

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 البليدة  
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا  
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك  
Département d'Électronique



## Mémoire de Master

Mention Électronique  
Spécialité Microélectronique

présenté par

OUBOUCHOU Amina

# Etude et simulation d'une cellule solaire à base couches minces

## CZTS

Proposé par : Mr NACER Said

Année Universitaire 2018-2019

# Table des matières

Remerciements .....	
Résumé .....	
Liste des symboles.....	
Listes des figures.....	
Liste des tableaux.....	
Introduction générale.....	01

## CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS

1.1 Introduction. ....	05
1.2 Rayonnement solaire. ....	05
1.3 Radiation d'un corps noir.....	07
1.4 Les semi-conducteurs. ....	08
1.5 Types de semi-conducteurs. ....	09
1.5.1 Semi-conducteur type N.....	09
a) Niveau de Fermi semi-conducteur type N .....	10
1.5.2 Semi-conducteur type P. ....	10
a) Niveau de Fermi semi-conducteur type P .....	11
1.6 L'absorption .....	11
1.7 Génération optique .....	12
1.8 Equations de transport des semi-conducteurs . ....	13
1.9 Recombinaison .....	14
1.10 La jonction PN .....	15
1.11 L'hétérojonction. ....	16
1.12 Conclusion.....	19

## CHAPITRE 2 Cellule solaire à base de CZTS

2.1 Introduction. ....	20
2.2 La cellule photovoltaïque .....	20
2.3 Historique du photovoltaïque .....	20
2.4 L'effet photovoltaïque .....	22
2.5 Les différents technologies des cellules photovoltaïque .....	22
2.6 Description du principe de fonctionnement d'une cellule solaire . ....	24
2.7 Paramètres essentiels caractérisant une cellule photovoltaïque .....	25
2.7.1 Courant de court circuit $J_{cc}$ .....	25
2.7.2 Tension de circuit ouvert $V_{co}$ . ....	25
2.7.3 Rendement de conversion $\eta$ .....	26
2.7.4 La puissance maximale $P_{max}$ .....	26
2.7.5 Facteur de forme $FF$ .....	26
2.8 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque .....	27
2.9 Cellule solaire à base de CZTS .....	28
2.10 Bande interdite. ....	28
2.11 Propriétés optiques . ....	30
2.12 Propriétés électriques .....	31
2.13 Composition et fabrication des cellules CZTS.....	32
2.14 Avantages et inconvénients d'une cellule CZTS . ....	33
2.15 Conclusion .....	33

## CHAPITRE 3 Résultats de simulation et discussion

3.1 Introduction. ....	34
3.2 Présentation du logiciel COMSOL Multiphysics .....	34
3.3 Paramètres utilisés dans la simulation .....	35
3.4 Effets de l'épaisseur de la couche fenêtre ZnO.....	35

3.4.1 Courant de court circuit $J_{cc}$ .....	35
3.4.2 Tension de circuit ouvert $V_{co}$ .....	36
3.4.3 Rendement de conversion $\eta$ .....	36
3.5 Effets de l'épaisseur de la couche tampon CdS.....	37
3.5.1 Courant de court circuit $J_{cc}$ .....	37
3.5.2 Tension de circuit ouvert $V_{co}$ .....	38
3.5.3 Rendement de conversion $\eta$ .....	38
3.6 Effets de l'épaisseur de la couche absorbante CZTS.....	39
3.6.1 Courant de court circuit $J_{cc}$ .....	39
3.6.2 Tension de circuit ouvert $V_{co}$ .....	40
3.6.3 Caractéristiques I-V.....	41
3.6.4 Caractéristiques P-V.....	42
3.6.5 Puissance maximale $P_{max}$ .....	42
3.6.6 Rendement de conversion $\eta$ .....	43
3.6.7 Facteur de forme FF.....	44
3.7 Effet de la largeur de la bande interdite 'gap' de la couche absorbante CZTS(S,Se).....	45
3.7.1 Courant de court circuit $J_{cc}$ .....	45
3.7.2 Tension de circuit ouvert $V_{co}$ .....	46
3.7.3 Caractéristiques I-V.....	47
3.7.4 Caractéristiques P-V.....	47
3.7.5 Puissance maximale $P_{max}$ .....	48
3.7.6 Rendement de conversion $\eta$ .....	49
3.7.7 Facteur de forme FF.....	49
3.8 Conclusion.....	50
Conclusion générale.....	51
Bibliographie.....	52

## Liste des figures

Figure 1.1 Rayonnement solaire .....	05
Figure 1.2 Irradiation solaire .....	07
Figure 1.3 Courbe de rayonnement du corps noir à différentes températures .....	08
Figure 1.4 Matériau conducteur a) Conducteur, b) Isolant, c)Semi-conducteur... ..	09
Figure 1.5 Semi-conducteur type N, a) diagramme de bande d'énergie, b) densité d'état énergétique.....	10
Figure 1.6 Semi-conducteur type p, a) diagramme de bande d'énergie, b) densité d'état énergétique .....	11
Figure 1.7 Formation d'une jonction PN.....	16
Figure 1.8 Diagramme de bande d'une hétérojonction isotype : (a) avant contacte, (b) après contacte. ....	17
Figure 1.9 Diagramme de bande d'une hétérojonction anisotype : (a) avant contacte, (b) après contacte. ....	18
Figure 2.1 L'effet photovoltaïque.....	22
Figure 2.2 Cellule solaire en silicium.....	23
Figure 2.3 Cellule solaire CIGS .....	24
Figure 2.4 Cellule solaire organique .....	24
Figure 2.5 Caractéristiques I(V) et P(V) d'une cellule photovoltaïque .....	25
Figure 2.6 Méthode d'extraction de la bande interdite en fonction de $h\nu$ .....	29
Figure 2.7 Variation de l'énergie de bande interdite du CZTSSe en fonction de la composition x .....	30
Figure 2.8 Coefficient d'absorption du CZTS en fonction de $h\nu$ (eV).....	30
Figure 2.9 Structure standard d'une cellule CZTS.....	32
Figure 3.1 Variation du courant de court circuit $J_{cc}$ en fonction de l'épaisseur de la couche ZnO .....	36

Figure 3.2 Variation de la tension de circuit ouvert $V_{co}$ en fonction de l'épaisseur de la couche ZnO .....	36
Figure 3.3 Représentation de la variation du rendement en fonction de l'épaisseur de la couche ZnO .....	37
Figure 3.4 Courant de court circuit $J_{cc}$ en fonction de l'épaisseur de la couche tampon CdS .....	38
Figure 3.5 Variation de la tension de circuit ouvert $V_{co}$ en fonction de l'épaisseur de la couche CdS.....	38
Figure 3.6 Représentation de la variation du rendement en fonction de l'épaisseur de la couche CdS.....	39
Figure 3.7 Représentation du courant de circuit ouvert $J_{cc}$ en fonction de l'épaisseur de la couche absorbante.....	40
Figure 3.8 Variation de la tension de circuit ouvert $V_{co}$ en fonction de l'épaisseur de la couche CZTS .....	41
Figure 3.9 Caractéristiques courant tension pour différentes épaisseurs de la couche CZTS .....	41
Figure 3.10 Représentation de la puissance délivrée par la cellule en fonction de la tension $V$ pour différentes épaisseurs de CZTS.....	42
Figure 3.11 Représentation de la variation de la puissance maximale $P_{max}$ en fonction de l'épaisseur de la couche CZTS .....	43
Figure 3.12 Représentation du rendement de conversion en fonction de l'épaisseur de la couche CZTS.....	44
Figure 3.13 Représentation de la variation du facteur de forme $FF$ en fonction de l'épaisseur de la couche CZTS .....	45
Figure 3.14 Courant de court circuit $J_{cc}$ en fonction du gap de CZTS .....	46
Figure 3.15 Tension de circuit ouvert $V_{co}$ en fonction du gap de CZTS.....	46
Figure 3.16 Caractéristiques courant tension pour différents gaps de CZTS .....	47
Figure 3.17 Représentation de la puissance délivrée par la cellule en fonction de la tension pour différentes largeurs de la bande interdite de CZTS.....	48

Figure 3.18 Représentation de la variation d la puissance maximale $P_{max}$ en fonction de la largeur de la bande interdite de CZTS. ....	49
Figure 3.19 Représentation de la variation du rendement en fonction de la largeur de la bande interdite de CZTS .....	49
Figure 3.20 Représentation de la variation du facteur de forme FF en fonction de la largeur de la bande interdite de CZTS .....	50

## Liste des tableaux

Tableau 2.1 Les propriétés électriques du composant CZTSSe .....	31
Tableau 3.1 Les paramètres utilisés dans la simulation .....	50



## Remerciements

---

Tout d'abord je remercie dieu le plus puissant, de m avoir donné la force, la volonté et le courage pour mener ce présent travail.

Je tiens à remercier particulièrement mon promoteur, Monsieur NACER Said professeur à l'université de SAAD DAHLAB-Blida, pour l'aide qu'il a fournie et les connaissances qu'il a su me transmettre. Je le remercie également pour sa disponibilité et la qualité de ses conseils.

Je ne saurais oublier de remercier toutes les personnes qui me sont chères.

---

ملخص: الخلايا الضوئية هي مكونات قادرة على تحويل الطاقة الضوئية مباشرة إلى طاقة كهربائية ، بمساعدة بعض مواد أشباه أظهرت نتائج COMSOL باستخدام برنامج CZTS الموصلات. في هذا العمل ، قمنا بدراسة ومحاكاة خصائص الخلية القائمة على المحاكاة أن معلمات الخلية مثل سمك وفجوة طبقة الامتصاص تلعب دورًا مهمًا في أداء الخلية. تم الحصول على كفاءة تحويل eV، مثالية بنسبة 26٪ لسماكة الطبقة الماصة التي تبلغ 1,5 ميكرومتر وفجوة تتراوح بين 1.4 و 1.5

كلمات المفاتيح: سمك. الفجوة. المحاكاة. CZTS. الخلايا الضوئية

---

**Résumé :** les cellules photovoltaïques sont des composants capable de convertir directement l'énergie lumineuse en énergie électrique, en s'aidant de certains matériaux semi-conducteurs. Dans ce travail, nous avons étudié et simulé les caractéristiques d'une cellule à base de CZTS en utilisant le logiciel COMSOL. Les résultats de simulation ont montré que les paramètres de la cellule tels que l'épaisseur et le gap de la couche absorbante jouent un rôle important sur les performances de la cellule. Un rendement de conversion optimal de 26% a été obtenu pour une épaisseur de la couche absorbante de l'ordre de 1,5µm et un gap de 1,4-1,5eV.

**Mots clés :** Cellule photovoltaïque; CZTS; épaisseur; gap; simulation.

---

**Abstract :** photovoltaic cells are components capable of directly converting light energy into electrical energy, with the help of certain semiconductor materials. In this work, we have studied and simulated the characteristics of a CZTS-based cell using COMSOL software. Simulation results showed that cell parameters such as the thickness and gap of the absorbing layer play an important role in cell performance. An optimal conversion efficiency of 26% was obtained for a thickness of the absorbent layer of the order of 1.5 µm and a gap of 1.4-1.5eV.

**Keywords :** Photovoltaic cell; CZTS; thickness; gap; simulation.

---

## Listes des acronymes et abréviations

AM : Masse d'air.

K : Constante de Boltzmann.

q : Charge élémentaire.

