

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البلدة  
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا  
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك  
Département d'Électronique



## Mémoire de Master

Mention Électronique  
Spécialité Microelectronique

présenté par

Mekhloufi hithem

&

Elkinai walid

---

# Etude et simulation d'une cellule solaire double jonction cascade à base de couches minces CZTS-CZTSe

---

Proposé par : Mr NACER said

Année Universitaire 2019-2020

## Table des matières

Remerciements .....	
Résumé .....	
Liste des symboles.....	
Listes des figures.....	
Liste des tableaux.....	
Introduction générale .....	01
<b>CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS</b>	
1.1 Introduction .....	10
1.2 Histoire du photovoltaïque .....	10
1.3 L'énergie solaire.....	11
1.4 Rayonnement solaire .....	11
1.5 Spectre solaire .....	12
1.6 Rayonnement d'un corps noir .....	13
1.7 La cellule photovoltaïque.....	15
1.8 L'effet photovoltaïque .....	15
1.9 Les technologies des cellules photovoltaïques .....	15
1.10 Principe de fonctionnement d'une cellule solaire .....	19
1.11 Les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque .....	20
1.11.1 courant de court-circuit $I_{cc}$ .....	21
1.11.2 Tension de circuit ouvert $V_{co}$ .....	21
1.11.3 Le rendement $\eta$ .....	21
1.11.4 La puissance maximale $P_{max}$ .....	22
1.11.5 Facteur de forme .....	22
1.12 Les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire.....	22
1.13 Les semi-conducteurs.....	23

1.14 Les types de semi-conducteurs.....	25
1.14.1 Les Semi-conducteur type n.....	25
1.14.2 Les Semi-conducteur type p .....	26
1.15 L'absorption.....	27
1.16 Taux de génération.....	28
1.17 Recombinaison.....	28
1.18 Les équations de semi-conducteur.....	29
1.18.1 Equation de Poisson.....	29
1.18.2 Les équations de continuité des électrons et des trous.....	30
1.19 La jonction pn .....	30
1.20 Conclusion.....	31

## **CHAPITRE 2 : Cellule solaire à base de CZTS**

2.1 Introduction .....	32
2.2 L'hétérojonction .....	32
2.3 cellule solaire à base de CZTS .....	33
2.4 Structure cristalline des composés I <sub>2</sub> -II-IV .....	34
2.5 Bande interdite .....	36
2.6 Propriétés électriques .....	37
2.7 Propriétés optiques .....	38
2.7.1 Influence de la température .....	38
2.7.2 Influence de la composition.....	38
2.7.3 Influence de l'épaisseur.....	38
2.8 Composition et fabrication des cellules CZTS.....	39
2.9 Avantages et inconvénients d'une cellule CZTS .....	40
2.10 Les cellules multi jonction .....	40
2.11 Conclusion .....	42

## CHAPITRE 3 Résultats de simulation et discussion

3.1 Introduction .....	43
3.2 Présentation du logiciel COMSOL Multiphysics.....	43
3.3 Présentation de la cellule étudiée .....	44
3.4 Paramètres de simulation .....	45
3.5 Effets de l'épaisseur de la couche absorbante CZTS dans la cellule supérieure .....	45
3.5.1 Caractéristique courant tension $J(V)$ .....	45
3.5.2 Caractéristique puissance tension $P(V)$ .....	46
3.5.3 Courant de court-circuit $J_{cc}$ .....	47
3.5.4 Tension de circuit ouvert $V_{co}$ .....	48
3.5.5 Puissance maximale $P_{max}$ .....	49
3.5.6 Le Rendement $\eta$ .....	50
3.5.7 Facteur de forme $FF$ .....	50
3.6 Effets de l'épaisseur de la couche absorbante CZTSe dans la cellule inférieure.....	51
3.6.1 Caractéristique courant tension $J(V)$ . .....	51
3.6.2 Caractéristique puissance tension $P(V)$ .....	52
3.6.3 Courant de court-circuit $J_{cc}$ .....	53
3.6.4 Tension de circuit ouvert $V_{co}$ .....	54
3.6.5 Puissance maximale $P_{max}$ .....	55
3.6.6 Le rendement $\eta$ .....	56
3.6.7 Facteur de forme <b>FF</b> .....	56
3.7 Caractéristiques de la cellule CZTS/CZTSe cascade.....	57
3.8 Conclusion.....	58
Conclusion générale.....	59
Bibliographie.....	60

## Liste des figures

<b>Figure 1.1</b> Les modules photovoltaïques .....	11
<b>Figure 1.2</b> Différentes positions du soleil .....	12
<b>Figure 1.3</b> Spectre d'émission solaire sur la surface de la terre .....	13
<b>Figure 1.4</b> Courbe de rayonnement du corps noir à différentes températures Selon l'équation de Planck (courbe en couleurs) comparée à une courbe établie Selon la théorie de Rayleigh-jeans (courbe en noir) .....	14
<b>Figure 1.5</b> L'effet photovoltaïque.....	15
<b>Figure 1.6</b> Cellules poly-mono cristallins.....	11
<b>Figure 1.7</b> Modules verre-verre au Telluride de Cadmium, efficacité de 9 à 11%.....	17
<b>Figure 1.8</b> Façade en CIGS au Pays de Galles, efficacité de 8,5%.....	17
<b>Figure 1.9</b> Module photovoltaïque souple au silicium amorphe $\alpha$ Si triple jonction pour une efficacité de 6,5%.....	17
<b>Figure 1.10</b> Cellule solaire organique.....	19
<b>Figure 1.11</b> Sac à dos incorporant un module de technologie organique DSC.....	19
<b>Figure 1.12</b> Principe de fonctionnement de la cellule solaire.....	21
<b>Figure 1.13</b> Caractéristique I(V) et P(V) d'un cellule.....	21
<b>Figure 1.14</b> shema d'un semi-conducteur .....	25
<b>Figure 1.15</b> Silicium dopé au phosphore, libération d'un électron.....	25
<b>Figure 1.16</b> Silicium dopé au Bore, libération d'un trou.....	27
<b>Figure 1.17</b> La jonction pn.....	28
<b>Figure 2.1</b> Diagrammes schématiques montrant deux types différents d'hétérojonction.....	34
<b>Figure 2.2</b> Section du tableau périodique montrant la logique de l'évolution de CIGS à CZTS. Déplacement de groupe 12 à 14.....	35
<b>Figure 2.3</b> Représentation des structures stannite et kèsterite de CZTS .....	36
<b>Figure 2.4</b> Structure de bande d'énergie du : gap indirect A et gap direct B.....	37
<b>Figure 2.5</b> Schéma d'une cellule solaire CZTS .....	40

<b>Figure 2.6</b> Cellule tandem.....	42
<b>Figure 2.7</b> Cellule cascade.....	43
<b>Figure 3.1</b> Schéma de la structure de la cellule solaire CZTS/CZTSe simulée.....	45
<b>Figure 3.2</b> Caractéristiques courant tension pour différentes épaisseurs de la couche CZTS.....	47
<b>Figure 3.3</b> Caractéristiques puissance tension pour différentes épaisseurs de la couche CZTS.....	48
<b>Figure 3.4</b> Variation du courant de court-circuit $J_{CC}$ en fonction de l'épaisseur de la couche CZTS.....	49
<b>Figure 3.5</b> Variation de la tension de circuit ouvert $V_{CO}$ en fonction de l'épaisseur de la couche absorbante CZTS.....	50
<b>Figure 3.6</b> Variation de la puissance maximale en fonction de l'épaisseur de la couche CZTS dans la cellule supérieure.....	50
<b>Figure 3.7</b> Variation du rendement en fonction de l'épaisseur de la couche CZTS dans la cellule Supérieure.....	51
<b>Figure 3.8</b> Variation du facteur de forme FF en fonction de la couche CZTS dans la cellule Supérieure.....	52
<b>Figure 3.9</b> Caractéristiques courant tension pour différentes épaisseurs de la couche CZTSe dans la cellule inférieure.....	53
<b>Figure 3.10</b> Caractéristiques puissance tension pour différentes épaisseurs de la couche CZTSe dans la cellule inférieure.....	54
<b>Figure 3.11</b> Variation de la densité de courant court-circuit $J_{CC}$ en fonction de l'épaisseur de la couche CZTSe dans la cellule inférieure.....	55
<b>Figure 3.12</b> Variation de la tension de circuit ouvert $V_{CO}$ en fonction de l'épaisseur de la couche CZTSe dans la cellule inférieure.....	56
<b>Figure 3.13</b> Variation de la puissance maximale en fonction de l'épaisseur de la couche CZTSe.....	56
<b>Figure 3.14</b> Variation du rendement en fonction de l'épaisseur de la couche CZTSe.....	57

<b>Figure 3.15</b> Variation du facteur de forme FF en fonction de la couche CZTSe.....	58
<b>Figure 3.16</b> Caractéristiques courant-tension de la structure CZTS/CZTSe cascade.....	59
<b>Figure 3.17</b> Caractéristiques puissance-tension de la structure CZTS/CZTSe cascade.....	59

## Liste des tableaux

<b>Tableaux 2.1</b> Les composés de système adamantin.....	33
<b>Tableaux 2.2</b> Atomes et positions des deux structures stannite et kesterite.....	34
<b>Tableaux 2.3</b> Les propriétés électriques des composés CZTSSe.....	36
<b>Tableaux 3.1</b> Paramètres utilisés dans la simulation.....	44

## Liste des Symboles et Abréviations

**AM** : masse d'air

**F( $\lambda$ )** : l'irradiation spectrale

**k** : la constante de Boltzmann

**R<sub>s</sub>** : Rayon du soleil

**E<sub>g</sub>** : la bande interdite

**I<sub>cc</sub>** : courant de court circuit

**V<sub>co</sub>** : La tension de circuit ouvert

**$\eta$**  : Le rendement

**P<sub>max</sub>** : La puissance maximale

**FF** : Le facteur de forme

**E<sub>F</sub>** : le niveau de fermi

**n,p** : Les densités des porteurs

**$\alpha$**  : Le coefficient d'absorption

**G<sub>opt</sub>** : Le taux de génération

**R<sub>n,p</sub>** : Taux de recombinaison

**E** : le champ électrique

**J<sub>n</sub>** : densité de courant des électrons

**J<sub>p</sub>** : densité de courant des trous

**$\mu_n$  et  $\mu_p$**  : mobilités des électrons et des trous

**$\lambda$**  : la longueur d'onde

**h**: la constante de Planck,

**c**: la vitesse de la lumière dans le vide

## REMERCIEMENTS

---

**ملخص :** إن الخلايا الضوئية هي مكونات لتحويل الطاقة الضوئية إلى طاقة كهربائية، بحيث هي مصنوعة بواسطة أشباه الموصلات ومن بينها أشباه الموصلات الواعدة من أجل تحسين أداء الخلايا الضوئية ذات الطبقة الرقيقة، هناك الكستريت  $Cu_2ZnSnS_4$  المكون من عناصر متوفرة وغير سامة بالإضافة إلى نطاقها المستقيم، و إن مركب CZTS مع هذه المكاسب يمثل أفضل بديل لباقي المواد الأخرى و التي تعتمد أيضا على عناصر الكاوجينات مثل المادة CdTe و CIGS. إن في عملنا هذا قمنا بدراسة محاكاة خلية شمسية ذات وصلة مزدوجة CZTS-CZTSe عن طريق برنامج COMSOL، حيث أظهرت نتائج المحاكاة بوضوح أن سمك الطبقات الماصة في الخلية العليا CZTS و الخلية السفلية CZTSe و فجوتها يؤديان دورا مهم جدا في أداء الخلية الشمسية، وعليه تم الحصول على كفاءة تحويل قصوى تبلغ 27,5 في المائة لسمك 2,5 ميكرومتر للخلية السفلى و 4 ميكرومتر للخلية العليا.

الكلمات المفتاحية, CZTS, CZTSe, الخلايا الضوئية, الطبقة الرقيقة, COMSOL, الفجوة

**Résumé :** Les cellules photovoltaïques sont des composants de conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique. Elles sont fabriquées par les semi-conducteurs. Parmi les semi-conducteurs les plus prometteurs pour améliorer les performances des cellules photovoltaïques en couches minces on trouve le kesterite  $Cu_2ZnSnS_4$  (CZTS) composé avec des éléments abondants et non toxiques. En plus d'un gap direct, le CZTS et ses atouts, représente un excellent candidat pour remplacer les autres matériaux des éléments chalcogènes comme le CIGS et le CdTe utilisés dans les photopiles en couches minces. Dans ce travail nous avons étudié et simulé une cellule solaire double jonction à base de couches minces CZTS-CZTSe et ses caractéristiques en utilisant le logiciel COMSOL. Les résultats de simulation ont clairement montré que l'épaisseur et le gap des couches absorbantes de la cellule supérieure CZTS et inférieure CZTSe jouent un rôle très important dans les performances de la cellule solaire. Un rendement de conversion optimal de 27,5 % a été obtenu pour une épaisseur de l'ordre  $2,5\mu m$  de la cellule supérieure et  $4\mu m$  de la cellule inférieure.

**Mots clés :** CZTS, CZTSe, Cellule photovoltaïque, couches minces, COMSOL

**Abstract:** Photovoltaic cells are components for converting light energy into electrical energy. They are manufactured by semiconductors. Among the most promising semiconductors which belong in a third generation photovoltaic to improve the performances of thin-film solar cells is the absorber  $Cu_2ZnSnS_4$  (CZTS) material composes of material made from abundant and nontoxic elements. These advantages in addition to a direct band gap make it an excellent candidate to alternate the other materials which are based on chalcogènes elements as CIGS and CdTe used in thin-film solar cells. In this work we have studied and simulated a CZTS-CZTSe thin-film based double-junction solar cell and are characteristic using COMSOL software. The simulation results clearly showed that the thickness and gap of the absorbent layers of the upper cell CZTS and lower cell CZTSe play a very important role in the performance of the solar cell. An optimum conversion efficiency of 27.5% was obtained for a thickness of the order of  $2.5\mu m$  on top and  $4\mu m$  on the bottom.

**Keywords :** CZTS, CZTSe, Photovoltaic cells, thin-film solar cells, COMSOL

# Introduction générale

---

Sans énergie, notre monde ne pourrait fonctionner. En effet, l'homme, les machines et la nature en ont tous besoin. La demande totale d'énergie dans le monde s'accroît proportionnellement à la croissance démographique et au développement industriel et technologique. A l'échelon mondial, la production actuelle en énergie est essentiellement basée sur des ressources dites « non renouvelables » telles que le pétrole, le gaz naturel, le charbon ou encore l'uranium. Une fois ces ressources épuisées, l'homme sera condamné à trouver d'autres alternatives pour produire cette énergie dont il s'est rendu dépendant. Actuellement, 85% des besoins énergétiques sont couverts par les combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz). Ces ressources fossiles sont principalement responsables de la production de CO<sub>2</sub> largué dans l'atmosphère et du changement induit sur le climat (réchauffement de la planète, pollutions radioactives, etc..). Ces dernières années, la protection de l'environnement est devenue une préoccupation majeure. De nombreuses voies de recherches se sont donc orientées vers l'utilisation des énergies renouvelables, parmi les sources d'énergies renouvelables, on compte le vent, les flux marins et océaniques, la géothermie, le solaire photovoltaïque. Ce dernier est une source d'énergie très puissante. En effet, la puissance du rayonnement solaire au niveau du sol est d'environ 950 W/m<sup>2</sup>. La quantité totale d'énergie solaire reçue au niveau du sol pendant une semaine dépasse l'énergie produite par les réserves mondiales de pétrole, de carbone, de gaz et d'uranium. Mais dans la plupart des cas, une conversion de l'énergie du rayonnement solaire en électricité est nécessaire. Cette conversion peut être effectuée de manière directe ou indirecte. L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie renouvelable car elle utilise une source d'énergie d'origine naturelle qui est le soleil. Elle constitue donc une alternative aux énergies fossiles à plusieurs titres : elle est inépuisable, elle peut être produite localement et selon les besoins locaux, elle préserve l'environnement car elle n'émet pas de gaz à effet de serre, ne produit pas de déchets et n'entraîne aucun risque majeur et aucune nuisance significative. Cette énergie est produite par l'intermédiaire d'un dispositif appelé « cellule photovoltaïque ou photopile » qui transforme l'énergie lumineuse en courant électrique.

La majorité des photopiles solaires utilisées actuellement sont à base de silicium qui est le matériau le plus commercialisé dans l'industrie photovoltaïque grâce à ses nombreux avantages: disponibilité, qualité photovoltaïque, multiplicité des formes employées

(silicium monocristallin, poly-cristallin et amorphe) qui assurent un bon rendement de conversion. Les cellules solaires photovoltaïques fournissent l'énergie d'alimentation la plus importante et de longue durée pour des satellites et des véhicules spatiaux. Comme elles sont utilisées dans des applications terrestres. Les cellules solaires sont habituellement évaluées en mesurant les caractéristiques courant tension du dispositif dans des conditions standard d'illumination et puis en extrayant un ensemble de paramètres à partir des données obtenus. Ces paramètres sont le courant de saturation, la résistance série, le facteur d'idéalité, le photocourant et la résistance shunt. Ces paramètres peuvent être employés pour le contrôle de la qualité pendant la production ou fournir des perspectives dans le fonctionnement des dispositifs, menant de ce fait aux améliorations de ces dispositifs.

