

**République Algérienne Démocratique et Populaire**

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



**Université Ahmed Draïa Adrar**  
**Faculté des Sciences et de la Technologie**  
**Département des sciences de la matière**

## **MASTER ACADEMIQUE**

**Domaine : Sciences de la matière**

**Filière : physique**

**Spécialité : physique énergétique et énergie renouvelables**

**Intitulé**

**Simulation et Optimisation d'une Cellule Solaire à  
base de Cu (In,Ga)Se<sub>2</sub>**

**Présenté par :**

**Ben Ali Mourad**

**Rahmouni Seddik**

Soutenu publiquement le 30/05/2018

**Devant le jury :**

<b>Président : Mr. Hassan Dahbi</b>	<b>M. A</b>	<b>Univ. Adrar</b>
<b>Promoteur : Dr. Mostefaoui Mohammed</b>	<b>M. R</b>	<b>URER/MS - ADRAR</b>
<b>Co-encadreur : Dr. Khelifi seyfallah</b>	<b>M. R</b>	<b>URER/MS - ADRAR</b>
<b>Examineur : Dr. Ghaitaoui Touhami</b>	<b>M. R</b>	<b>URER/MS - ADRAR</b>

**Année Universitaire : 2017/2018**

## Dédicace

*Je dédie ce mémoire*

*À mes parents qui ont toujours veillé à mon éducation*

*À mon frère et mes sœurs*

*À ma famille*

*À mes amis*

*À tous ceux qui me sont très chers*

## Remerciements

Ce travail de master a été préparé et réalisé au Département des sciences technologies de l'Université Ahmed Draya Adrar en collaboration avec L'Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien (URER.MS) Adrar.

La Pluridisciplinarité du sujet de ce travail de recherche m'a permis de rencontrer des personnes possédant de grandes qualités scientifiques et humaines. Je tiens notamment à exprimer toute ma reconnaissance à Dr. Mostefaoui Mohammed, de l'Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien Adrar, d'avoir encadré ce travail et m'avoir initié à la recherche scientifique, Egalement pour l'aide constante et bienveillante qu'il m'a apportée, pour la confiance et l'autonomie d'action qu'il m'a accordée. Je lui souhaite une joyeuse vie scientifique.

Que Les Messieurs Le Dr. Khelifi seyfallah, le Mr. Hassan Dahbi et Dr.Ghaitaoui Touhami respectivement sachent que je suis honoré qu'ils aient accepté d'être examinateurs de ce travail de master. Je les remercie pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail ainsi que pour leurs remarques et commentaires qui ont contribué à l'amélioration de ce manuscrit.

Je souhaite maintenant remercier mes collègues amis et frères d'Université Ahmed draya Adrar.

Merci beaucoup à tout ma famille qui m'ont soutenu tout au long de mes études jusqu'à ce que je devienne ce que je suis aujourd'hui.

# Sommaire

<b>INRODUCTION GENERAL</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I</b>	
<b>Généralités sur les cellules photovoltaïques</b>	
I.1 .Introduction	4
I.2. Historique de l'effet photovoltaïque	4
I.3. Constantes d'illumination	6
I.4. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	8
I.4.1. L'interaction photon/semi-conducteur	8
I.4.2. Principe de l'effet photovoltaïque	9
I.5. Mécanismes de génération et de recombinaison des porteurs	10
I.5.1. La recombinaison	10
I.5.1.1. La recombinaison bande à bande (directe)	11
I.5.1.2. La recombinaison par pièges (indirecte)	11
I.5.1.3.La recombinaison Auger	11
I.5.2. La génération	11
I.6. Les différentes filières du photovoltaïque	12
I.6.1. La filière du silicium massif	12
I.6.2. La filière à base des matériaux III-V (principalement AsGa)	12
I.6.3. La filière tellure de cadmium (CdTe) et Diséléniure de Cuivre (CIS)	13
I.6.3.1. Les cellules CIS ou CIGS	13
I.6.3.2. Les cellules à base de tellure de cadmium (CdTe)	13
I.6.4. La filière des matériaux nitrures III-N	13
I.6.4.1. Cellule solaire en InGaN/GaN	14
I.6.5. La filière des matériaux organiques	14
I.7. Structure des cellules photovoltaïques	15
I.7.1. Les constituants de base d'une cellule photovoltaïque	15
I.7.1.1. Passivation des faces avant et arrière	15
I.7.1.2. Couche antireflet	16
I.7.1.3. Texturation de la surface	16

I.7.1.4. Contacts face avant et arrière	17
I.7.1.5. Le BSF	17
I.7.2. Structure d'une cellule photovoltaïque à haut rendement (PERL)	17
I.8. Conclusion	19

## **Chapitre II**

### **Les Cellules solaires à base de Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> (CIGS)**

II.1. Introduction	21
II.2. Structure d'une cellule CIGS	21
II.2.1. Le substrat	22
II.2.2. Le contact arrière	22
II.2.3. L'absorbeur	22
II.2.4. La couche tampon	22
II.2.5. La couche fenêtre	23
II.2.6. La grille	23
II.3. Structure cristalline	23
II.4. Caractéristiques d'une cellule solaire photovoltaïque	24
II.4.1. Courbe courant-tension	24
II.4.2. Rendement quantique	26
II.5. Propriétés optiques du Cu(In,Ga)Se <sub>2</sub>	27
II.6. Propriétés électroniques (Dopage)	28
II.7. Conclusion	28

## **Chapitre III**

### **Simulation numérique des Cellules solaires à base de CIGS**

III.1. Introduction	30
III.2. Présentation du logiciel SCAPS	31
III.3. Présentation de la cellule étudiée	35
III.4. Résultats de la simulation numérique et interprétations	36
III.4.1. Effet des paramètres technologiques du front dans les cellules N <sup>+</sup> P	38
III.4.1.1. Effet de l'épaisseur sur les grandeurs photovoltaïques	38
III.4.1.2. Effet de l'épaisseur sur la réponse spectrale	40

III.4.1.3. Effet du dopage sur les grandeurs photovoltaïques	41
III.4.1.4. Effet de dopage sur la réponse spectrale	43
III.4.2. Effet des paramètres technologiques de la base dans les cellules N <sup>+</sup> P	44
III.4.2.1. Effet de l'épaisseur sur les grandeurs photovoltaïques	44
III.4.2.2. Effet de l'épaisseur sur la réponse spectrale	46
III.4.2.3. Effet du dopage sur les grandeurs photovoltaïques	47
III.4.2.4. Effet de dopage sur la réponse spectrale	49
III.4.3. Effet des paramètres physiques de la cellule solaire sur la caractéristique I-V50	
III.4.3.1. Effet de température	50
III.4.3.1. Effet de température sur la réponse spectrale	52
III.5. Conclusion	54

## **CONCLUSION GENERALE**

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

# Introduction générale

---

L'énergie a été depuis l'antiquité le moteur de l'activité humaine, elle joue un rôle très important dans la vie quotidienne et dans le développement des nations.

Selon les besoins plusieurs formes d'énergies sont apparues au fur et à mesure du développement de la civilisation humaine. Généralement ces formes proviennent des sources d'énergie fossiles telles que le charbon, le pétrole, le gaz naturel et l'uranium.

L'épuisement et la pollution provoquée par ces sources ainsi que la crise énergétique des années soixante-dix, amènent les pays qui ont de grands besoins d'énergie à se tourner vers des sources d'énergies renouvelables telles que le soleil, le vent, l'eau, la biomasse et la géothermie.

Parmi ces sources d'énergie on trouve le soleil, qui est contrairement aux autres sources d'énergies renouvelables, abondante et propre, d'autre part annuellement elle fournit à la terre une énergie supérieure à celle de la consommation mondiale.

L'électricité est l'une des formes non polluantes et silencieuses de conversion de l'énergie solaire, elle se produit au moyen d'un dispositif de conversion appelée « Cellule solaire » basé sur un effet dit « Effet photovoltaïque ».

Les cellules solaires font actuellement l'objet de multiples recherches dans le but de réaliser le meilleur rapport entre le rendement énergétique et le prix de revient.

Pour diminuer à la fois le poids et le prix de ces dispositifs tout en augmentant leurs surfaces et leurs souplesses, des cellules en couches minces ont été réalisés.

Les cellules solaires qui utilisent le  $\text{Cu(In,Ga)Se}_2$  (CIGS) représentent l'approche la plus prometteuse au plan de réduction des coûts de production. L'avantage de ce matériau est son élaboration facile d'une part et son haut rendement d'autre part.

Notre étude a porté sur l'optimisation des grandeurs photovoltaïques tels que le courant de court-circuit  $I_{CC}$ , le rendement de conversion  $\eta$ , la tension de circuit ouvert  $V_{CO}$  et le facteur de forme FF ainsi que la réponse spectrale d'une cellule solaire à base de CIGS moyennant le logiciel SCAPS-1D.

L'optimisation des paramètres physiques (dopage et épaisseur) des différentes couches mises enjeu dans la réalisation des de la cellule permettra d'aboutir au meilleur rendement qui pourra être délivré par les cellules à base de couche mince de  $\text{Cu(In,Ga)Se}_2$ .



# Introduction générale

---

Notre mémoire comporte trois chapitres.

- Nous avons commencé dans le premier chapitre par présenter succinctement l'énergie photovoltaïque et le principe de la conversion photovoltaïque. Nous avons aussi présenté les différentes filières photovoltaïques.
- Nous présentons ensuite dans le second chapitre un aperçu sur la structure et les propriétés des cellules solaires à base de Cu (In,Ga)Se<sub>2</sub> (CIGS).
- Le troisième chapitre est consacré à la simulation numérique de la caractéristique directe I (V) de la jonction N+P sous les conditions d'éclairement standard AM1.5 à base de Cu (In,Ga)Se<sub>2</sub>. Ces caractéristiques, nous permettrons l'extraction et l'optimisation des grandeurs photovoltaïques en fonction des paramètres technologiques fondamentaux qui sont : le dopage et l'épaisseur de chaque région de la cellule (front et base).

# CHAPITRE I

## Généralités sur les cellules photovoltaïques

**I.1. Introduction :**

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 15000 fois la consommation énergétique de l'humanité. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré ( $\text{kWc/m}^2$ ) répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge. Les déserts de notre planète reçoivent en six heures plus d'énergie du soleil que ne consomme l'humanité en une année. Depuis très longtemps, l'homme a cherché à utiliser l'énergie émise par le soleil l'étoile la plus proche de la terre [1].

**I.2. Historique de l'effet photovoltaïque:**

La découverte des effets électriques de la lumière sur les semi-conducteurs est plus récente que celle de la photosynthèse et l'histoire est plus courte, mais les progrès récents ont été très importants.

En 1839, le physicien français Antoine César Becquerel constata les effets électriques que produisent les rayons solaires dans une pile constituée par des électrodes de platine et de cuivre oxydé plongeant dans une solution électrolytique acide.

En 1873 Willoughby Smith découvre la photoconductivité du sélénium, et en 1877 W.G. Adams et R.E. Day développent une jonction solide à base de sélénium dont le rendement était de l'ordre de 1%, Mais la recherche n'apporte plus rien pendant longtemps. En 1940, Adler, reprenant une idée émise par Garrison en 1923, étudia la tension de circuit ouvert d'une pile et sa variation en fonction de l'intensité d'illumination [2].

R-S. Ohl décrivit, en 1941, la première réalisation d'une jonction P-N dans le silicium, à effet photovoltaïque, mais il faut attendre 1955 pour que des chercheurs des Bell Téléphone Laboratoires (États-Unis), C. S. Fuller, G. L. Pearson et M. B. Prince, annoncèrent la mise au point d'une cellule dont le rendement de conversion énergétique (c'est-à-dire le rapport de l'énergie électrique produite sur l'énergie rayonnée incidente) atteint 6 %, marquant ainsi véritablement la naissance de la photopile solaire.

Par la suite, le développement des techniques utilisées dans l'industrie des semi-conducteurs (redresseurs et transistors) a permis d'améliorer la qualité des matériaux utilisés, des méthodes de fabrication et de l'organisation des piles photovoltaïques. Cette recherche est encouragée par la naissance de l'industrie spatiale qui cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites. Dès 1959, les Américains lancèrent un satellite Vanguard qui est alimenté par des piles photovoltaïques. Tous les grands laboratoires s'intéressent à cette nouvelle technologie,

et, en 1960, M. Rodot et H. Valdmann réalisèrent la première cellule photovoltaïque au Centre national de la recherche scientifique (CNRS).

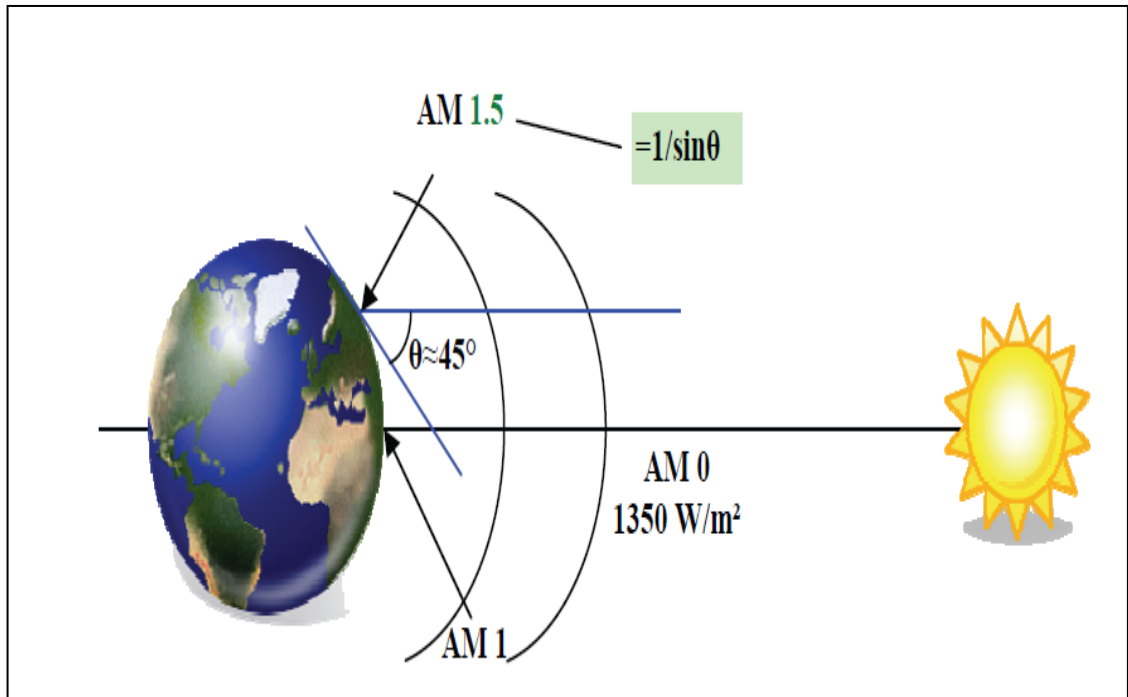
Quelques années plus tard, en 1973-1974, en pleine crise pétrolière, on se précipite sur toutes les possibilités de remplacer le pétrole et les énergies fossiles. Parmi les énergies renouvelables envisagées, la production directe d'électricité par l'effet photovoltaïque est en bonne place. On disposait, en effet, de photopiles à base de silicium monocristallin d'assez bon rendement, héritées des applications spatiales, mais à un prix relativement élevé (il fallait compter 500 à 1000 francs pour produire 1 Watt sous le soleil de midi, ce qu'on appelle 1 Watt-crête) et d'une productivité encore limitée. Il fallait donc fabriquer massivement des photopiles fiables à bon marché et de rendement acceptable. Le pari est gagné, les performances augmentent en flèche 1 Mégawatt-crête dès 1978 et 20 en 1985, pour atteindre 50 en 1992, 50 millions de fois mieux en 20 ans. De plus, l'essor de la microélectronique et des ordinateurs, qui utilisent également le silicium dans la fabrication des microprocesseurs (puces), contribue à la diminution du coût de ce matériau (d'un facteur 10 tous les six ou sept ans).

Des laboratoires de recherche proposent maintenant d'autres manières de construire les composants photovoltaïques et d'autres matériaux semi-conducteurs que le silicium : le choix peut être en effet extrêmement large si on se tourne vers les matériaux composés. De plus, on est expérimentalement encore souvent loin des rendements théoriques. Tout cela a stimulé la recherche, indépendamment des fluctuations du prix du pétrole, au niveau de l'enthousiasme des chercheurs et des ingénieurs, mais malheureusement pas au niveau des marchés.

Il semble que d'importantes recherches soient en cours en faveur des photopiles, par liaison étroite entre les constructeurs des équipements, et les spécialistes de l'électronique et ses composants.