T : Température.

c : Vitesse de la lumière.

J : Densité de courant.

$V_{co}$  : Tension de circuit ouvert.

$J_{cc}$  : courant de court circuit.

FF : Facteur de forme.

$\eta$  : Rendement de conversion

$E_g$  : Gap d'énergie.

$E_c$  : Bande de conduction.

$E_v$  : Bande de valence.

$h\nu$  : Energie de photon.

$N_a$  : La concentration de dopant donneurs ionisés dans le matériau P.

$N_d$  : La concentration de dopant donneurs ionisés dans le matériau N.

$n_i$  : La concentration intrinsèque des porteurs libres.

$\alpha$  : coefficient d'absorption.

# Introduction générale

---

De nos jours, l'énergie est quelque chose d'indispensable à notre quotidien car elle est l'étincelle qui permet d'accomplir toute activité humaine. Elle est aussi un facteur de développement et le pilier de l'économie.

Actuellement, environ 80% d'énergie utilisée dans le monde est de sources limitées et épuisables tels que les gisements de combustible fossile (pétrole, gaz et charbon).

Aujourd'hui la situation énergétique mondiale est devenue préoccupante sous l'effet de la croissance économique et la croissance démographique, d'une autre part les demandes énergétiques du monde s'élèvent continuellement.

C'est pourquoi, il est impératif de trouver un autre moyen pour prendre la relève et diversifier le bouquet énergétique. Une des solutions les plus prometteuses pour le futur énergétique et l'humanité est le développement d'une autre forme d'énergie dite "énergie renouvelable". Le principal avantage de ces énergies renouvelables est qu'elles sont quasi illimitées et permanentes, en plus elles ne sont pas nocifs aux humains et n'ont pas l'effet polluant car c'est des sources naturelles, ce qui réduit l'émission de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>).

A cet effet, la recherche de nouvelles sources est devenue un sujet capital dans le but de passer des énergies de stocks à des énergies renouvelables dans de nombreux domaines. D'abord dans la production d'énergie nucléaire, ensuite dans le domaine des sources d'énergie telles que la production d'électricité par le vent "l'éolien" ou la transformation d'énergie solaire "le photovoltaïque".

Au sein de la filière solaire, l'énergie photovoltaïque se différencie de l'énergie solaire thermodynamique, car elle produit directement de l'électricité et ne nécessite pas un ensoleillement direct. Cependant cette technologie est largement dominée par le silicium qui souffre toujours d'un faible rendement et d'un coût relativement cher.

L'originalité de l'énergie photovoltaïque telle qu'on l'entend ici est de transformer directement l'énergie solaire en électricité.

Le module photovoltaïque est constitué de cellules photovoltaïques associées en série ou en parallèle pour les installations solaires.

Plusieurs filières se sont développées: la première génération s'est basée sur les cellules à base de silicium, les rendements maximum en laboratoire sont de 20% pour les cellules à base de silicium poly-cristallin et 25% pour les cellules à base de silicium monocristallin [1].

La seconde génération développe des cellules en couches minces, au pouvoir d'absorption important, qui nécessite moins de matériau (quelques  $\mu\text{m}$  d'épaisseur) que les cellules au silicium (environ 0,2mm d'épaisseur), et offrent de nombreux autres avantages: elle peuvent être déposées sur des substrats

souples (ce qui multiplie le nombre d'applications possibles) par des procédés simples, rapides en peu d'étapes.

Le Cuivre, le Zinc, l'étain, le soufre et le sélénium forment ensemble des matériaux semi-conducteurs de choix, puisqu'ils sont fait 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 serait moins couteux que ceux de la filière CIGS.

Notre travail aborde l'étude des caractéristiques électriques de la cellule solaire en couches minces à base de  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  (CZTS). La structure hétérojonction ZnO/CdS/CZTS est constituée par le composé CZTS de type p, qui représente l'absorbeur de la cellule (c'est-à dire la zone où les paires électrons-trous sont générées sous illumination). Une jonction PN est formée entre la couche absorbante CZTS de type p et la couche tampon CdS de type n. Le ZnO est appelé couche fenêtre, car elle doit autoriser le passage du rayonnement dans la cellule solaire. 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 électrique.

Les résultats de simulation seront présentés et discutés dans le troisième chapitre.

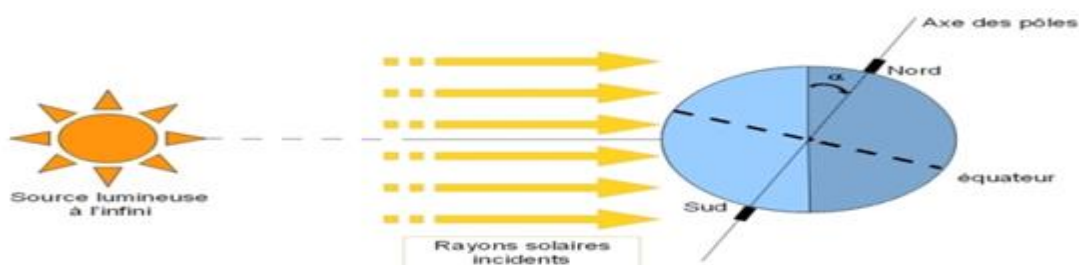
# Chapitre 1 Généralités

---

## 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 et description des différents paramètres photovoltaïques.

## 1.2 Rayonnement solaire



**Figure 1.1** Rayonnement solaire.

Le soleil émet continuellement une quantité d'énergie radiante colossale dans le système solaire d'environ 5800K. La terre intercepte une toute petite partie de l'énergie solaire rayonnée dans l'espace. Cette quantité d'énergie considérable de  $1367 \text{ W/m}^2$  est appelée la constante solaire. Il faut bien noter que la terre reçoit une petite fraction de cette énergie car l'irradiation de ce dernier est pondérée par plusieurs facteurs à sa surface. Parmi ces facteurs on



peut citer l'absorption, les conditions climatiques et les changements de saisons.

Néanmoins la quantité d'énergie qui atteint la surface de la terre dans une seule journée est plus importante que toute la quantité consommée par la population mondiale pendant toute une année.

On mentionne aussi la masse d 'air (AM) qui correspond a la perte d'énergie solaire par l'absorption atmosphérique qui est donnée par :

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

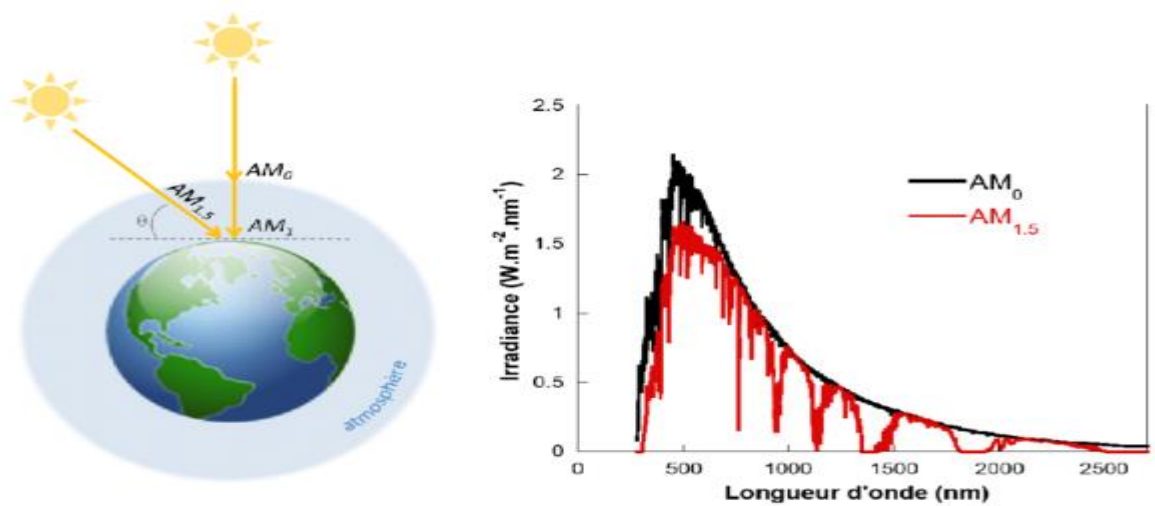
où :

$\theta$ : l'angle en radian entre le rayonnement solaire et le plan horizontal de la terre.

Le rayonnement qui atteint le niveau de la mer à midi dans un ciel clair est de  $1000\text{W/m}^2$  est décrit en tant que rayonnement de la masse d'air "1" ou (AM1), dans ce cas le soleil est perpendiculaire au zénith,  $\theta=90^\circ$ .

Une fois que le soleil décline vers le bas, la lumière traverse une plus grande distance, perdant plus d'énergie en arrivant sur la terre avec un angle de  $48^\circ$  et une masse d'air inférieure à  $1000\text{ W/m}^2$  "AM1.5" .

Le "1.5" est pour mentionner que le parcours de la lumière dans l'atmosphère est supérieur au parcours le plus court du soleil d'une fois et demi et correspond à une inclinaison du soleil de  $45^\circ$  par rapport au zénith.



**Figure 1.2** Irradiation solaire.

### 1.3 Radiation d'un corps noir

Le corps noir est un objet qui absorbe parfaitement toute l'énergie électromagnétique qu'il reçoit, sans en réfléchir ni en transmettre. La qualification de "noir" vient donc de ce que la lumière visible est entièrement absorbée. Cependant, si la température du corps est suffisamment élevée, son rayonnement émis atteint le spectre de la lumière visible et il peut être visible à notre œil (figure 1.3). L'irradiation spectrale est donnée par la loi de Planck :

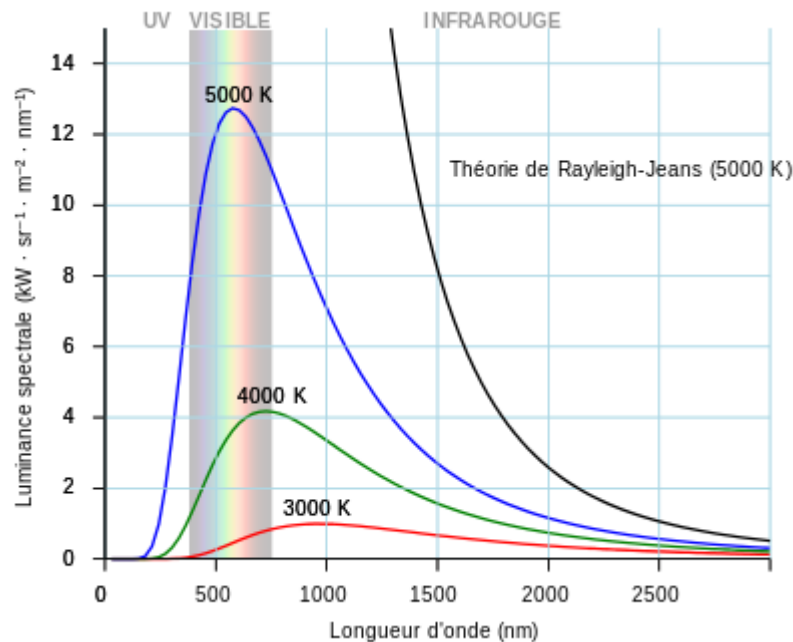
$$F(\lambda) = 2\pi A \frac{c}{\lambda^4 (\exp(\frac{hc}{\lambda kT}) - 1)} \quad (1.2)$$

Avec :

$$A = \left(\frac{R_s}{d}\right)^2 \quad (1.3)$$

- $\nu$  : la fréquence de la lumière.
- $k$  : la constante de Boltzmann.
- $T$  : la température absolue.
- $c$  : la vitesse de la lumière.