Le Cuivre, le Zinc, l'étain, le soufre et le sélénium forment ensemble des matériaux semi-conducteurs de choix, puisqu'ils sont faits d'éléments courants et non toxiques. Le CIGS et le CdTe auront bientôt un remplaçant de premier ordre. Le CZTS possède des propriétés optiques et électroniques similaires à celles de CIGS, tout en ayant l'avantage d'être composé d'éléments abondants, par ailleurs les constituants de base de CZTS seraient moins coûteux que ceux de la filière CIGS.

Le travail présenté dans ce mémoire aborde l'étude des différentes caractéristiques d'une cellule solaire double jonction cascade CZTS/CZTSe. La structure de la cellule CZTS/CZTSe se compose de deux cellules solaires, la cellule supérieure en CZTS avec une large bande interdite, et une cellule inférieure en CZTSe avec une petite bande interdite.

La simulation de la cellule solaire sera faite par un logiciel de simulation numérique: COMSOL multiphysics.

La présentation de cette étude a été répartie en trois chapitres :

- Dans le premier chapitre, on fait appel aux notions générales sur l'énergie photovoltaïque.
- Le second chapitre présentera les propriétés des couches minces CZTS, leurs différentes propriétés optiques et électriques
- Dans le troisième chapitre nous discuterons les résultats de simulation
- En fin, nous terminons par une conclusion générale

# Chapitre 1 Généralités sur les cellules solaires

---

## 1.1 Introduction

Dans ce chapitre on fait appel à quelques bases indispensables dans le domaine photovoltaïque. Nous aborderons ainsi en premier lieu quelques notions sur la source d'énergie photovoltaïque. Nous décrirons ensuite les semi-conducteurs, les cellules solaires avec leur caractéristiques photovoltaïques, la jonction pn et on termine par les étapes nécessaire au processus de conversion (l'absorption, recombinaison...) et les équations de semi-conducteurs.

## 1.2 Histoire du photovoltaïque

Quelques dates importantes dans l'histoire du photovoltaïque :

En 1839 : Le physicien français Edmond Becquerel découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. C'est l'effet photovoltaïque.

En 1905, Einstein découvrit que l'énergie de ces quanta de lumière est proportionnelle à la fréquence de l'onde électromagnétique. L'utilisation des cellules solaires débute dans les années quarante. Le domaine spatial a besoin d'une énergie sans combustible embarqué. La recherche s'intensifie sur le photovoltaïque.

En 1875 : Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.

En 1954 : Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.

En 1958 : Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.

En 1973 : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware.

En 1983 : La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 km en Australie.

En 1995 : Des programmes de toits photovoltaïques raccordés au réseau ont été lancés, au Japon et en Allemagne, et se généralisent depuis 2001.

La première cellule photovoltaïque (ou photopile) a été développée aux États-Unis en 1954 par les chercheurs des laboratoires Bell, qui ont découvert que la photosensibilité du silicium pouvait être augmentée en ajoutant des "impuretés". [1]

## 1.3 L'énergie solaire

### 1.3.1 l'énergie solaire photovoltaïque



**Figure 1.1** : les modules photovoltaïques [2]

Le solaire photovoltaïque (PV) permet de produire de l'électricité. La conversion directe de l'énergie solaire en électricité se fait par l'intermédiaire d'un matériau semi-conducteur comme le silicium. L'élément de base est la cellule photovoltaïque et le produit commercial s'appelle un module photovoltaïque. C'est la production directement de l'électricité à partir de la lumière grâce à des panneaux photovoltaïques [2]

## 1.4 Rayonnement solaire

Le soleil décharge continuellement une énorme quantité d'énergie radiante dans le système solaire, la terre intercepte une toute petite partie de l'énergie solaire rayonnée dans l'espace. Une moyenne de 1367 watts atteint chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère terrestre (pour une distance moyenne Terre-soleil de 150 Millions de km), c'est ce que l'on appelle la constante solaire égale à  $1367 \text{ W/m}^2$ . La part d'énergie reçue sur la surface de la terre dépend de l'épaisseur de l'atmosphère à traverser. Celle-ci est caractérisée par le nombre de masse d'air AM. Le rayonnement qui atteint le niveau de la mer à midi dans un ciel clair est de  $1000 \text{ W/m}^2$  et est décrit en tant que rayonnement de la masse d'air "1" (ou AM1). Lorsque le soleil se déplace plus bas dans le ciel, la lumière traverse une plus grande épaisseur d'air, perdant plus d'énergie. Puisque le soleil n'est au zénith que durant peu de temps, la masse d'air est donc plus grande en permanence et l'énergie disponible est donc inférieure à  $1000 \text{ W/m}^2$ . Les scientifiques ont donné un nom au spectre standard de la lumière du soleil sur la surface de la terre : AM1.5G ou AM1.5D. Le nombre "1.5" indique que le parcours de la lumière dans l'atmosphère est 1.5 fois supérieur au parcours le plus court du soleil, c'est-à-dire lorsqu'il est au zénith (correspondant à une inclinaison du soleil de  $45^\circ$  par rapport au zénith).

Le « G » représente le rayonnement "global" incluant rayonnement direct et rayonnement diffus et la lettre « D » tient compte seulement du rayonnement direct [3].

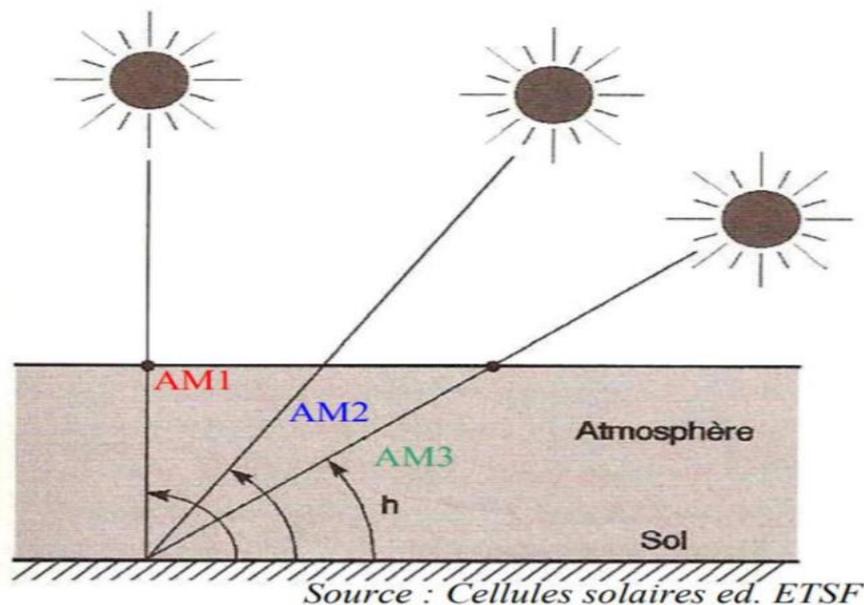


Figure 1.2: différentes positions du soleil [3]

## 1.5 Spectre solaire

Le spectre solaire à la surface de la terre n'est plus le même que dans l'espace, car il est mesuré par l'absorption des molécules présentes dans l'atmosphère (O<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, ...). La valeur réelle du spectre est déterminée par l'influence de la présence des molécules et les situations climatiques [4].

Les performances des cellules solaires peuvent comparer avec les différents spectres solaires utilisés. La notion de masse d'air (AM) quantifie la quantité d'énergie absorbée par l'atmosphère en fonction de l'angle  $\theta$  du soleil par rapport au zénith. Sa valeur dépend principalement de la pression, de l'altitude et de l'angle d'incidence des rayons lumineux. Le nombre de masse est défini par [4] :

$$AM = \frac{1}{\cos\theta} \quad (1.1)$$

L'angle  $\theta$  représente l'angle d'élévation du soleil sur l'horizon (90 degré au zénith). L'intégration de l'irradiante sur la totalité du spectre permet d'obtenir la puissance P (en W. m<sup>-2</sup>) fournie par le rayonnement. Pour simplifier, on utilise les notations suivantes :

- AM0 : Hors atmosphère (application spatiales).  $P \approx 1.3 \text{ kW.m}^{-2}$
- AM1 : Le soleil est au zénith du lieu d'observation (l'équateur).
- AM1.5 G : Spectre standard, le soleil est à 45°.  $P \approx 1 \text{ kW.m}^{-2}$  [4].

La figure 1.3 montre le spectre d'émission solaire :

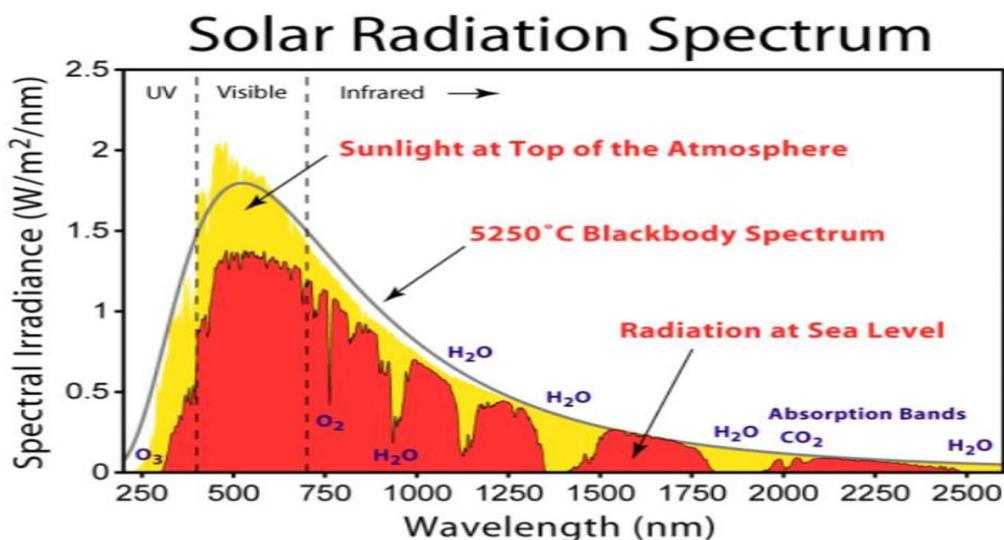


Figure 1.3 : Spectre d'émission solaire sur la surface de la terre [5].

## 1.6 Rayonnement d'un corps noir

Un corps noir est un objet idéal (n'existant pas physiquement) qui absorbe la totalité des rayonnements incidents quelles que soit leur longueur d'onde, l'angle d'incidence (la direction), et la polarisation. Il a l'émission thermique la plus intense possible ; ce fait a conduit à l'appeler également radiateur intégral [6].

En thermographie infrarouge, le corps noir est une source infrarouge de référence qui se révèle indispensable à tout utilisateur de systèmes infrarouges. En effet, les corps noirs sont utilisés aussi bien dans le secteur de l'industrie pour l'étalonnage de pyromètres, scanners ou caméras, que dans les laboratoires spécialisés pour la caractérisation de systèmes optroniques infrarouges complexes [6].

L'irradiation spectrale est donnée par la loi de Planck [7]:

$$F(\lambda) = 2\pi A \frac{c}{\lambda^4 (\exp(\frac{hc}{kT}) - 1)} \quad (1.2)$$

Avec  $A = \left(\frac{R_s}{d}\right)^2$

$h$ : la constante de Planck

$c$ : la vitesse de la lumière dans le vide;

$k$ : la constante de Boltzmann;

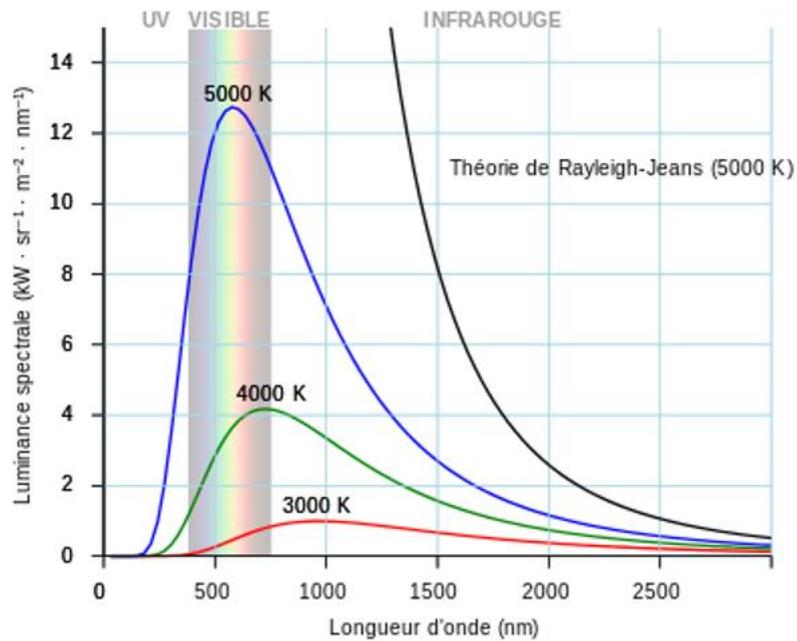
$\nu$ : la fréquence de la radiation électromagnétique;

$T$ : la température absolue du corps.

$R_s$ : Rayon du soleil ( $R_s = 6,96 \cdot 10^5$  Km )

$d$ : distance soleil-terre ( $d = 1,5 \cdot 10^9$  Km )

$\lambda$ : longueur d'onde de la lumière



**Figure 1.4:** courbe de rayonnement du corps noir à différentes températures selon l'équation de Planck (courbe en couleurs) comparée à une courbe établie selon la théorie de Rayleigh-Jeans (courbe en noir) [7]

### 1.7 La cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque est le composant électronique souvent composé de semi-conducteurs de type n ou de type p qui, exposé à la lumière, produit de l'électricité. Dans la cellule photovoltaïque, l'absorption des photons libère des électrons chargés négativement et des « trous » chargés positivement. Ceux-ci sont récoltés par une électrode, ce qui crée une différence de potentiel entre les deux bornes. La cellule photovoltaïque délivre une tension continue [8].

### 1.8 L'effet photovoltaïque

Le terme « photovoltaïque » vient du Grec qui indique la lumière . Découvert par le physicien français Edmond Becquerel en 1839.

L'effet photovoltaïque est obtenu par absorption des photons dans un matériau semi-conducteur qui génère alors une tension électrique. L'effet photovoltaïque c'est la transformation directe du rayonnement solaire en énergie électrique de type continu directement utilisable au moyen de cellules solaires[9]

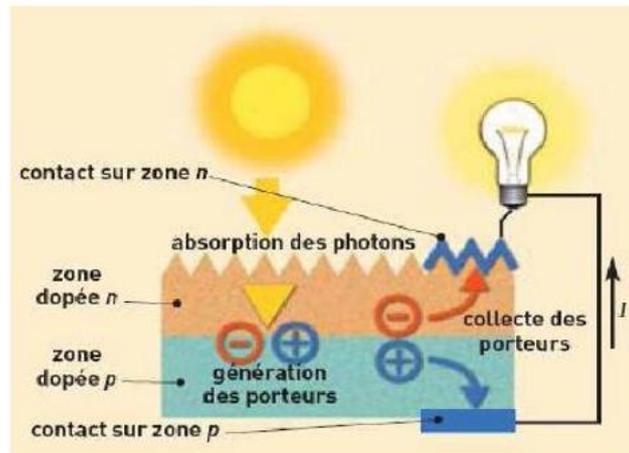


Figure 1.5 :L'effet photovoltaïque [10]

### 1.9 Les technologies des cellules photovoltaïques

Parmi les différentes technologies de la production d'énergie disponibles, le photovoltaïque apparaît comme la voie la plus propre qui utilise la source la plus abondante et durable. Historiquement, il existe trois générations de cellules photovoltaïques [11].

**Première génération:** Silicium cristallin dans lesquelles l'élément actif est le silicium dopé dans la masse. Bien que plus ancienne, cette technologie représente encore 90 % des parts de marché du fait de sa robustesse et de ses performances (rendement modules allant de 12 à 24 % pour une durée de vie de 35 ans environ) il ya deux type de silicium (monocristallin et polycristallin) les panneaux solaires monocristallins affichent les meilleurs rendements du marché, de l'ordre de 16-24%. Les panneaux solaires polycristallins affichent des rendements compétitifs, pouvant même aller jusqu'à 18%.

