $\eta$ ). Les résultats obtenus offrent des avancées prometteuses pour les cellules CIGS, essentielles pour répondre aux défis énergétiques actuels et promouvoir les énergies renouvelables.

**Mots clés :** Énergie renouvelable, couches minces, CIGS, SCAPS 1-D

## ❖ Agzul

Akerdas-a yesseqdac aseggem n uyewwar n tbessast iğebden tikwatin n yiṭiğ s l̄sas n  $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga}) \text{Se}_2$  (CIGS) iwakken ad awenneε leğhada-n̄sen ad saṭṭar ssuma. S useqdec n useyzan SCAPS-1D, tussna tesbgen-d d akken aseggem usdid n (dopage) akked tuzert n tbessasin. Xersum s sl̄ea am  $\text{CdS}$  akked  $\text{Cu}_2\text{O}$ , yesnerney s ttawil n uḍru n court-circuit ( $I_{cc}$ ), tussda n lxiḍ yeldin ( $V_{co}$ ) akked tririt amatu ( $\eta$ ). Agemmuḍ i d-nufa yefka-d asnerni yelhan i tekwatin CIGS, welment iwakken ad yer i yiεewwiqen n lqewwa tamirant d usl̄hu n lqewwa i d-yett̄eiwiden.

**Awalen n tsura :** Tazmert yettwasnernan, isura iḗewren, CIGS, SCAPS 1-D

## ❖ Abstract

This thesis explores the optimization of the absorber layer parameters in  $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$  (CIGS) solar cells to enhance their efficiency and reduce costs. Using the SCAPS-1D software, the study shows that precise adjustment of doping and layer thickness, particularly with materials like  $\text{CdS}$  and  $\text{Cu}_2\text{O}$ , significantly increases the short-circuit current ( $I_{cc}$ ), open-circuit voltage ( $V_{co}$ ), and overall efficiency ( $\eta$ ). The results provide promising advancements for CIGS cells, essential for addressing current energy challenges and promoting renewable energy adoption.

**Keywords:** Renewable energy, thin films, CIGS, SCAPS 1-D

## ❖ Bibliographie

- [1] D. I. Zemghassene, "Recharge d'une batterie avec un panneau photovoltaïque et poursuite du point de puissance maximale", Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri De Tizi Ouzou (2018).
- [2] J. Liliensten et P.-L. Blelly, "Du Soleil À La Terre : Aéronomie Et Météorologie De l'espace", Edition EDP Science (2000).
- [3] Qu. Zhipeng, "La nouvelle méthode Heliosat-4 pour l'évaluation du rayonnement solaire au sol", Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris (2013).
- [4] A. Ricaud, "Gisement solaire et transferts énergétiques", Master Energies Renouvelables, Université de CERGY-PONTOISE (2011).
- [5] <https://www.europe-energie.com/blog/petite-histoire-du-photovoltaique/>
- [6] <https://terresolaire.com/Blog/comprendre-le-solaire/histoire-du-photovoltaique2/>
- [7] <https://www.lemoniteur.fr/article/developpement-durable-l-energie-photovoltaique.753504>
- [8] I. Attouche et A. Lokbaichi, "Modélisation des cellules photovoltaïques à base de silicium poly cristallin", Mémoire de Master, Université Amar Telidji – Laghouat (2016)
- [9] N. Servagent, "Physique des semi-conducteurs : Fondamentaux", Notes de cours, Ecole des Mines de Nantes (2011).
- [10] V. Dubuc, A. Jolibois, M. Mas, V. Pasquier et I. Patton, "Energie solaire photovoltaïque", Projet de Physique, STPI/P6/2017 – #41, Institut National des Sciences Appliquées de Rouen (2017)
- [11] <https://www.annabac.com/Annales-bac/le-fonctionnement-optimal-d-une-cellule-photovoltaique>
- [12] F. Mechai, "Etude et simulation des structures photovoltaïques à base de chalcogénures de métaux de transition  $MX_2$  (M = W, Mo; X = S, Se)", Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri De Tizi Ouzou (2016)
- [13] C. Ziada et Z. Mahdjoubi, "Etude de l'apport des couches antireflets et de la texturisation aux performances des cellules solaires en silicium cristallin", Mémoire de Master, Université de Adrar (2016).
- [14] A. Bali, "Etude comparative entre les cellules solaires de type p+ -AlGaAs/p-GaAs/n-GaAs et une autre de type n+ -AlGaAs/n-GaAs/p-GaAs", Mémoire de Master, Université Mohamed Khider-Biskra (2013).