- $R_s$  : Rayon du soleil ( $R_s=6,96.10^5$  Km ).
- $d$  : distance soleil-terre ( $d=1,5.10^9$  Km ).
- $\lambda$  : longueur d'onde de la lumière.



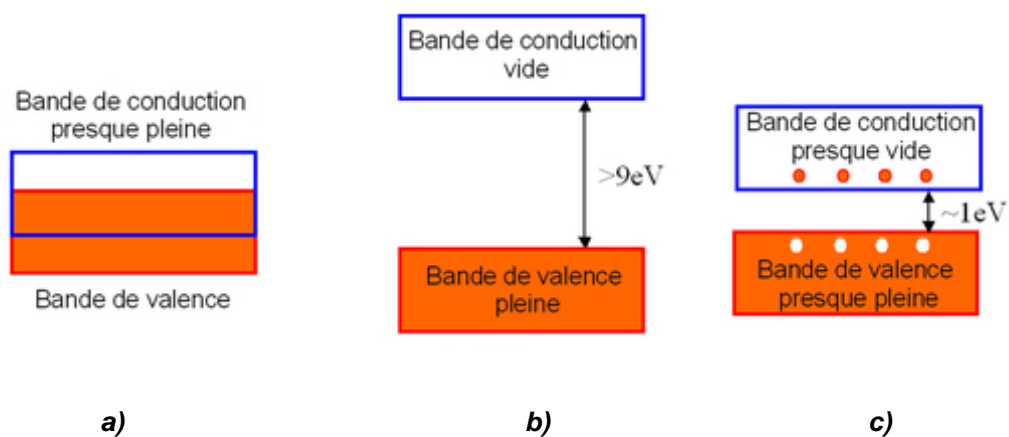
**Figure 1.3** Courbe de rayonnement du corps noir à différentes températures selon l'équation de Planck (courbes en couleurs) comparée a une courbe établie selon la théorie de Rayleigh-jeans (courbe en noir)[2].

## 1.4 Les semi-conducteurs

On appelle semi-conducteur un matériau électronique intermédiaire entre conducteur et isolant figure 1.4. On sait qu'au sein des structures cristallines de la matière, les électrons ont des énergies distinctes qui appartiennent à certains ensembles de valeurs appelées bande d'énergie.

On distingue isolants et conducteurs par la différence d'énergie qui existe entre ces bandes, appelée le gap " $E_g$ ". Pour les conducteurs, la bande

de conduction et la bande de valence se chevauchent : les électrons transitent instantanément entre les deux bandes "bonne conduction" **(a)**. Dans les isolants, la bande de conduction est habituellement vide à cause de la largeur de la bande interdite très élevée, ainsi les électrons restent emprisonnés dans la bande de valence **(b)**. Pour les semi-conducteurs, le gap assez faible permet à des porteurs de passer dans la bande de conduction grâce à leur agitation thermique **(c)**.



**Figure 1.4** Matériaux a) Conducteur, b) Isolant, c) Semi-conducteur.

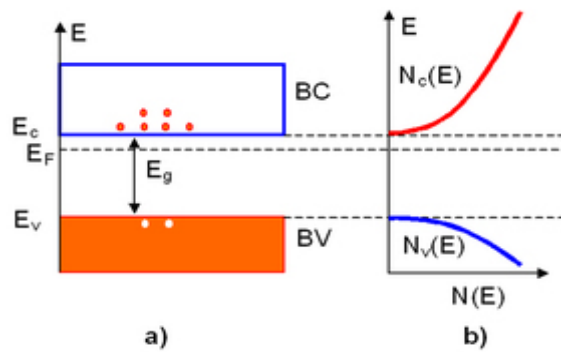
## 1.5 Types de semi-conducteurs

### 1.5.1 Semi-conducteur type N

Est un semi-conducteur intrinsèque (ex : silicium Si) dans lequel on a introduit des impuretés de type donneurs (ex : Arsenic AS ou phosphore P) qui possèdent 5 électrons de valence. Ces impuretés sont ainsi appelées parce qu'elles donnent un électron à la bande de conduction.

### a Niveau de Fermi pour semi-conducteur type N

Plus la densité de donneurs est élevée plus le niveau de Fermi se rapproche de la bande de conduction (Figure 1.5). A la limite si  $N_c=N_d$  le niveau de Fermi entre dans la bande de conduction, on dit alors que c'est un semi-conducteur dégénéré.



**Figure 1.5** Semi-conducteur type N, a) diagramme de bande d'énergie, b) densité d'état énergétique.

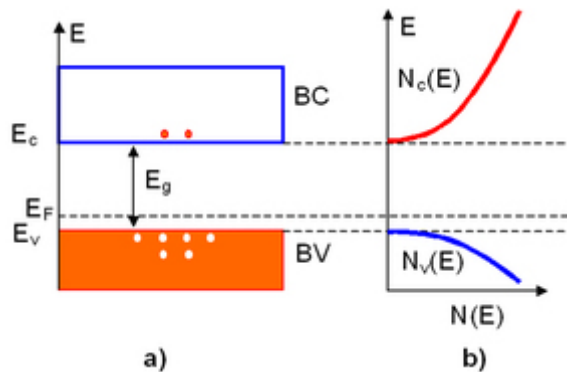
### 1.5.2 Semi-conducteur type P

Est un semi-conducteur intrinsèque (ex : silicium Si) dans lequel on a introduit des impuretés de type accepteur (ex : Bohr B). Ces impuretés sont ainsi appelées parce qu'elles acceptent un électron.

Un semi-conducteur dopé P a une densité d'électrons  $n$  plus faible et une densité de trou plus élevée, on dit alors que les électrons sont les porteurs minoritaire et les trous sont les porteurs majoritaires.

### a Niveau de Fermi pour un semi-conducteur type P

Plus la densité d'accepteurs est élevée plus le niveau de Fermi se rapproche de la bande de valence (Figure 1.6). A la limite si  $N_a=N_v$  le niveau de Fermi entre dans la bande de valence, en dit alors que c'est un semi-conducteur dégénéré.



**Figure 1.6** Semi-conducteur type P, a) diagramme de bande d'énergie, b) densité d'état énergétique.

## 1.6 L'absorption

La lumière absorbée par le matériau photovoltaïque est restituée sous forme d'énergie électrique. Les spectres solaires sont utilisées différemment par le matériau d'où l'efficacité avec laquelle il transforme l'énergie d'un rayonnement d'une longueur d'onde en énergie électrique dépend essentiellement des caractéristiques du matériau.

le coefficient d'absorption  $\alpha$ , est une propriété qui définit la quantité de lumière absorbée par le matériau, et peut être exprimé par:

$$a = \alpha_0 \sqrt{E - E_g} \quad (1.4)$$

Avec :

-  $\alpha_0$  : constante qui dépend du matériau.

- E : énergie du photon.

-  $E_g$  : Gap.

## 1.7 Génération optique

Il existe deux types de générations : génération intrinsèque (bande à bande) et génération extrinsèque (par l'intermédiaire du niveau de dopage ou de piège). La génération bande à bande peut se produire quand un électron passe directement dans la bande de conduction. Ceci peut se produire par l'absorption de la lumière: photo-génération. Les centres d'impuretés peuvent être utilisés pour la génération, l'électron n'aurait pas besoin autant d'énergie pour atteindre la bande de conduction comme le cas de génération bande à bande.

En général pour être efficace, l'excitation d'un électron du sommet de la bande de valence dans la bande de conduction exige que l'énergie lumineuse soit supérieure à la largeur de la bande interdite.

Le taux de génération est donné par l'expression suivante :

$$G_{opt} = (1 - R). a. \exp(-ax) \quad (1.5)$$

Avec :

- R : est le coefficient de réflexion.

- x : est la distance de la surface.

-  $\alpha$  : est le coefficient d'absorption.

## 1.8 Equations de transport des semi-conducteurs

Le comportement électrique d'une jonction PN est décrit par :

L'équation de Poisson :

$$\frac{\partial(\epsilon E)}{\partial(x)} = q(p - n + N_d - N_a) \quad (1.6)$$

Avec :  $E = -\frac{\partial V}{\partial x}$

Les équations de continuité des électrons et des trous:

$$\frac{\partial J_n}{\partial x} = q(R - G) \quad (1.7)$$

$$\frac{\partial J_p}{\partial x} = -q(R - G) \quad (1.8)$$

où:

-R: est le taux de recombinaison.

-G: est le taux de génération.

Les densités de courant des électrons et des trous sont données par les relations :

$$J_n = q\mu_n n \frac{\partial E_{Fn}}{\partial X} \quad (1.9)$$

$$J_p = q\mu_p p \frac{\partial E_{Fp}}{\partial X} \quad (1.10)$$

$-\mu_n$  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.



## 1.9 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 [3] :

$$R_{n,p} = \frac{\Delta n,p}{\tau_{n,p}} \quad (1.11)$$

Avec :

- $\Delta n, p = n, p - n_e, p_e$  : la densité des porteurs générés.
- $n_e, p_e$  : la densités des porteurs a l'équilibre.
- $\tau_{n,p}$  : la durée de vie de ces porteurs.

Par définition, la recombinaison est le retour de l'électron de l'état excité à l'état initial ou a la bande de conduction vers la bande de valence, car il ne peut rester dans un état excité que pour un temps faible ( $t < 10^{-8}$ s) [4]. Cette transition peut être classée en trois façon : radiative où l'émission d'un photon (lumière), non cinétique à un autre électron libre ou trou [5].

La recombinaison peut être caractérisé comme suit :

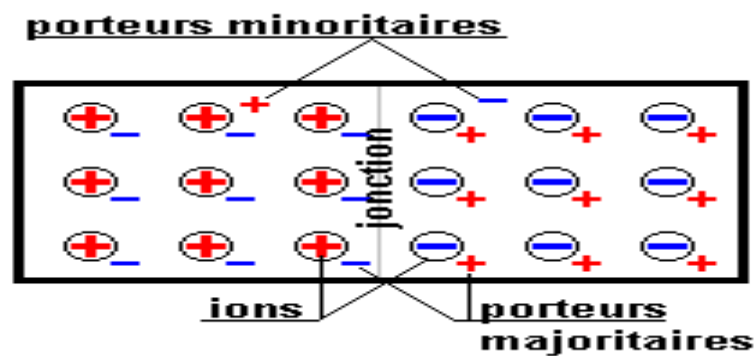
- Recombinaison directe (de bande à bande) : la recombinaison direct est quand un électron dans la bande de conduction se combine avec un trou dans la bande de valence, sans variation d'énergie cinétique de l'électron.
- Recombinaison indirect (de bande aux impuretés, avec l'aide de piège)
- Recombinaison Auger : lorsque l'énergie de l'électron qui se recombine dans la bande de valence est transférée sous forme d'énergie cinétique à un

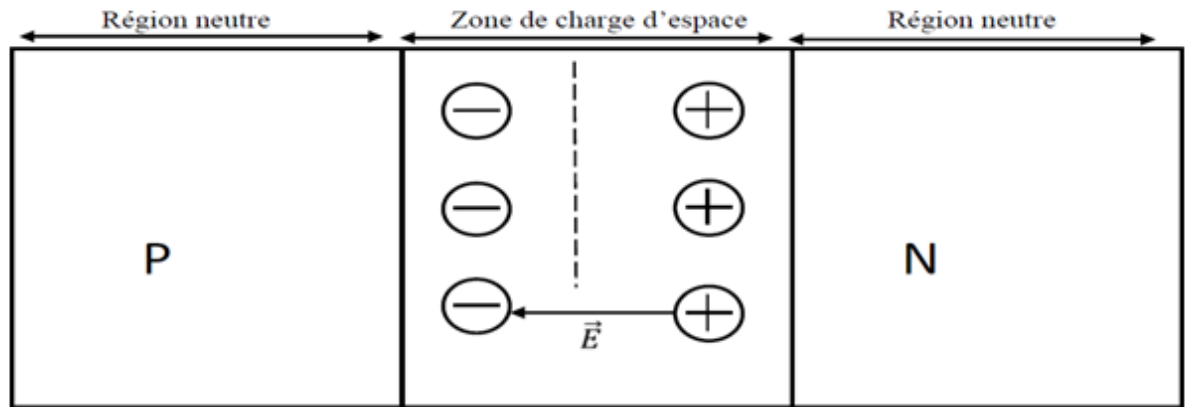
autre électron libre.