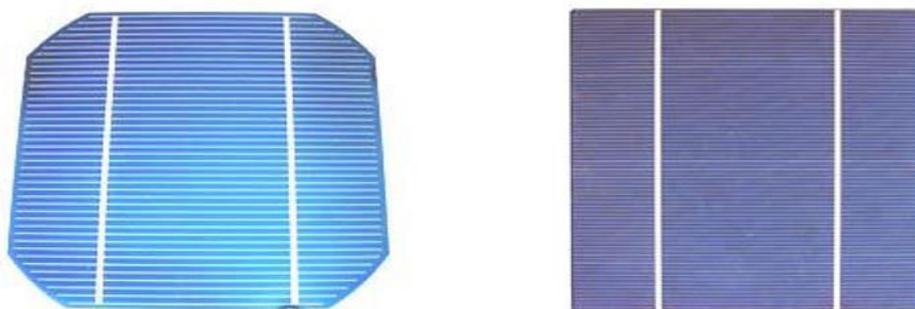


Figure 1.6 : cellules poly-mono cristallins [11]

**Deuxième génération:** CdTe, CIS/ CIGS, silicium amorphe et microcristallin : les cellules à base de couches minces qui ont en commun le procédé de dépôt du matériau semi-conducteur à faible épaisseur sur des substrats variés et donnant un aspect uni, produisant des modules de rendement légèrement inférieur (de 7 à 13 %). La part de marché pour l'ensemble de ces technologies est d'environ 10 % et reste relativement stable. Parmi les technologies en couches minces qui sont exploitées industriellement (production de masse), on distingue :

CdTe : Cadmium Telluride (telluride de cadmium)

CIS / CIGS : Copper Indium Gallium Selenide

Silicium en couche mince : silicium amorphe  $\alpha$ Si et microcristallin



**Figure 7** modules verre-verre au Telluride de Cadmium, efficacité de 9 à 11%. [12]



**Figure 8** Façade en CIGS au Pays de Galles, efficacité de 8,5%. [12]

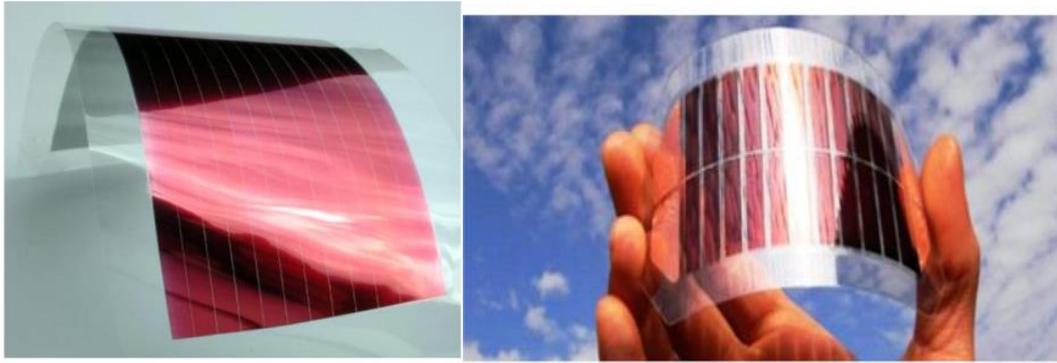


**Figure 9** Modules photovoltaïques souples au silicium amorphe  $\alpha$  Si triple jonction pour une efficacité de 6,5% [12]

**Troisième génération :** Technologies photo-électro-chimiques (Dye Sensitised Cell et Organic PV) : Apparues dans les années 1990, ces technologies ont pour but de réduire le coût de production de l'électricité. Les cellules photovoltaïques organiques bénéficient du faible coût des semiconducteurs organiques et des simplifications potentielles dans le processus de fabrication. Elles offrent la perspective d'une production en continu (roll-to-roll) qui pourrait réduire drastiquement le prix de revient des panneaux solaires.

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

- Les cellules photovoltaïques organiques moléculaires.
- Les cellules photovoltaïques organiques en polymères, le record de rendement est compris entre 4 et 5%



**Figure 1.10** Cellule solaire organique [13]



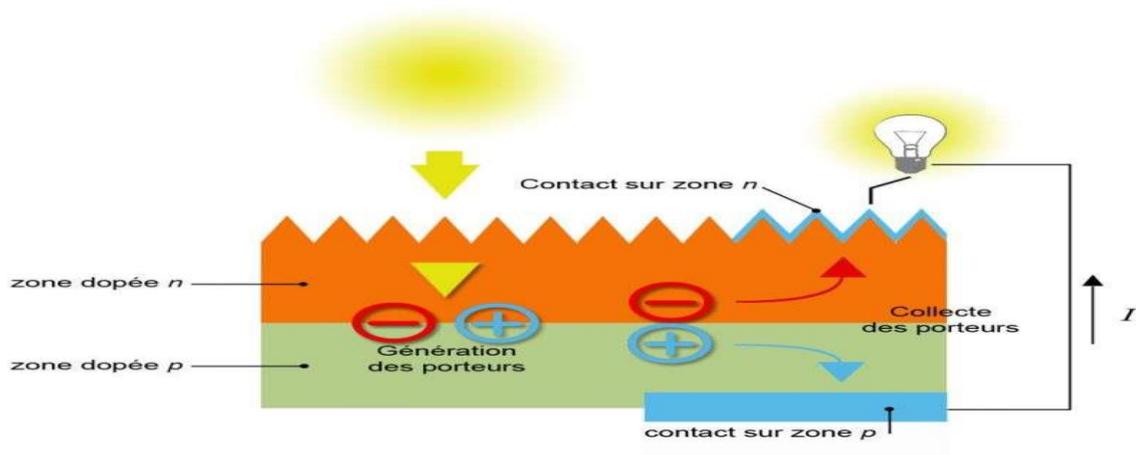
**Figure 1.11** Sac à dos incorporant un module de technologie organique DSC. [12]

### **1.10 Principe de fonctionnement d'une cellule solaire**

Le plus petit élément dans le système photovoltaïque est la cellule, c'est un dispositif électronique composé par des matériaux semi-conducteurs capables de convertir directement le rayonnement solaire en énergie électrique [14,15]. Cette transformation est basée sur trois mécanismes physiques liés et simultanés:

- L'absorption des photons par le matériau (dont l'énergie des photons est supérieure à celle associée à la bande interdite  $E_g$  ( $E_{ph}=h\nu$ )).
- La conversion de l'énergie absorbée (photon) en énergie électrique qui correspond à la création des paires électrons – trous.
- La collection des charges générées dans le dispositif dans un circuit électrique [16].

Les cellules solaires ont des modes de fonctionnement basés sur les semi-conducteurs et la jonction p-n [17]. Un semi-conducteur est un matériau présentant une bande interdite  $E_g$  (eV) entre la bande de valence (BV) et la bande de conduction (BC), avec le niveau de Fermi dans la bande interdite [17]. La position du niveau de Fermi est fonction des porteurs de charges majoritaires. Dans un semi-conducteur de type n, les électrons sont les porteurs de charge majoritaires, dans ce cas, le niveau de Fermi se situe près de la bande de conduction. Alors que, pour un semi-conducteur de type p, les trous sont majoritaires, et donc, le niveau de Fermi est proche de la bande de valence. Lors du contact entre les zones p et n, les porteurs majoritaires de chacune se propagent à travers la surface de contact, il se crée une zone chargée positivement du côté de la région n et une zone chargée négativement du côté de la région p. Cette zone de transition est appelée zone de charge d'espace (ZCE) ou bien la zone de déplétion. Le gradient de concentration des porteurs majoritaires induit la présence d'un champ électrique permanent dans cette ZCE à l'équilibre. Les niveaux de Fermi des deux zones s'égalisent, ce qui provoque une courbure du diagramme de bande, introduisant une barrière de potentiel à l'interface [18]. Une jonction p-n est formée par un semi-conducteur de type p et de type n. Lorsque les deux semi-conducteurs sont du même matériau, c'est l'homojonction comme le cas des cellules à base de silicium. Par contre, l'hétérojonction c'est la jonction formée par deux matériaux semi-conducteurs différents [17].



**Figure 1.12** :Principe de fonctionnement de la cellule solaire

### 1.11 Les Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque

Les caractéristiques (J-V) d'une cellule solaire sous éclaircissement ou à l'obscurité sont présentées sur la figure (1.13).

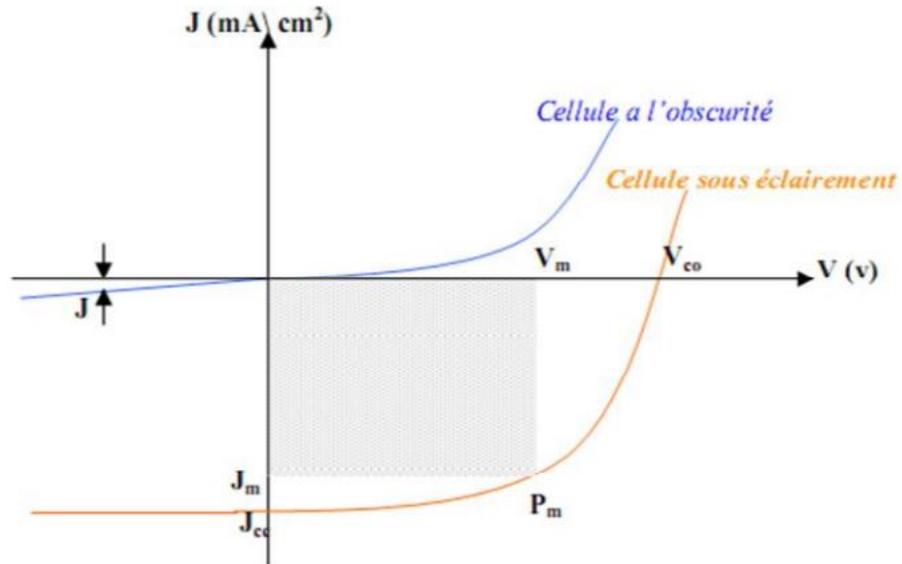


Figure 1.13 : Caractéristique  $J(V)$  et  $P(V)$  d'une cellule [14]

### 1.11.1 Courant de court-circuit $I_{CC}$

Le courant de court circuit est le courant débité par la cellule sous éclairement en court-circuitant la sortie. C'est-à-dire que :  $I_{cc} = I(V = 0)$  pour une cellule solaire idéale le courant de court circuit est égal au courant photovoltaïque  $I_{ph}$ .

$$I_{cc} \approx I_{ph} \quad (1.3)$$

### 1.11.2 Tension de circuit ouvert $V_{CO}$

La tension de circuit ouvert est la tension mesurée lorsque aucun courant n'est fourni par la cellule  $I=0$  est elle varie peu avec l'éclairissement .

### 1.11.3 Le rendement $\eta$ :

Le rendement de conversion  $\eta$  est le rapport de la puissance fournie par la cellule sur la puissance incidente (l'éclairissement), et il exprime la capacité et l'efficacité de la cellule dans la conversion des photons de lumière incidente en courant électrique

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} \quad (1.4)$$

Avec  $P_{in}$  : est la puissance d'éclairissement reçue par unité de surface.

#### 1.11.4 La puissance maximale $P_{\max}$

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

$$P_{\max} = I_m \cdot V_m \quad (1.5)$$

#### 1.11.5 Facteur de forme $FF$

Le facteur de forme est un critère de qualité de la cellule solaire. Dans une cellule parfaite, la courbe sera un parfait rectangle et le facteur de forme sera égale à 1. Sa valeur est déterminée à partir du rapport maximum de puissance  $P_{\max}$  produite par la cellule solaire et le produit du courant de court circuit  $I_{CC}$  et la tension du circuit ouverte  $V_{CO}$

$$FF = \frac{P_{\max}}{I_{CC} V_{CO}} = \frac{I_m \times V_m}{I_{CC} \times V_{CO}} \quad (1.6)$$

### 1.12 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

#### Avantages

- L'énergie solaire présente, outre tous les avantages des énergies renouvelables, ses propres avantages, à savoir : énergie maîtrisable et adaptable aux situations de toutes les régions.
- Le photovoltaïque est une technologie sûre et sans risque. En général, les panneaux photovoltaïques sont garantis 25 ans (et peuvent fonctionner 40 ans quasiment sans diminuer leur rendement).
- L'investissement et le rendement sont prévisibles à long terme.
- Ce sont des systèmes simples et rapides à installer qui nécessitent très peu de maintenance (d'où des frais de maintenance relativement faibles).
- Le solaire photovoltaïque ne comporte aucune pièce en mouvement, la production électrique est réalisée sans combustion ; il n'existe donc ni d'usure due aux mouvements, ni d'usure thermique comme pour les chaudières.
- Cette technologie utilisée dans l'aérospatiale a prouvé sa stabilité et sa fiabilité durant des dizaines d'années. Les systèmes sont conçus pour résister aux intempéries, au rayonnement UV et aux variations de température.
- Les installations photovoltaïques présentent un bilan énergétique positif. Les modules sont recyclables et la majorité des composants peut être réutilisée ou recyclée.

- En devenant producteur d'électricité avec une installation photovoltaïque, chacun peut améliorer son écobilan, réduire les émissions de Dioxyde de Carbone et préserver les ressources naturelles.
- Ce système produit de l'électricité sur place ; il peut donc être installé là où on en a besoin, sans être raccordé à un quelconque réseau.
- Il s'agit d'une source d'énergie électrique totalement silencieuse ce qui n'est pas le cas, par exemple, des installations éoliennes.

### **Inconvénients**

- Les panneaux solaires coûtent excessivement cher, du fait de la haute technicité qu'ils requièrent.
- Le rendement actuel des cellules photovoltaïques reste assez faible (environ 10% pour le grand public) et donc ne délivre qu'une faible puissance. De ce fait, pour couvrir un besoin familial, une grande surface de panneaux photovoltaïques est nécessaire.
- Le rendement maximum d'un panneau solaire s'obtient uniquement quand la surface du panneau est strictement perpendiculaire aux rayons solaires. Idéalement, il faudrait donc que la position du panneau varie suivant les saisons et au cours de la journée, ce qui n'est quasiment pas réalisable.
- Pour cette même raison d'ensoleillement, les panneaux solaires ne peuvent pas s'installer n'importe où, ni n'importe comment, sous peine de voir le gain d'énergie divisé par deux par rapport aux valeurs théoriques.
- La production d'électricité ne se fait que le jour alors que la plus forte demande se fait la nuit.
- Le stockage de l'électricité est également très difficile avec les technologies actuelles (problème contourné en cas de raccord avec le réseau).
- Le recyclage des cellules photovoltaïques en fin de vie pose des problèmes environnementaux. Les batteries utilisées par les panneaux photovoltaïques sont composées de plomb, de zinc, de cadmium, . . . et donc ont un impact sur l'environnement.
- Les usines de production de cellules photovoltaïque émettent un grand taux de Dioxyde de Carbone.
- La transformation du silicium de sa forme naturelle (non exploitable) à sa forme traitée (exploitable) nécessite une très haute température (donc beaucoup d'énergie).

- Le photovoltaïque souffre d'une "pénurie" de silicium : l'accroissement de la demande ayant été sous-estimé, la production de cet élément chimique n'arrive pas à couvrir la demande actuelle des industries électroniques et solaires.
- Les panneaux noirs ne sont pas toujours esthétiques, notamment sur des bâtiments non modernes.

### **1.13 Les semi-conducteurs**

Corps cristallin dont les propriétés de conductibilité électrique sont intermédiaires entre celle des métaux et celle des isolants.

Un semi-conducteur serait isolant à une température de zéro kelvin (zéro absolu), contrairement à un métal.

Les semi-conducteurs sont largement utilisés en électronique pour réaliser des composants tels que des diodes, des transistors, des thyristors, des circuits intégrés ainsi que des lasers à semi-conducteur.

La conductivité intrinsèque d'un cristal semi-conducteur est liée à son nombre de porteurs de charge intrinsèques (électrons et trous). La libération d'un électron de conduction, c'est-dire son passage de la bande de valence à la bande de conduction laisse un trou dans la bande de valence, qui participe à la conduction électrique comme un électron de charge électrique positive.

La formation d'une paire électron-trou est d'autant plus facile que le gap, différence d'énergie entre la bande de conduction et la bande de valence, est faible. figure (1.14)

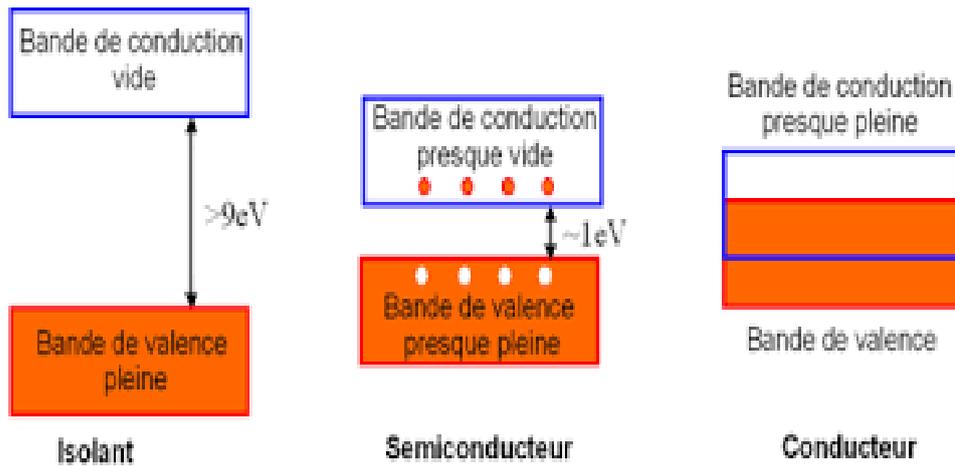


Figure 1.14 : Shéma d'un semi-conducteur

## 1.14 Les types de semi-conducteurs

### 1.14.1 Semi-conducteur type n

Un semi-conducteur type N est un semi-conducteur intrinsèque (ex : silicium Si) dans lequel on a introduit des impuretés de type donneurs (ex : phosphore P). Ces impuretés sont ainsi appelées parce qu'elles donnent un électron à la bande de conduction pour réaliser une liaison avec le cristal semi-conducteur [19].