### I.3. Constantes d'illumination:

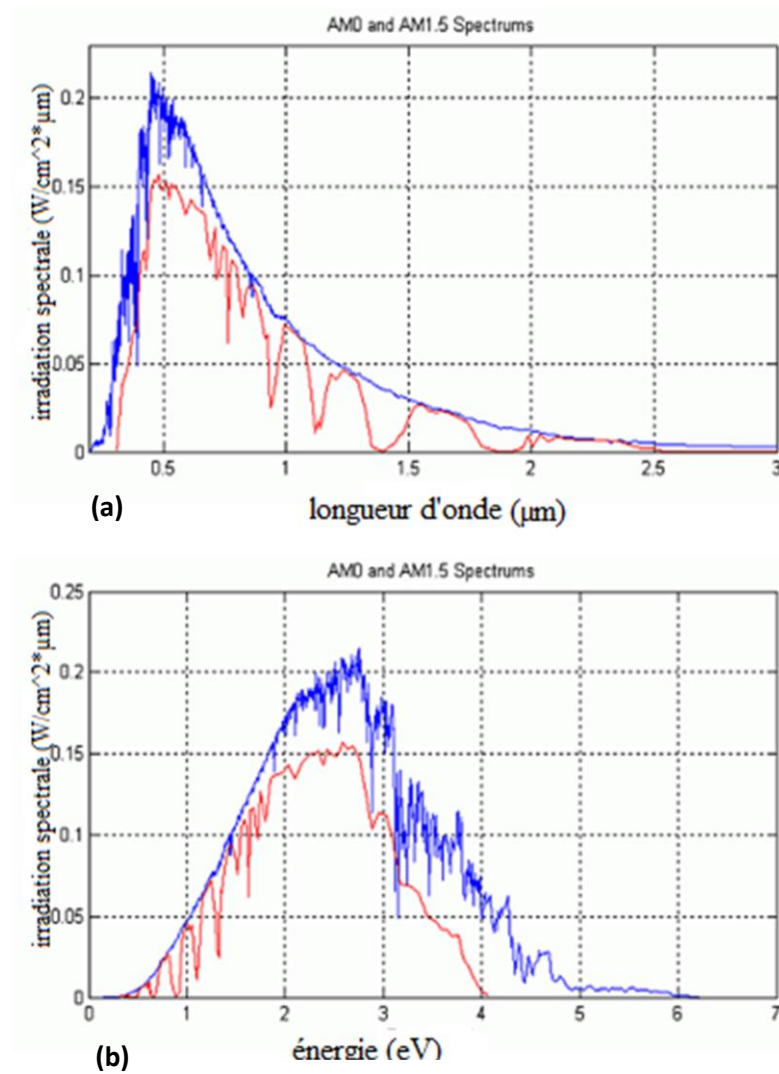
L'atmosphère terrestre reçoit ce rayonnement à une puissance moyenne de  $1.367 \text{ kW/m}^2$  avec un spectre centré au voisinage de  $\lambda=0.48 \text{ }\mu\text{m}$ . La figure I.1 montre les différentes normes de mesures d'énergie émise par le soleil.



**Figure I.1:** Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse

émis par le soleil, notion de la convention AM [3].

L'atmosphère en absorbe toutefois une partie, de sorte que la quantité d'énergie atteignant la surface terrestre n'est plus que de  $0.9 \text{ kW/m}^2$ . Pour mesurer l'effet de l'atmosphère on utilise l'air masse, défini par  $AM = 1/\sin(\theta)$  où  $\theta$  représente l'angle que fait la direction du soleil avec la verticale. AM0 représente le spectre solaire en dehors de l'atmosphère, sa puissance est de  $1350 \text{ W/m}^2$ , AM1 correspond au soleil à la verticale  $\theta = 0^\circ$  avec une puissance d'incidence de  $925 \text{ W/m}^2$ , AM2 est obtenu pour un angle de  $60^\circ$  et à une puissance d'environ  $691 \text{ W/m}^2$ . L'air masse AM1.5 défini par l'angle  $48.2^\circ$  au-dessus de l'horizon, d'une intensité de  $844 \text{ W/m}^2$  est approprié pour les applications terrestres. Le spectre solaire est représenté sur la figure I.2.



**Figure I.2:** Distribution spectrale de l'énergie solaire AM0 (bleu) et AM1.5 (rouge), (a) en fonction de la longueur d'onde, (b) en fonction de l'énergie [4].

Le tableau I.1 présente un résumé des différentes distributions spectrales.

Hauteur	Position du soleil	Puissance d'incidence ( $\text{W/m}^2$ )	Distribution spectrale
En dehors de l'atmosphère		1350	AM0
Surface	$\theta = 0^\circ$	925	AM1
Surface	$\theta = 48.2^\circ$	844 ou 1000 (standard)	AM1.5
Surface	$\theta = 60^\circ$	691	AM2

**Tableau I.1:** Résumé des différentes distributions spectrales.

## I.4. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

### I.4.1. L'interaction photon/semi-conducteur:

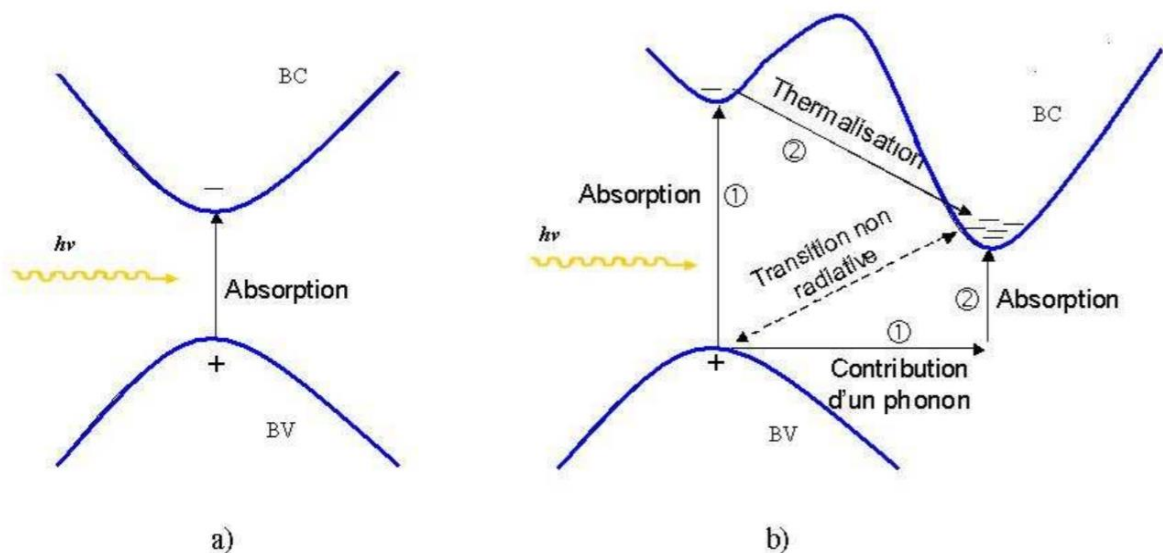
L'écart entre les bandes de valence et de conduction, ou gap, représente une caractéristique fondamentale des semi-conducteurs. La figure I-3 présente les différentes transitions possibles selon la nature du gap. Quand le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence coïncident dans l'espace des  $k$ , il s'agit d'un gap direct. Les transitions inter bandes s'effectuent verticalement, et sont donc radiatives (figure I-3 (a)).

Ceci illustre le fonctionnement des semi-conducteurs binaires III-V, tels que le GaAs, beaucoup utilisés en optoélectronique. Dans le cas du silicium, le gap est indirect [5]:

Les transitions électroniques entre les extremas des bandes sont obliques, donc non radiatives puisqu'elles impliquent un changement du vecteur d'onde de l'électron.

Les électrons du sommet de la bande de valence peuvent toutefois être directement excités vers le minimum relatif central de la bande de conduction grâce à un photon de plus grande énergie.

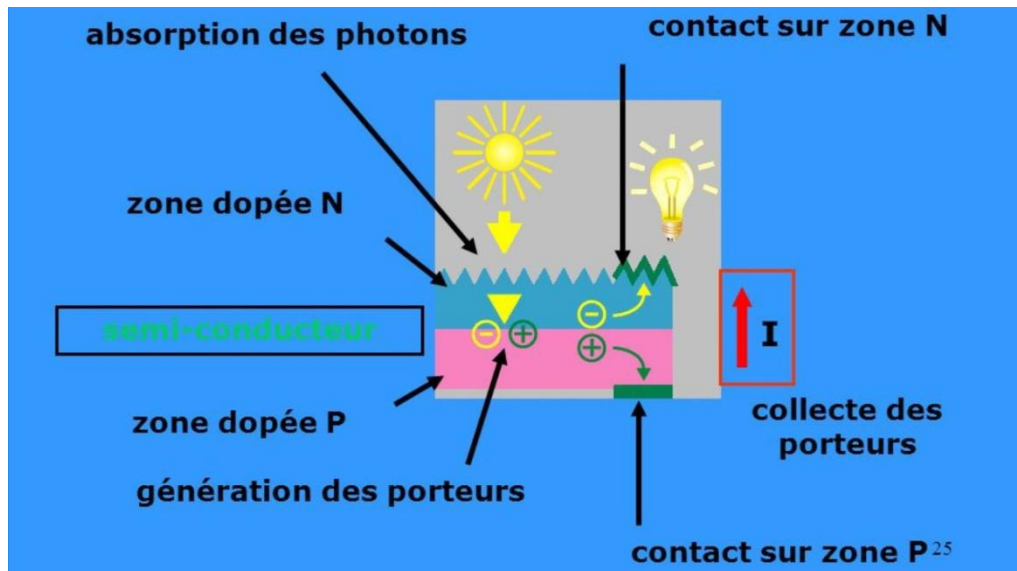
Pour que la transition s'effectue dans le gap indirect, il faut qu'un phonon soit au préalable absorbé (ou émis) par l'électron, afin que le vecteur d'onde de ce dernier corresponde au maximum de la bande de valence, pour absorber un photon (figure I-3 (b)).



**Figure I.3:** Transitions inter-bandes d'électrons dans un semi-conducteur. a) correspond à un semi-conducteur à gap direct, b) à un gap indirect [5].

### I.4.2. Principe de l'effet photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité (figure I.4) par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière [6].



**Figure I.4:** Principe de fonctionnement d'une cellule solaire [6].

L'effet photovoltaïque repose principalement sur trois grands principes dont l'action conjuguée de manière quasi-simultanée engendre la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique:

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

Un dispositif photovoltaïque doit donc être constitué:

- D'un matériau absorbant dans la gamme du spectre solaire et possédant au moins une transition possible entre deux niveaux d'énergie.
- D'une structure de collecte, de résistance électrique la plus faible possible [7].

Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant, d'où l'intérêt des semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque.



## I.5. Mécanismes de génération et de recombinaison des porteurs :

### I.5.1. La recombinaison :

La recombinaison est à l'opposé de la génération. Elle correspond aux mécanismes conduisant à la perte de paires électron-trou, avec l'énergie excédentaire émise sous forme de phonons ou de photons. Expérimentalement, elle correspond à une durée de vie des porteurs minoritaires  $\tau_n$  capable d'être mesurée. Celle-ci correspond au temps moyen au bout duquel un pair électron-trou générée se recombine. La valeur de ce paramètre peut être déterminée, permettant de définir les taux de recombinaison  $R_n$  pour les électrons,  $R_p$  pour les trous par :

$$R_{n,p} = \frac{\Delta n_{,p}}{\tau_{n,p}}$$

Avec :

$\Delta n, p$ : Densité des porteurs générés.

$\tau_n, p$ : Durée de vie de ces porteurs.

L'interprétation de la durée de vie n'est pas simple car il existe différents mécanismes de recombinaison intervenant simultanément en surface et en volume d'un échantillon. On définit donc une durée de vie effective, qui tient compte de l'ensemble de ces mécanismes.

En générale, la recombinaison peut être caractérisée comme suit :

- Recombinaison directe (de bande à bande).
- Recombinaison indirecte (de bande aux impuretés, avec l'aide de piège).
- Recombinaison Auger.
- Recombinaison de surface.

Ces processus sont présentés dans la figure (I.5).

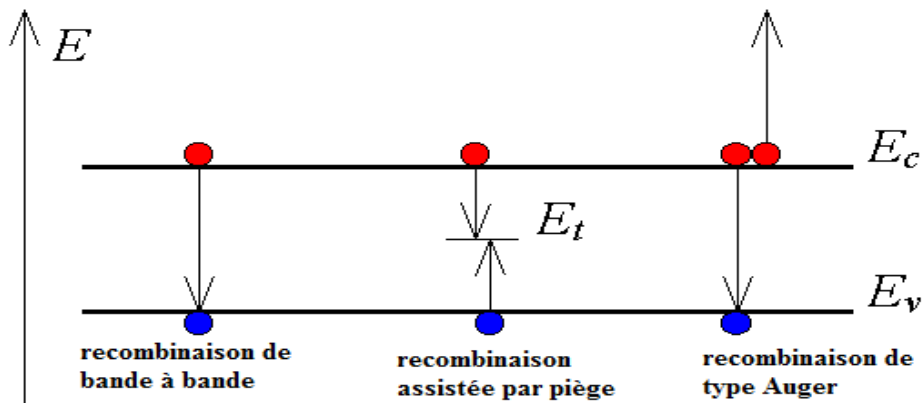


Figure I.5 : Types de recombinaison [8].

**I.5.1.1. La recombinaison bande à bande (directe):**

La recombinaison directe est quand un électron dans la bande de conduction se combine avec un trou dans la bande de valence, sans variation d'énergie cinétique de l'électron. Ce type de recombinaison se produit dans les matériaux directs tels que le GaAs (Gallium arsenide). Étant donné qu'aucune quantité de mouvement n'est nécessaire, le taux de recombinaison est le plus élevés. La durée de vie d'un porteur est l'inverse de son taux de recombinaison, par conséquent, cette durée de vie est très courte.

**I.5.1.2. La recombinaison par pièges (indirecte):**

Recombinaison en volume de type RSH c'est une recombinaison assistée par un piège se produit lorsqu'un électron tombe dans un « piège », ou un niveau d'énergie au sein de la bande interdite résultant d'un défaut structural ou impuretés. Une fois que le piège est rempli, il ne peut accepter un autre électron. Les électrons occupant le piège, dans un deuxième temps, s'installent dans des états de la bande de valence vides, complétant ainsi le processus de recombinaison. On peut envisager ce processus comme une transition en deux étapes d'un électron de la bande de conduction à la bande de valence ou l'anéantissement de l'électron et le trou, qui se rencontrent dans le piège.

**I.5.1.3. La recombinaison Auger :**

Nous avons une recombinaison de type Auger, lorsque l'énergie de l'électron qui se recombine dans la bande de valence est transférée sous forme d'énergie cinétique à un autre électron libre. L'énergie transférée est libérée ensuite sous forme de phonons. Ce mécanisme est prédominant pour les régions fortement dopées. Cette recombinaison nécessite trois particules: au moins un trou et un électron et la troisième peut être un trou ou un électron. Ce type de recombinaison est similaire à la recombinaison de bande à bande, mais la troisième particule reçoit l'énergie à partir de la recombinaison [8].

**I.5.2. La génération :**

La génération peut être considérée comme le mécanisme inverse de la recombinaison. La génération des porteurs est un processus pour reconstituer l'équilibre d'un semi-conducteur qui a été perturbé. La génération se produit quand il y a un déficit de la concentration en porteur comparée à la concentration d'équilibre.

Des porteurs doivent être créés dans le semi-conducteur pour atteindre cet équilibre. Lorsqu'on expose l'une des faces de la cellule solaire sous un flux solaire, on constate immédiatement un phénomène intéressant au niveau de cette structure, la radiation lumineuse

peut ainsi atteindre le cristal semi-conducteur, et en particulier la jonction. Cette radiation est capable de générer une paire électron-trou.

On peut faire une analogie entre les deux processus génération et recombinaison, autrement dit, les trois mécanismes de la recombinaison peuvent être inversés pour créer des porteurs. Il s'agit de la génération bande à bande, intrinsèque, de la génération extrinsèque par l'intermédiaire du niveau de dopage ou bien le piégeage, et la génération Auger. La génération bande à bande peut se produire quand un électron est sorti directement dans la bande de conduction. Ceci peut se produire par l'absorption de la lumière, photo-génération. Des centres d'impuretés peuvent être utilisés pour la génération, l'électron n'aurait pas besoin d'autant d'énergie pour atteindre la bande de conduction comme le cas de la génération bande à bande. La génération Auger se produit souvent quand un champ électrique est appliqué.

### **I.6. Les différentes filières du photovoltaïque :**

La conversion photovoltaïque nécessite l'utilisation d'une couche photoconductrice, dite couche absorbante, qui transforme le rayonnement lumineux en paires électron-trou.

Il existe cinq principales filières [9] :

- ❖ la filière du Silicium massif ;
- ❖ La filière à base des matériaux III-V (principalement AsGa).
- ❖ la filière Tellurure de Cadmium (CdTe) et Diséléniure de Cuivre (CIS).
- ❖ La filière des matériaux nitrurés III-N.
- ❖ La filière des matériaux organiques.

#### **I.6.1. La filière du silicium massif :**

On distingue au sein même de cette famille, plusieurs types de cellules utilisant des qualités de silicium différentes : les cellules à base de Si mono-cristallin (rendement de l'ordre de 25%, coût de fabrication élevé), les cellules à base de Si poly-cristallin (rendement de l'ordre de 20%, coût de fabrication moindre) et les cellules à base de Si amorphe (rendement et coût plus faibles que le mono ou le poly-cristallin).

#### **I.6.2. La filière à base des matériaux III-V : (principalement AsGa)**

Il convient de distinguer deux types de cellules incorporant l'arséniure de gallium. D'un côté, les cellules de type «III.V » dont le composant principal est l'arséniure de gallium (rendement de l'ordre de 18 à 25%). De l'autre côté, les cellules multijonctions (de type GInP/GaAs/Ge) qui constituent les cellules les plus efficaces (rendement de l'ordre de 32%) mais présentent un coût de mise en forme très élevé.

**I.6.3. La filière tellurure de cadmium (CdTe) et diséléniure de cuivre (CIS)****I.6.3.1. Les cellules CIS ou CIGS :**

Les premières sont composées de diséléniure de cuivre et d'indium ( $\text{CuInSe}_2$ ) et les deuxièmes font intervenir en plus du gallium. Ces matériaux sont stables sous rayonnement et ont de très bonnes propriétés d'absorption. Ce type de cellules présente un faible coût de fabrication.

**I.6.3.2. Les cellules à base de tellure de cadmium (CdTe) :**

L'avantage de ces cellules réside dans la forte absorption du tellurure de cadmium, cependant la toxicité du matériau freine le développement de cette technologie. Les meilleures cellules à base de CdTe présentent des rendements de photo conversion de l'ordre de 17%.