- [15] H. Messaoudene, "Détermination intelligente de la puissance maximale des modules photovoltaïques", Mémoire de Master, Université de Batna 2 (2015).
- [16] H. Haloui, "Contribution à la conception et modélisation d'un capteur solaire hybride photovoltaïque thermique à base de cellules solaires en couches minces", Thèse doctorat, Université D'oum El Bouaghi (2012).
- [17] M. Boukais, "Utilisation des couches minces à base des matériaux IV-IV dans les applications photovoltaïques", Thèse de Doctorat, Université Abou-Bekr Belkaid –Tlemcen (2022).
- [18] A.A. Kanoun, "Etude théorique et prédictive des nouveaux matériaux pour conception des cellules solaires et applications photovoltaïques", Thèse de Doctorat, Université Abou-Bekr Belkaid -Tlemcen, En 2019.
- [19] W. El-Huni, "Modélisation de cellules solaires multi-tandem bas coût et très haut rendement à base de nitrures des éléments III-V," Thèse de Doctorat, Université Paris Saclay (2016).
- [20] A. Rockett, "The materials science of semiconductors", Ed. Springer Science & Business Media (2007).
- [21] N. E. Belabas, "Prédiction des propriétés des cellules photovoltaïques à base de nouveaux matériaux semi-conducteurs", Mémoire de Master, Université Bordj Bou Arreridj (2022).
- [22] J. Nelson, "The physics of solar cells". Ed. World Scientific Publishing Company, (2003).
- [23] A. Fath, "Allah Regroupement de techniques de caractérisation de matériaux destinés à l'énergie solaire pour optimisation et mesures industrielles", Thèse de Doctorat, Université Paris Sud (2015).
- [24] K. Djeriouat, "Optimisation du rendement des cellules photovoltaïques à hétérojonctions : GaInP/GaAs", Mémoire de Magister, [Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen \(2011\)](#)
- [25] R. Couderc, "Etude du comportement thermique et électrique des cellules photovoltaïques en silicium cristallin sous concentration", thèse de Doctorat, Université INSA de Lyon (2015)
- [26] A. Ghadhi, "Dimensionnement et Simulation d'une installation de pompage photovoltaïque", Munich, GRIN Verlag, <https://www.grin.com/document/1314932>
- [27] S. Zairi et S. Boubiada, "Etude et Dimensionnement d'un centrale Photovoltaïque", Mémoire de Master, Université Mohamed Khider de Biskra (2020).

- [28] A. Mahfoud, "Modélisation des cellules solaires tandem à couches minces et à haut rendement", Thèse de Doctorat, Paris Scally, (2018).
- [29] P. Würfel and U. Würfel, "Physics of solar cells: from basic principles to advanced concepts", Edition John Wiley & Sons (2016).
- [30] A. R. Jha, "Solar cell technology and applications", Edition, Auerbach publications, (2009).
- [31] H. Mathieu, T. Bretagnon, and P. Lefebvre, "Physique des Semiconducteurs et des Composants Electroniques-Problèmes Résolus", Edition Dunod (2001).
- [32] M. E. Klausmeier-Brown, "Status, prospects and economics of terrestrial single junction GaAs concentrator cells," Solar Cells and their Applications, Wiley, New York (1995).
- [33] H. Naim, "Etude de gestion d'une mini-centrale solaire et mise au point d'un dispositif automatique de mesures, contrôles et régulation de l'énergie électrique", Thèse de doctorat, Université des sciences et de la technologie d'Oran Mohamed Boudiaf (2016).
- [34] A. Belkaid, "Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique", Mémoire de Magister En Electrotechnique, Université Ferhat Abbas – Sétif (2015).
- [35] F. Oliva, "Modélisation, caractérisation et optimisation des procédés de traitements thermiques pour la formation d'absorbeurs CIGS", Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne (2014).
- [36] L. Ribeaucourt, "Electrodépôt et sélénisation d'alliages Cu-In-Ga en vue de la synthèse de couches minces de Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> pour cellules solaires", Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI (2011).
- [37] A. Duchatelet, "Synthèse de couches minces de Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> pour cellules solaires par électro dépôt d'oxydes mixtes de cuivre-indium-gallium", Thèse de Doctorat, université de Lille1 (2012).
- [38] N. Touafek, "Contribution à l'étude d'une cellule solaire en couches minces à base de CuIn<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>Se<sub>2</sub>", These de doctorat, Université Des Frères Mentouri - Constantine (2015)
- [39] T. Sidali, "Cellules solaires de hautes performances à base de couches minces de diséléniure de cuivre de gallium et d'indium (CIGS) préparées par voie électrochimique simplifiée et structures innovantes", Thèse de doctorat Université Pierre et Marie Curie - Paris VI (2015).
- [40] M. Ben Ali et S. Rahmouni, "Simulation et Optimisation d'une Cellule Solaire à base de Cu (In,Ga)Se<sub>2</sub>", Mémoire de master, Université Ahmed Draïa Adrar (2018).