Dans le silicium de type N, des atomes de phosphore à cinq électrons périphériques remplacent des atomes de silicium : ils offrent donc des électrons (des charges négatives) supplémentaires (un par atome de phosphore).

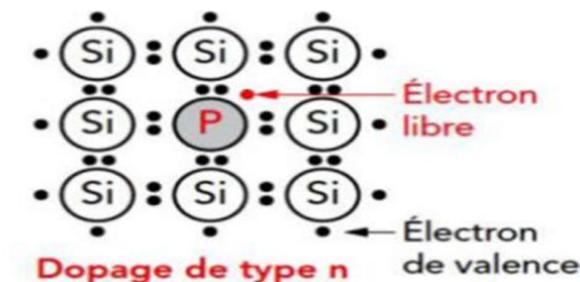


Figure 1.15 Silicium dopé au phosphore, libération d'un électron.

La figure 1.15 représente un semiconducteur de type n avec une densité d'électrons N très élevée et une densité de trous P faible dans la même configuration d'un semi-conducteur intrinsèque. Alors on dit que les électrons sont les porteurs majoritaires et les trous sont les

porteurs minoritaires. En notant  $N_d$  la densité de donneurs, les densités des porteurs d'un semi-conducteur de type N sont :

$$n = N_D$$

$$p = \frac{n_i^2}{N_D} \quad (1.7)$$

#### **Le niveau de fermi $E_F$ :**

Les densités des porteurs sont données par

$$n = N_D = N_C e^{-(E_C - E_F)/kT} \quad (1.8)$$

En conséquence, le niveau de Fermi se déplace du milieu de la bande interdite ( $E_{Fi}$ ) vers la bande de conduction.

$$\text{Donc } E_{Fn} - E_{Fi} = kT \ln \left( \frac{N_D}{n_i} \right) \quad (1.9)$$

$$E_{Fn} = E_{Fi} + kT \ln \left( \frac{N_D}{n_i} \right) \quad (1.10)$$

#### **1.14.2 Les semi-conducteurs type p**

Un semi-conducteur type P est un semi-conducteur intrinsèque (ex : silicium Si) dans lequel on a introduit des impuretés de type accepteurs (ex : Bore B). Ces impuretés sont ainsi appelées parce qu'elles acceptent un électron de la bande de conduction pour réaliser une liaison avec le cristal semi-conducteur [19].

Dans le silicium de type P, des atomes de Bore avec trois électrons périphériques entraînent un défaut d'électrons (création de charges positives) et engendrent la formation de trous (un par atome de Bore). Les électrons en excès ou les trous conduisent l'électricité. Lorsque des zones de semi-conducteur de type P et de type N sont adjacentes, elles forment une jonction PN.

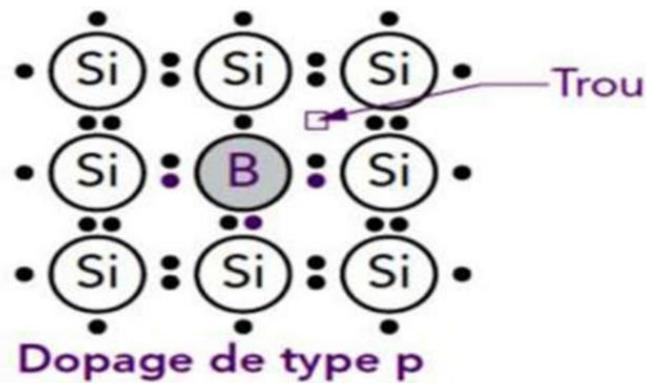


Figure 1.16-Silicium dopé au Bore, libération d'un trou.

La figure 1.16 met en évidence qu'un semi-conducteur dopé P à une densité d'électrons  $n$  plus faible et une densité  $p$  de trous plus élevée que le même semi-conducteur pris dans sa configuration intrinsèque. On dit alors que les électrons sont les porteurs minoritaires et les trous, les porteurs majoritaires. Pour les semi-conducteurs extrinsèques, la densité de dopant est toujours très supérieure à la densité de porteurs intrinsèques  $N \gg n_i$ . Dans le cas d'un type P. la densité de trous est donc proche de celle du dopant accepteur  $N_A$ . La relation  $n_i^2 = n.p$  étant toujours vérifiée, nous obtenons pour les densités de porteurs :

$$p = N_A$$

$$n = \frac{n_i^2}{N_A} \quad (1.11)$$

### Le niveau de fermi $E_F$

Les densités des porteurs sont données par :

$$n_i = N_C e^{-\left(\frac{E_C - E_{Fi}}{kT}\right)} = N_V e^{\left(\frac{E_V - E_{Fi}}{kT}\right)} = \sqrt{N_C N_V} e^{-\frac{E_g}{2kT}} \quad (1.12)$$

$$\left[ \begin{array}{l} n = n_i e^{\left(\frac{E_F - E_{Fi}}{kT}\right)} \\ p = n_i e^{-\left(\frac{E_F - E_{Fi}}{kT}\right)} \end{array} \right] \quad (1.13)$$

Par conséquent le niveau de fermi  $E_{FP}$  se déplace du milieu de la bande interdite vers la bande de valence :

$$E_{Fi} - E_{FP} = kT \ln \left( \frac{N_a}{n_i} \right) \quad (1.14)$$

$$E_{FP} = E_{Fi} - kT \ln \left( \frac{N_a}{n_i} \right) \quad (1.15)$$

## 1.15 L'absorption

L'absorption des photons est la première étape nécessaire au processus de conversion photovoltaïque. La plus élémentaire est celle d'un photon d'énergie  $h\nu$  qui excite un électron d'un niveau de basse énergie vers un niveau de plus haute énergie. Ainsi, l'une des propriétés d'un matériau photovoltaïque est son coefficient d'absorption ( $\alpha$ ). L'exploitation du spectre d'absorption permet de calculer toutes les transitions que peut subir un électron et ainsi accéder à la distribution des niveaux énergétiques dans le semi-conducteur. Ce coefficient est donc lié à l'énergie du gap en fonction des énergies des photons incidents [20]

### ▪ Le coefficient d'absorption $\alpha$

Est une propriété qui définit la quantité de lumière absorbée par le matériau, et peut être exprimé par [7] :

$$\alpha = \alpha_0 \sqrt{E - E_g} \quad (1.16)$$

Avec :

- $\alpha_0$  : constante qui dépend du matériau
- $E$  : énergie du photon
- $E_g$  : Gap

## 1.16 Taux de génération

Les photons d'énergie supérieure au gap du matériau entrant dans un semi-conducteur génèrent des paires électron-trous (on suppose implicitement la création d'une seule paire par photon). L'expression du taux de génération  $g$  dépend de la forme du faisceau et de la surface éclairée [21]

Le taux de génération s'écrit :

$$G_{opt} = (1-R).\alpha.\exp(-\alpha x) \quad (1.17)$$

Avec :

- $R$  : coefficient de réflexion
- $x$  : distance de la surface

## 1.17 Recombinaison

Par définition, la recombinaison est le retour de l'électron de l'état excité à l'état initial ou de la bande de conduction vers la bande de valence, car il ne peut rester dans un état excité que pour un temps faible ( $t < 10^{-8}\text{s}$ ). Ce retour de l'électron de l'état excité vers l'état stable peut avoir lieu selon plusieurs façons [22] :

- **Les recombinaisons radiatives** : Le processus de recombinaison radiative ou inter bande est défini comme l'inverse du processus d'absorption. L'excès d'énergie de l'électron recombiné est cédé sous forme d'un rayonnement optique [22]
- **Les recombinaisons 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 [22]
- **Recombinaisons RSH (Read-Schokley-Hall)**: Ce sont des recombinaisons indirectes assistées par des centres de pièges qui introduisent des niveaux d'énergie dans la bande interdite. Elles sont prépondérantes dans les semi-conducteurs à gap indirect [23]
- **Recombinaisons de surface** : La surface d'un semi-conducteur est un lieu où les recombinaisons sont particulièrement nombreuses, en raison des liaisons non satisfaites des atomes de surface et autres défauts caractéristiques à température constante ( $T=300^\circ\text{K}$ ) [22]
- **Taux de recombinaison** :

Lors d'une génération des paires électrons-trou, il faut aussi considérer le processus inverse ou recombinaison des paires électrons-trou, permettant de définir les taux de recombinaisons  $R_n$  pour les électrons,  $R_p$  pour les trous par [7] :

$$R_{n,p} = \frac{\Delta_{n,p}}{\tau_{n,p}} \quad (1.18)$$

Avec :

-  $\Delta_{n,p} = n \cdot p - n_e \cdot p_e$  : la densité des porteurs générés.

-  $n_e \cdot p_e$  : la densité des porteurs à l'équilibre.

-  $\tau_{n,p}$  : la durée de vie de ces porteurs.

## 1.18 Les équations de semi-conducteur

### 1.18.1 Equation Poisson

L'équation de Poisson nous permet de calculer le champ électrique et le potentiel électrostatique dans les dispositifs à semi-conducteurs [21]

$$\mathbf{divE} = \frac{\rho}{\varepsilon} \quad (1.19)$$

$E$  est le champ électrique,  $\rho$  la densité de charges électriques,  $\varepsilon$  la permittivité.

$$E = -grad\varphi \quad (1.20)$$

$\varphi$  est le potentiel électrostatique

$$\mathbf{div}(\varepsilon.\mathbf{grad}\varphi) = -\rho \quad (1.21)$$

$$\rho = q (p-n+N_d-N_a) \quad (1.22)$$

Donc l'équation de Poisson devient [21] :

$$\mathbf{div}(\varepsilon E) = q( p - n + N_d - N_a) \quad (1.23)$$

### 1.18.2 Les équations de continuité des électrons et des trous

$$\mathbf{div}(\mathbf{J}_n) = q( R - G ) \quad (1.24)$$

$$\mathbf{div}(\mathbf{J}_p) = q( R - G ) \quad (1.25)$$

Avec :  $R$  taux de recombinaison,  $G$  taux de génération

- Les densités de courant des électrons et des trous sont données par [7] :

$$\mathbf{J}_n = q\mu_n n \frac{\partial E_{Fn}}{\partial X} \quad (1.26)$$

$$\mathbf{J}_p = q\mu_p p \frac{\partial E_{Fp}}{\partial X} \quad (1.27)$$

Avec :

- $\mu_n$  et  $\mu_p$  : mobilités des électrons et des trous
- $n$  et  $p$  : concentrations des électrons et des trous
- $E_{Fn}$  et  $E_{Fp}$  : quasi niveaux de Fermi des électrons et des trous

L'équation de Poisson forme avec les deux équations de continuité un système à trois équations et trois inconnues : le potentiel électrostatique et les densités des électrons et des trous. Ces trois équations sont le point de départ de l'analyse de la plupart des phénomènes électrique et photovoltaïques [21]

### 1.19 La jonction pn

Parmi tous les dispositifs à semi-conducteur, la jonction P-N est un composant essentiel à la fois pour ses applications directes et parce que la compréhension de sa physique permet la compréhension de nombreux autres dispositifs.

Une jonction P-N est constituée par un cristal semi-conducteur dont la concentration en impuretés profondes varie avec  $x$  pour passer d'une région de type P à une région de type N.

Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau N diffusent dans le matériau P. La zone initialement dopée N devient chargée positivement, et la zone initialement dopée P chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone N et les trous vers la zone P. Une jonction (dite P-N) a été formée. La zone où la charge n'est pas nulle porte le nom de zone de charge d'espace (ZCE) [24].

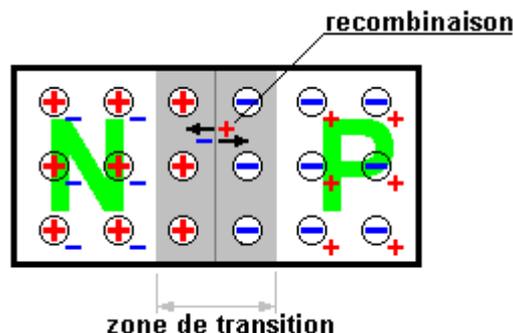


Figure 1.17 : La jonction PN [25]

## **1.20 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons vu des notions théoriques sur le photovoltaïque et ses applications sur les cellules solaires. Nous avons ensuite expliqué le fonctionnement des cellules photovoltaïques et leurs caractéristiques principales. Ce que nous avons vu, va donc nous aider à étudier notre cellule dans les chapitres à venir.

# Chapitre 2 Cellule solaire à base de CZTS

---

## 2.1 Introduction

Dans ce chapitre nous donnerons un aperçu sur les propriétés fondamentales du CZTS, à savoir sa structure cristalline, ses propriétés électrique et optique. Une brève description sur ce matériau, sa composition et comment le fabriquer, on parle aussi de ses avantages et inconvénients.

Actuellement, la force motrice principale dans l'énergie solaire photovoltaïque est la technologie de cellule solaires en silicium, mais actuellement la technologie de couches minces gagne du terrain car elle offre un rendement élevé et des cellules solaires à faible coût.

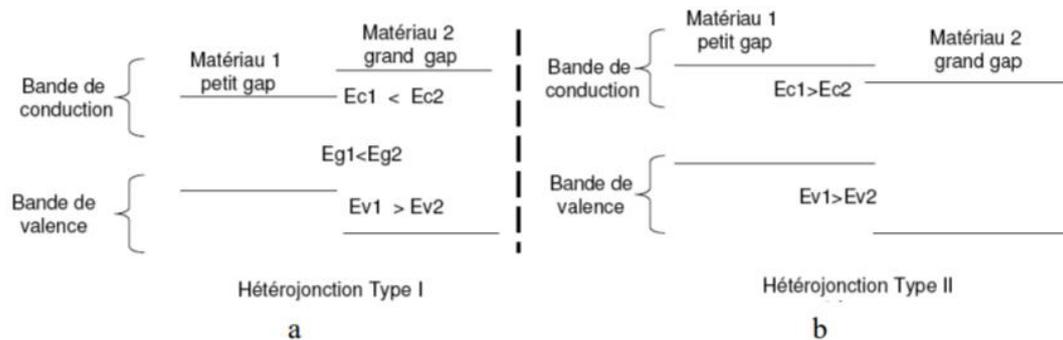
Parmi les différentes couches minces candidates de cellules solaires, le  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  (CZTS) a été identifié comme un matériau à haut potentiel en termes d'énergie photovoltaïque et bénéficiant de ressources naturelles importantes pour répondre à un accroissement de la demande mondiale en énergie. Contrairement à d'autres technologies thin-film photovoltaïques, la couche active CZTS présente également l'avantage de n'utiliser que des matériaux non-toxiques permettant de s'inscrire totalement dans une dimension de technologie durable.

## 2.2 L'hétérojonction

Les jonctions constituées par la mise en contact de deux régions différemment dopées d'un même semi-conducteur, sont appelées homojonctions. Par contre, les jonctions réalisées par la juxtaposition de deux matériaux différents sont appelées hétérojonctions [26]. La réalisation d'hétérojonction s'effectue par la croissance cristalline d'un matériau sur l'autre et nécessite l'utilisation de semi-conducteurs ayant des propriétés cristallines voisines (la taille

des atomes doit être notamment assez proche). Selon les matériaux utilisés pour les semiconducteurs, on peut distinguer deux types d'hétérojonctions.[27]

Le schéma de la figure 2.1 donne une description schématique des décalages de bandes de conduction et de valence pour deux types d'hétérojonction.



**Figure 2.1** : Diagrammes schématiques montrant deux types différents d'hétérojonction [27]

### 2.3 Cellule solaire à base CZTS

Le cuivre, le zinc, l'étain, le soufre et le sélénium forment ensemble un matériau semiconducteur de choix, puisqu'il est fait d'éléments courants et non toxiques. Dommage que le rendement affiché par les cellules CZTS ne soit pas plus élevé, il devrait augmenter dans les années à venir. Le CIGS et le CdTe auront-ils bientôt un remplaçant de premier ordre? De nouvelles cellules sont déjà en cours de développement en prévision de la pénurie probable d'indium. Cependant, remplacer les cellules au CIGS représente un véritable défi tant cet absorbant est efficace. Une alternative exploitant le principe de la jonction p-n se démarque néanmoins depuis la fin des années 2000, la cellule CZTS Cuivre-zinc-étain-soufre (CZTS) est un semi-conducteur avec d'excellentes propriétés photovoltaïques tels que gap à bande direct, le coefficient d'absorption élevé, et possède une énergie de bande optimale de 1.4 à 1.5 eV fortement souhaitée en matière photovoltaïque.