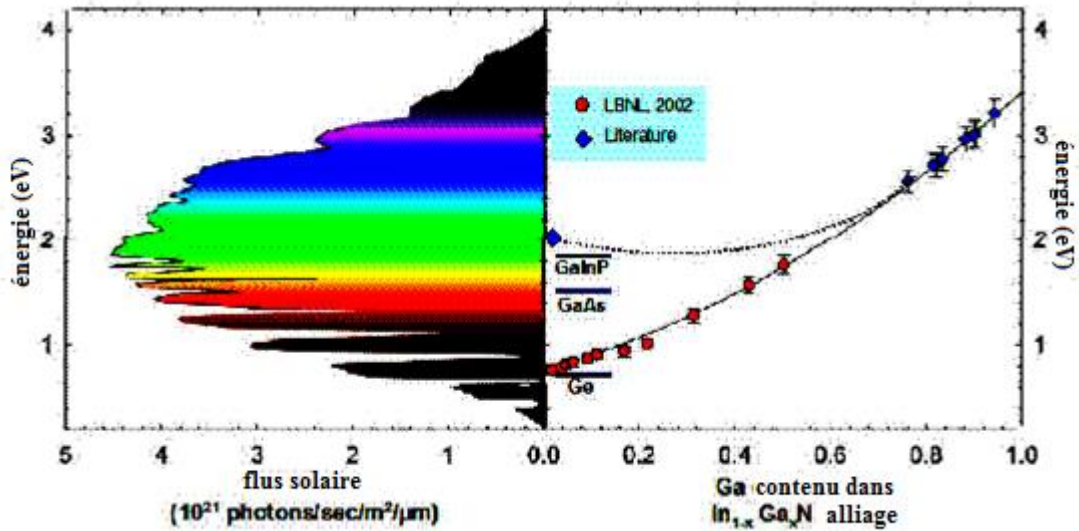
**I.6.4. La filière des matériaux nitrures III-N :**

Les nitrures d'éléments III, GaN, AlN, InN et leurs alliages ternaires et quaternaires sont des matériaux semi-conducteurs ayant une forte importance en microélectronique grâce à leurs propriétés réfractaires qui permettent d'envisager leur application dans des environnements hostiles (hautes températures, hautes puissances) et pour l'optoélectronique du fait de leurs gaps directs qui couvrent l'ensemble du spectre visible et même au delà. [10].

Le GaN, l'InN et leur alliage ternaire InGaN sont des matériaux très importants pour le développement des composants optoélectroniques et des dispositifs électroniques à haute température, ceci est dû à leur bande interdite qui peut varier entre 0.7 eV pour l'InN jusqu'à 3.4 eV pour le GaN. Dernièrement, les nitrures sont utilisés pour développer des cellules solaires de haute efficacité [11,12].

L'InGaN, est un alliage très utilisé en optoélectronique, il présente un gap direct, ce qui permet de couvrir tout le spectre visible.

Le premier alliage InGaN a été reporté par Osamura et al. [10]. Il a employé des mesures optiques d'absorption pour déterminer la dépendance du gap d'InGaN en fonction de la composition en alliage comme estimée à partir de la loi de Vegard. Le gap direct a changé sans à-coup avec la composition en alliage avec un certain bowing [10]. (figure I.6)



**Figure I.6 :** Correspondance entre le spectre solaire et le gap de l'InGaN [10].

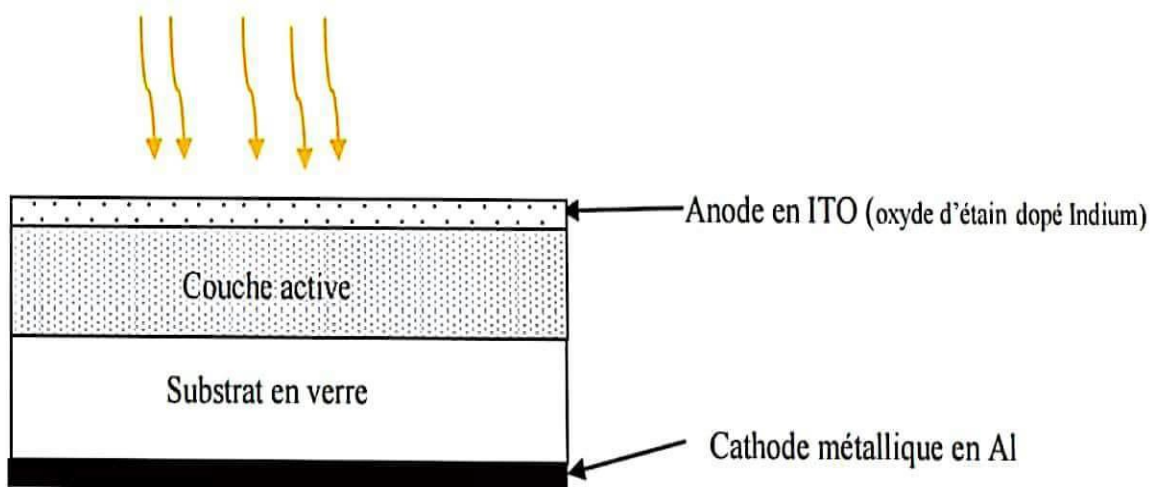
#### I.6.4.1. Cellule solaire en InGaN/GaN :

L'une des options clés à accomplir pour avoir une conversion photovoltaïque efficace (plus grand que 50%) est l'utilisation des composants photovoltaïques de gap supérieur à 2.4 eV. In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N est l'un de quelques alliages qui offre cette exigence [13].

#### I.6.5. La filière des matériaux organiques:

Les cellules photovoltaïques organiques utilisent des matériaux organique, tel que les polymères. Leurs rendement est de 5 % .

La structure de la cellule organique est démontrée dans la figure (I.7).



**Figure I.7:** Cellule solaire organique[9]

La couche active est composée de deux matériaux l'un donneur d'électron comme une chaîne de polymère et l'autre accepteur d'électron comme le fullerène. Quand on éclaire la cellule on a un transfert d'électrons du polymère à la molécule de fullerène.

L'avantage de ces cellules c'est qu'on peut réaliser des grandes surfaces, elles sont légères flexible et leur cout de fabrication est faible.

## I.7. Structure des cellules photovoltaïques:

### I.7.1- Les constituants de base d'une cellule photovoltaïque :

Bien que différentes structures soient envisageables pour l'élaboration des cellules photovoltaïques, des parties similaires sont présentes dans chaque composant. La structure d'une cellule photovoltaïque avec contacts sur les deux faces est présentée sur la figure I.8.

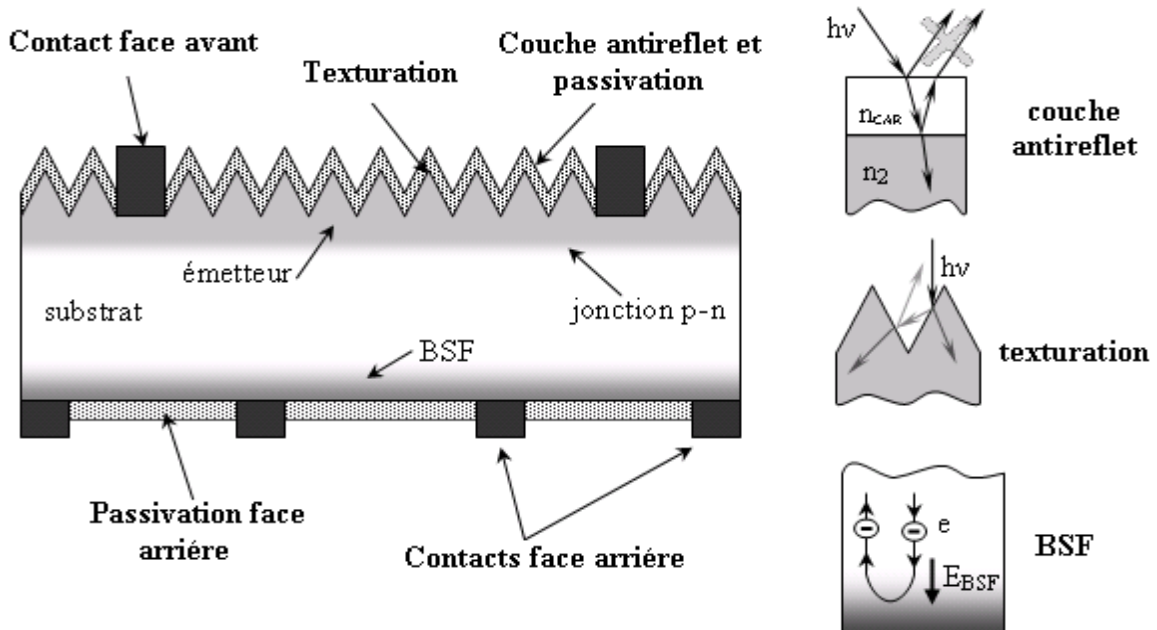


Figure I.8 : Composition d'une cellule photovoltaïque[5].

#### I.7.1.1. Passivation des faces avant et arrière :

La surface des semi-conducteurs contient une densité importante de défauts (liaisons pendantes, impuretés, etc.) entraînant des pertes non négligeables liées à la recombinaison en surface. La passivation consiste à améliorer les qualités électroniques de la surface et du volume du matériau en neutralisant les effets de ses défauts électriquement actifs. Diverses couches de passivation sont utilisées en photovoltaïque mais les principales sont l'oxyde thermique de silicium ( $\text{SiO}_2$ ) et le nitrure de silicium hydrogéné ( $\text{SiN}_x\text{H}$ ).

**I.7.1.2- Couche antireflet :**

Pour minimiser la réflexion de la lumière, une couche antireflet (ang. Anti-Reflective CAR) est utilisée. Le principe d'action des couches antireflet est basé sur l'interférence des faisceaux lumineux dans les couches diélectriques minces (voir insertion sur la figure I.8).

Pour les cellules photovoltaïques à haut rendement, une double couche antireflet est utilisée (avec deux diélectriques différents). Différentes CAR sont utilisées en photovoltaïque : TiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>, ZnS, MgF<sub>2</sub>, SiN<sub>x</sub>, etc .

**I.7.1.3- Texturation de la surface :**

La texturation du silicium est utilisée pour diminuer la réflectivité de la surface de la cellule. Cette opération vise à développer en surface un relief micrométrique, généralement de forme pyramidale. La longueur d'onde de la lumière incidente étant inférieure aux dimensions des structures ainsi réalisées, les rayons incidents suivent les lois de l'optique géométrique.

L'insertion sur la figure I-8 présente le principe de réflexions multiples propre à la texturation. Le relief de la surface entraîne une baisse de la réflexion en face avant : un rayon arrivant à incidence normale (par rapport au plan de la cellule) sur une pyramide sera réfléchi sur la face d'une pyramide adjacente, cette double réflexion sur les pyramides diminue le coefficient de réflexion totale, qui ne vaut plus  $R$  mais  $R^2$ . D'autre part, un rayon d'incidence normale sera transmis dans la cellule avec un angle de réfraction  $\theta$  différent de  $0^\circ$ . Le trajet de ce rayon au sein du silicium sera donc augmenté d'un facteur  $1/\sin \theta$  par rapport au cas d'une surface plane et perpendiculaire à l'éclairement, ce qui aura pour effet d'augmenter la part de photons absorbés par le matériau. Pour finir, la texturation de la surface entraîne un piégeage plus important de la lumière pénétrant dans la cellule. Sur la face arrière de la cellule, il existe un angle d'incidence critique  $\theta_c$  à partir duquel le rayon est totalement réfléchi et prolonge son trajet au sein du semi-conducteur, augmentant là aussi l'absorption des photons. En appliquant la loi de Descartes, on trouve que cet angle vaut  $17^\circ$  dans le cas du silicium dans l'air. Ce phénomène est particulièrement important dans le cas des cellules de faible épaisseur, et peut être renforcé par une texturation de la face arrière et/ou une couche antireflet sur cette même face. Différents procédés sont utilisés pour texturer la surface du silicium : attaques chimiques de la surface (KOH, NaOH, acides), texturation mécanique (laminage à froid sous un peigne dentelé), texturation laser.

**I.7.1.4-Contacts face avant et arrière :**

Les contacts métalliques à l'émetteur et au substrat servent à collecter le courant de porteurs photogénérés. Les contacts doivent être ohmiques, c'est-à-dire que la caractéristique  $I=f(V)$  du contact doit être linéaire. La résistance des contacts est un paramètre très important. La forte résistance des contacts augmente la résistance série de la cellule et baisse le facteur de forme et le rendement. Différents procédés sont utilisés pour réaliser les contacts. Dans le cadre des cellules photovoltaïques industrielles en silicium multicristallin, les contacts sont généralement réalisés par sérigraphie. Pour les cellules photovoltaïques à haut rendement, la pulvérisation cathodique ou l'évaporation sous vide sont utilisées.

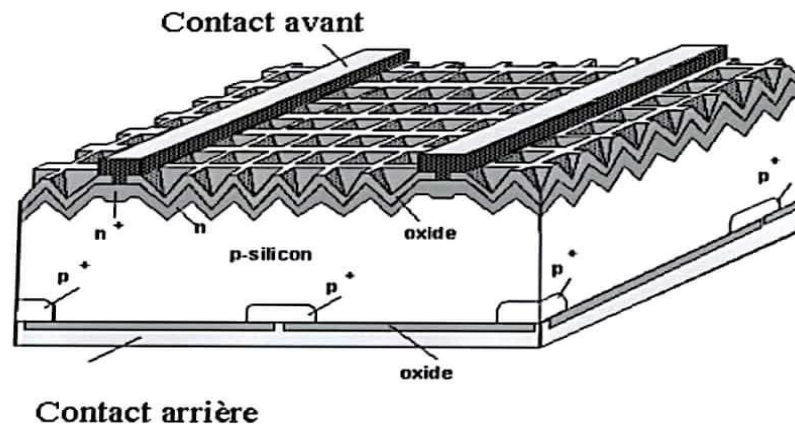
**I.7.1.5-Le BSF :**

Le champ électrique arrière (BSF : Back Surface Field) consiste à créer une barrière de potentiel (par exemple, jonction P+P) sur la face arrière de la cellule pour assurer une passivation. La barrière de potentiel induite par la différence de niveau de dopage entre la base et le BSF tend à confiner les porteurs minoritaires dans la base (voir l'insertion sur la figure I-8). Ceux-ci sont donc tenus à l'écart de la face arrière qui est caractérisée par une vitesse de recombinaison très élevée. Le BSF fait encore l'objet de nombreuses recherches car l'épaisseur des plaques est constamment réduite. Afin de réaliser une économie de matière première le silicium multicristallin présente désormais des longueurs de diffusion des porteurs minoritaires élevées.

**I.7.2- Structure d'une cellule photovoltaïque à haut rendement (PERL) :**

La structure de la cellule photovoltaïque à haut rendement en silicium monocristallin est présentée sur la figure I.9. Cette cellule a été élaborée en laboratoire avec des procédés de la microélectronique en utilisant la technologie PERL (Passivated Emitter with Rear Locally diffused). Cette cellule est réalisée sur un substrat de Si FZ (Float Zone) de type p. La face avant (face éclairée) de la cellule est texturée en «pyramides inversées».





**Figure I.9** Structure d'une cellule photovoltaïque en Si monocristallin à haut rendement (24.7%) [5].

Ce type de texturation permet une réduction importante du coefficient de réflexion et ainsi des pertes optiques dans la cellule. Une jonction p-n peu profonde est réalisée sur toute la surface avant pour assurer la séparation des porteurs de charge. L'émetteur ainsi réalisé est peu dopé afin de limiter les recombinaisons. Le contact ohmique sur l'émetteur est déposé sous forme de grille. La géométrie de cette grille doit assurer une faible résistance série tout en limitant l'ombrage de la cellule. Pour obtenir un contact ohmique, la région sous le contact avant est sur dopée n+ (émetteur sélectif).

Une fine couche d'oxyde thermique (de haute qualité) est formée sur l'émetteur pour réduire la recombinaison sur la face avant de la cellule. Sur l'oxyde, une double couche anti-réfléchissante est déposée pour réduire les pertes par réflexion. De même que la face avant, la face arrière de la cellule est passivée par de l'oxyde thermique avec des trous pour prendre le contact. Pour assurer un bon contact arrière, la région du contact est dopée p+. Néanmoins, le contact entre le métal et le silicium n'est pas continu afin de limiter la recombinaison sur le contact et dans la région fortement dopée p+.

Par contre, la métallisation de la face arrière est continue : elle couvre les zones de contact et l'oxyde de passivation servant ainsi de réflecteur arrière.

Actuellement le rendement record obtenu pour une cellule PV à base de silicium est de 24.7% dans les conditions d'illumination AM 1.5G. Cette valeur est à comparer à la limite théorique du rendement de 28.8% pour les cellules PV en silicium d'épaisseur 80  $\mu\text{m}$  dans les conditions d'illumination AM1.5G et en l'absence de réflexion de la face avant, de recombinaison en surface et en volume [5].

**I.8 Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les bases indispensables à la compréhension de la cellule photovoltaïque qui constitue le dispositif ou le composant électronique le plus rentable en énergie, en convertissant l'énergie radiative ou solaire en énergie électrique. Alors, nous avons d'abord présenté l'historique de l'effet photovoltaïque et le principe de fonctionnement puis on a cité les différentes filières du photovoltaïque .

Enfin, on a présenté les différentes régions de la cellule photovoltaïque ainsi que les technologies utilisées par l'industrie pour avoir un bon rendement.

## CHAPITRE II

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

## II. 1. Introduction :

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

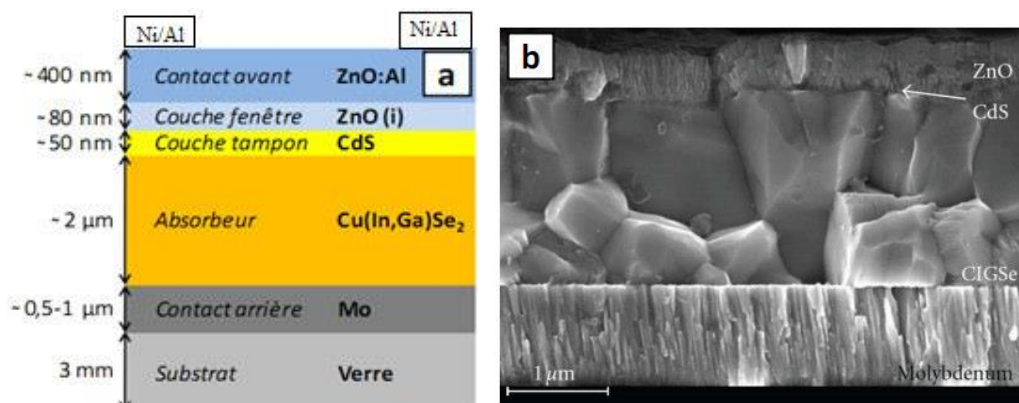
Les cellules solaires en couches minces à base de CIGS sont des cellules à hétérojonction, où le semi-conducteur de type p, le CIGS, est l'absorbeur de la cellule (c'est-à dire la zone où les paires électrons trous sont générées sous illumination). La jonction est formée avec le CdS/ZnO, des semi-conducteurs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

Dans ce chapitre nous décrivons la structure d'une cellule solaire à base de CIGS, le rôle et les caractéristiques des différentes couches constituant la cellule, à savoir sa structure cristalline, Ensuite nous présentons les propriétés électriques et optiques pour les cellules solaires à base de CIGS.