➤ Recombinaison de surface : recombinaison au niveau des surfaces et des interfaces peuvent avoir un impact significatif sur le comportement des dispositifs semi conducteurs.

## 1.10 La jonction PN

En juxtaposant une zone dopée P et une zone dopée N à l'intérieur d'un cristal de semi-conducteur (Figure 1.7), 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).





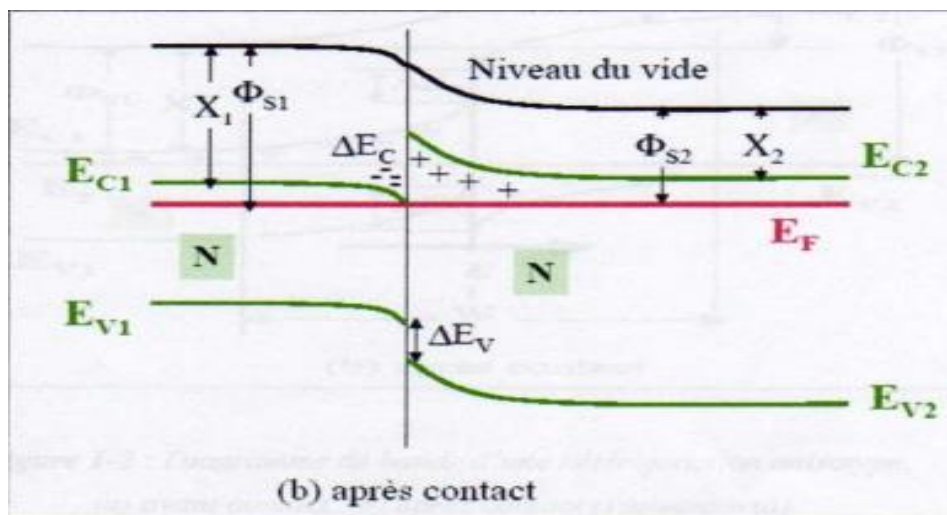
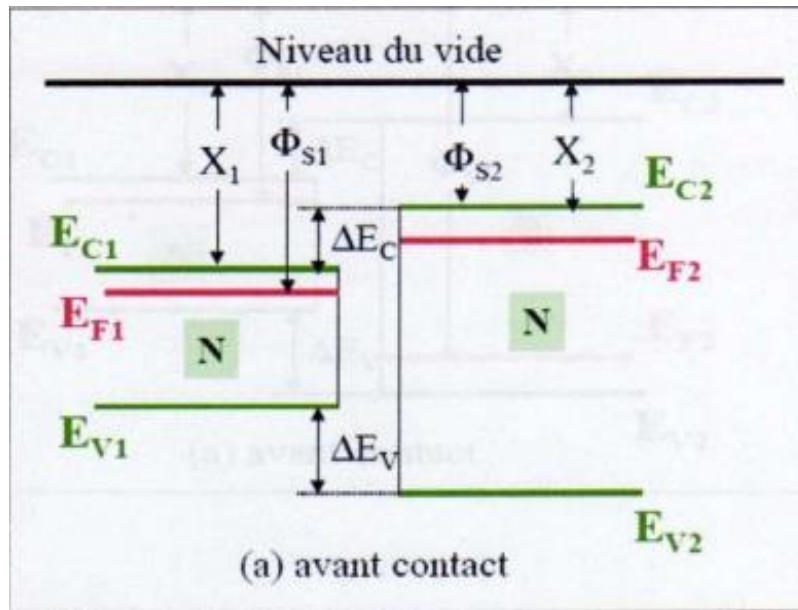
**Figure 1.7** Formation d'une jonction PN.

## 1.11 L'hétérojonction

Contrairement aux cellules solaires à base de silicium qui transforment directement l'énergie solaire en énergie photovoltaïque, les cellules à base de CZTS sont de type "hétérojonction", c'est-à-dire que les régions n et p sont constituées de deux semi-conducteurs et matériaux différents. Sa réalisation s'effectue par croissance cristalline d'un matériau sur l'autre et nécessite l'utilisation de semi-conducteur ayant des propriétés cristallines voisines (la taille des atomes doit notamment être assez proche) [6].

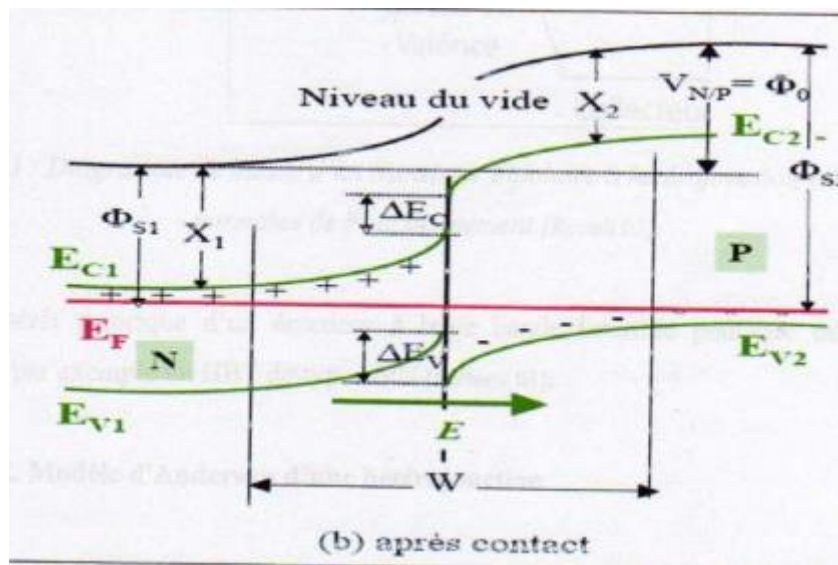
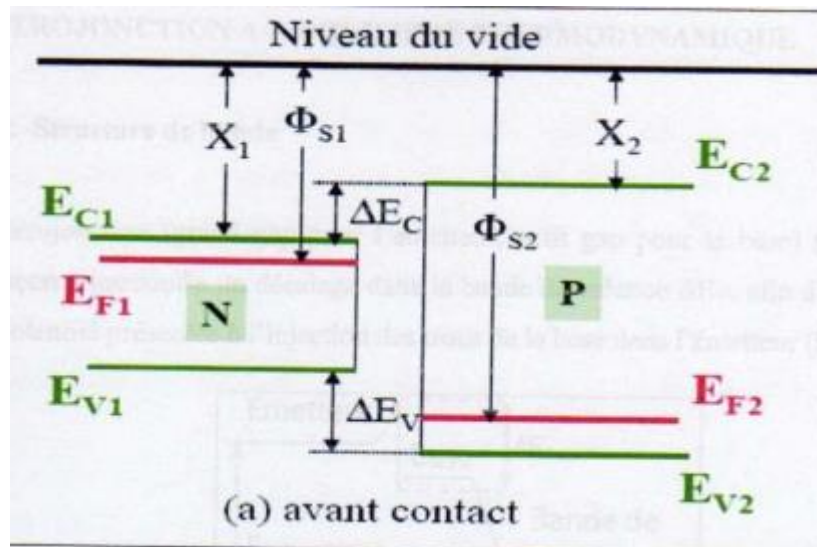
Selon le type de dopage utilisé pour les semi-conducteurs, deux hétérojonctions se distinguent :

- Les premières sont les hétérojonctions isotypes, pour lesquelles les deux semi-conducteurs sont de même type de dopage :



**Figure 1.8** Diagramme de bande d'une hétérojonction isotype : (a) avant contact, (b) après contact.

➤ Les seconds sont les hétérojonctions anisotypes, pour lesquelles les deux semi-conducteurs sont dopés différemment :



**Figure 1.9** Diagramme de bande d'une hétérojonction anisotrope : (a) avant contact, (b) après contact.

## **1.12 Conclusion**

Dans ce chapitre, on a abordé les phénomènes physiques liés au soleil, tels que le spectre solaire et le corps noir. Puis on a étudié les caractéristiques et les propriétés électriques et optiques des semi-conducteurs.

Les caractéristiques étudiées dans ce chapitre vont être utilisées dans le deuxième chapitre pour définir le mode de fonctionnement et les différentes propriétés de la cellule de travail.

# Chapitre 2 Cellule solaire à base de CZTS

---

## 2.1 Introduction

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

Dans ce chapitre, nous donnerons un aperçu sur les différentes technologies des cellules photovoltaïques. Le principe de fonctionnement des cellules solaires y sera décrit ainsi que leurs paramètres caractéristiques. Ensuite, les cellules à base de CZTS seront présentées et étudiées.

## 2.2 La cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque est composée d'un matériau semi-conducteur de type n et un autre de type p. Cette transformation d'énergie se fait via la création et le déplacement de charges électriques positives et négatives dans le matériau semi-conducteur sous l'effet de la lumière incidente. Cette transformation est donc basée sur l'absorption, la jonction p-n ou l'hétérojonction et la conversion de l'énergie photovoltaïque en énergie électrique où la cellule produit un courant continu.

## 2.3 Historique 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 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 1905** : Einstein découvre que l'énergie de la quantité 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 1954** : Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.

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

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



## 2.4 L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est dû à la transformation de l'énergie lumineuse en électricité par la mise en œuvre des matériaux semi-conducteurs, il utilise les photons pour créer des paires électron-trou dans le matériaux. Ainsi apparait une différence de potentiel entre les bornes de la cellule. En circuit fermé, la cellule génère un courant électrique continu.