D'autre part, la disponibilité de cuivre, de zinc, de l'étain et du soufre sur la croûte de notre terre sont de 50 ppm, 75 ppm, 2,2 ppm et 260 ppm respectivement. Alors que la disponibilité de l'indium est de 0,049 ppm sur la croûte de la terre qui est relativement très faible par rapport au zinc et à l'étain [28].

		13	14	15	16
		5 B	6 C	7 N	8 O
		13 Al	14 Si	15 P	16 S
11	12	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se
29 Cu	30 Zn	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te
47 Ag	48 Cd				

**Figure 2.2 :** Section du tableau périodique montrant la logique de l'évolution de CIGS à CZTS. déplacement de groupe 12 à 14[28]

## 2.4 Structure cristalline des composés I2-II-IV

Il est bien connu que dans la structure diamant, tous les composants dont la structure dérive du diamant est appelé "adamantine [29,30].

Les binaires ont la formule commune  $A^N B^{8-N}$  ( $N = 1, 2, 3$ ), les matériaux connus sont les composés  $A^{II}X^{VI}$  ( $N = 2$ ;  $A = Zn, Cd, Hg$ ;  $X = S, Se, Te$ ) qui cristallisent dans la structure cubique de type sphalérite (blende) et dans le type hexagonale wurtzite [29,30]. Pour les composés ternaires la formule est  $A^{N-1} B^{N+1} X_2^{8-N}$ . Dans les composés  $A^I B^{III} X_2^{VI}$  ( $N = 2$ ;  $A = Cu, Ag, B = Al, Ga, In, X = S, Se, Te$ ), comme on observe dans le tableau (2.1) suivant [29,30] :

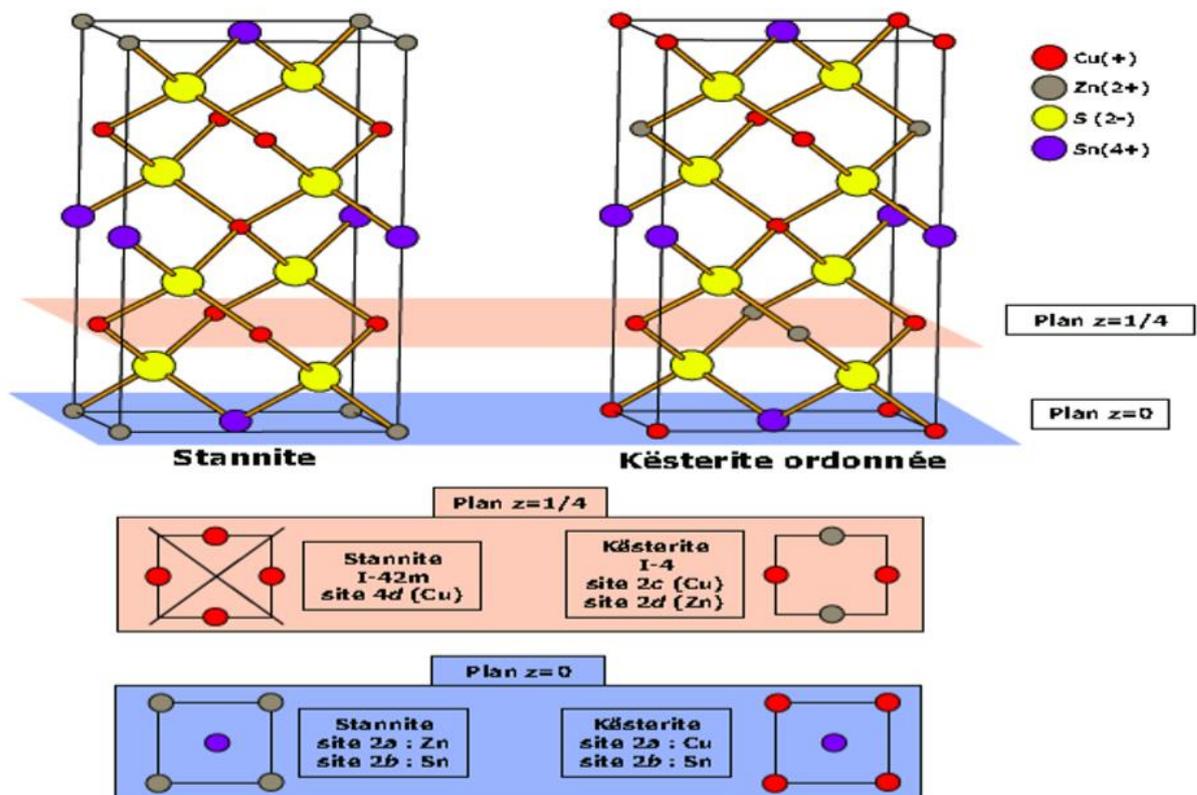
Composés	N=2 (chalcogénures)	N=3 (pnictides)
Composés binaire	$A^{II}X^{VI}$	$A^{III}X^V$
Composés ternaire	$A^I B^{III} X_2^{VI}$	$A^{II} B^{VI} X_2^V$
Composés quaternaire	$A_2^I B^{II} C^{IV} D_4^{VI}$	$A_2^{II} B^{IV} C^V D_4^V$

**Tableau. 2.1.** Les composés de système adamantin [31]

Les matériaux CZTS cristallisent dans une structure tétragonale ( $a = b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ ) qui peut être de type kesterite (groupe d'espace  $I\bar{4}$ ) ou stannite (groupe d'espace  $I\bar{4}2m$ ) [13], ils sont décrites dans des mailles quadratiques, qui dérivent toutes les deux de la structure ZnS sphalérite et tirent leur nom de minéraux naturels de formule générale  $Cu_2(Fe_xZn_{1-x})SnS_4$  (la stannite est plus riche en fer que la kesterite) [32,33]. Ces deux modèles structuraux sont très proches, la principale différence entre ces deux structures réside dans la distribution des cations  $Cu^+$  et  $Zn^{2+}$  dans les plans perpendiculaires à l'axe  $c$  : dans la structure kesterite, les couches de cations s'alternent suivant l'ordre CuSn, CuZn, CuSn et CuZn à  $z = 0, 1/4, 1/2, 3/4$  respectivement. Par contre, la structure stannite présente un

ordre d'empilement des couches cationiques ZnSn, Cu<sub>2</sub>, ZnSn, Cu<sub>2</sub>. Une autre différence structurale est la position des anions. Dans la structure stannite, les anions sont situés sur des miroirs de plan (110), alors que dans la structure k esterite, cette symétrie est perdue, la structure k esterite est considérée comme étant plus stable que la stannite [5,13]. La position des atomes de cuivre et de zinc diffère selon les structures. Pour la structure K esterite, décrite dans le groupe d'espace I-4, les plans perpendiculaires à l'axe C sont constitu es ainsi : Plan Z = 0 : CuI & SnIV, Plan Z = 1/4 : ZnII & CuI.

Concernant la structure stannite (groupe d'espace I42m), les atomes sont répartis de la façon suivante : Plan Z = 0 : ZnII & SnIV, Plan Z = 1/4 : CuI. (Voir figure 2. 3) [34].



**Figure 2.3:** Représentation des structures stannite et k esterite de CZTS [33,34].

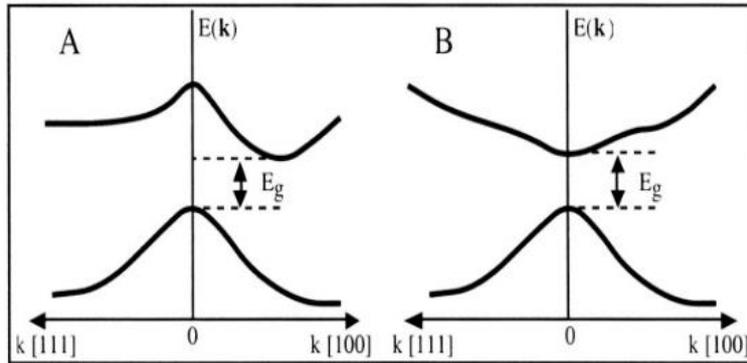
Le tableau 2.2 : regroupe les atomes et leurs positions pour les deux structures, stannite et k esterite, respectivement. Dont leurs paramètres de la maille conventionnelle sont  $a = 5,44 \text{  }$ ,  $c = 10,75 \text{  }$  pour le stannite et  $a = 5,44 \text{  }$ ,  $c = 10,88 \text{  }$  pour le kesterite [33,35].

Stannite ( $I\bar{4}2m$ )			Kesterite ( $I\bar{4}$ )		
Atomes	Sites	Positions	Atomes	Sites	Positions
Zn	2a	(0 0 0)	Cu	2a	(0 0 0)
Sn	2b	( $\frac{1}{2}$ $\frac{1}{2}$ 0)	Cu	2c	(0 $\frac{1}{2}$ $\frac{1}{4}$ )
Cu	4d	(0 $\frac{1}{2}$ $\frac{1}{4}$ )	Sn	2b	( $\frac{1}{2}$ $\frac{1}{2}$ 0)
			Zn	2d	( $\frac{1}{2}$ 0 $\frac{1}{4}$ )
			S	8g	(x y z)

**Tableau. 2.2** Atomes et positions des deux structures stannite et kesterite [33,35].

## 2.5 Bande interdite

La famille des matériaux semi-conducteurs, peut être classée en deux familles. Les matériaux à gap direct, comme la plupart des composés issues des colonnes III-V du tableau périodique et les matériaux à gap indirect comme le silicium (colonne IV). La largeur de la bande interdite  $E_g$  d'un semi-conducteur détermine comment réagit une cellule solaire à la lumière [37]



**Figure 2.4:** Structure de bande d'énergie du : gap indirect A et gap direct B [37]

La bande interdite du matériau semi-conducteur détermine la longueur d'onde de la lumière nécessaire pour générer de l'énergie électrique. La relation reliant la bande interdite et la longueur d'onde est [38]:

$$\lambda(\mu\text{m}) = hc / E_g = 1,24 / E_g(\text{eV}) \quad (2.1)$$

Et l'énergie du photon est donnée par :

$$E_{\text{ph}}(\text{eV}) = 1,24 / \lambda(\mu\text{m}) \quad (2.2)$$

Où :

$\lambda$ : la longueur d'onde en  $\mu\text{m}$ .

$h$ : la constante de Planck,

$c$ : la vitesse de la lumière dans le vide

$E_g$  : l'énergie du gap en eV

Le CZTS est un semi-conducteur de type p d'un gap direct de 1.5 eV théoriquement et une transparence optique faible.

Pour moduler la bande interdite on ajoute le sélénium Se, on obtient le matériau CZT(S,Se) [7]

La largeur de la bande interdite peut être exprimée par l'équation suivante :

$$E_g(x) = (1 - x)E_g(\text{CZTSe}) + xE_g(\text{CZTS}) - bx(1 - x) \quad (2.3)$$

Où :

$x$  : Représente le taux  $[S]/([S]+[Se])$ .

$b$  : paramètre d'ajustement appelé "bowing parameter" où  $b=0.1\text{V}$

## 2.6 propriétés électriques

Les principales caractéristiques électriques des matériaux semi-conducteurs résultent des déplacements des porteurs de charge sous l'effet d'un champ électrique, ou magnétique (conductivité électrique, effet Hall, photoconductivité,...). Pourtant, ces déplacements sont gouvernés par les collisions des porteurs de charge avec les ions, les impuretés ou les défauts du réseau cristallin[39,40]

La plupart des valeurs rapportées de résistivité des couches minces de CZTS sont variées de  $\sim 10^{-3}$  à  $10^1 \Omega\cdot\text{cm}$ , mais il y a aussi des valeurs de résistivité plus élevées que  $10^4 \Omega\cdot\text{cm}$  ont été également rapportés [39]. On a rapporté que la concentration des porteurs de charge varie entre  $10^{16} \text{cm}^{-3}$  à  $10^{21} \text{cm}^{-3}$  [39]. Les résultats de mesure de l'effet Hall ont prouvé que la mobilité dans les couches de CZTS a changé simplement de 0.1 à  $30 \text{cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ , alors que la plupart des valeurs éditées étaient dans la gamme de 1 à  $10 \text{cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$  [39].

Les propriétés électriques des composés CZTSSe sont présentées au Figure (2.3) pour les films préparés à l'aide de diverses méthodes.

Composé	Densité de porteur (cm <sup>-3</sup> )	Mobilité (cm <sup>2</sup> /V.s)	Résectivité (Ω. cm)	Méthodes
CZTS	8.2*10 <sup>18</sup>	6.3	0.16	Pulvérisation cathodique
CZTS	8.0*10 <sup>18</sup>	6.0	0.13	Sulfuration
CZTS	>5*10 <sup>19</sup>	<0.1	>1.3	Pulvérisation cathodique
CZTS			0.02-2	Pulvérisation cathodique
CZTSe	2.1*10 <sup>17</sup>	39.7	0.74	DRX
CZTSe			0.1-0.8	Spary

**tableau 2.3** : Les propriétés électriques des composes CZTSSe [40].

## 2.7 Propriétés optiques

L'énergie de bande interdite vaut 1,0 eV pour le CZTSe pur tandis que celle du CZTS pur est de 1,5 eV [5]. Elle varie entre ces deux valeurs pour le CZTSSe et peut être modulée grâce au taux de soufre et de sélénium dans le matériau [41].

Le CZTSSe possède un coefficient d'absorption supérieur à 10<sup>4</sup> cm<sup>-1</sup> au maximum d'émission du spectre solaire. Cela lui permet d'absorber au moins 90% de la lumière du spectre solaire sur une épaisseur relativement faible de l'ordre du micromètres [41].

Les couches minces de CZTS ont de bonnes propriétés optiques, mais, elles sont toujours gouvernées par les conditions de préparation. Les principaux paramètres influents sur la valeur du gap dans les structures kesterite sont [42] :

- La température.
- L'épaisseur de la couche

- la composition de la couche

### **2.7.1 Influence de la température**

Plusieurs considérations expérimentales ont été reportées sur la variation de l'énergie de gap de CZTS avec la température. Les mesures faites dans différents domaines de température montrent que dans tous les cas le gap diminue linéairement avec l'augmentation de la température [42].

### **2.7.2 Influence de la composition**

Pour toute application en optique, les couches minces doivent être les plus homogènes possibles surtout en composition car elle influe directement sur leurs propriétés optiques[37].

### **2.7.3 Influence de l'épaisseur**

D'après la littérature, quelques travaux font état d'une variation du gap optique en fonction de l'épaisseur des couches minces de CZTS. Les mesures de l'énergie du gap de CZTS faites pour différentes épaisseurs montrent une diminution du gap lorsque l'épaisseur augmente [42].

## **2.8 Composition et fabrication des cellules CZTS**

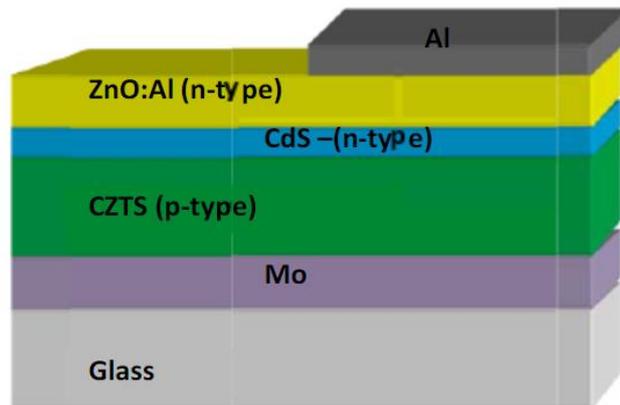
Généralement, dans une cellule solaire en couches minces, il existe quatre couches principales qui sont : une couche fenêtre, la couche tampon, la couche absorbante et le contact arrière .

La structure et la fabrication des cellules CZTS et CIGS sont similaires. Seules les conditions optimales d'assemblage varient d'une filière à l'autre. Les substrats peuvent eux aussi être rigides ou souples.

Du haut en bas, une cellule CZTS se compose :

- d'un verre de protection ;
- d'une couche conductrice transparente d'oxyde de zinc intrinsèque (elle est parfois précédée d'une couche de ZnO dopée à l'aluminium, de 400 nm d'épaisseur).

- d'une couche de sulfure de cadmium (CdS) ou d'un composé mixte comprenant du zinc, de l'oxygène, du soufre et des hydroxydes Zn(S, O, OH). d'une épaisseur de 70 nm, ils sont naturellement dopés n.
- de la couche de CZTS (épaisseur d'environ 1,5  $\mu\text{m}$ ).
- du conducteur inférieur, généralement du molybdène (épaisseur de 300 nm).
- du substrat.



**Figure 2.5** : Schéma d'une cellule solaire CZTS [28]

## 2.9 Avantages et inconvénients d'une cellule CZTS

### 2.9.1 Avantages :

- Un gap de 1.5 eV.
- L'indice de réfraction est de 2.07.
- Le coefficient d'absorption est de l'ordre de  $10^4 \text{ cm}^{-1}$
- Les éléments constitutifs de CIGS sont chers (In en Ga) et d'autres toxiques (Se). En revanche, CZTS est un matériau semi-conducteur à base d'éléments abondants et donc à faible coût et non-toxiques.
- Une efficacité de conversion énergétique plus de 6.77 %.