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

Dans sa structure la plus répandue, une cellule CIGS est formée d'un empilement de plusieurs matériaux en couches minces déposés successivement sur un substrat.

La figure (II.1) présente la structure standard d'une cellule à base de  $\text{Cu}(\text{In,Ga})(\text{Se})_2$ .



**Figure (II.1):** Structure d'une cellule solaire à base de CIGS. (a) schéma de l'empilement des différentes couches, (b) image MEB de la tranche d'une cellule [15].

Les principaux éléments dans la cellule sont:

### **II.2.1. Le substrat :**

Le substrat est le support permettant la tenue mécanique des différentes couches, dont l'empilement ne dépasse pas quelques micromètres d'épaisseur. Il doit répondre à différents critères chimiques et mécaniques, qui le rendent apte à suivre toutes les étapes de fabrication de la cellule, sans en détériorer la qualité, tout en ayant un coût limité. Il existe trois catégories de substrat : le verre, les métaux, et les polymères. Le substrat le plus couramment utilisé est le verre sodo-calcique, qui présente toutes les propriétés requises. [16]

### **II.2.2. Le contact arrière :**

La première couche déposée sur le substrat est l'électrode de contact arrière. Elle a pour rôle principal de collecter les charges générées dans la cellule. D'un point de vue électrique, elle constitue le pôle positif du générateur photovoltaïque. Cette couche est composée de molybdène (Mo) et son épaisseur est d'environ 300 nm à 1000 nm. La méthode de dépôt la plus utilisée pour le contact arrière est la pulvérisation cathodique.

### **II.2.3. L'absorbeur :**

La couche située directement au-dessus du contact arrière est composée du matériau absorbeur, le CIGS. Il s'agit d'un semi-conducteur de type p qui forme la première partie de l'hétérojonction p-n. C'est aussi dans ce matériau que la majorité des photons est absorbée pour former les paires électron-trou. Son épaisseur est d'environ 1  $\mu\text{m}$  à 2  $\mu\text{m}$ . Les méthodes de dépôt du CIGS sont variées, les plus communes étant la co-évaporation et le recuit de précurseurs métalliques en présence de vapeurs de sélénium.

### **II.2.4. La couche tampon :**

L'hétérojonction p-n avec le CIGS est formée en ajoutant une couche appelée « couche tampon ». Cette dénomination provient du fait qu'elle joue aussi un rôle de protection physique du CIGS lors du dépôt par pulvérisation cathodique des couches suivantes [16].

Actuellement, les meilleurs rendements sont obtenus en utilisant des couches tampon à base de sulfure de cadmium (CdS). Aussi, c'est le matériau le plus utilisé. Cependant, en raison de la toxicité du cadmium, d'importants efforts sont tournés vers le développement de couches tampon alternatives ( $\text{Zn(O,S)}$ ,  $\text{(Zn,Mg)O}$ ,  $\text{In}_2(\text{S,Se})_3$ , etc.). L'épaisseur typique

d'une couche tampon en CdS est d'environ 50 nm. La méthode la plus courante de dépôt du CdS est le bain chimique (Chemical Bath Deposition, CBD).

### II.2.5. La couche fenêtre :

La couche tampon est recouverte d'une couche fenêtre (Window Layer). Cette couche est composée d'un dépôt d'oxyde de zinc (ZnO) et d'un dépôt d'oxyde transparent conducteur (Transparent Conducting Oxide, TCO). La couche de ZnO est résistive et sert à limiter la formation de court-circuits dans les zones présentant un recouvrement imparfait du CIGS par la couche tampon [17]. Les TCO les plus utilisés sont le ZnO dopé aluminium (ZnO : Al) et l'oxyde d'indium et d'étain (Indium Tin Oxide, ITO) déposés par pulvérisation cathodique. Le TCO permet à la couche fenêtre de constituer en partie le contact avant de la cellule photovoltaïque tout en étant transparente au rayonnement solaire, ce dernier devant être absorbé dans la couche de CIGS. L'épaisseur de la couche fenêtre est de l'ordre de 300 nm à 500 nm.

### II.2.6. La grille :

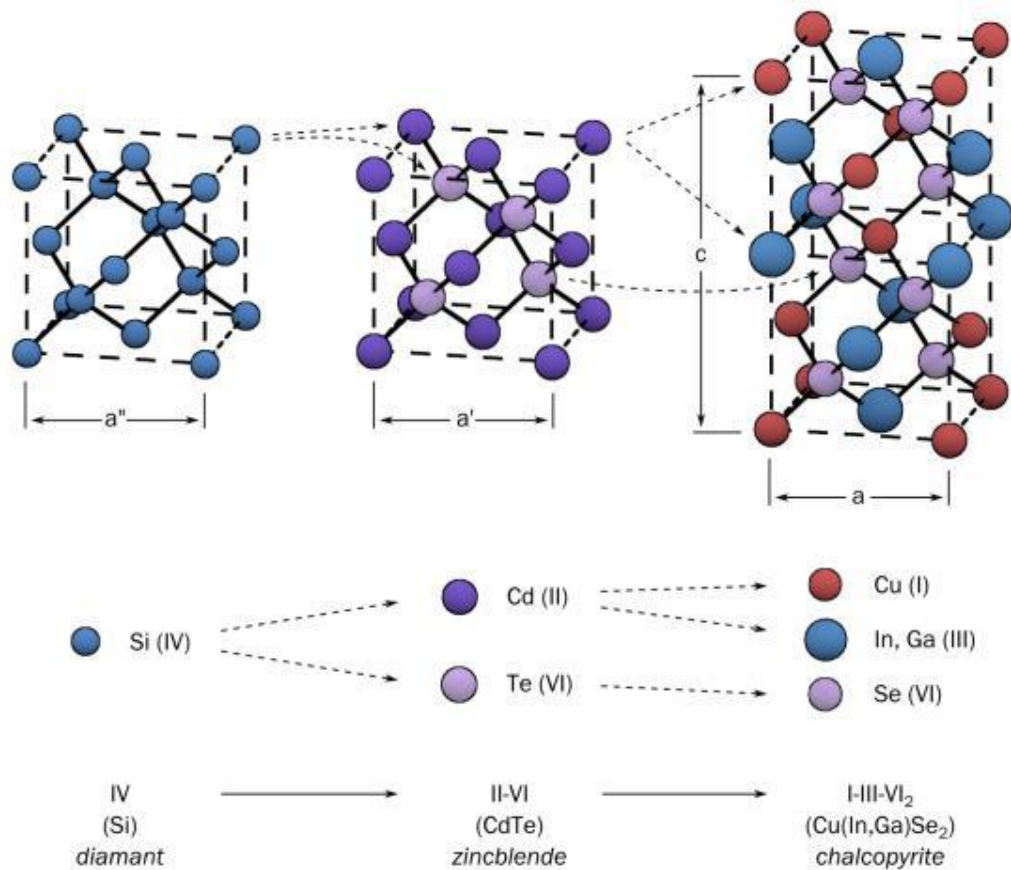
Le contact avant final est réalisé en ajoutant à l'empilement une grille qui collectera les charges générées par le dispositif. Cette grille est composée d'une couche de nickel et d'une couche d'aluminium. Le Ni sert de couche d'accroche et permet d'éviter l'oxydation de l'Al liée à la présence sous-jacente du TCO. Les grilles sont déposées en général par évaporation en utilisant un masque de dépôt

## II.3. Structure cristalline :

Le matériau à la base du CIGS est le CIS ( $\text{CuInSe}_2$ ). C'est un semi-conducteur I-III-VI<sub>2</sub> qui possède une structure cristalline chalcopyrite. Cette structure tétragonale peut être décrite comme un empilement de deux structures zincblende dans lequel les sites tétrahédriques sont occupés par des atomes du groupe III (Se) (anions) et les autres sites sont occupés de manière ordonnée par des atomes des groupes I (Cu) et II (In) (cations). Le ratio des paramètres de maille  $c/a$  est légèrement différent de 2 (distorsion tétrahédrique), ce qui est dû à des différences d'énergie entre les liaisons Cu-Se et In-Se [18].

Dans le cas du CIGS, les sites des atomes du groupe III sont donc occupés par des atomes d'In ou de Ga, dans des proportions dépendant de la composition de l'alliage.

En d'autres termes, le CIGS est une solution solide de  $\text{CuInSe}_2$  et de  $\text{CuGaSe}_2$ . La figure II.2 présente les différences de structure cristalline entre 3 matériaux semi-conducteurs utilisés dans le photovoltaïque : le Si, le CdTe et le CIGS.



**Figure (II.2):** Comparaison des mailles élémentaires des structures cristallines du Si, du CdTe et du CIGS. Structure chalcopyrite d'après [18].

#### II.4. Caractéristiques d'une cellule solaire photovoltaïque :

Les deux principales caractéristiques d'une cellule solaire sont :

##### II.4.1. Courbe courant-tension :

Le tracé de la caractéristique  $I(V)$  de la cellule solaire découle de l'équation

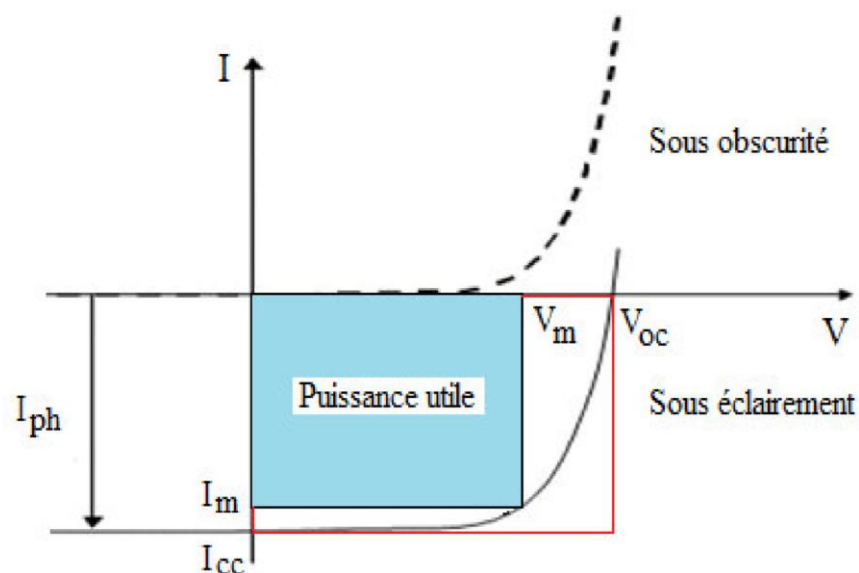
$I = I_{obs} - I_{ph}$  est représenté sur la figure (II-3) qui montre la variation du courant en fonction de la tension ( $I-V$ ) pour une cellule solaire typique. Sous obscurité, la courbe caractéristique est la même que celle d'une diode simple, et sous éclaircissement, la courbe est décalée vers le bas d'une valeur égale au photo-courant  $I_{ph}$ .  $I_{cc}$  et le  $V_{co}$  sont, respectivement, le courant de court-circuit et la tension du circuit ouvert.

- Courant de court-circuit : il est obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule ( $V=0$ ). Il correspond au photo-courant  $I_{ph}$  généré par le rayonnement.

Pour une distribution spectrale donnée, ce photo-courant croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule, de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température [19].

- Tension en circuit ouvert : si la cellule est laissée en circuit ouvert (courant nul), la tension mesurée aux bornes des électrodes est appelée tension de circuit ouvert  $V_{CO}$ . C'est la tension qu'il faudrait appliquer à la diode dans le sens passant pour générer un courant égal au photo-courant  $I_{CC}$  [20]. Elle est donnée par la relation:

$$V_{CO} = \frac{KT}{q} \ln\left(\frac{I_{CC}}{I_0} + 1\right) \quad (\text{II.1})$$



**Figure (II.3) :** Caractéristique d'une cellule photovoltaïque [20].

- Facteur de forme : le facteur de forme ou FF (Fill Factor) représente l'efficacité de la cellule solaire. C'est le rapport entre la puissance maximale débitée  $V_m \cdot I_m$  (la surface du plus petit rectangle) et la puissance idéale  $V_{CO} \cdot I_{CC}$  (La surface du plus grand rectangle) [20]. Où  $V_m$  et  $I_m$  sont les valeurs de tension et du courant correspondant au point de fonctionnement pour lequel la puissance, qui est égale à  $U \cdot I$ , est maximale.



Le FF, est donné par la relation suivante:

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{cc}} \quad (\text{II.2})$$

• Rendement : il est défini par le rapport entre l'énergie maximale délivrée par la cellule  $P_{max}$  et l'énergie lumineuse incidente  $P_{ino}$  par unité de surface :

$$\eta = \frac{V_m I_m}{P_{in}} = \frac{FF V_{oc} I_{cc}}{P_{in}} \quad (\text{II.3})$$

#### II.4.2. Rendement quantique :

Le rendement quantique décrit la probabilité, pour un photon incident d'une longueur d'onde donnée, de créer une paire électron-trou effectivement collectée par la cellule. Il s'exprime selon l'équation suivante :

$$QE(\lambda) = \frac{J_{ph}}{q \Phi_o(\lambda)} \quad (\text{II.4})$$

Où  $J_{ph}(\lambda)$  est le photocourant à la longueur d'onde  $\lambda$ ,  $q$  est la charge d'un électron,  $\Phi_o(\lambda)$  est le flux de photons incidents à la longueur d'onde  $\lambda$ . Deux types de rendement quantiques sont souvent considérés dans le cas de cellules solaires :

- Le rendement quantique externe noté EQE (External Quantum Efficiency), qui prend en compte les effets de pertes optiques, comme la lumière non absorbée ou la lumière réfléchie.
- Le rendement quantique interne ou IQE (Internal Quantum Efficiency), il ne prend pas en considération les photons transmis (absorption incomplète) et réfléchis.

Le rendement quantique interne et le rendement quantique externe sont reliés par la relation suivante:

$$IQE(\lambda) = \frac{EQE(\lambda)}{1-R(\lambda)} \quad (\text{II.5})$$

$R(\lambda)$  : coefficient de réflexion

Le rendement quantique, obtenu en fonction de la longueur d'onde des photons ( $\lambda$ ), correspond au nombre d'électrons collectés relativement au nombre de photons incidents ayant une longueur d'onde donnée. En convoquant cette courbe avec le spectre d'illumination, on peut déterminer le courant généré dans la cellule. De plus, cette courbe est un bon outil pour essayer de cerner les couches ou les interfaces de la cellule solaire qui provoquent des pertes d'absorption.

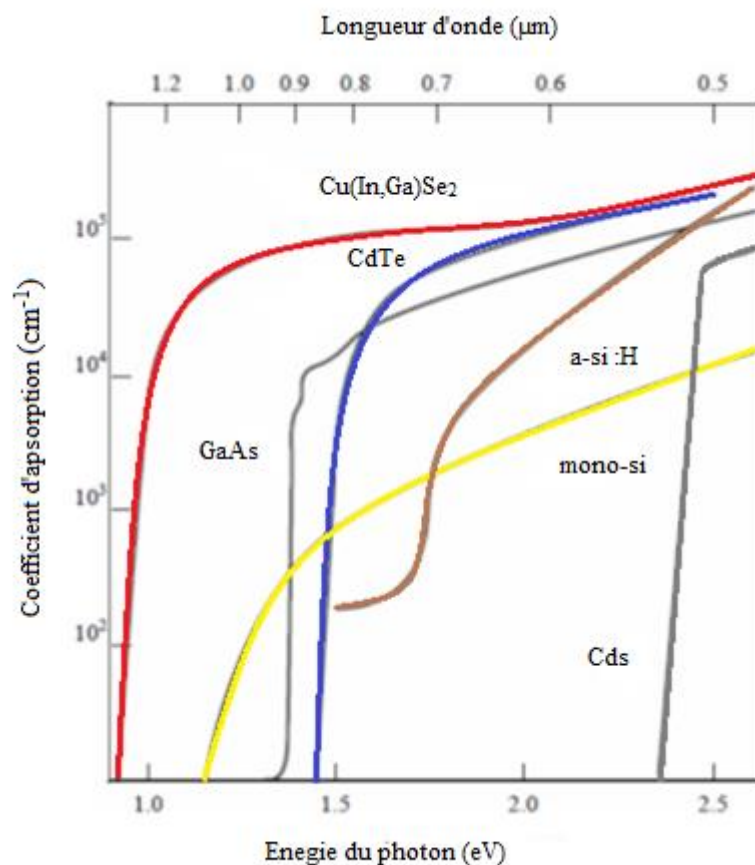
Le rendement quantique dépend essentiellement du coefficient d'absorption des matériaux utilisés, du potentiel d'ionisation, et de l'efficacité de la collecte.

### II.5. Propriétés optiques du $\text{Cu(In,Ga)Se}_2$ :

Le rendement des cellules solaires dépend principalement de la lumière absorbée par la couche absorbante. Du point de vue technologique, la couche absorbante doit avoir un gap optimal pour absorber la plus large gamme des longueurs d'ondes du spectre solaire avec un coefficient d'absorption élevé.

Les propriétés optiques des couches  $\text{Cu(In,Ga)Se}_2$  ont été largement étudiées par plusieurs groupes de recherche [21].