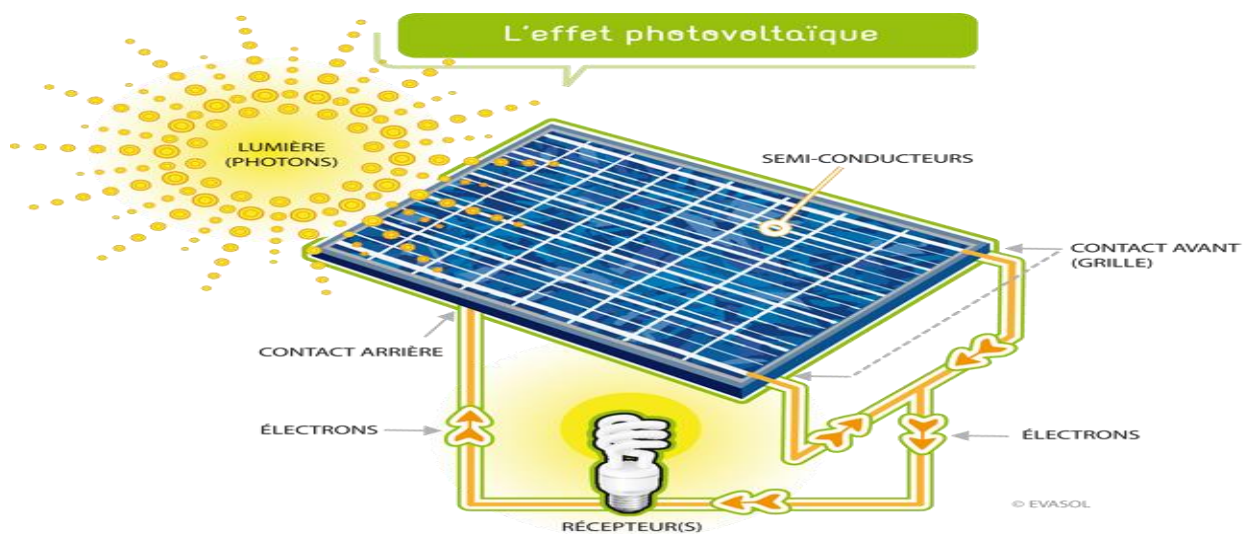


Figure 2.1 L'effet photovoltaïque.

## 2.5 Les différents technologies des cellules photovoltaïque

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

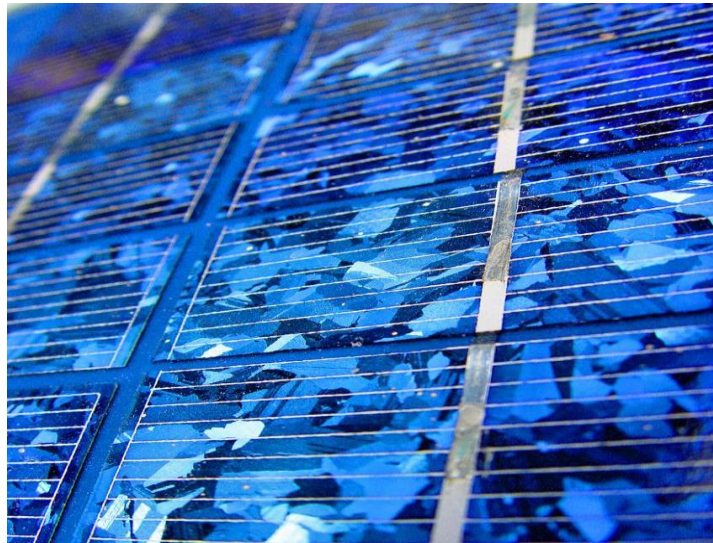
Il existe 3 générations de cellules :

❖ **La première génération (silicium cristallin "mono et poly ") :**

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

Les cellules cristallines se subdivisent en 2 catégories : mono et poly cristallin selon le type de structure et procédé de purification et de

solidification différent (processus Czochralski (Cz) et processus Siemens) et se distinguent aussi par rapport à leur plan de coupe qui est différent.

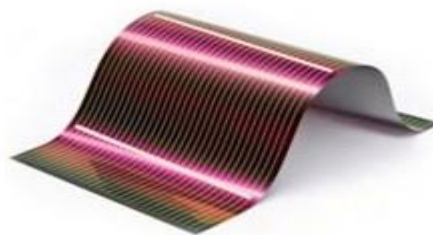


**Figure 2.2** Cellule solaire en silicium.

❖ **La deuxième génération CdTe ,CIS /CIGS , silicium amorphe et microcristallin :**

Cette génération de cellule repose sur la déposition de matériaux semi-conducteurs en couche mince (thin film).

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

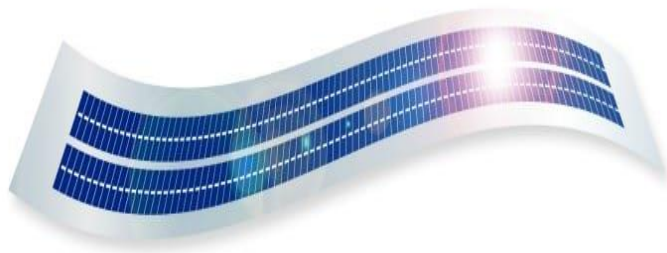


**Figure 2.3** Cellule solaire CIGS.

❖ **La troisième génération technologie photo-électro-chimique (Dye Sensitised Cell et Organic PV) :**

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

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



*Figure 2.4* Cellule solaire organique.

## **2.6 Description du principe de fonctionnement d'une cellule solaire**

Lorsque les photons incidents heurtent la surface du matériau photovoltaïque, il y'aura une création de porteurs dans les différents zones n, p et la zone de charge d'espace.

Le comportement des photo-porteurs dépendra de la région :

- Au niveau de la zone n ou p, les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge d'espace seront renvoyés par un champ électrique soit dans la zone p pour les trous ou bien dans la zone n pour les électrons. Leur accumulations permettra de créer un photo-courant de diffusion.
- Au niveau de la zone de charge d'espace, les paires électron/trou résultantes des photons incidents seront séparées par le champ électrique, d'où les électrons vont se diriger vers la région n et les trous vers la région p. Ceci permettra de créer un photo-courant de génération.

## 2.7 Paramètres essentiels caractérisant une cellule photovoltaïque

Le tracé de la variation de la densité de courant en fonction de la tension d'une cellule photovoltaïque, sous obscurité ou sous éclairage nous permet d'accéder à plusieurs paramètres physiques caractéristiques du composant (figure 2.5) : la densité de courant de court circuit  $J_{cc}$ , la tension de circuit ouvert  $V_{co}$ , le rendement de conversion  $\eta$  et le facteur de forme FF.

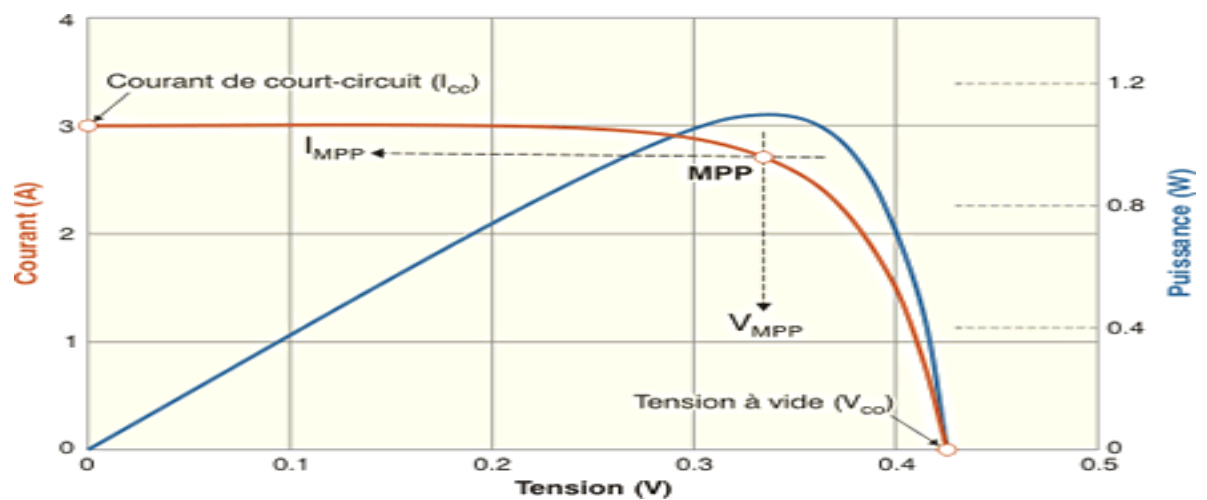


Figure 2.5 caractéristiques  $I(V)$  et  $P(V)$  d'une cellule photovoltaïque.

### 2.7.1 Courant de court circuit $J_{cc}$

Le courant de court circuit est le courant généré par la cellule lorsque la tension appliquée à la cellule est nulle  $V=0$ ,  $J_{cc}$  est la densité de courant la plus importante qu'une cellule solaire peut fournir.

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

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

### 2.7.3 Rendement de conversion $\eta$

Le rendement de conversion est le paramètre le plus important dans la cellule solaire, car il exprime la capacité et l'efficacité de la cellule dans la conversion des photons de lumière incidents en courant électrique. Sa valeur est déterminée à partir du rapport entre la puissance maximale  $P_{\max}$  et la puissance incidente  $P_{\text{in}}$ .

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{\text{in}}} = \frac{\text{FF} V_{\text{co}} J_{\text{cc}}}{P_{\text{in}}} \quad (2.1)$$

Avec :

- $P_{\text{in}}$  : puissance d'éclairement reçue par unité de surface.

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

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

$$P_{\max} = I_m \cdot V_m \quad (2.2)$$

### 2.7.5 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 égal à 1. Sa valeur est déterminée à partir du rapport du maximum de puissance  $P_{\max}$  produite par la cellule solaire et le produit du courant de court circuit  $J_{\text{cc}}$  et la tension de circuit ouvert  $V_{\text{co}}$  :

$$\text{FF} = \frac{P_{\max}}{V_{\text{co}} J_{\text{cc}}} \quad (2.4)$$

## 2.8 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

### Avantages

- Une haute fiabilité, les modules sont garantis pendant 25 ans par la plupart des constructeurs.
- Elle ne comporte pas de pièces mobiles, qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt.
- Leurs coûts de fonctionnement sont très faibles vu les entretiens réduits, et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique, car le produit final est non polluant, silencieux, peu de déchet.

### Inconvénient

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- L'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28 %).
- Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs Diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- Enfin, lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru. La fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulations associés soient judicieusement choisis.

## 2.9 Cellule solaire à base de CZTS

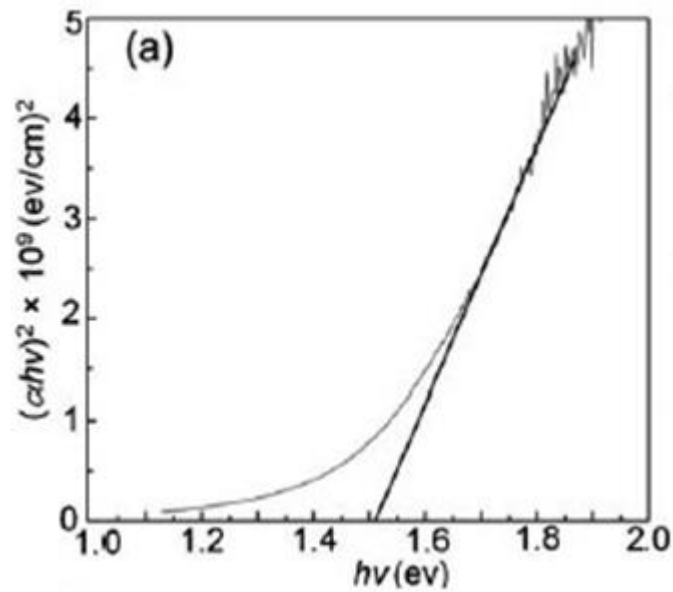
Plus de 80% du marché solaire est actuellement dominé par la technologie à base de silicium. En revanche les technologies photovoltaïques à base de couches minces s'appuient sur CIGS et le CdTe, la question qui se pose maintenant auront-ils un remplaçant de premier ordre? Cependant remplacer les cellules aux CIGS est un grand défi à relever tant cet absorbant est efficace. Une alternatif exploitant le principe de la jonction p-n se démarque néanmoins depuis la fin des année 2000 : la cellule CZTS.