- [41] N. Messei, "Study of the effect of grading in composition on the performance of thin film solar cells based on AlGaAs and CZTSSe, a numerical simulation approach," These de Doctorat, Université Des Frères Mentouri Constantine-1 (2016).
- [42] N. Naghavi et al., "Buffer layers and transparent conducting oxides for chalcopyrite Cu(In,Ga)(S,Se)<sub>2</sub> based thin film photovoltaics: present status and current developments", Progress in Photovoltaics: Research and Applications 18, 411–433 (2010)
- [43] J.I. Posada-Parra, "Optimisation d'un procédé hybride de co-pulvérisation/évaporation pour l'obtention de cellules solaires à base de Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>". Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI (2015).
- [44] W. N. Shafarman, S. Siebentritt, and L. Stolt, "Cu (InGa) Se<sub>2</sub> Solar Cells," Handbook of photovoltaic science and engineering, 546–599 (2010).
- [45] S. Ishizuka, A. Yamada, P. Fons, and S. Niki, "Texture and morphology variations in (In, Ga)<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> and Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> thin films grown with various Se source conditions," Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 21, 544–553 (2013).
- [46] D. H. Shin, Y. M. Shin, J. H. Kim, B. T. Ahn, and K. H. Yoon, "Control of the preferred orientation of Cu (In, Ga) Se<sub>2</sub> thin film by the surface modification of Mo film", Journal of The Electrochemical Society 159, B1–B5 (2011).
- [47] S. Chaisitsak, A. Yamada, and M. Konagai, "Preferred orientation control of Cu (In<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>) Se<sub>2</sub> (x≈ 0.28) thin films and its influence on solar cell characteristics," Japanese Journal of Applied Physics, 41, 507 (2002).
- [48] J.-H. Yoon, W.-M. Kim, J.-K. Park, Y.-J. Baik, T.-Y. Seong, and J. Jeong, "Control of the preferred orientations of Cu (In, Ga) Se<sub>2</sub> films and the photovoltaic conversion efficiency using a surface-functionalized molybdenum back contact", Progress in Photovoltaics: Research and Applications 22, 69–76 (2014).
- [49] M. A. Contreras, K. M. Jones, L. Gedvilas, and R. Matson, "Preferred orientation in polycrystalline Cu (In, Ga) Se<sub>2</sub> and its effect on absorber thin-films and devices", National Renewable Energy Lab., Golden, CO (US) (2000).
- [50] L. L. Kazmerski, "Optical properties and grain boundary effects in CuInSe<sub>2</sub>", Journal of Vacuum Science and Technology A: Vacuum, Surfaces and Films 1, 395–398 (1983).
- [51] N. Yamamoto and T. Miyauchi, "Growth of Single Crystals of CuGaS<sub>2</sub> and CuGa<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>S<sub>2</sub> in In Solution", Japanese Journal of Applied Physics 11, 1383–1384 (1972).

- [52] J. E. Jaffe and A. Zunger, "Electronic structure of the ternary chalcopyrite semiconductors CuAlS<sub>2</sub>, CuGaS<sub>2</sub>, CuInS<sub>2</sub>, CuAlSe<sub>2</sub>, CuGaSe<sub>2</sub>, and CuInSe<sub>2</sub>", *Physical Review B: Condensed Matter* 28, 5822–5847 (1983).
- [53] S.-H. Wei and A. Zunger, "Calculated natural band offsets of all II–VI and III–V semiconductors: Chemical trends and the role of cation d orbitals", *Applied Physics Letters* 72, 2011 (1998).
- [54] <https://solarbuy.com/fr/solar-101/cigs-thin-film-solar-panels/>
- [55] <https://esolarfirst.com/fr/news/what-are-the-advantages-and-disadvantages-of-thin-film-power-generation-and-crystalline-silicon-power-generation/>
- [56] A. Niemegeers and M. Burgelman, "Numerical modelling of ac-characteristics of CdTe and CIS solar cells", *Proceedings of the 25th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, Washington DC, 901 (1996).
- [57] M. Burgelman, P. Nollet, and S. Degraeve, "Modelling polycrystalline semiconductor solar cells", *Thin Solid Films* 361, 527–532 (2000).
- [58] M. Nyborg, "Dominant Defect Complexes in Cuprous Oxide", *Thèse de Doctorat*, Université de Oslo, Suède (2022).
- [59] D. Lalam, "Etude et optimisation des cellules solaires en couches minces CdTe/CdS", *Mémoire de Master*, Université Mouloud Mammeri De Tizi Ouzou (2016).