Le  $\text{Cu(In,Ga)Se}_2$  se distingue des autres matériaux photovoltaïques ( $\text{CdTe}$ ,  $\text{GaAs}$ ,  $\text{CdS}$ , etc.) par un coefficient d'absorption très élevé, plus grand que  $10^5 \text{cm}^{-1}$  dans le domaine du visible et le proche infrarouge (Figure. II.4). De plus, le  $\text{Cu(In,Ga)Se}_2$  a une bande interdite à transition directe de l'ordre de 1.04 eV [22].



**Figure (II.4):** Coefficient d'absorption des matériaux ( $\text{Cu(In,Ga)Se}_2$ ,  $\text{CdTe}$ ,  $\text{GaAs}$ ,  $\text{a-Si : H}$ ,  $\text{mono-Si}$  et  $\text{CdS}$ ) pour la fabrication des cellules solaires en couches minces. [21]

## II.6. Propriétés électroniques (Dopage) :

### ➤ Dopage

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

Dans le cas du CIGS, ces valeurs varient dans de faibles proportions en fonction du taux de Ga [23].

Les niveaux accepteurs sont principalement dus aux lacunes de cuivre ( $V_{\text{Cu}}$ ) et d'indium ( $V_{\text{In}}$ ), ainsi qu'aux substitutions d'indium par le cuivre ( $\text{Cu}_{\text{In}}$ ). Cependant le dopage p du CIGS est essentiellement lié aux  $V_{\text{Cu}}$  pour deux raisons. Premièrement, ils génèrent un niveau accepteur très proche (0.03 eV) du maximum de la bande de valence. Deuxièmement, leur énergie de formation est la plus favorable ( $E_f = 0.6\text{eV}$ ) [24]. Quant aux défauts générant des niveaux donneurs ( $\text{In}_{\text{Cu}}$  et  $\text{Cu}_i$ ), ils possèdent une énergie de formation beaucoup élevée que les  $V_{\text{Cu}}$ . C'est donc l'abondance de ce dernier défaut dans le CIGS qui est à l'origine de son dopage p.

## II.7. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté la caractéristique Courant-Tension de la cellule pour calculer ses différents paramètres physiques ainsi que la Structure de la cellule solaire en couches minces. Nous avons également, décrit les propriétés électriques et optiques du matériau utilisé dans ce travail à savoir : le  $\text{CuInGaSe}_2$  (CIGS).

## CHAPITRE III

Simulation numérique des  
Cellules solaires à base de **CIGS**

**III.1. Introduction :**

La simulation est un moyen performant d'analyse et de compréhension des phénomènes physiques dans les dispositifs à semi-conducteurs. En effet, il existe une panoplie d'algorithmes et de logiciels différents pour simuler, comprendre, prédire et optimiser le fonctionnement des dispositifs à semi-conducteurs qui peuvent être déterminés à partir de la solution d'équations différentielles bien connues dans la littérature traitant les semi-conducteurs qui sont : l'équation de Poisson et les deux équations de continuité des électrons et des trous. Ces équations rendent compte des phénomènes de conduction dans le volume du semi-conducteur et aussi dans les régions sièges de charge d'espace. A cause de l'aspect non linéaire de ces équations, il est impossible de résoudre analytiquement le système d'équations et l'emploi des méthodes numériques s'avère indispensable.

Le logiciel commercial SCAPS (Version 3.3.04) est un outil de simulation général et très performant pour décrire le comportement électrique des dispositifs à matériaux semi-conducteurs cristallins. Ce logiciel est particulièrement conçu pour la simulation des dispositifs photovoltaïques et il tient compte de tous les facteurs pouvant limiter les performances photoélectriques dans les cellules solaires (réflexions externes, texturisation, recouvrement de la surface, etc..) mis à part des facteurs primordiaux qui sont : l'épaisseur et le dopage des régions du front et de la base.

L'exploitation du logiciel SCAPS, nous à conduit à simuler le comportement photoélectrique des jonctions N<sup>+</sup>P à base CIGN. Ceci se fait à partir de la simulation numérique de la caractéristique Courant-Tension  $I$  (V) sous les conditions d'éclairement solaire AM1.5. Notre investigation est de voir la sensibilité des paramètres photovoltaïques ou de sortie tels que le courant de court-circuit ( $I_{CC}$ ), le rendement de conversion électrique ( $\eta$ ), la tension de circuit ouvert ( $V_{CO}$ ) et le facteur de forme (FF) ainsi que la réponse spectrale en fonction des paramètres intrinsèques propre au dispositif, soit : le dopage et l'épaisseur de chaque région (front et base) au contact.

### III.2. Présentation du logiciel SCAPS [25]:

La simulation numérique des cellules solaires est essentielle, non seulement pour l'interprétation des mesures avancées sur les structures compliquées des cellules, mais aussi pour désigner et optimiser les structures de la cellule.

SCAPS est originellement développé pour les structures de cellules de famille CuInSe<sub>2</sub> et CdTe. Un aperçu de ses principales caractéristiques est donné ci-dessous :

- Jusqu'à 7 couches semi-conductrices.
- Presque tous les paramètres peuvent être introduits avec des variations graduées (en dépendance de la composition et la profondeur de la cellule, ex:  $\chi$ ,  $\epsilon_{c}$ ,  $N_v$ ,  $v_{thn}$ ,  $\mu_n$ ,  $\mu_p$ ,  $N_a$ ,  $N_d$ , tous les pièges (défauts  $N_i$ ).
- Mécanismes de recombinaison : bande-à-bande (directe), Auger, SRH.
- Les niveaux des défauts : en volume ou à l'interface, en considérant leurs états de charge et la recombinaison à leurs niveaux.
- Les niveaux des défauts, type de charge : pas de charge (neutre), monovalent (un seul donneur, accepteur), divalent (double donneur, double accepteur, amphotère), multivalent (défini par l'utilisateur).
- Les niveaux des défauts, distribution énergétique : niveau discret, uniforme, Gauss, sous forme de queue ou bien une combinaison.
- Les niveaux des défauts, propriété optique : Excitation directe par la lumière est possible (connue par effet de l'impureté photovoltaïque, IPV).
- Les niveaux des défauts, transitions métastables entre les niveaux.
- Contacts : Travail de sortie du métal ou régime de bande plate ; Propriété optique (réflexion ou transmission).
- Effet Tunnel, inter-bandes (dans la bande de conduction ou dans la bande de valence),
- Génération : à partir d'un calcul interne ou bien d'un fichier  $g(x)$  fourni par l'utilisateur.
- Illumination : plusieurs types de spectres sont disponibles (AM0, AM1.5D, AM1.5G, AM1.5G édition 2, Monochromatique, etc.).
- Illumination: du côté P ou N.

Le logiciel SCAPS est capable de résoudre les équations de base de la physique des semi-conducteurs de base, l'équation de Poisson, les équations de conduction et les équations de continuité pour les électrons et les trous (Eqs. III.1-5):

$$\frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{q}{\epsilon_0\epsilon_r} \left( p - n - N_A^- + N_D^+ \frac{\rho_t}{q} \right) \quad (\text{III. 1})$$

$$\frac{1}{q} \frac{dJ_n}{dx} = G - R \quad (\text{III. 2})$$

$$-\frac{1}{q} \frac{dJ_p}{dx} = G - R \quad (\text{III. 3})$$

$$J_n = -D_n \frac{dn}{dx} + \mu_n n \frac{dV}{dx} \quad (\text{III. 4})$$

$$J_p = -D_p \frac{dp}{dx} - \mu_p p \frac{dV}{dx} \quad (\text{III. 5})$$

où  $\mu_n$ ,  $\mu_p$  et  $D_n$ ,  $D_p$  sont les mobilités et les constantes de diffusion des électrons et des trous respectivement. où  $\epsilon$  est la constante diélectrique,  $V$  le potentiel électrostatique,  $n$  et  $p$  les concentrations des porteurs libres,  $N_D^+$  et  $N_A^-$  sont les densités des donneurs et d'accepteurs ionisés respectivement.  $J_n$  et  $J_p$  les densités de courants des électrons et des trous respectivement,  $R$  est le taux de recombinaison et  $G$  le taux de génération électron-trou.

Le terme de recombinaison dans les Eqs (III.2 et III.3) a une dépendance non-linéaire sur les concentrations des porteurs  $n$  et  $p$ . Aussi le second terme (drift) dans les équations de courant (III.4 et III.5) est non-linéaire, car il contient un produit de deux fonctions inconnues  $n$  (ou  $p$ ) et  $\phi$ . Finalement les équations semi-conductrices sont non-linéaire, pour cela un ensemble de  $3N$  équations non linéaires, Eqs. (III.1-5) sont résolues numériquement dans SCAPS en utilisant l'approche suivante :

- Discrétisation du dispositif : Dans une dimension, la longueur totale de la cellule  $L$  est divisée en  $N$  intervalles et les valeurs du potentiel  $\phi_i$  et les concentrations des électrons et des trous  $n_i$  et  $p_i$  de chaque intervalle constituent les  $3N$  inconnues du problème.
- Discrétisation des équations (III.1-5) : les équations de base de chaque intervalle  $i$  conduit à  $3N$  équations non-linéaires (discrétisation par la méthode des différences finies).
- Application sur les conditions de limites (contacts et interfaces).

- Résolution par itération en utilisant le schéma de Scharfetter-Gummel.

La modélisation numérique des cellules solaires est basée sur la résolution de cinq équations essentielles qui gouvernent le comportement des cellules solaires en terme générale, cinq équations différentielles qui sont : deux équations de courants des porteurs minoritaires, deux équations de continuité pour les minoritaires et la loi de poisson, le couplage de ces équations n'ont une solution analytique si et seulement si :

- Les conditions de l'état stationnaire sont satisfaites.
- Le champ électrique est différent de zero seulement dans la zone de charge d'espace.
- Il y a une faible injection : c'est-à-dire la concentration des porteurs minoritaires est plus petite par rapport à celle des majoritaires.

Les concentrations des dopages sont constantes dans les deux régions N et P.

La plupart des simulations peuvent prédire les caractéristiques électriques qui sont associés aux structures et les conditions spécifiques des composants. Dans la simulation la structure des composants est représentée en une dimension, deux dimensions ou bien trois dimensions.

La différence entre les modèles utilisés dans la modélisation des composants, réside dans le degré de la fonctionnalité du modèle, par exemple un tel modèle simple doit résoudre au moins l'équation de poisson pour trouver le champ électrique et le potentiel à l'équilibre thermodynamique, et pour un modèle plus précis il faut que ce dernier contienne toutes les équations motionnées précédemment.

Le principe de fonctionnement de notre simulateur est basé sur les modèles suivants :

Le modèle du courant utilisé est le modèle thermoïnique pour les deux types de porteurs.

$$J_{c,maj} = qv_{th}N_C \exp\left(-\frac{q\Phi_B}{kT}\right)\left(\exp\left(\frac{qV_c}{kT}\right) - 1\right) \quad (\text{III. 6})$$

$$J_{c,maj} = qv_{th}N_V \exp\left(-\frac{q\Phi_B}{kT}\right)\left(\exp\left(\frac{qV_c}{kT}\right) - 1\right) \quad (\text{III. 7})$$

La hauteur de barrière est calculée en fonction du travail de sortie  $\Phi_m$  du métal, l'affinité électronique  $\chi_e$  et l'énergie de la bande interdite  $E_g$  :

Type-n : l'hauteur de barrière des électrons s'écrit donc :

$$\Phi_B = \Phi_m - \chi \quad (\text{III. 8})$$

Type-p : l'hauteur de barrière des trous :



$$\Phi_B = \chi + E_g - \Phi_m \quad (\text{III. 9})$$

Pour les porteurs minoritaires, le modèle utilisé est la description classique de la recombinaison en surface des porteurs minoritaires. Le courant de porteurs minoritaires est donné par :

$$J_{C,min} = qS_c(c - c_0) \quad (\text{III. 10})$$

où  $c$  dénote la concentration des électrons ou des trous, et  $c_0$  dénote la concentration à l'équilibre thermodynamique

Les densités d'états dans la bande de conduction  $N_C$  et dans la bande de valence  $N_V$ , dépend de la température telle que :

$$N_C(T) = N_{C0} \left( \frac{T}{T_0} \right)^{1.5} \quad (\text{III. 11})$$

$$N_V(T) = N_{V0} \left( \frac{T}{T_0} \right)^{1.5} \quad (\text{III. 12})$$

où  $T_0$  est la température de référence égale à 300K.  $N_{C0}$  et  $N_{V0}$  sont les valeurs spécifiques à température ambiante.

La vitesse thermique  $v_{th}(T)$  dépend de la température comme suite :

$$v_{th}(T) = v_{th0} \left( \frac{T}{T_0} \right)^{0.5} \quad (\text{III. 13})$$

Le coefficient d'absorption optique  $\alpha(\lambda)$  d'une couche avec l'énergie de gap  $E_g$  est donné par :

$$\alpha(\lambda) = \left( A + \frac{B}{h\nu} \right) \sqrt{h\nu - E_g} \quad (\text{III. 14})$$

où  $h\nu$  est l'énergie du photon, et A et B sont des constantes.

Le programme comprend plusieurs panneaux (ou fenêtres, ou dopages). Le panneau principal est « le panneau d'action ». Il autorise de mettre le problème, permet de choisir les calculs exigés, exécuter les calculs, naviguer aux autres panneaux, sauver et mettre en graphe les résultats et quitter le programme.

La fenêtre principale du logiciel SCAPS 3201 est présentée sur la figure III.1 ci-dessous.

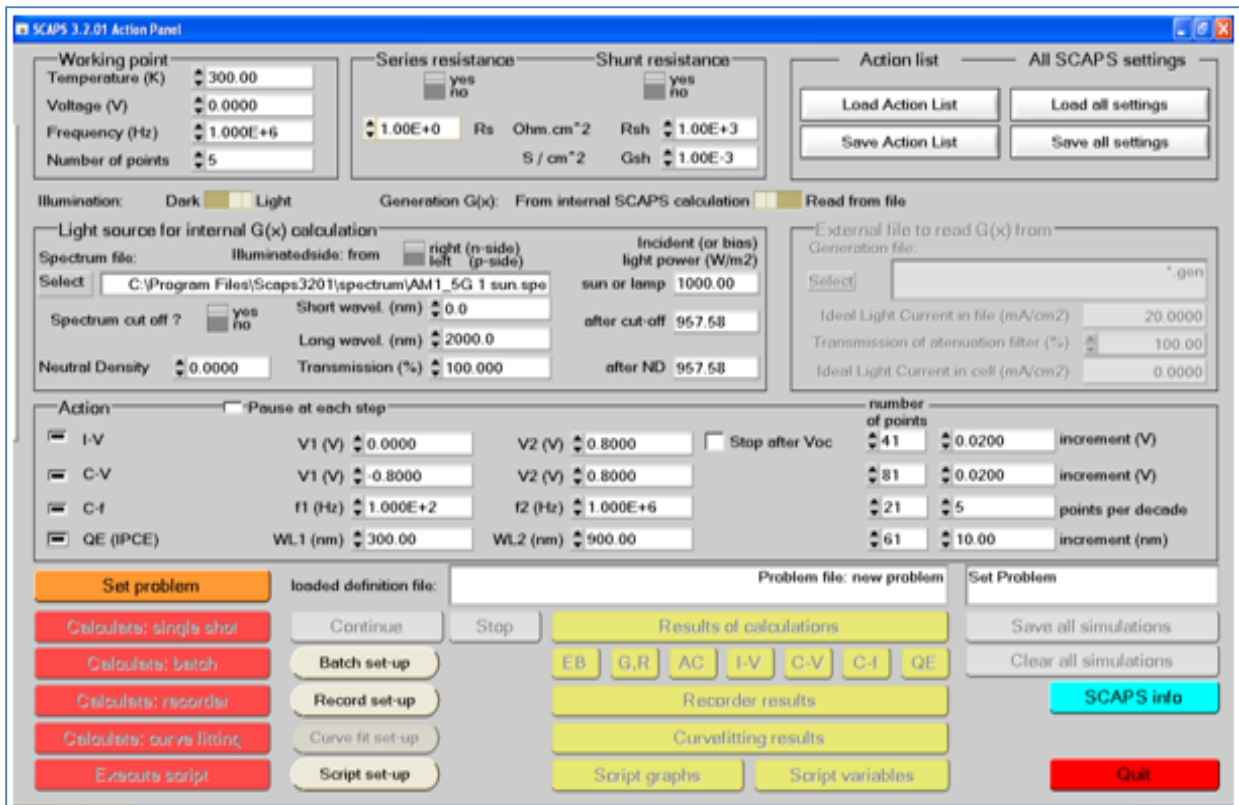


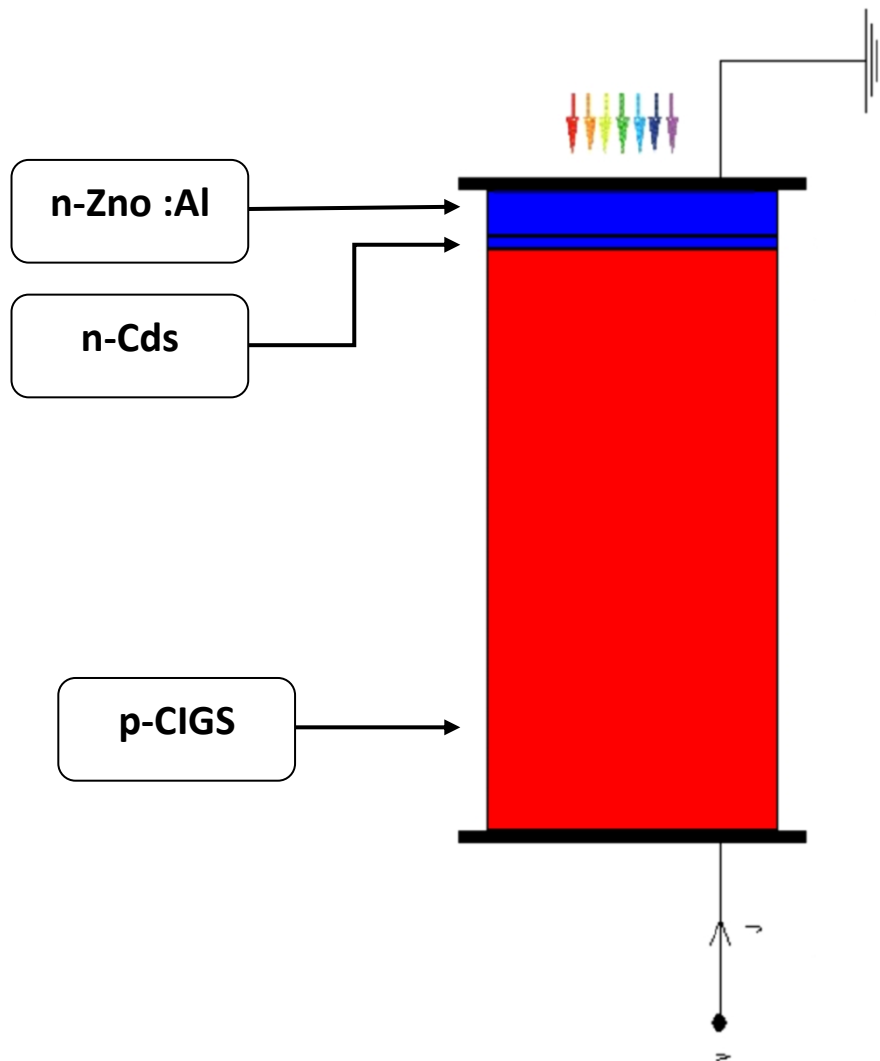
Figure III.1: Fenêtre principale du logiciel SCAPS [25].