CZTS "Cuivre, Zinc, étain et soufre " est un semi-conducteur type p avec une énergie de bande interdite directe pouvant être réglée dans la plage allant de 1,4-1,56 eV et un coefficient d'absorption supérieur à  $10^4 \text{ cm}^{-1}$ , ces propriétés sont fortement souhaitées en matière photovoltaïque, donc c'est un semi-conducteur de choix. Ce matériau a servi de base à la fabrication de cellules solaires en couches minces dans de nombreux laboratoires du monde entier.

D'autre part, les cellules CZTS utilisent des matériaux abondants non toxiques et peu coûteux. 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. [7].

## 2.10 Bande interdite

Le CZTS est un semi-conducteur de type p d'un gap direct de 1,5 eV théoriquement et une transparence optique faible. Les résultats expérimentaux ont démontré que la bande interdite d'une couche mince CZTS déposée en utilisant différentes méthodes varie de 1,4 eV à 1,5 eV.



**Figure 2.6** Méthode d'extraction de la bande interdite en fonction de  $h\nu$ .

où :  $h\nu$  est l'énergie de photon.

Les valeurs des largeurs de bandes interdites qui peuvent être atteintes sont proches de la valeur optimale qui permet une absorption du spectre solaire atteignant la limite de Shockley-Queisser à 32% de rendement pour un absorbeur dont la largeur de bande interdite vaudrait 1,3 eV (figure 2.7).

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

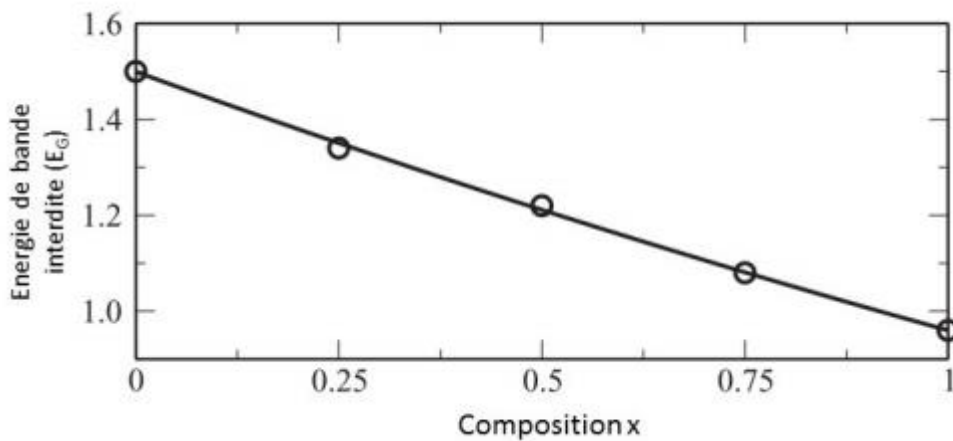
La largeur de la bande interdite peut être exprimée par l'équation suivante :

$$E_g(x) = (1 - x)E_g(\text{CZTS}_e) + xE_g(\text{CZTS}) - bx(1 - x) \quad ( 2.5 )$$

où :

- $x$  : Représente le taux  $[S]/([S]+[S_e])$ .
- $b$  : Paramètre d'ajustement appelé "bowing parameter" où  $b \sim 0,1\text{V}$ .

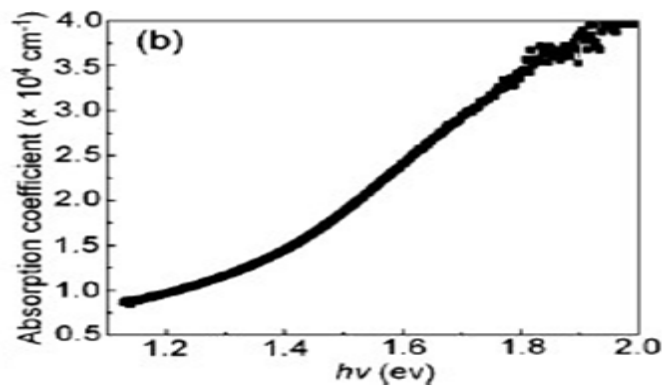




**Figure 2.7** Variation de l'énergie de bande interdite du CZTSSe en fonction de la composition x.

## 2.11 Propriétés optiques

Il est connu généralement qu'une couche mince CZTS possède un coefficient d'absorption plus élevé que  $10^4 \text{ cm}^{-1}$  dans la gamme des photons d'énergie supérieure à 1,2 eV (figure 2.8). En théorie, le spectre d'absorption permet de découvrir toutes les transitions et d'obtenir des informations sur la structure de bande du composé. Expérimentalement, l'allure du spectre d'absorption est une caractéristique optique du matériau et évolue avec la composition, les défauts et son état de cristallinité. La probabilité d'absorption du photon détermine le coefficient d'absorption optique.



**Figure 2.8** Coefficient d'absorption du CZTS en fonction de  $h\nu$ (eV).

## 2.12 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,...). Néanmoins, ces déplacements sont gouvernés par les collisions des porteurs de charge avec les ions, les impuretés ou les défauts du réseau cristallin.

Le système CZTSSe a l'avantage de permettre le réglage de la bande interdite directe, en faisant varier le rapport S: Se, de près de 1 eV pour le composé :séléniure pure à environ 1.5 eV pour le matériau : sulfure pur (gamme très utile pour l'énergie solaire terrestre).

Les propriétés électriques des composés CZTSSe sont présentées dans le tableau 2.1, pour les films préparés à l'aide de diverses méthodes, telles que la pulvérisation cathodique, co-évaporation et dépôt par spray ultrasonique. En général, ces films sont préparés sur des substrats isolants pour empêcher la conduction parallèle dans les mesures de Hall. [8]

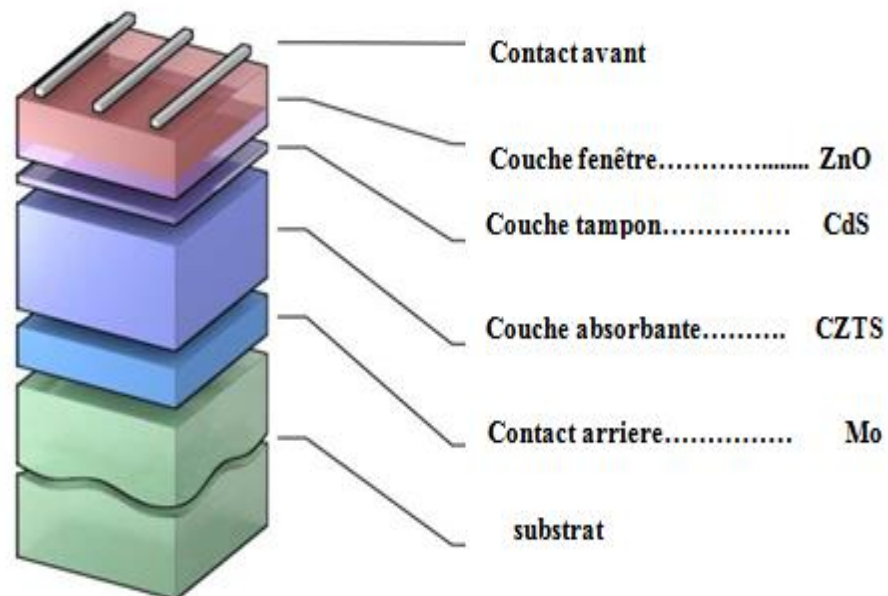
Composé	Densité de porteur (cm <sup>3</sup> )	Mobilité (cm <sup>2</sup> /Vs)	Résistivité (Ω cm)	Méthodes	Références
CZTS	8.2×10 <sup>18</sup>	6.3	0.16	Pulvérisation cathodique	[9]
CZTS	8.0×10 <sup>18</sup>	6.0	0.13	Sulfuration	[10]
CZTS	>5×10 <sup>19</sup>	< 0.1	> 1.3	Pulvérisation cathodique	[11]
CZTS			0.02 – 2	Pulvérisation cathodique	[12]
CZTSe	2.1×10 <sup>17</sup>	39.7	0.74	DRX	[13]

**Tableau 2.1** Les propriétés électriques du composant CZTSSe[8].

## 2.13 Composition et fabrication des cellules CZTS

La structure et la fabrication des cellules CZTS et CIGS sont similaires. Seules les conditions optimales d'assemblage varient d'une filière à une autre. Les substrats peuvent eux aussi être rigides ou souples. Du haut en bas, une cellule CZTS se compose de :

- verre de protection.
- 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).
- 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), épaisseur de 70 nm, naturellement dopée n.
- la couche de CZTS (épaisseur d'environ 1,5 µm).
- conducteur inférieur, généralement du molybdène (épaisseur de 300 nm) .
- substrat .



**Figure 2.9** Structure standard d'une cellule CZTS.

## 2.14 Avantages et inconvénients d'une cellule CZTS

### Avantages

- Un gap de 1,5 eV.
- L'indice de réfraction est de 2,07.
- Le coefficient d'absorption est de l'ordre de  $10^4 \text{ cm}^{-1}$
- Des éléments constitutifs de CIGS sont chers (In et Ga) et d'autres toxiques. En revanche, CZTS est un matériau semi-conducteur à base d'éléments abondants et donc à faible coût et non-toxiques.

### Inconvénient

L'inconvénient majeur des cellules CZTS est leur rendement qui est faible et pose actuellement un problème.

## 2.15 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la cellule photovoltaïque, son historique, l'effet photovoltaïque, les différentes technologies des cellules photovoltaïques, le principe de fonctionnement et les paramètres essentiels caractérisant une cellule photovoltaïque. Après on a abordé la cellule CZTS, ses propriétés optiques et électriques, sa composition et ses avantages et inconvénients.

## Chapitre 3 Résultats de simulation et discussion

---

### 3.1 Introduction

Dans ce présent travail, nous avons utilisé une simulation numérique pour étudier les caractéristiques de la cellule solaire ZnO/CdS/CZTS en utilisant le logiciel de simulation COMSOL multiphysics.

Nous avons étudié l'effet de l'épaisseur des différentes couches sur le courant de court circuit  $J_{cc}$ , la tension de circuit ouvert  $V_{co}$ , la puissance maximale  $P_{max}$  et le rendement  $\eta$ . Ensuite, l'effet de l'énergie de la bande interdite du CZTS sur les différents paramètres de la cellule.

### 3.2 Présentation du logiciel COMSOL Multiphysics

COMSOL multiphysics est un logiciel de simulation numérique capable de simuler quasiment tout les phénomènes physiques et de nombreuses applications dans l'ingénierie. Ce logiciel basé sur la méthodes des éléments finis est apparu pour la première fois en 1986, ce dernier a été conçu par des étudiants de l'institut royal de technologie de Stockholm en Suède.