## 2.10 Les cellules multi jonctions :

Il est parfois difficile de trouver un matériau qui absorbe l'ensemble du spectre solaire. Les cellules multi-jonction III-V (de troisième génération) répondent à cette problématique. En effet il s'agit de l'empilement de divers composés III-V, chacun optimisé pour absorber une partie du spectre solaire avec efficacité. L'empilement, obtenu par croissance épitaxiale, permet donc de capter une grande partie du spectre solaire, et mène à une cellule unique composée en réalité de plusieurs cellules en série.

De par le domaine de spectre solaire dont les photons sont récoltés et la minimisation des pertes dues à la thermalisation, ces cellules permettent d'atteindre les records connus à ce jour en matière de conversion photovoltaïque. Des rendements de plus de 40% ont ainsi été obtenus sous lumière concentrée

Le procédé de fabrication et les matériaux utilisés pour la fabrication de ces cellules entraînent un coût extrêmement élevé qui cantonne ces matériaux à des applications spatiales

### a- cellule tandem

Dans la configuration tandem, les cellules sont placées en série donc reliées électriquement, d'où les contraintes : les matériaux des cellules doivent avoir des paramètres de maille voisins afin que les interfaces soient exemptes de défauts qui piègent les électrons et réduisent donc le rendement de la cellule.

Le courant dans les cellules en série est le même et donc limité par le plus faible courant des différentes cellules

Le rendement d'une cellule tandem sera donné par :

$$\eta = \frac{\sum V_{co} \cdot \min(J_c)}{P_i} FF \quad (2.4)$$

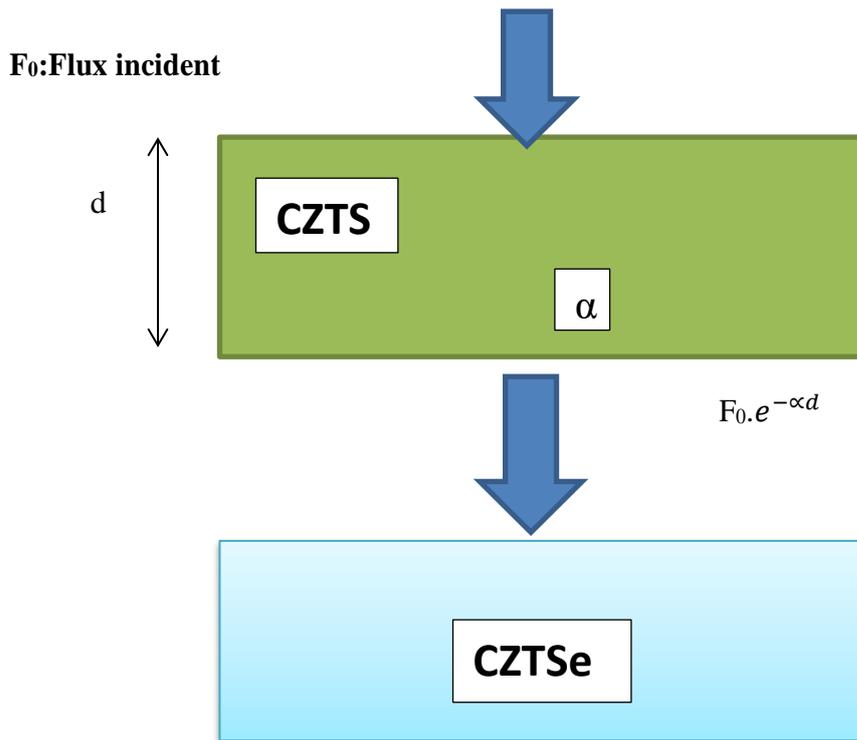


Figure 2 .6 : Cellule tandem

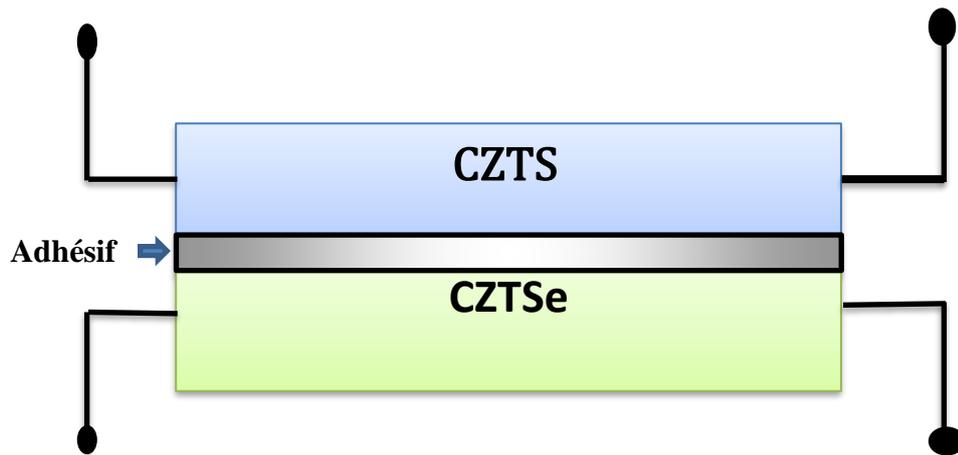
**b-cellule cascade :**

Dans la configuration cascade, les cellules sont fabriquées séparément ensuite reliées par une colle transparente. Les cellules sont isolées électriquement et dotées de contacts électriques.

Dans cette configuration, on s'affranchit des contraintes citées précédemment. Les matériaux des cellules peuvent avoir des paramètres de maille et des courants différents. Cependant, la réalisation de ces cellules est plus complexe.

Le rendement d'une cellule cascade sera donné par :

$$\eta = \frac{\sum P_m}{P_i} \tag{2.5}$$



**Figure 2.7** Cellule cascade

### **2.11 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté la cellule solaire CZTS, l'hétérojonction ainsi que la structure de la cellule solaire, la bande interdite et les propriétés électriques et optiques.

Enfin nous avons abordé les cellules multi-jonctions (cellule tandem et cellule cascade).

# Chapitre 3 Résultats de simulation et discussion

---

## 3.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter les résultats de la simulation numérique, par le logiciel COMSOL Multiphysics, de la cellule solaire cascade CZTS/CZTSe et l'interprétation des résultats trouvés.

Nous avons d'abord étudié la variation des paramètres caractéristiques (courant de court-circuit  $J_{cc}$ , tension de circuit ouvert  $V_{co}$ , puissance maximale  $P_{max}$  ainsi que le rendement  $\eta$  et le facteur de forme FF) en fonction des épaisseurs pour les deux cellules séparément, ensuite, nous avons déduit les caractéristiques de la cellule photovoltaïque à double jonction optimisée.

## 3.2 Présentation du logiciel COMSOL Multiphysics

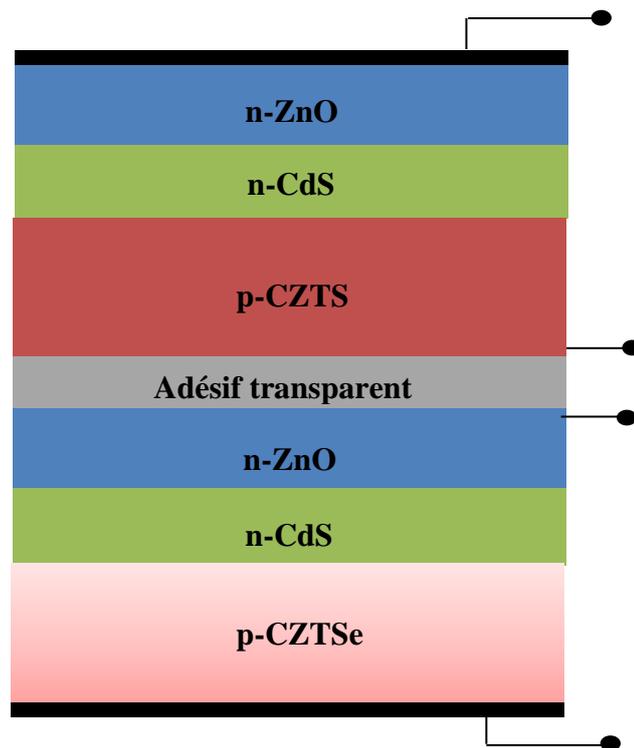
COMSOL Multiphysics est un logiciel de simulation numérique basé sur la méthode des éléments finis. Ce logiciel permet de simuler de nombreuses physiques et applications en ingénierie, et tout particulièrement les phénomènes couplés ou simulation multi-physiques.

Les principales étapes pour faire la simulation avec ce logiciel sont:

- Mettre en place l'environnement modèle.
- Construire la géométrie.
- Spécifier les propriétés des matériaux.
- Définir les conditions limites de la physique.
- Créez le maillage.
- Exécutez la simulation.
- Post-traiter les résultats.

### 3.3 Présentation de la cellule étudiée

La figure (3.1) ci-dessous montre la structure de la cellule CZTS/CZTSe simulée. Elle se compose de deux cellules solaires, la cellule supérieure en CZTS avec une large bande interdite ( $E_g=1.5\text{eV}$ ), et une cellule inférieure en CZTSe avec une petite bande interdite ( $E_g=1\text{eV}$ ). La cellule est soumise à un éclairage de spectre solaire AM0 d'une densité de puissance de  $1300\text{ W/m}^2$ , on supposera également que les rayons solaires sont normaux à la surface.



**Figure 3.1** Schéma de la structure de la cellule solaire CZTS/CZTSe simulée

### 3.4 Paramètres de simulation

Les paramètres des différentes couches utilisés dans la simulation de la cellule CZTS/CZTSe sont regroupés dans le tableau (3.1) :

Paramètres	n-ZnO	n-CdS	p-CZTS	p-CZTSe
W( $\mu\text{m}$ )	0.05	0.05	2.5	4
E <sub>g</sub> (eV)	3.3	2.45	1.5	1
X (eV)	4.45	4.45	4.45	4.45
$\epsilon_r$	9	10	10	10
N <sub>c</sub> (cm <sup>-3</sup> )	2.2 x 10 <sup>18</sup>			
N <sub>v</sub> (cm <sup>-3</sup> )	1.8 x 10 <sup>19</sup>			
$\mu_n$ (cm <sup>2</sup> /V.s)	100	100	100	100
$\mu_p$ (cm <sup>2</sup> /V.s)	25	25	25	25

Tableau 3.1 Paramètres utilisés dans la simulation

### 3.5 Effet de l'épaisseur de la couche absorbante CZTS dans la cellule supérieure

#### 3.5.1 Caractéristiques courant tension J(V)

La figure (3.2) représente les caractéristiques J(V) pour différentes épaisseurs de la couche CZTS dans la cellule supérieure. On voit que le courant augmente avec l'augmentation de l'épaisseur jusqu'à une valeur égale à 2.5 $\mu\text{m}$ , la variation devient de plus en plus faible. Quant à la tension de circuit ouvert, elle varie faiblement.

Remarque : W3 représente la largeur de la couche CZTS.

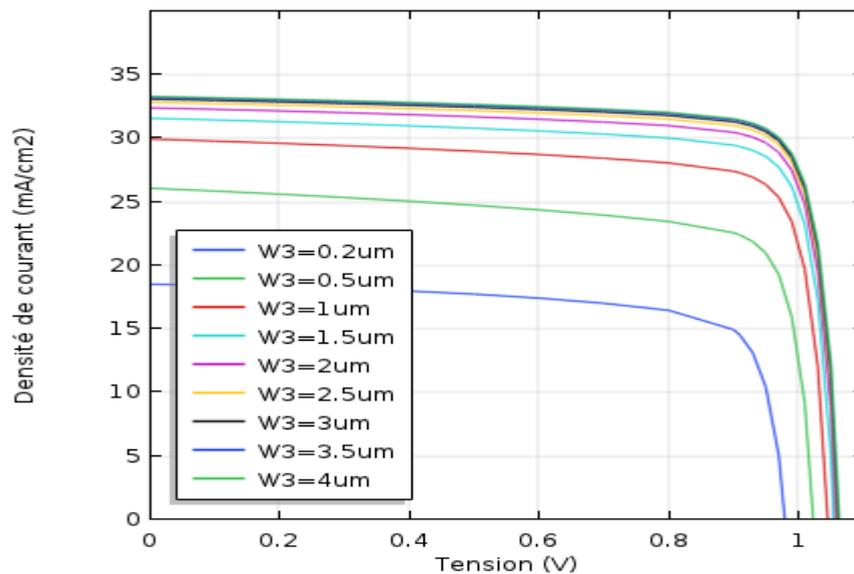


Figure 3.2 Caractéristiques courant tension pour différentes épaisseurs de la couche CZTS

### 3.5.2 Caractéristiques puissance tension P(V)

La figure (3.3) présente les caractéristiques P(V) pour différentes épaisseurs de la couche absorbante CZTS dans la cellule supérieure. On remarque que la puissance augmente avec l'augmentation de l'épaisseur, la variation devient très faible à partir de 2.5 $\mu\text{m}$ . Quant à la tension de circuit ouvert elle varie très faiblement.

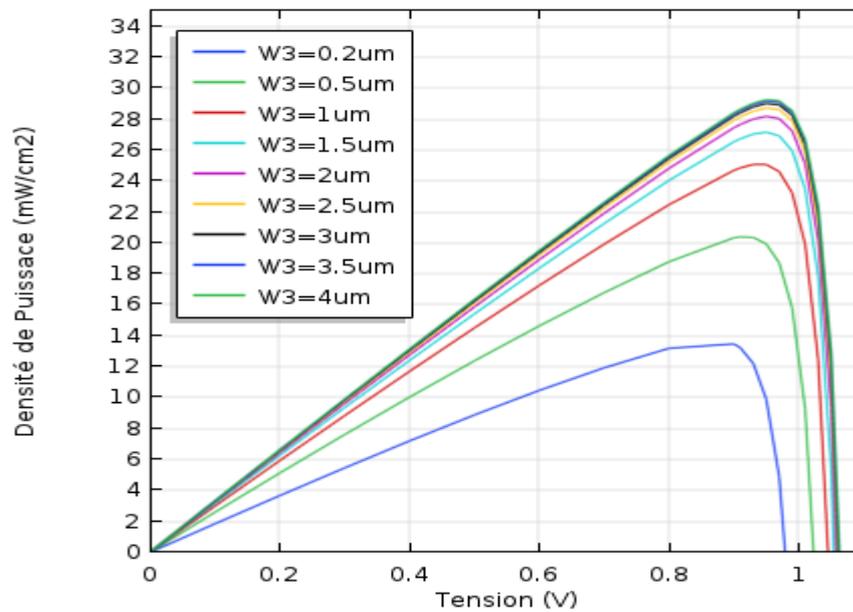


Figure 3.3 Caractéristiques puissance tension pour différentes épaisseurs de la couche CZTS

### 3.5.3 Courant de court-circuit $J_{cc}$ :

La variation de la densité de courant de court-circuit  $J_{cc}$  en fonction de l'épaisseur de la couche CZTS dans la cellule supérieure est illustrée sur la figure (3.4). On remarque que le courant de court-circuit  $J_{cc}$  augmente très rapidement entre 0 et 1.5 $\mu\text{m}$ . On remarque également qu'à partir de l'épaisseur de 2.5  $\mu\text{m}$ , la variation du courant de court-circuit  $J_{cc}$  est extrêmement faible.

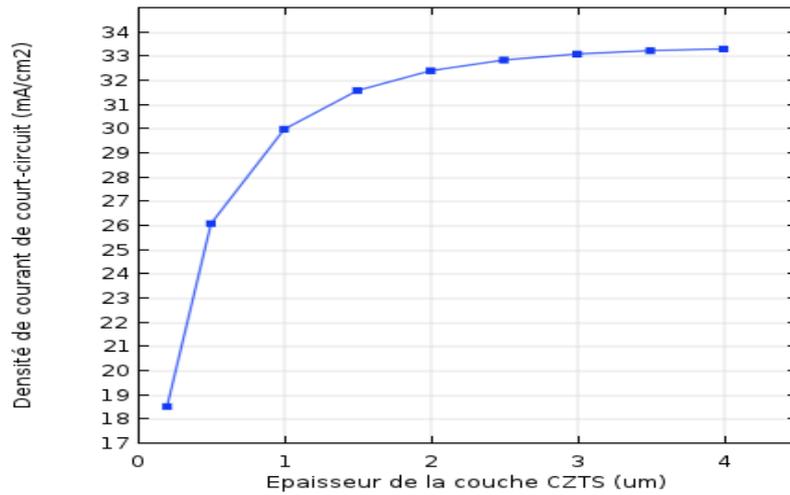


Figure 3.4 Variation du courant de court-circuit  $J_{cc}$  en fonction de l'épaisseur de la couche CZTS

### 3.5.4 Tension de circuit ouvert $V_{co}$

L'influence de la couche absorbante CZTS sur la tension de circuit ouvert dans la cellule supérieure est représentée dans la figure (3.5). On remarque que l'épaisseur de la couche absorbante a une très faible influence sur la tension de circuit ouvert  $V_{co}$ .