Cette fenêtre est appelée "action panel" ce qui permet de poser le problème, d'introduire les paramètres de structure, d'exécuter le programme tout en ayant accès aux résultats par des panneaux : <<Current-density voltage IV, capacitance-voltage CV, capacitance-frequency Cf et Quantum-Efficiency QE>>.

### III.3. Présentation de la cellule étudiée :

La structure à étudier est une cellule à simple homojonction N<sup>+</sup>P dont le schéma de principe est représenté sur la figure III.2. Elle est constituée, principalement, d'une couche émettrice de type n fortement dopée et d'une base de type p (ou bien l'inverse).

Les couches semi-conductrices ZnO :Al (fenêtre) , CdS (tampon) , le CIGS (absorbeur), et le substrat de base.



**Figure III.2:** Structure de la cellule solaire à base de CIGS [25].

#### III.4. Résultats de la simulation numérique et interprétations :

La difficulté dans la simulation des dispositifs électroniques réside dans le choix des paramètres de simulation. Dans ce qui suit, on s'est intéressé à la conversion photoélectrique dans les cellules solaires à base de CIGS. L'optimisation des grandeurs de sortie (courant de court-circuit, rendement de conversion électrique, tension de circuit ouvert et facteur de forme) ainsi que la réponse spectrale se fera en fonction des paramètres technologiques concernant les régions du front et de la base dans les jonctions  $N^+P$ , en particulier le dopage et l'épaisseur.

- Le tableau (III.1) regroupe tous les paramètres physiques des trois couches ZnO :Al, CdS et CIGS d’après la base des données de SCAPS.

	Zno :Al	Cds	CIGS
Epaisseur (μm)	0.2	0.05	2.5
Bande de gap	3.5 eV	2.4 eV	1.15 Ev
Affinité électronique (eV)	4.65	4.2	4.5
Constante diélectrique	9	10	13.6
$N_c(cm^{-3})$	$2.2 \times 10^{17}$	$2.2 \times 10^{18}$	$2.2 \times 10^{18}$
$N_v(cm^{-3})$	$1.8 \times 10^{19}$	$1.8 \times 10^{19}$	$1.8 \times 10^{19}$
La vitesse thermique des électrons	$1 \times 10^7$	$1 \times 10^7$	$1 \times 10^7$
La vitesse thermique du trou	$1 \times 10^7$	$1 \times 10^7$	$1 \times 10^7$
Mobilité d’électron ( $cm^2/V.s$ )	100	100	100
Mobilité du trou ( $cm^2/V.s$ )	25	25	25

**Tableau III.1 :** Constantes physiques spécifiques du Zno, de CdS et CIGS à 300K.

- Notre travail consiste à optimisé une cellule solaire à base de CIGS et à simuler ces paramètres électriques, optiques et géométriques afin de concevoir une cellule ayant le rendement électrique optimal.
- Le tableau (III.2) regroupe respectivement les paramètres technologiques tels que l’épaisseur et le dopage, pour chaque région, front et base de la cellule solaire CIGS.

Paramètres technologiques	Valeurs par défaut	Etendu de variation
Dopage du front ( $cm^{-3}$ )	$10^{18}$	$10^{15} - 10^{21}$
Dopage de la base ( $cm^{-3}$ )	$10^{17}$	$10^{15} - 10^{21}$
Epaisseur du front (μm)	0.01	0.01 – 0.1
Epaisseur de la base (μm)	2.5	1 – 5

**Tableaux III.2 :** Valeurs des paramètres de la simulation numérique pour le CIGS.

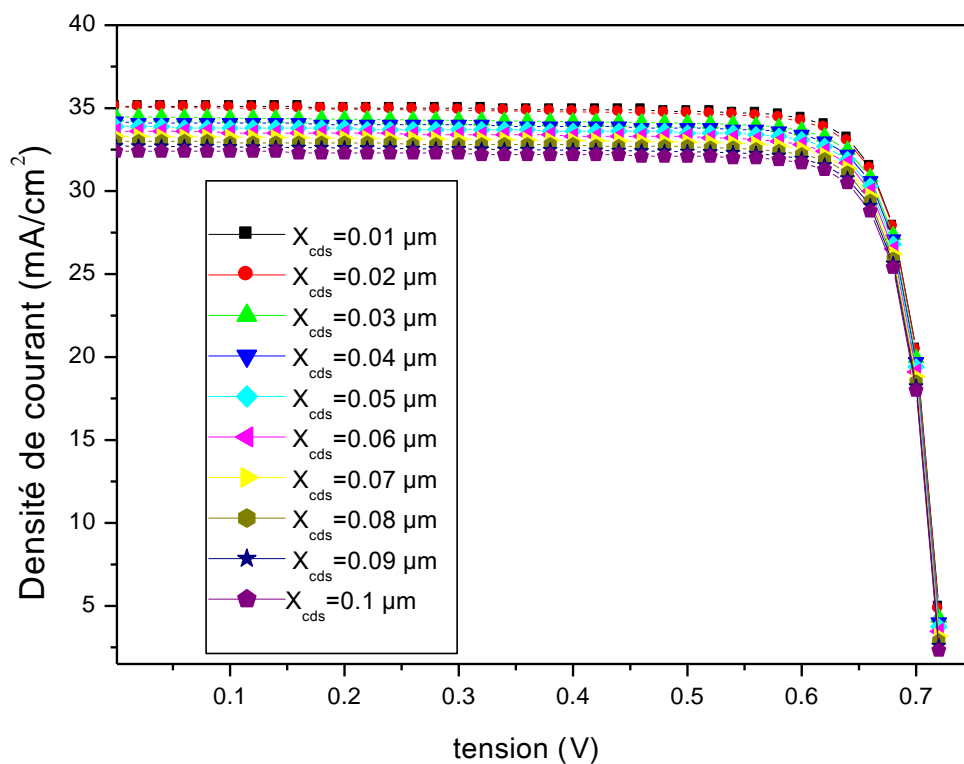
Le choix des épaisseurs de front et de base faibles réside dans l'orientation de la technologie des dispositifs photovoltaïques réalisés en couche minces d'une part et des difficultés à obtenir des matériaux à base de CIGS avec des épaisseurs importantes d'autres part.

- Dans notre étude, les caractéristique I (V) sont simulées dans les conditions d'éclairement solaire AM1.5G [26] pour une puissance incidente de  $1000 \text{ W/m}^2$ .

### III.4.1. Effet des paramètres technologiques du front dans les cellules N<sup>+</sup>P

#### III.4.1.1. Effet de l'épaisseur sur les grandeurs photovoltaïques :

L'effet de la variation de l'épaisseur du front  $X_{cds}$  de  $0.01$  à  $0.1 \mu\text{m}$  sur la caractéristique I-V et représenté sur la figure III.3.



**Figure III.3 :** Influence de l'épaisseur du front sur la caractéristique I-V.

Les paramètres de la structure, pour différentes épaisseurs  $X_{cds}$ , tirés des différentes caractéristiques, sont récapitulés dans le tableau suivant III.3:

Epaisseur de la couche Cds ( $\mu\text{m}$ )	Tension en circuit ouvert $V_{CO}$ (v)	Courant à court-circuit $I_{CC}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	Facteur de forme FF(%)	Rendement $\eta$ (%)
0.01	0.7239	35.14	83.47	21.23
0.02	0.7237	35.07	83.27	21.13
0.03	0.7234	34.48	83.35	20.79
0.04	0.7232	34.15	83.47	20.62
0.05	0.7230	33.88	83.47	20.44
0.06	0.7227	33.60	83.45	20.26
0.07	0.7225	33.30	83.44	20.08
0.08	0.7223	33.01	83.43	19.89
0.09	0.7221	32.72	83.42	19.71
0.1	0.7219	32.44	83.41	19.53

**Tableau III.3:** Caractéristiques de cellule solaire de CIGS.

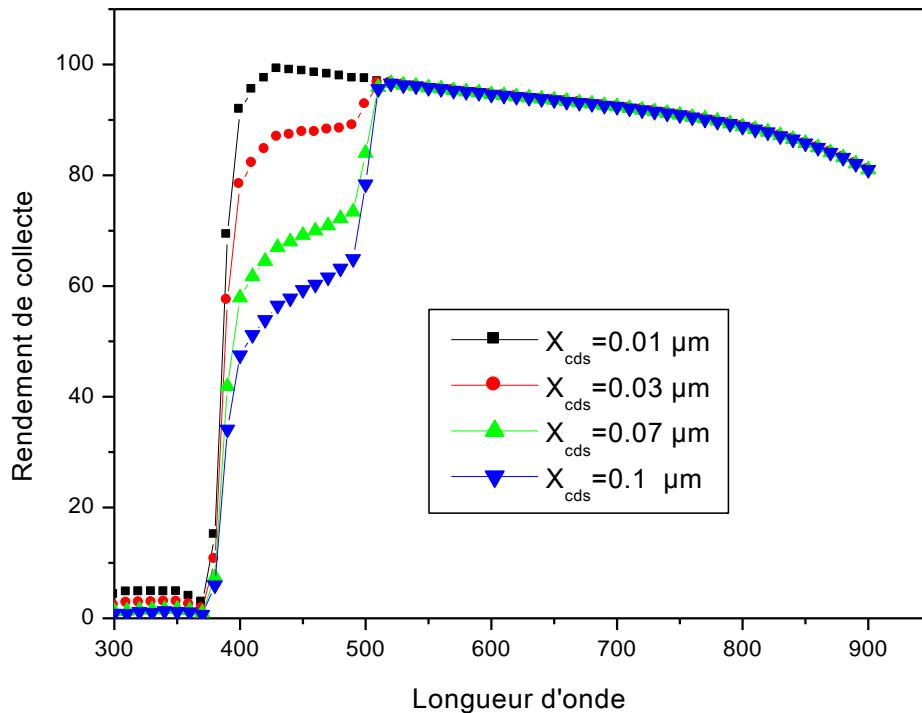
Nous remarquons que la caractéristique I-V a une meilleure forme pour les petites épaisseurs de CdS. Chaque fois que l'épaisseur augmente la caractéristique I-V se déforme.

La variation de l'épaisseur du front  $X_{cds}$  avec le rendement montre qu'il y a une diminution du rendement avec l'augmentation de l'épaisseur du front. Nous obtenons un rendement de 21.23% avec une épaisseur de 0.01 $\mu\text{m}$ .

La tension en circuit ouvert  $V_{CO}$  diminue avec l'augmentation de l'épaisseur du front  $X_{cds}$ .

### III.4.1.2. Effet de l'épaisseur sur la réponse spectrale :

Le choix de l'épaisseur peut aussi être expliqué par le tracé de la réponse spectrale qui est donnée par la figure (III.4).

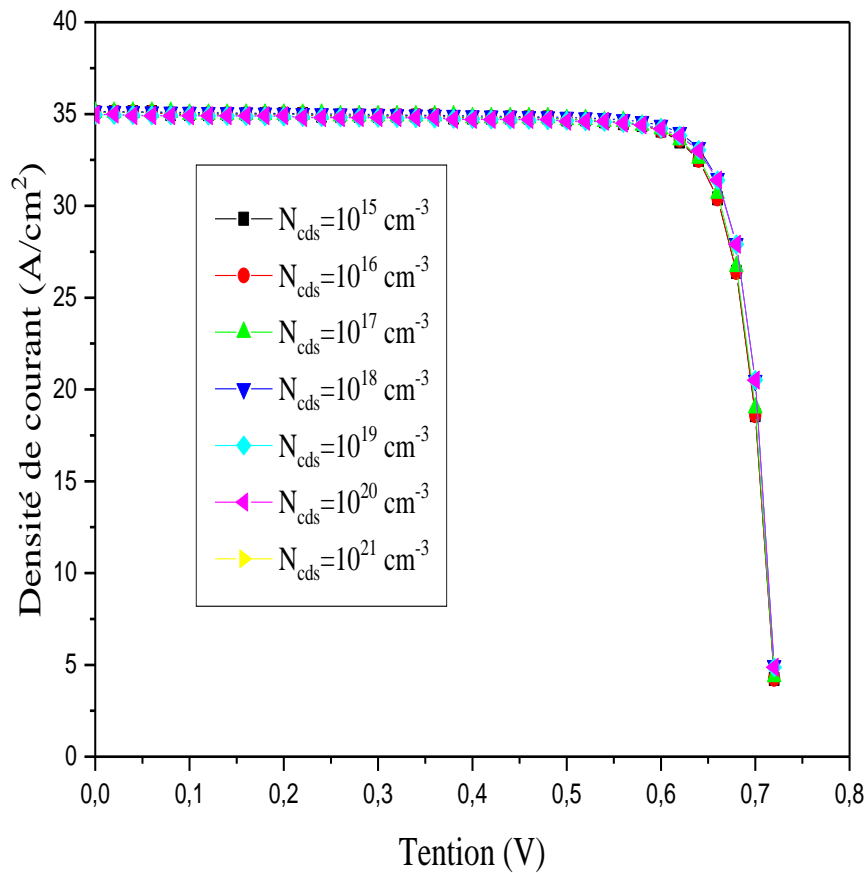


**Figure III.4 :** Variation de la réponse spectrale en fonction de l'épaisseur du front pour CIGS dans le cas de la jonction  $N^+P$ .

Pour avoir le maximum de collecte et minimiser les pertes en surface, il faut rapprocher la jonction à la surface d'éclairage le plus possible. En réduisant ainsi l'épaisseur de la face avant à  $0.01 \mu m$ , on arrive à atteindre un rendement de collecte élevé (>80%).

### III.4.1.3. Effet du dopage sur les grandeurs photovoltaïques :

La figure III.5 représente la caractéristique I-V de notre cellule photovoltaïque pour une gamme de dopage du front allant de  $10^{15}$  jusqu'à  $10^{22} \text{ cm}^{-3}$ .



**Figure III.5:** Influence pour différent dopage du front sur la caractéristique I -V.



Les paramètres de la structure tirés des différentes caractéristiques représentées précédemment, sont récapitulés dans le tableau III.4.

Densité de dopage Cds( $cm^{-3}$ )	Tension en circuit ouvert $V_{CO}$ (v)	Courant à court-circuit $I_{CC}$ ( $mA/cm^2$ )	Facteur de forme FF(%)	Rendement $\eta$ (%)
$10^{15}$	0.7241	35.090	82.08	20.86
$10^{16}$	0.7241	35.091	82.11	20.86
$10^{17}$	0.7240	35.10	82.40	20.94
$10^{18}$	0.7239	35.14	83.47	21.23
$10^{19}$	0.7238	34.963	83.57	21.15
$10^{20}$	0.7238	34.966	83.58	21.15
$10^{21}$	0.7238	34.97	83.58	21.15

**Tableau III.4:** Caractéristiques de cellule solaire de CIGS.

Après la variation du dopage de la couche tampon CdS, nous observons que ces courbes présentent deux zones différentes :

**-La première zone (0-0.6V) :** les courbes I-V sont identiques (ont la même allure) l'élévation du dopage n'a pas une influence significative sur la caractéristique I-V jusqu'à une tension de l'anode de 0.6V.

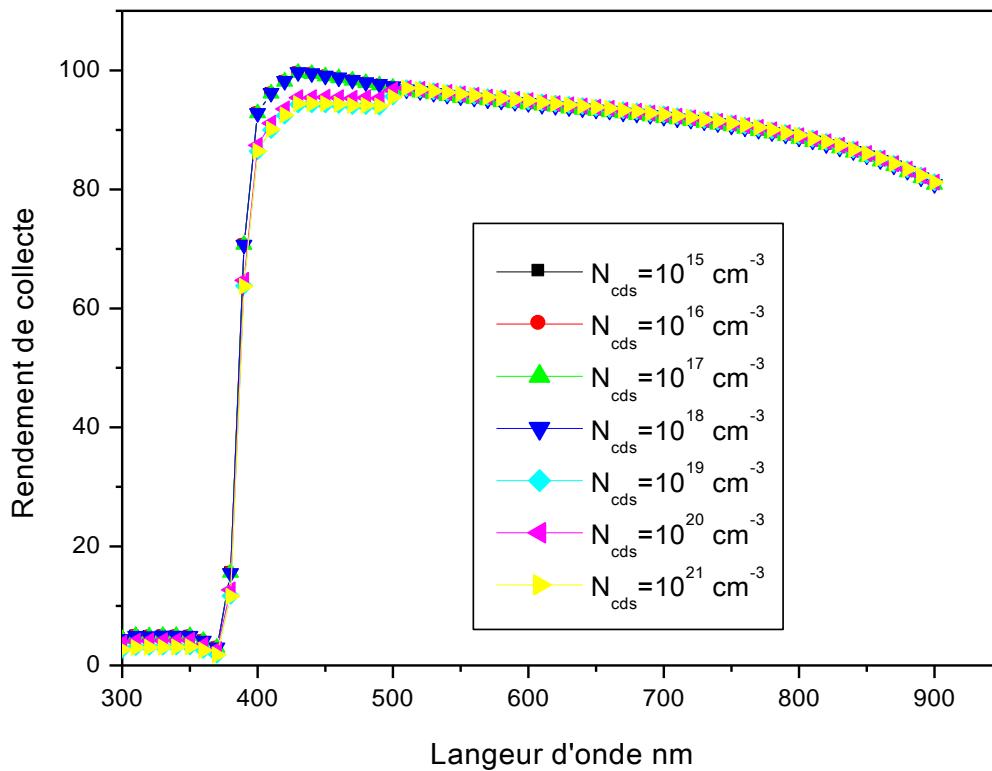
**-La deuxième zone (0.6 -0.75V) :** les courbes I-V ne subissent pas des modifications, ces dernières présentent un changement significatif au point de fonctionnement (le maximum de puissance).