La modélisation d'un système sous COMSOL multiphysics passe généralement par cinq étapes essentielles. On commence d'abord par définir la géométrie de notre système ou composant, puis on introduit les propriétés correspondantes. Ensuite, on procédera au maillage c'est à dire la simplification de notre système en définissant les caractéristiques de son environnement ou de son milieu (dimensions, repères et volumes.....etc. ). Après on va déterminer la ou les physiques du système. Et enfin, dans la dernière étape on va résoudre et afficher les résultats obtenus.

### 3.3 Paramètres utilisés dans la simulation

Les paramètres des différentes couches utilisés dans la simulation sont regroupés dans le tableau 3.1

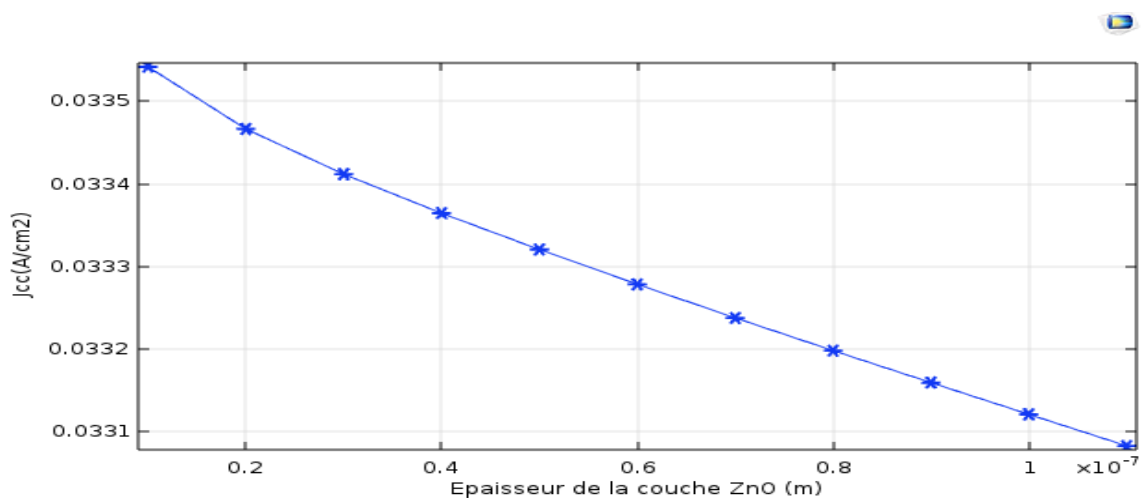
	n-ZnO	n-CdS	p-CZTS
$E_g$ (eV)	3,3	2,45	1,5
$X$ (eV)	4,45	4,45	4,25
$\epsilon_r$	9	10	10
$N_c$ (cm <sup>-3</sup> )	$2,2 \cdot 10^{18}$	$2,2 \cdot 10^{18}$	$2,2 \cdot 10^{18}$
$N_v$ (cm <sup>-3</sup> )	$1,8 \cdot 10^{19}$	$1,8 \cdot 10^{19}$	$1,8 \cdot 10^{19}$
$\mu_n$ (cm <sup>2</sup> /V s)	100	100	100
$\mu_p$ (cm <sup>2</sup> /V s)	25	25	20

**Tableau 3.1** Les paramètres utilisés dans la simulation.

### 3.4 Effets de l'épaisseur de la couche fenêtre ZnO

#### 3.4.1 Courant de court-circuit $J_{cc}$

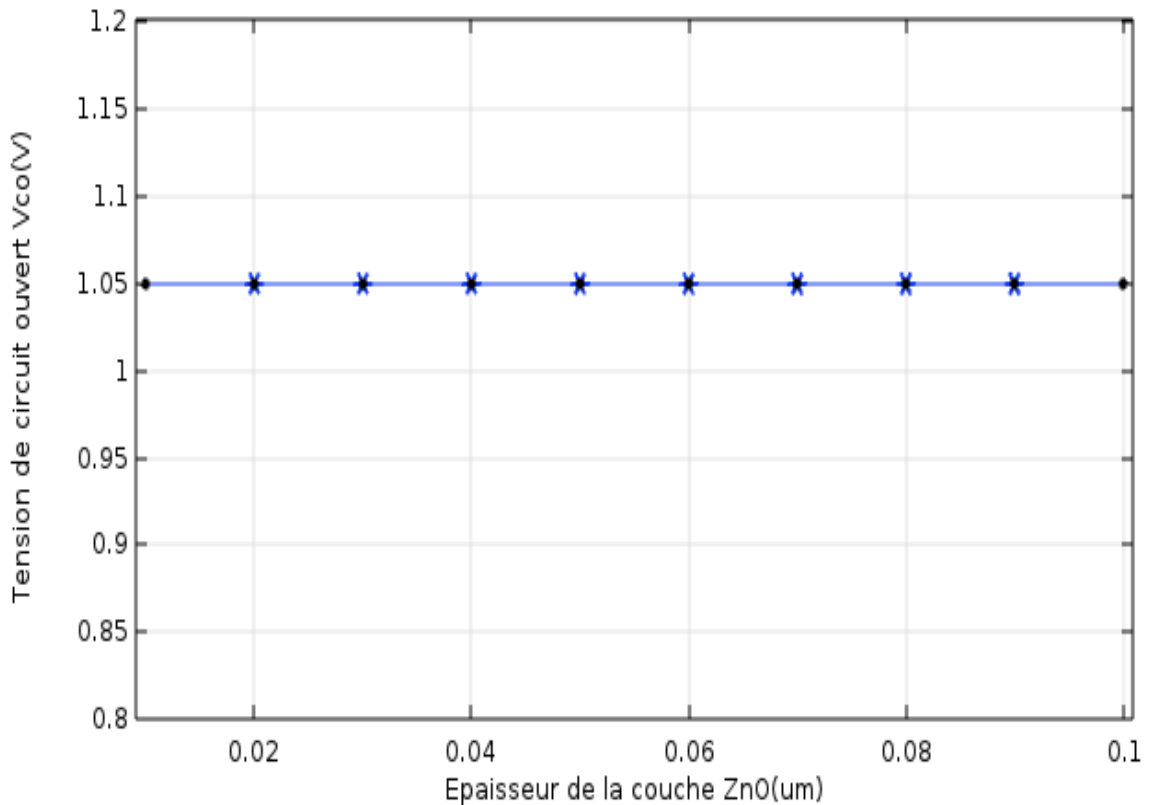
La dépendance de la densité de courant de court-circuit  $J_{cc}$  de l'épaisseur de la couche fenêtre ZnO est illustrée dans la figure 3.1. On constate qu'en augmentant l'épaisseur de la couche fenêtre de 0,01 à 0,1 $\mu$ m,  $J_{cc}$  diminue.



**Figure 3.1** Variation du courant de court-circuit  $J_{cc}$  en fonction de l'épaisseur de la couche ZnO.

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

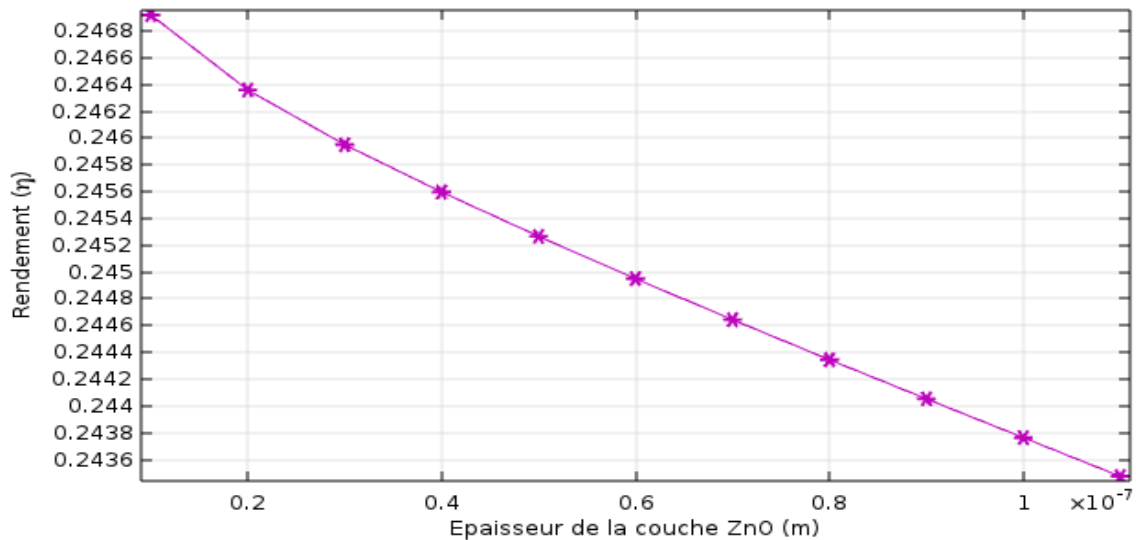
La variation de la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  est illustrée dans la figure 3.2.  $V_{co}$  reste constante et ne dépend pas de l'épaisseur de la couche ZnO.



**Figure 3.2** Variation de la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  en fonction de l'épaisseur de la couche ZnO.

### 3.4.3 Rendement de conversion $\eta$

La figure 3.3 montre la variation du rendement de conversion  $\eta$  en fonction de l'épaisseur de la couche fenêtre ZnO. On peut voir clairement que sa variation montre la même tendance que  $J_{cc}$ . Il s'agit d'un comportement attendu, car on constate que  $V_{co}$  est constamment constant sur toute la plage d'épaisseur considérée.

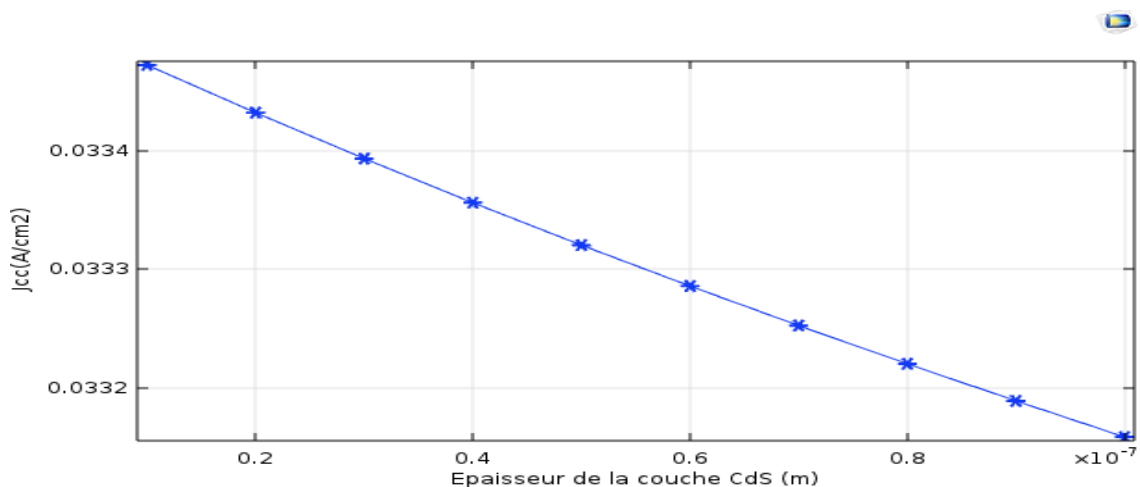


**Figure 3.3** Représentation de la variation du rendement  $\eta$  en fonction de l'épaisseur de la couche ZnO.

## 3.5 Effets de l'épaisseur de la couche tampon CdS

### 3.5.1 Courant de court-circuit $J_{cc}$

La dépendance de la densité de courant de court-circuit  $J_{cc}$  de l'épaisseur de la couche tampon est illustrée dans la figure 3.4. La densité de courant de court circuit diminue de manière linéaire lorsqu'on augmente l'épaisseur de la couche tampon. Cela peut être compris en termes de perte de paires électron-trou photo-générés.