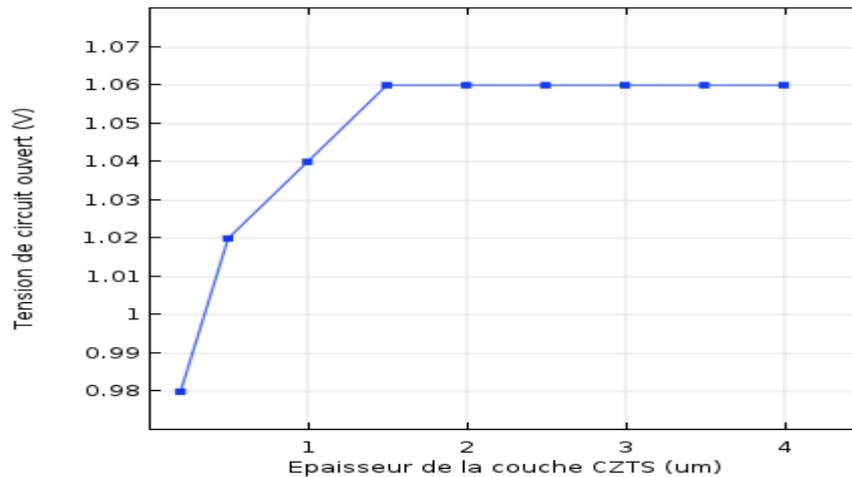
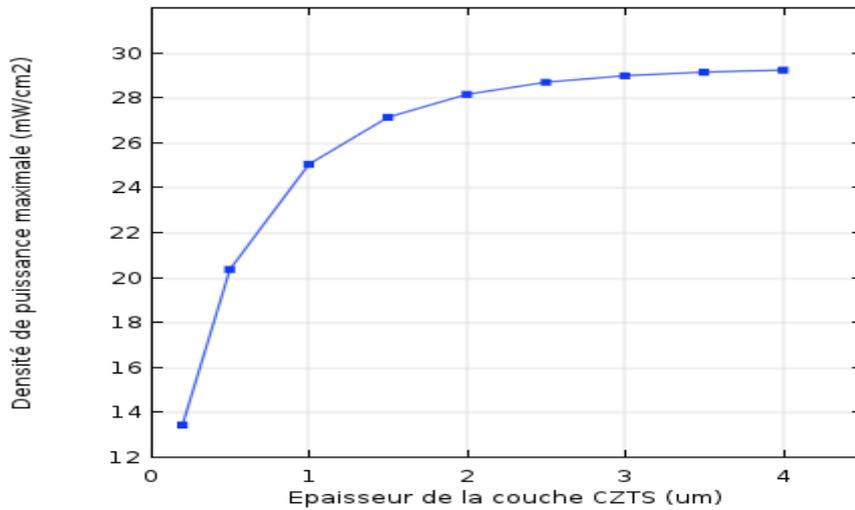


Figure 3.5 : Variation de la tension de circuit ouvert  $V_{CO}$  en fonction de l'épaisseur de la couche absorbante CZTS

### 3.5.5 Puissance maximale $P_{max}$

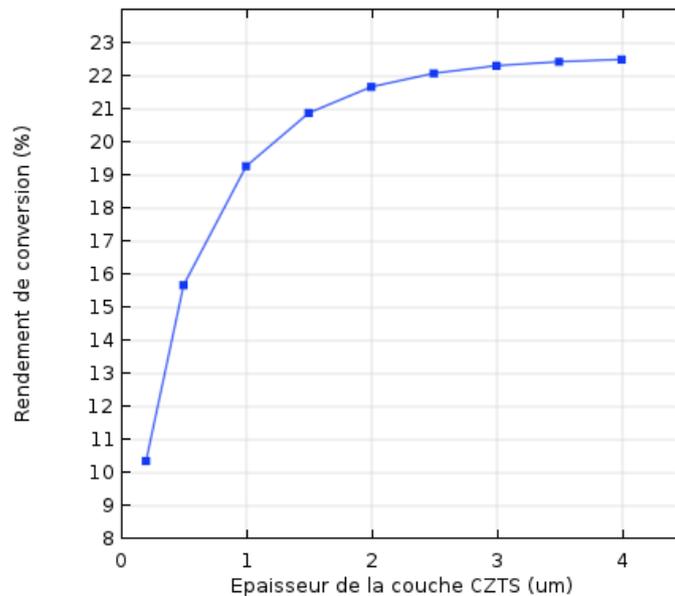
Dans la figure (3.6), on observe que la puissance maximale augmente avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche absorbante CZTS et cela est dû à l'augmentation du courant et de la tension. La puissance commence à se stabiliser à partir d'une épaisseur de  $2.5\mu\text{m}$ .



**Figure 3.6** Variation de la puissance maximale en fonction de l'épaisseur de la couche CZTS dans la cellule supérieure

### 3.5.6 Le rendement $\eta$

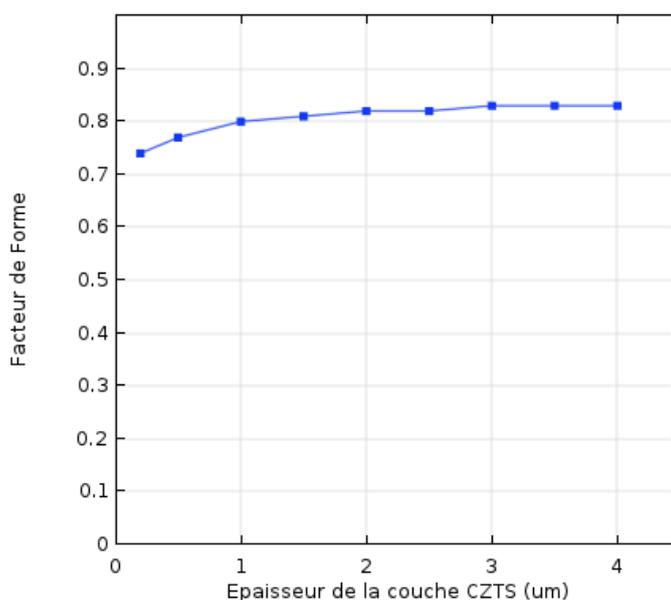
La variation du rendement en fonction des épaisseurs de la couche absorbante CZTS dans la cellule supérieure est représentée dans la figure (3.7). On constate une augmentation du rendement avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche, puis à partir d'une épaisseur égale à 2.5 $\mu\text{m}$  la variation devient faible.



**Figure 3.7** Variation du rendement en fonction de l'épaisseur de la couche CZTS de la cellule supérieure

### 3.5.7 Facteur de forme FF

Dans la figure (3.8), est représentée la variation du facteur de forme en fonction de l'épaisseur de la couche absorbante CZTS dans la cellule supérieure. On remarque que le facteur de forme varie faiblement et se stabilise à une valeur de 0.82.



**Figure 3.8** Variation du facteur de forme FF en fonction de la couche CZTS de la cellule supérieure

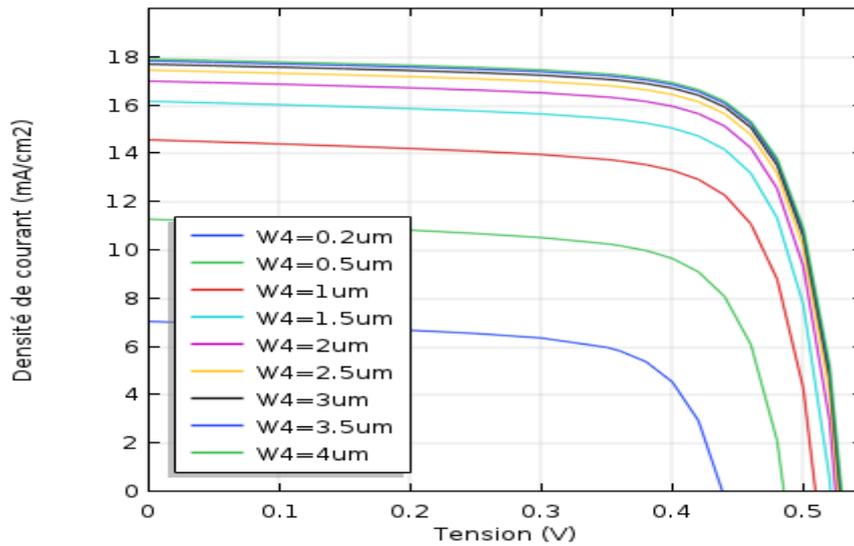
**Remarque :** afin d'étudier la cellule inférieure, on va fixer l'épaisseur de la couche absorbante CZTS de la première cellule à sa valeur optimale, c'est-à-dire à 2.5 $\mu$ m.

## 3.6 Effet de l'épaisseur de la couche absorbante CZTSe de la cellule inférieure

### 3.6.1 Caractéristiques courant tension J(V)

La figure (3.9) représente les caractéristiques J(V) pour différentes épaisseurs de la couche CZTSe dans la cellule inférieure. On voit que le courant augmente avec l'augmentation de l'épaisseur jusqu'à une valeur égale à 3.5  $\mu$ m, ensuite la variation devient de plus en plus faible. Quant à la tension de circuit ouvert, elle varie faiblement.

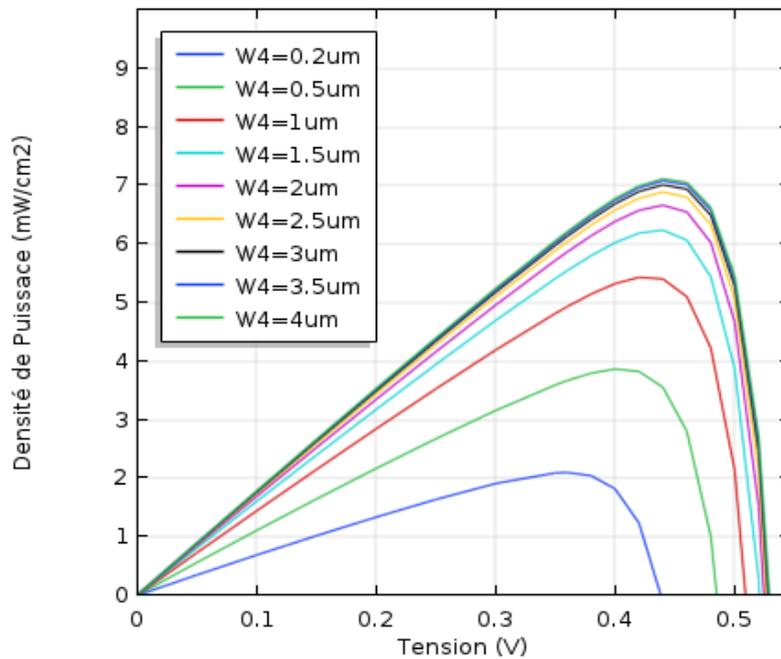
**Remarque :**  $W_4$  représente l'épaisseur de la couche CZTSe.



**Figure 3.9** Caractéristiques courant tension pour différentes épaisseurs de la couche CZTSe de la cellule inférieure

### 3.6.2 Caractéristiques puissance tension P(V)

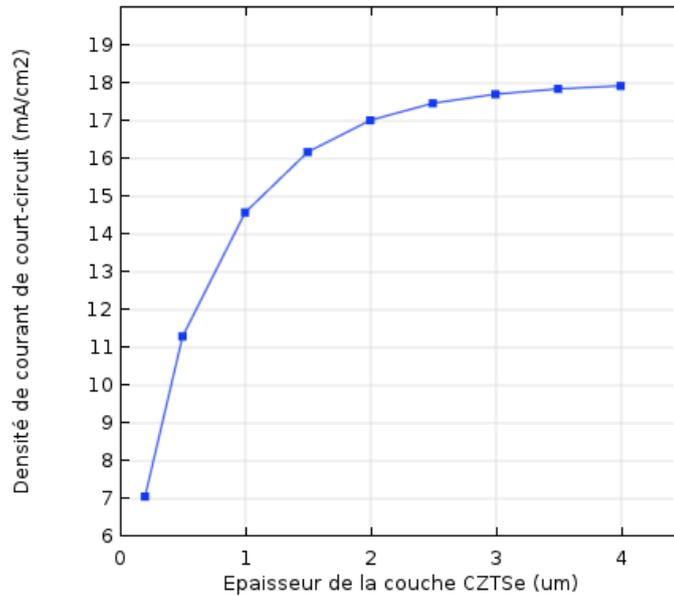
La figure (3.10) présente les caractéristiques P(V) en fonction des épaisseurs de la couche absorbante CZTSe dans la cellule inférieure. On remarque que la puissance augmente avec l'augmentation de l'épaisseur, la variation devient très faible à partir de 3.5 μm. Quant à la tension de circuit ouvert elle varie faiblement



**Figure 3.10** Caractéristiques puissance tension pour différentes épaisseurs de la couche CZTSe de la cellule inférieure

### 3.6.3 Courant de court-circuit $J_{CC}$

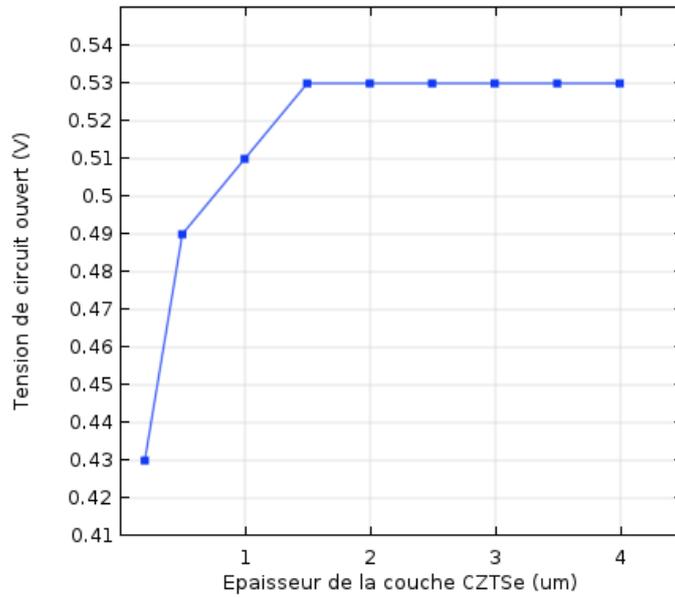
La variation de la densité de courant court-circuit  $J_{CC}$  en fonction de l'épaisseur de la couche CZTSe dans la cellule inférieure est illustrée dans la figure 3.11. On remarque que le courant de court-circuit  $J_{CC}$  augmente très rapidement entre 0 et  $2\mu\text{m}$ , ensuite tend à se stabiliser. On remarque également qu'à partir de l'épaisseur de  $3.5\mu\text{m}$ , la variation du courant de court-circuit  $J_{CC}$  devient très faible et se stabilise à la valeur  $J_{CC}=18\text{ mA/cm}^2$ .



**Figure 3.11** Variation de la densité de courant court-circuit  $J_{CC}$  en fonction de l'épaisseur de la couche CZTSe de la cellule inférieure.

### 3.6.4 Tension circuit ouvert $V_{CO}$

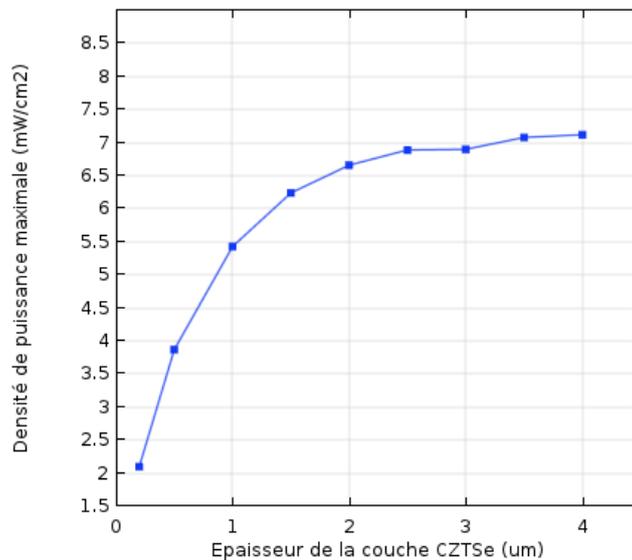
L'influence de la couche absorbante CZTSe sur la tension de circuit ouvert dans la cellule inférieure est représentée sur la figure(3.12). On remarque que l'épaisseur de la couche absorbante a une très faible influence sur la tension de circuit ouvert  $V_{CO}$ .