Le Tableau montre que le rendement subissent une augmentation pour un dopage entre  $10^{15}$  et  $10^{18} cm^{-3}$  mais, stabiliser quand on augmente la concentration du dopage au-delà de  $10^{18} cm^{-3}$ . Le rendement le plus élevé est obtenue à la concentration de  $10^{18} cm^{-3}$ .

La tension de circuit ouvert  $V_{CO}$  diminue lorsque la concentration du dopage augmente. Ceci est du à la diminution du courant de saturation puisque ce dernier est lié à la tension du circuit ouvert.

**III.4.1.4. Effet de dopage sur la réponse spectrale :**

Dans la figure (III.6) donnant le tracé de la réponse spectrale de cellule N<sup>+</sup>P au la CIGS pour des dopages du front de  $10^{15}$ ,  $10^{16}$ ,  $10^{17}$ ,  $10^{18}$ ,  $10^{19}$ ,  $10^{20}$ ,  $10^{21} \text{ cm}^{-3}$  on a noté qu'une légère influence. La meilleure réponse spectrale est obtenue pour un dopage de l'ordre de  $10^{18}$ ,  $\text{cm}^{-3}$ . figure III.6.

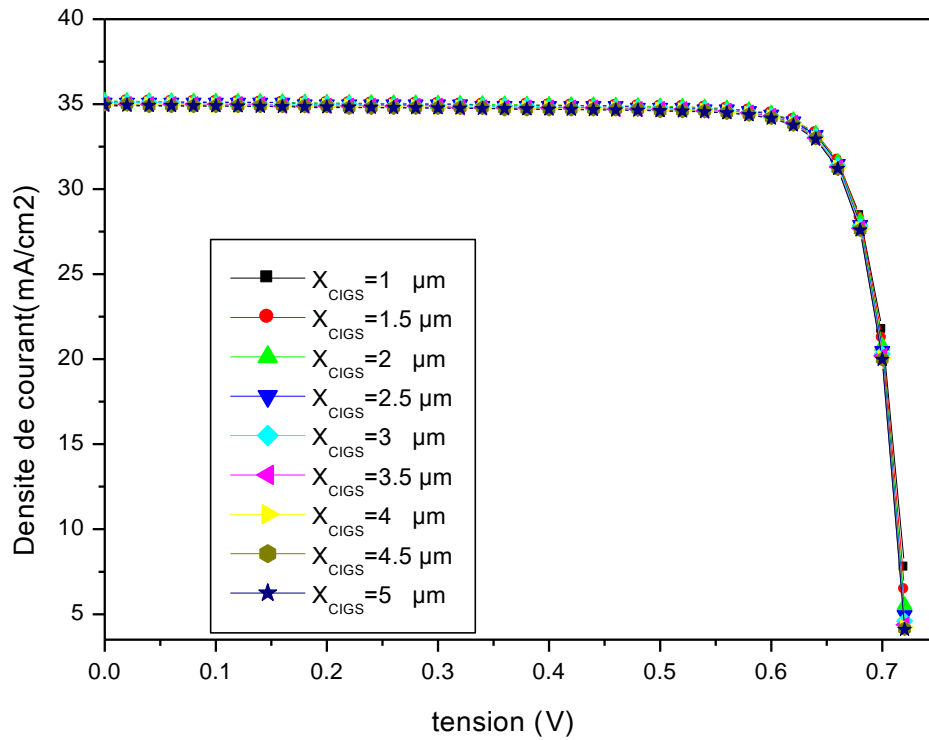


**Figure III.6:** Variation de la réponse spectrale pour différent dopage du front pour La CIGS dans le cas de la jonction N<sup>+</sup>P

### III.4.2.Effet des paramètres technologiques de la base dans les cellules N<sup>+</sup>P

#### III.4.2.1.Effet de l'épaisseur sur les grandeurs photovoltaïques :

L'effet de la variation de l'épaisseur de la base  $X_{\text{CIGS}}$  de 1 à 5  $\mu\text{m}$  sur la caractéristique I-V représenté sur la figure III.7.



**Figure III.7:** Influence de l'épaisseur de la base sur la caractéristique I -V.

Le tableau suivant résume les différentes caractéristiques de la structure pour différentes épaisseurs.

Épaisseur de la couche CIGS ( $\mu\text{m}$ )	Tension en circuit ouvert $V_{CO}$ (v)	Courant à court-circuit $I_{CC}$ ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ )	Facteur de forme FF (%)	Rendement $\eta$ (%)
1	0.7265	35.93	83.62	21.32
1.5	0.7252	35.19	83.54	21.31
2	0.7244	35.17	83.49	21.28
2.5	0.7239	35.14	83.47	21.23
3	0.7236	35.09	83.45	21.19
3.5	0.7234	35.04	83.44	21.15
4	0.7233	35.00	83.44	21.12
4.5	0.7233	34.97	83.43	21.10
5	0.7232	34.94	83.43	21.08

**Tableau III.5.** Caractéristiques de cellule solaire de CIGS.

Nous remarquons que ces caractéristiques I(V) présentent deux zones :

-**La première zone** (0-0.6V) : pas de variation avec l'épaisseur.

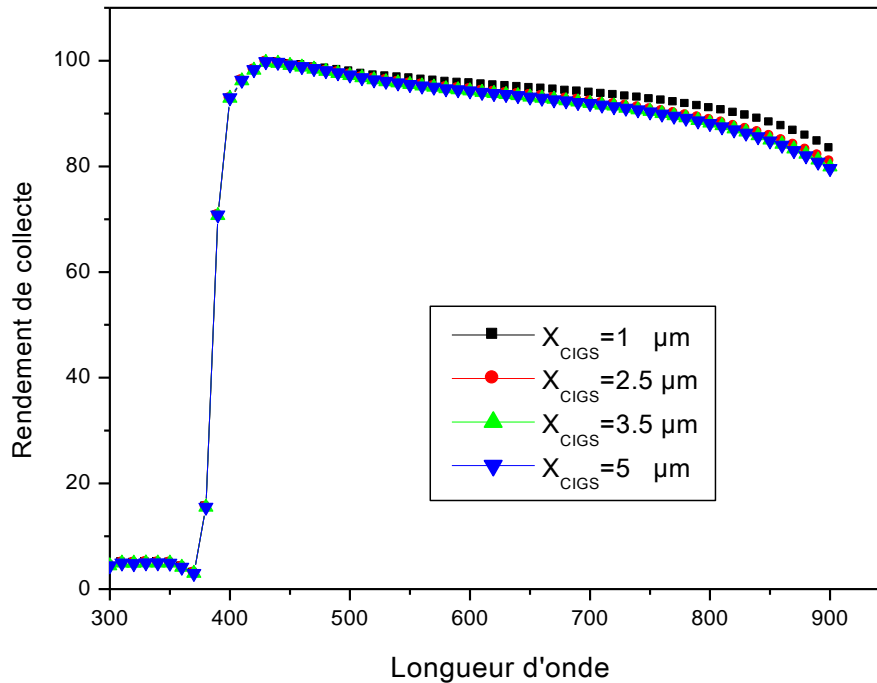
-**La deuxième zone** (0.6-0.75V) : les courbes I-V ne subissent pas des modifications, ces dernières présentent une stabilité au point de fonctionnement (le maximum de puissance).

Le Tableau montre que les paramètres de sortie  $I_{cc}$ ,  $\eta$ ,  $V_{co}$  et FF de la cellule solaire décroissent avec l'augmentation de l'épaisseur de la base. Nous avons obtenu un rendement maximal de 21.32% avec une épaisseur de  $1\mu\text{m}$ .

Le rendement décroît lorsque l'épaisseur de la CIGS est augmentée. Donc la probabilité de recombinaison des transporteurs générés est plus importante au voisinage du contact arrière.

### III.4.2.2. Effet de l'épaisseur sur la réponse spectrale :

Le choix de l'épaisseur peut aussi être expliqué par le tracé de la réponse spectrale qui est donnée par la figure III.8.

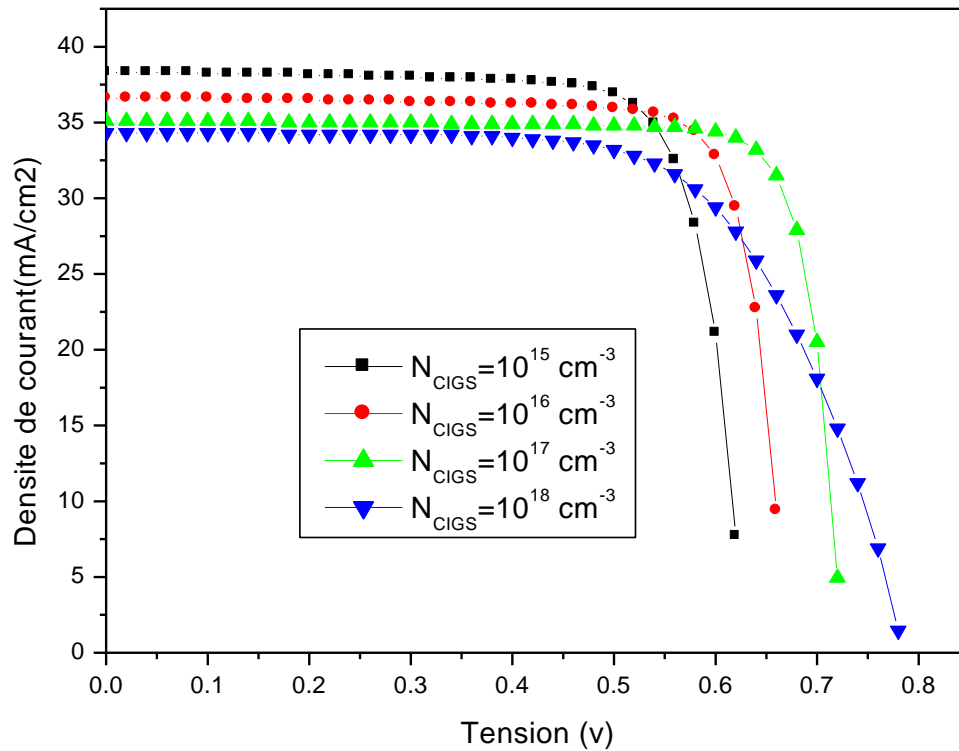


**Figure III.8:** Variation de la réponse spectrale en fonction de l'épaisseur de la base pour la CIGS dans la cellule N<sup>+</sup>P.

Pour avoir le maximum de collecte et minimiser les pertes en surface, il faut rapprocher la jonction à la surface d'éclairement le plus possible. En réduisant ainsi l'épaisseur de la face avant à 1 µm, on arrive à atteindre un rendement de collecte élevé (>80%).

### III.4.2.3. Effet du dopage sur les grandeurs photovoltaïques:

Pour voir l'influence du dopage de la base CIGS nous avons procédé à la variation de  $N_{\text{CIGS}}$  de  $10^{15}$  à  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . L'influence du dopage de l'absorbeur CIGS sur la caractéristique IV est représentée sur la figure III.9.



**Figure III.9:** Influence pour différent dopage de la base sur la caractéristique I -V.

Les résultats de simulation sont récapitulés dans le tableau :

Densité de dopage CIGS ( $\text{cm}^{-3}$ )	Tension en circuit ouvert $V_{CO}$ (V)	Courant à court-circuit $I_{CC}$ ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ )	Facteur de forme FF (%)	Rendement $\eta$ (%)
$10^{15}$	0.6270	38.35	78.56	18.89
$10^{16}$	0.6687	36.65	81.39	19.95
$10^{17}$	0.7239	35.14	83.47	21.23
$10^{18}$	0.7844	34.29	66.02	17.76
$10^{19}$	0.9850	19.37	10.35	1.97
$10^{20}$	2.3963	1.29	21.84	0.68
$10^{21}$	6.0573	0.871	11.91	0.63

**Tableau III.6:** Caractéristiques de cellule solaire de CIGS.

**-La première zone (0-0.5V) :** les courbes I-V sont identiques (ont la même allure) ; l'élévation du dopage n'a pas une influence significative sur la caractéristique I-V jusqu'à une tension de l'anode de 0.5V.

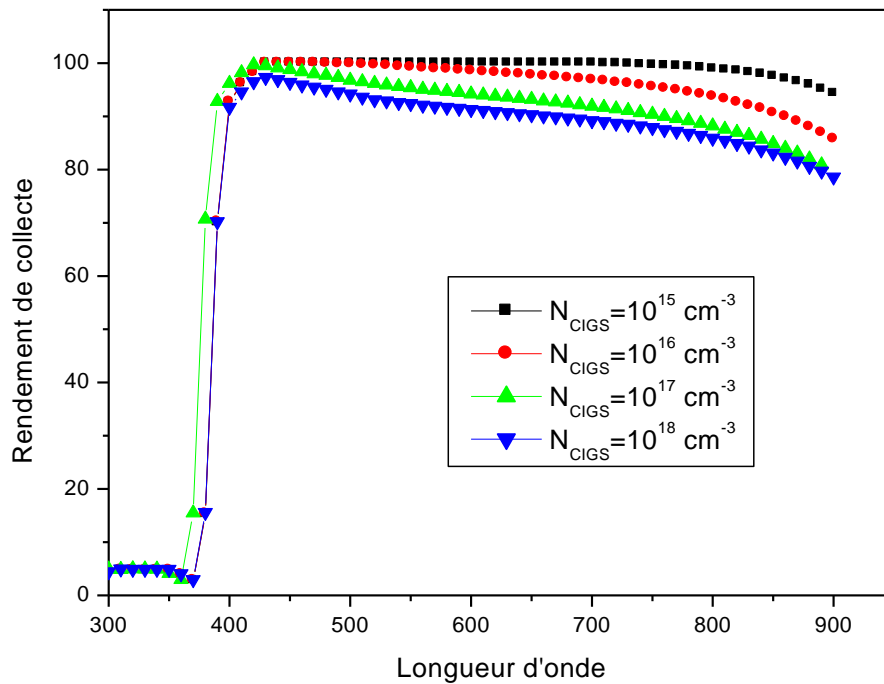
**-La deuxième zone (0.5 -0.65V) :** les courbes I-V subissent des modifications, ces dernières présentent un changement significatif au point de fonctionnement (le maximum de puissance).

Nous remarquons aussi que le rendement et Facteur de forme subissent une augmentation pour un dopage entre  $10^{15}$  et  $10^{17} \text{cm}^{-3}$  mais, commence à diminuer quand on augmente la concentration du dopage au-delà de  $10^{17} \text{cm}^{-3}$ . Le rendement le plus élevé est obtenue à la concentration de  $10^{17} \text{cm}^{-3}$ .

Les caractéristiques des matériaux semi-conducteurs sont fortement influencées par les impuretés ou les défauts. Ces derniers sont ajoutés pour augmenter la conductivité électrique ou le contrôle de la durée de vie, mais souvent ces impuretés ou ces imperfections dans le réseau, à partir d'un certain seuil, agissent comme facteurs de perte, par conséquent une concentration élevée de défauts défavorise le transport des porteurs, réduisant ainsi le rendement de conversion.

#### III.4.2.4. Effet de dopage sur la réponse spectrale :

Dans la figure (III.10) donnant le tracé de la réponse spectrale de cellule N<sup>+</sup>P au la CIGS pour des dopages de base de  $10^{15}$ ,  $10^{16}$ ,  $10^{17}$ ,  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ .



**Figure III.10:** Variation de la réponse spectrale en fonction du dopage de la base pour La CIGS dans la cellule N<sup>+</sup>P.

On a noté qu'une légère influence. La meilleure réponse spectrale est obtenue pour un dopage de l'ordre de  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$ .

L'analyse de l'ensemble de nos résultats montre que les meilleures grandeurs photovoltaïques pour CIGS, c'est-à-dire :

$$I_{CC} = 35.17 \text{ mA},$$

$$\eta = 21.31\%,$$

$$V_{CO} = 0.7252 \text{ V},$$

$$FF = 83.54\%,$$



Sont obtenus pour:

$$X_{cds}=0.01 \mu\text{m},$$

$$N_{cds}=10^{18} \text{cm}^{-3},$$

$$X_{CIGS}=1.5 \mu\text{m},$$

$$N_{CIGS}=10^{17} \text{cm}^{-3}.$$

### III.4.3.Effet de température :

#### III.4.3.1.Effet de la température sur la caractéristique I-V de la cellule solaire :

Comme tous les autres dispositifs semi-conducteurs, les cellules solaires sont sensibles à la température, Les figure III.10 représente la caractéristique I-V d'une cellule solaire à différentes températures (300K, 310K, 320K, 330K), gardant les mêmes paramètres physiques et technologiques.

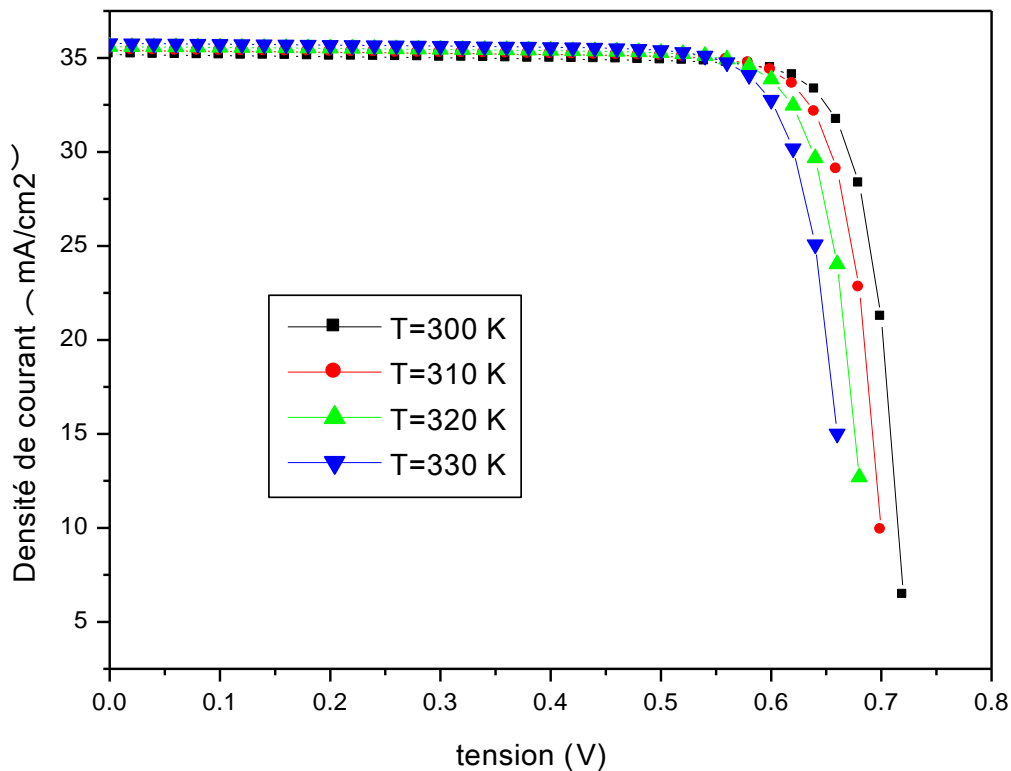


Figure III.10 : Caractéristique I-V d'une cellule solaire en fonction de température

Nous pouvons remarquer d’après cette figure que la variation de température ne change pas la caractéristique I-V dans le premier intervalle de tension de polarisation (0 à 0.55V), l’influence de température est visible dans le deuxième intervalle de tension de polarisation (0.55V à 0.75V).

Le tableau suivant résume les différentes caractéristiques de la structure pour différentes température.

température (K)	Tension en circuit ouvert $V_{CO}(v)$	Courant à court-circuit $I_{CC}(mA/cm^2)$	Facteur de forme FF(%)	Rendement $\eta(\%)$
300	0.7252	35.17	83.54	21.31
310	0.7088	35.40	83.04	20.83
320	0.6924	35.60	82.47	20.33
340	0.6760	35.77	81.85	19.79

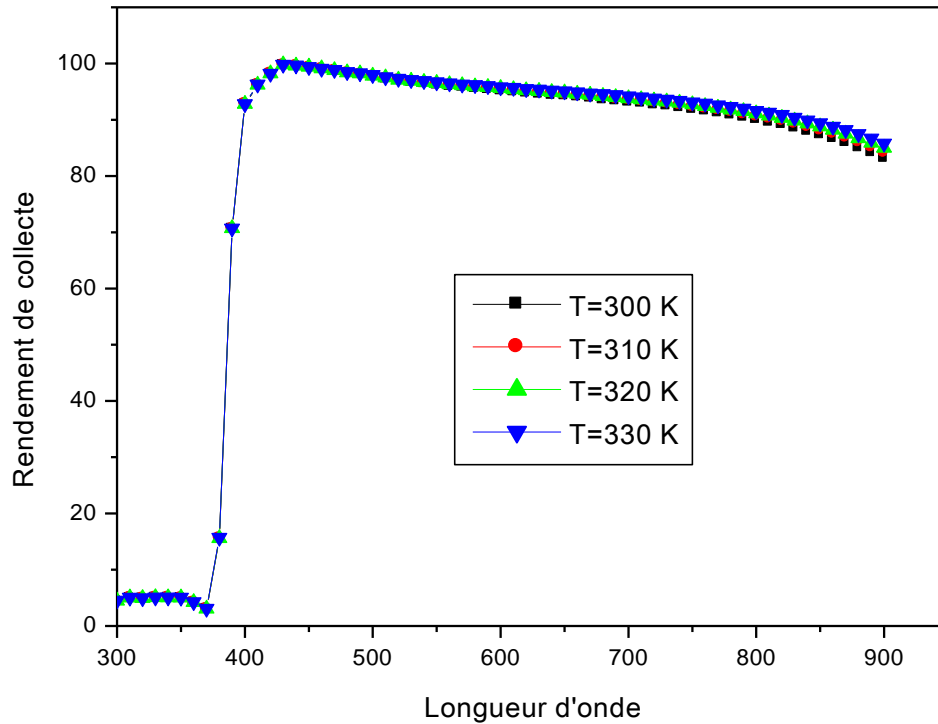
**Tableau III.6:** Caractéristiques de cellule solaire de CIGS.

Le Tableau montre que le rendement  $\eta$  de la cellule solaire décroît avec l’augmentation de la température. Nous avons obtenu un rendement maximal de 21.31% avec une température de 300 K.

La température peut influencer les différents paramètres d’une cellule solaire ; Le courant de court-circuit,  $I_{CC}$ , augmente légèrement avec la température, car l’énergie de bande interdite,  $E_g$ , diminue et crée plus de porteurs de charges.

### III.4.3.1. Effet de température sur la réponse spectrale :

Dans la figure (III.11) donnant le tracé de la réponse spectrale de cellule N<sup>+</sup>P au la CIGS pour des températures de 300, 310, 320, 330 K on a noté qu'une légère influence



**Figure III.11 :** Variation de la réponse spectrale en fonction de température dans la cellule N<sup>+</sup>P.

Dans cette figure, nous observons que le rendement de collecte fournie par la cellule solaire augmente avec l'augmentation de la température

Pour valider notre travail nous avons jugé utile de faire des comparaisons avec les résultats obtenus dans la littérature [27, 28, 29].

Le tableau (III.7) regroupe tous les paramètres de sortie des cellules solaires à base de CIGS obtenus dans la littérature en comparaison avec nos résultats :

Matériaux	$V_{CO}(v)$	$I_{CC}(mA)$	FF(%)	$\eta(\%)$	Références
CIGS/c-Si tandem	0.831	28.2	76.9	18.0	[27]
CdS/CIGS	0.672	32.5	78.8	17.2	[28]
ZnS /CIGS	0.668	36.42	81.30	19.80	[29]
CdS/CIGS	0.7252	35.17	83.54	21.31	Nos résultats

**Tableau III.7 :** Comparaison de nos résultats avec les résultats donnés dans la littérature.

➤ Nous remarquons que nos résultats pour une simple jonction PN, sont les meilleurs, car nous obtenons un meilleur rendement. Le rendement sera certainement encore plus important avec une cellule solaire à multijonctions.

### III.5.Conclusion :

Dans ce chapitre, nous nous sommes appuyés sur le logiciel le plus adapté à la conversion photovoltaïque des dispositifs à semiconducteurs, qui est le Scaps -1D .

Dans cette partie nous avons simulé la caractéristique I(V) de la cellule solaire à base de CIGS sous les conditions AM1.5 d'éclairement solaire et on a déduit les paramètres de sortie tels que : le courant de court-circuit  $I_{CC}$ , le rendement de conversion électrique, la tension de circuit ouvert  $V_{CO}$  et le facteur de forme FF .Cette simulation nous a permis de mieux comprendre la sensibilité et la variation de ces grandeurs en fonction des épaisseurs des régions N et P.

Pour renforcer les résultats de la simulation, le rendement de collecte pour chaque longueur d'onde du spectre solaire ou encore la réponse spectrale a été le tracé en fonction de ces paramètres.

L'analyse de l'ensemble de nos résultats montre que les meilleures grandeurs photovoltaïques pour la cellule solaire à base  $Cu(In, Ga)Se_2$  sont :  $I_{CC} = 35.17$  mA,  $\eta = 21.31\%$ ,  $V_{CO} = 0.7252$  V,  $FF = 83.54\%$ , sont obtenus pour:  $X_{cds} = 0.01$   $\mu m$ ,  $N_{cds} = 10^{18} cm^{-3}$ ,  $X_{CIGS} = 1.5$   $\mu m$ ,  $N_{CIGS} = 10^{17} cm^{-3}$ .

En effet, Cette étude nous a permis d'optimiser le rendement électrique de la structure ZnO/CdS/CIGS. Nous pouvons dire que les paramètres de chaque couche jouent un rôle très important vis-à-vis des performances du dispositif étudié et en particulier dans l'amélioration du rendement de conversion des cellules solaires à base de matériaux  $Cu(In, Ga)Se_2$  (CIGS).Effectivement, puisqu'ils affectent les propriétés électriques de la jonction.

## CONCLUSION GÉNÉRALE

## Conclusion générale

---

L'objectif de notre travail était d'étudier l'intégration des cellules solaires à base Cu(In, Ga)Se<sub>2</sub> dans la technologie photovoltaïque et leur influence sur le rendement électrique tout en identifiant certains verrous qui limitent cette technologie. Ceci dans le but d'optimiser le temps et le coût de fabrication de ces cellules photovoltaïques à couches minces (CIGS) et d'étendre ainsi la technologie à la fabrication en série.

Dans ce travail nous avons utilisé la simulation numérique pour l'étude des caractéristiques de ces dispositifs. Nous avons aussi optimisé les paramètres technologiques d'une structure spécifique de cellule solaire à base de CIGS pour obtenir un rendement de conversion électrique maximal.

L'optimisation et la simulation ont été faites par le logiciel Scaps -1D, pour étudier les performances des cellules solaires à base de Cu(In, Ga)Se<sub>2</sub> (CIGS).

Nous avons évalué, dans un premier temps, le courant de court-circuit  $I_{CC}$ , la tension en circuit ouvert  $V_{CO}$ , le facteur de forme FF et le rendement électrique  $\eta$  pour une structure typique de CdS/CIGS.

Le rendement de la cellule solaire de référence a été évalué à partir de la caractéristique I(V) simulée.

Les résultats obtenus après simulation sont les suivants :

En prenant une structure qui combine les paramètres optimaux (épaisseur et dopage) de chaque couche, nous avons pu atteindre un rendement de conversion électrique de 21.31% avec un facteur de forme de 83.54%.

Les paramètres optimums de la structure optimale obtenus par notre simulation pour les régions du front et de la base de la cellule solaire sont présentés dans le tableau suivant.

**Tableau:** Paramètres optimum ayant donné  $\eta=21.31\%$

CdS		CIGS		$\eta$ (%)	FF (%)	$I_{CC}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$V_{CO}$ (V)
$N_{cds}$ (cm <sup>-3</sup> )	$X_{cds}$ ( $\mu$ m)	$N_{CIGS}$ (cm <sup>-3</sup> )	$X_{CIGS}$ ( $\mu$ m)				
10 <sup>18</sup>	0.01	10 <sup>17</sup>	1.5	21.31	83.54	35.17	0.72

## Conclusion générale

---

Cette étude nous a permis d'optimiser le rendement électrique de la structure CdS/CIGS et de montrer l'impact de chaque couche sur les performances du dispositif en fonction du rôle de chacune d'elle.

En fin, la validité de la rugosité des résultats obtenus par simulation, a été confronté avec ceux issus de la littérature.

Espérant que l'approche proposée peut fournir une base théorique et des connaissances physiques pour la conception des cellules solaires à base de CIGS.



## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

## Références bibliographiques

---

- [1] Soltane Belakehal, conception et commande machines à aimants permanents dédiées aux énergies renouvelables, thèse de doctorat, université de Constantine, 2010.
- [2] Photopile -PDF-.
- [3] M. Petibon Stéphane, Thèse de doctorat, Université Toulouse III-Paul Sabatier, France (2009).
- [4] P. Michalopoulos, Mémoire de master, Naval Post-graduate School, Monterey, California USA (2002).
- [5] N. Oleksiy, Thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Lyon (2005).
- [6] <http://www.tpepanneauxsolaires.fr/fonctionnement.html> (consulter le 13/05/2016).
- [7] H. Bennacer, Mémoire de magister, Université de Sidi Bel Abbes, Algérie (2009).
- [8] h. Hasni, Caractérisation Automatisée d'une cellule solaire, Mémoire de master, Université Med Khider Biskra, 2014.
- [9] B. Zakaria, pdf, Etude théorique des cellules solaires PV organiques: structure réseau interpénétré polymère conjugué-fullerène et cellules Graetzel, (2014).
- [10] S. Berreh, Thèse de Doctorat, Université de Sidi Bel Abbes, (2006).
- [11] O. Jani, Doctor of Philosophy, School of Electrical and Computer Engineering, Georgia Institute of Technology (2008).
- [12] C. L. Tsai, G. S. Liu, G. C. Fan, Y. S. Lee, Solid-State Electronics 54 541–544 (2010).
- [13] O. Jani, IEEE , 1-4244-0016-3/06 (2006).
- [14] Laradji Toumouh Nawal, Etude de Photopiles Solaires nanostructurées à base de Nitrures III-V : GaN, AlN, InN, Mémoire de magister, Université d'Oran, 2012.
- [15] W. Shockley, « Electrons and Holes in Semiconductors », D. Van Nostrand Co., Princeton, NJ, 1956, pp. 254.
- [16] M. Bouafia & L. Deblaoui, « Modélisation et simulation d'une cellule solaire en couche mince à base de diséléniure de Cuivre, d'Indium et de Gallium (CIGS) », diplôme de Master professionnel, 2012, Université de Ouargla.
- [17] Wenham S. R., Green M. A. and Watt M. E, « Applied Photovoltaic », Bridge Printer, Sidney, (1994).
- [18] M. Agrawal, C. Bolman, S. Carnahan, B. Merewitz, G. Phipps, M. Rogol, S. Willhaus, and T. Xu, "Solar Annual 2012: The Next Wave." Photon Consulting, 2012.
- [19] M. Oukachmih, « Les cellules photovoltaïques à base de matériaux organiques discotiques », Thèse de Doctorat, Université Toulouse-Paul Sabatier, 2003.

## Références bibliographiques

---

- [20] R. Alain, « Convertisseurs photovoltaïques », Comprese.doc, 2007.  
[http://www.cythelia.fr/images/file/Convertisseurs%20photovoltaïques\\_Alain%20Ricaud\\_Nov\\_07.pdf](http://www.cythelia.fr/images/file/Convertisseurs%20photovoltaïques_Alain%20Ricaud_Nov_07.pdf)
- [21] A. Luque, « Practical Handbook of Photovoltaics (Second Edition) », 2012.
- [22] B. Eguer, [Energie solaire photovoltaïque], Vol.1, (1993). Ellipses .
- [23] Philip Jackson, Dimitrios Hariskos, Erwin Lotter, Stefan Paetel, Roland Wuerz, Richard Menner, Wiltraud Wischmann, Michael Powalla, « New world record efficiency for Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> thin -film solar cells beyond 20% », Progress in photovoltaic, 2011.
- [24] A. Ricaud, “Gisement solaire et transferts énergétiques ”, Master Energies Renouvelables, Université de Cergy-Pontoise. Jan 2011.
- [25] KHELIFI Seyf Allah, Thèse de doctorat de l’Université Djillali Liabes De Sidi Bel Abbes , Algérie (2017)
- [26] Site web: <http://www.pv.unsw.edu.au>.
- [27] Kihwan Kim, Jihye Gwak, Seung Kyu Ahn, Young-Joo Eo, JooHyung Park, Jun-Sik Cho, Min Gu Kang, Hee-Eun Song, Jae Ho Yun , Solar Energy, vol. 145, 2017, pp. 52-58.
- [28] Craig Schwartz and al, Solar Energy Materials & Solar Cells, 149, 2016, pp. 275–283.
- [29] M. Mostefaoui, H. Mazari, S. Khelifi, A. Bouraiou, R. Dabou, Energy Procedia, 74, 2015 ,pp. 736 – 744.

## RESUME

Dans le contexte global de la diversification de l'utilisation des ressources naturelles, le recours aux énergies renouvelables et en particulier le solaire photovoltaïque se fait de plus en plus fort. A ce titre, le développement d'une nouvelle génération de cellules photovoltaïques à base de  $\text{Cu(In, Ga)Se}_2$  semble prometteur. En effet, le rendement de ces cellules a dépassé les 20% ces dernières années. Ainsi notre travail consiste à la modélisation d'une cellule solaire à base de  $\text{Cu(In, Ga)Se}_2$  (CIGS). Le but est d'optimiser les paramètres physiques (dopage et épaisseur) afin d'aboutir au meilleur rendement de conversion photovoltaïque possible.

Le logiciel SCAPS-1D est un outil très pratique et il est recommandé pour cette étude.

## ملخص

في السياق العام للاستخدام المتنوع للموارد الطبيعية، الرجوع إلى الطاقة المتجددة و بشكل خاص الطاقة الشمسية الكهروضوئية أصبح أقوى . ولهذا تطوير جيل جديد من الخلايا الضوئية القائمة على أساس  $\text{Cu(In, Ga)Se}_2$  تبدو واعدة في الواقع فاق أداء هذه الخلايا 20 ٪ في السنوات الأخيرة. وبالتالي فإن عملنا يتكون من نمذجة خلية شمسية القائمة على  $\text{Cu(In, Ga)Se}_2$  (CIGS) ، والهدف هو تحسين المعلمات الفيزيائية (سمك و الشوائب) من أجل تحقيق أفضل مردود تحويل كهربائي ممكن.

يعد برنامج SCAPS-1D أداة عملية للغاية ويوصى به لهذه الدراسة.