**Figure 3.12** Variation de la tension de circuit ouvert  $V_{CO}$  en fonction de l'épaisseur de la couche CZTSe de la cellule inférieure

### 3.6.5 Puissance maximale $P_{max}$

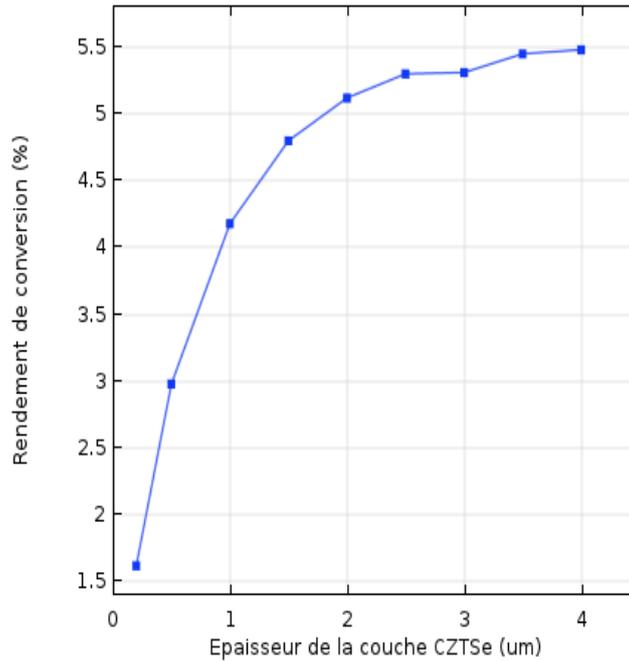
Dans la figure (3.13), on observe que la puissance maximale augmente avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche absorbante CZTSe et cela est dû à l'augmentation du courant et de la tension. La puissance commence à se stabiliser à partir d'une épaisseur de  $3.5\mu\text{m}$



**Figure 3.13** Variation de la puissance maximale en fonction de l'épaisseur de la couche CZTSe

### 3.6.6 Le rendement $\eta$

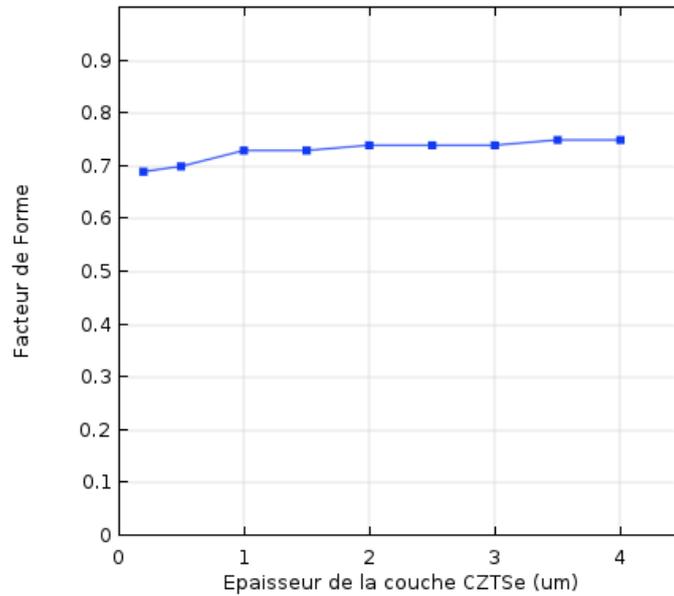
La variation du rendement en fonction des épaisseurs de la couche absorbante CZTSe dans la cellule inférieure est représentée dans la figure (3.14). On constate une augmentation du rendement avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche, puis à partir d'une épaisseur égale à 3.5 $\mu\text{m}$  la variation devient très faible.



**Figure 3.14** Variation du rendement en fonction de l'épaisseur de la couche CZTSe

### 3.6.7 Facteur de forme FF :

La représentation dans la figure (3.15) est la variation du facteur de forme en fonction de l'épaisseur de la couche absorbante CZTSe dans la cellule inférieure. On remarque que le facteur de forme augmente avec l'augmentation de l'épaisseur, mais cette variation est faible, puis il tend à se stabiliser vers une valeur de 0.76 approximativement.

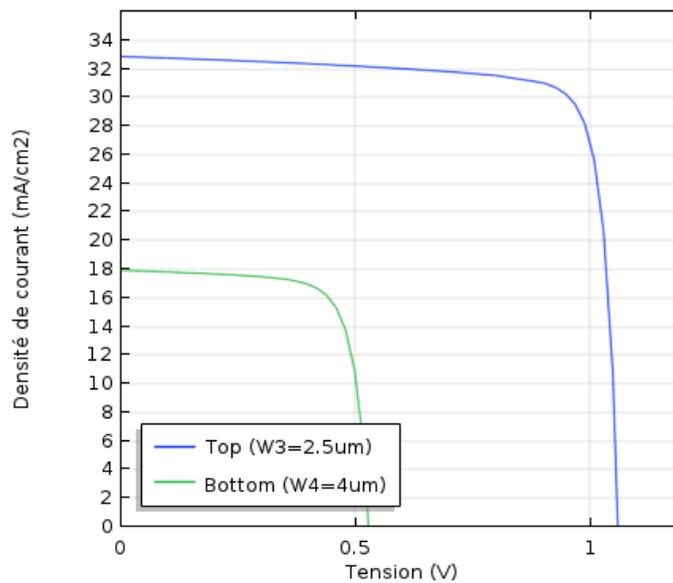


**Figure 3.15** Variation du facteur de forme FF en fonction de la couche CZTSe

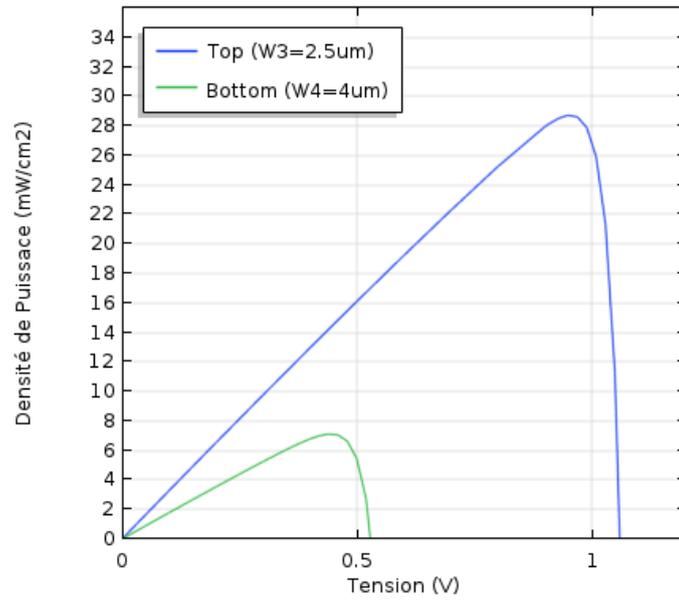
### 3.7 Caractéristiques de la cellule CZTS/CZTSe cascade

Les figures 3.16 et 3.17 représentent les caractéristiques courant-tension et puissance-tension des cellules supérieure et inférieure pour les épaisseurs optimales des couches absorbantes CZTS et CZTSe ( $W_3=2.5\mu\text{m}$  et  $W_4=4\mu\text{m}$ ).

Nous obtenons une puissance maximale optimale de l'ordre de  $35\text{mW}/\text{cm}^2$  et un rendement de conversion optimal de l'ordre de 27.5%.



**Figure 3.16** Caractéristiques courant-tension de la structure CZTS/CZTSe cascade



**Figure 3.17** Caractéristiques puissance-tension de la structure CZTS/CZTSe cascade

### 3.8 Conclusion

Dans ce chapitre, les performances optimales de la cellule solaire à double jonction CZTS/CZTSe cascade ont été déterminées par des simulations à l'aide du logiciel Comsol. Les résultats de simulation ont clairement montré que les épaisseurs des couches absorbantes de la cellule supérieure et inférieure jouent un rôle très important dans les performances de la cellule solaire. Les résultats de simulation prévoient un rendement de conversion optimal de l'ordre de 27.5%.

## Conclusion générale

---

La protection de l'environnement est devenue, ces dernières années, une préoccupation majeure. De nombreuses voies de recherches se sont donc orientées vers l'utilisation des énergies renouvelables, dont l'énergie solaire. L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie renouvelable car elle utilise une source d'énergie d'origine naturelle qui est le Soleil.

L'objectif de ce travail, est d'étudier les caractéristiques électriques de la cellule solaire cascade CZTS/CZTSe pour un éclairage AM0 et une température de 300K

Les résultats obtenus dans cette étude ont permis de constater que les performances optimales de notre structure sont obtenues pour une épaisseur de la couche absorbante de la cellule supérieure de l'ordre de  $2,5\mu\text{m}$  et de la cellule inférieure de l'ordre de  $4\mu\text{m}$  et un rendement de conversion optimal de l'ordre de 27,5% peut être atteint.

En perspective à ce travail, une structure double jonction CZTS/CZT(SSe) qui permet de moduler le gap de la couche absorbante de la cellule inférieure afin d'optimiser le rendement peut être envisagée.

# Bibliographie

---

- [1] fr-static.z-dn.net CHAPITRE 1- GENERALITE SUR LES CELLULES SOLAIRES
- [2] HANANOU Fatiha, ROUABAH AICHA «Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque », Mémoire MASTER, université Kasdi Merbah Ouargla,2014
- [3] Energie solaire photovoltaïque.doc / B. Flèche - D. Delagnes / juin 07
- [4] Liu, Heinzl, Rockett, «A revised version of the AMPS simulation code», Université de Nankai, à Tianjin, Chine et l'Université de l'Illinois, Urbana, Etats-Unis.
- [5] Djeghbala Afaf, «Etude par simulation numérique de l'effet du Dopage et des épaisseurs sur les Caractéristiques électriques d'une Cellule solaire (p/n) en Silicium », Mémoire de Master, Université Med Khider Biskra, 2013.
- [6] université ferhat abbas sétif ufas (algerie) magister theme "Contribution à l'etude de la thermographie infrarouge et ses applications réalisé par Mr.zidane hebboul
- [7] mémoire de master thème “Etude et simulation d'une cellule solaire à base couches minces CZTS “ présenté par Oubouchou Amina
- [8] <https://www.edfenr.com/lexique/cellule-photovoltaïque/>
- [9] Gravis David, « Synthèse de  $\text{Cu}_2\text{SnZnS}_4$  par pulvérisation magnétron réactive : de la caractérisation du plasma à la conception de cellules solaires » Mémoire de master, université de MONS ,2015.
- [10] Mémoire de fin d'étude en Master ,thème “Etude par simulation numérique de la Cellule solaire à base de CZTS par SCAPS“présenté par : Ben Abderrazak Ghania, Université Med Khider Biskra,2014.
- [11] ALPHOUSSEYNI Sagna, « Etude et élaboration par Close-Spaced Vapor Transport (CSVT), d'absorbeurs  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  en couches minces polycristallines destinées à la réalisation de photopiles à faible coût.», thèse de doctorat, UNIVERSITE DE PERPIGNAN VIA DOMITIA, 2016.
- [12] IF\_ENERGIE\_Mod3\_Fonctionnement\_technologies\_PV\_FR, institut bruxellois pour la gestion de l'environnement
- [13] [blog.solorea.com/fabrication-cellule-photovoltaïque](http://blog.solorea.com/fabrication-cellule-photovoltaïque)
- [14] OUSSIDHOUM Samira, « Etude comparative des performances des cellules solaire à jonctions simple et multiple », Mémoire de magister, Université MOULOUD MAMMERI Tizi-Ouzou ,2015

- [15] AIT MOKRANE Abderrahim, MOUSSAOUI Ahmed, «Extraction des Paramètres d'une Cellule Photovoltaïque », Mémoire de Master, université de ABDERRAHMANE MIRA BIJAYA, 2017.
- [16] KROUR Safia ,«optimisation des paramètres d'une cellule photovoltaïque par les algorithmes génétiques », Mémoire de Magister, université de FARHAT ABBES STIF1, 2014
- [17] ALPHOUSSEYNI Sagna, « Etude et élaboration par Close-Spaced Vapor Transport (CSVT), d'absorbteurs  $Cu_2ZnSnS_4$  en couches minces polycristallines destinées à la réalisation de photopiles à faible coût.», thèse de doctorat, UNIVERSITE DE PERPIGNAN VIA DOMITIA, 2016.
- [18] MENASSEL Haloui Hafsia , « Contribution à la conception et modélisation d'un capteur solaire hybride photovoltaïque thermique à base de cellules solaires en couches minces .», Thèse de Doctorat , Université d'OUM ELBOUAGHI.
- [19] Oghi, Z. : Mesure automatisée du spectre d'absorption optique des cellules solaires, Mémoire de Master, Université Med Khider Biskra Algérie, 2014, pp 5-8, 11.
- [20] UNIVERSITE FERHAT ABBAS – SETIF – 1 – UFAS (ALGERIE) MEMOIRE MAGISTER Réalisé Par Mr. CHAOUA Makhoulf THEME Effet des couches conductrices et transparentes sur les performances des cellules solaires  $Cu(In,Ga)Se_2$
- [21] Université Djillali Liabès de Sidi Bel Abbès, these “*Propriétés électriques et photoélectriques des diodes Schottky à base du matériau GaAs nitruré : Mesures et Simulation*” Par Mr RABEHI ABDELAZIZ
- [22] Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen, MAGISTER-theme « ETUDE COMPARATIVE DES PARAMETRES PHYSIQUES DES MATERIAUX PHOTOVOLTAÏQUES A BASE DE SILICIUM MONOCRISTALLIN ET POLYCRISTALLIN »réalisé par : M me GHENNOU Épouse BAKHTI Souad
- [23] Université Abdel Hamid Ibn Badis de Mostaganem, Projet de Fin d'Etudes,theme « Simulation par Excel d'une cellule solaire conventionnelle en Silicium », Présenté par : BELAIDI Siham
- [24] H. Mathieu. « Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques »
- [25] <https://f5zv.pagesperso-orange.fr>
- [26] S. Khlifi, Modélisation d'une Cellule Solaire  $Ga_{1-x}Al_xAs(n)-GaAs(i)-GaAs(p)$ ”, Mémoire magistère, Universitaire de Béchar. 2003
- [27] S. Alaa, Caractérisation en impulsions étroites et modélisation de transistors bipolaires à hétérojonction en technologie InP”, Thèse docteur, Université de Limoges. 2009
- [28] M.Istiaque Hossain ISTIAQUE HOSSAINa\*.Prospects of Cztssolar Cells from the perspective of material properties ,Fabrication methods and Current research challenges.

Department of Physics, Univerisiti Brunei Darussalam, Gadong BE 1410, Negara Brunei Darussalam. Vol. 9, No. 6, June 2012, p. 231 – 242

- [29] DARANFED Ouarda, « Elaboration et caractérisation de couches absorbantes des cellules Solaires en couches minces à base de  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  », thèse de doctorat, Université Mentouri, Constantine, 2013.
- [30] Nouiri, Bouallem, « Etude de l'effet de la couche mince  $\text{CdZnS}$  dans la cellule solaire CZTS », Mémoire de master, Université Mohamed Boudiaf, M'sila, 2017
- [31] Kentaro ITO « Copper Zinc Tin Sulfide-Based Thin-Film Solar Cells », University de Shinshu Nagano Japan, 2015.
- [32] Solange Temgoua, « Optimisation et compréhension des dispositifs à base de  $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{Sx}, \text{Se}_{1-x})_4$  pour applications photovoltaïques en couches minces. », Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie, 2016.
- [33] Léo Choubrac, « Cristallochimie de composés dérivés de  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  pour des applications photovoltaïques », Thèse de Doctorat, Université de Nantes, 2014.
- [34] Alphousseyni Sagna, « Etude et élaboration par Close-Spaced Vapor Transport (CSVT), d'absorbateurs  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  en couches minces polycristallines destinées à la réalisation de photopiles à faible coût. », thèse de doctorat, Université de Perpignan via domitia, 2016.
- [35] Nadia MESSEI, « Study of the effect of grading in composition on the performance of thin film solar cells based on  $\text{AlGaAs}$  and  $\text{CZTSSe}$ , a numerical simulation approach », Thèse de Doctorat, Université Frères Mentouri Constantine 1, 2016
- [36] MAGISTER EN ELECTRONIQUE THEME : « ETUDE D'UNE CELLULE SOLAIRE A BASE DE STRUCTURE PIN » Présenté par 'HOUDA CHABANE'  
Université Hadj Lakhdar de Batna
- [37] MAGISTER EN PHYSIQUE ELECTRONIQUE ET MODELISATION thème (ETUDE DES PROPRIETES OPTOELECTRONIQUES DES SEMICONDUCTEURS III-V A BASE DE GALIUM) Par Mme BAGHDADLI Nawel
- [38] Henry Mathieu Hervé Fanet, « Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques », 6ème édition Dunod
- [39] Touafek Naïma, « Contribution à l'étude d'une cellule solaire en couches minces à base de  $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$  », thèse de doctorat, 2015.
- [40] Medjdoub Sarra, « Etude structurelle des cellules solaires deuxième et troisième génération », Mémoire de master, Systèmes et Energies Renouvelables, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, 2016.
- [41] THÈSE « Etude des propriétés électroniques de couches minces de  $\text{CZTSSe}$  », Présentée par Raphaël FILLON, UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

[42] Mémoire de Master Académique ,thème“ Etude et simulation d’une cellule solaire à base des éléments chalcogènes“, Par: LAGHOUAG Ahlam ,BENCHEIKH Halima,  
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M’SILA