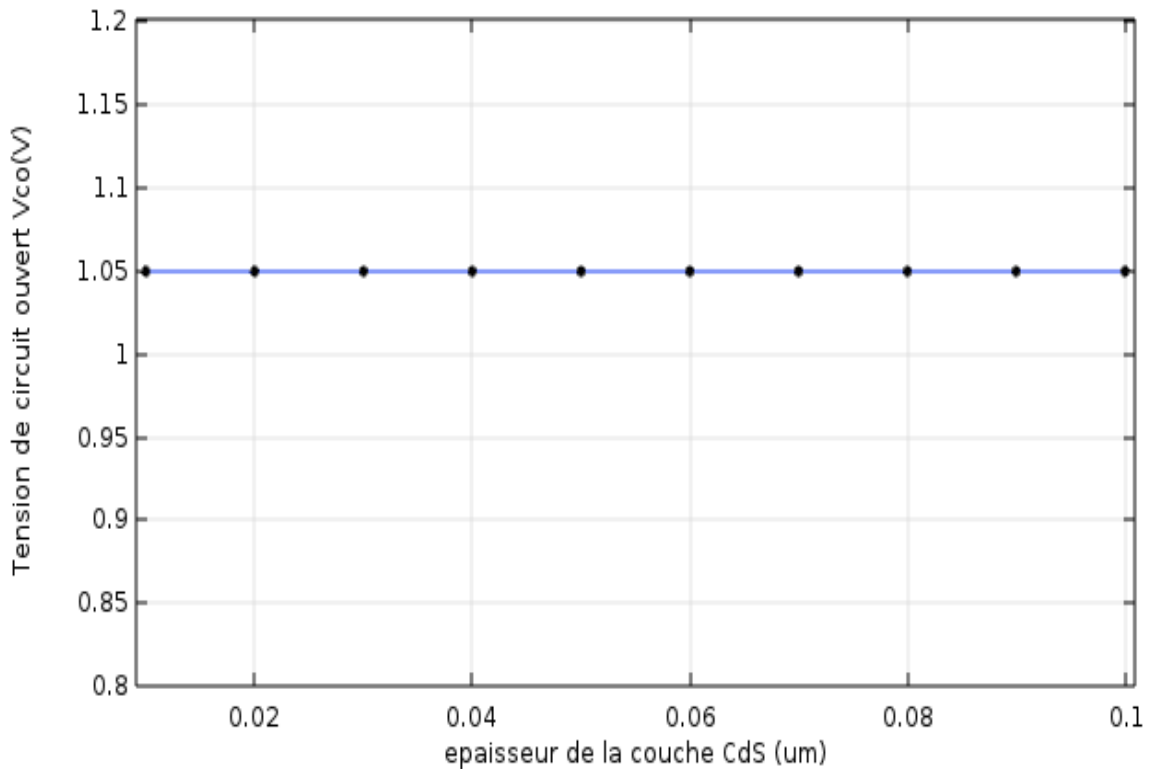


**Figure 3.4** Courant de court-circuit  $J_{cc}$  en fonction de l'épaisseur de la couche tampon CdS.



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

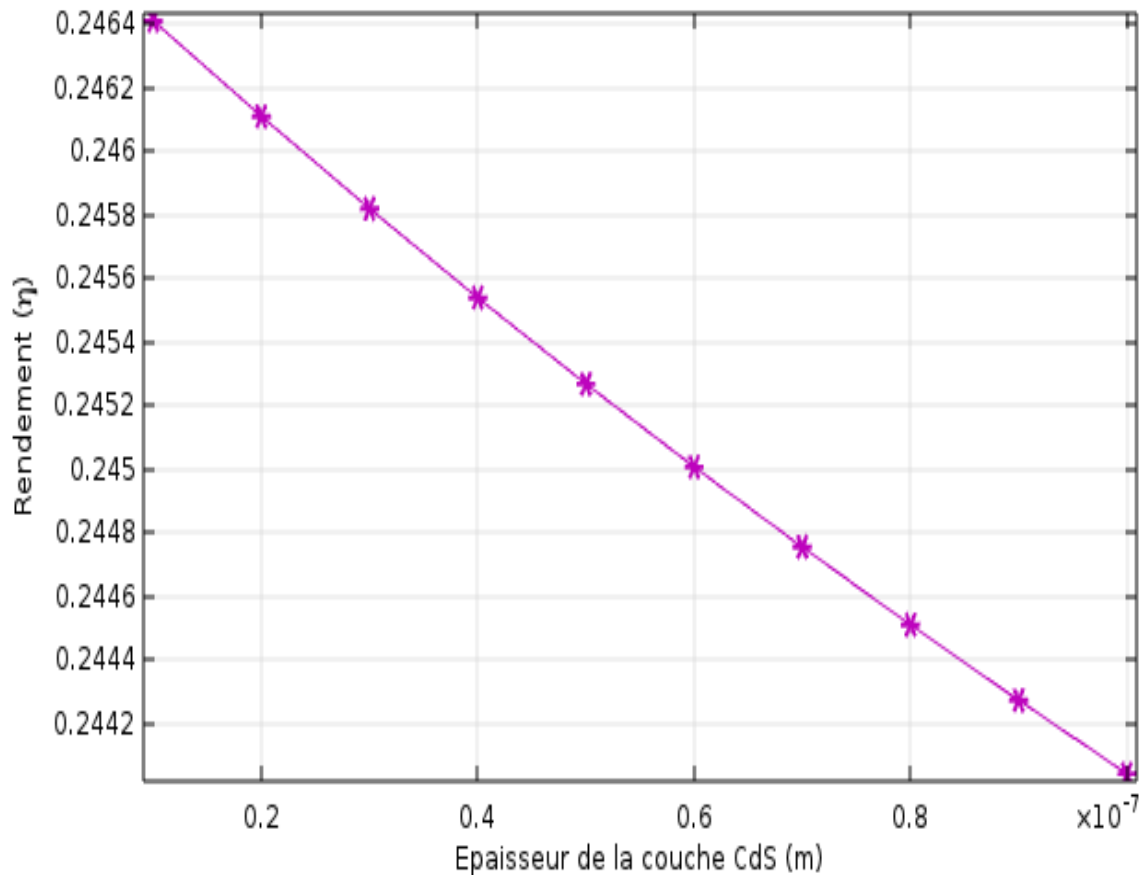
La variation de la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  est illustrée dans la figure 3.5.  $V_{co}$  reste constante et ne dépend pas de l'épaisseur de la couche CdS.



**Figure 3.5** Variation de la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  en fonction de l'épaisseur de la couche CdS.

### 3.5.3 Rendement de conversion $\eta$

La figure 3.6 montre la variation du rendement de conversion  $\eta$  en fonction de l'épaisseur de la couche tampon CdS. On peut voir clairement que sa variation suit la même tendance que  $J_{cc}$ , ceci est dû à ce que  $V_{co}$  reste constant sur toute la plage des épaisseurs de la couche CdS considérées.



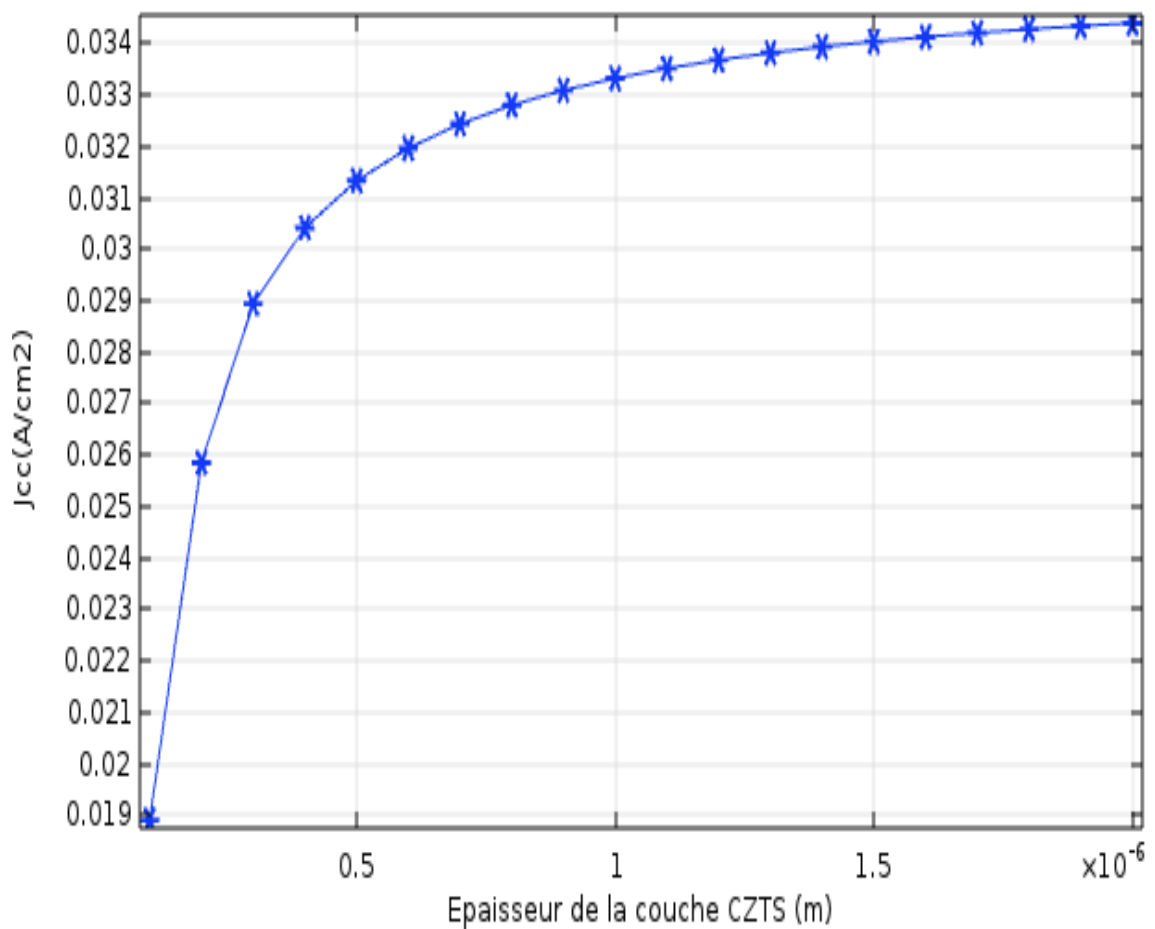
**Figure 3.6** Représentation de la variation du rendement  $\eta$  en fonction de l'épaisseur de la couche CdS.

Dans la suite de ce travail, nous fixons les épaisseurs des couches ZnO et CdS à 0,05 $\mu$ m.

## 3.6 Effets de l'épaisseur de la couche absorbante CZTS

### 3.6.1 Courant de court-circuit $J_{cc}$

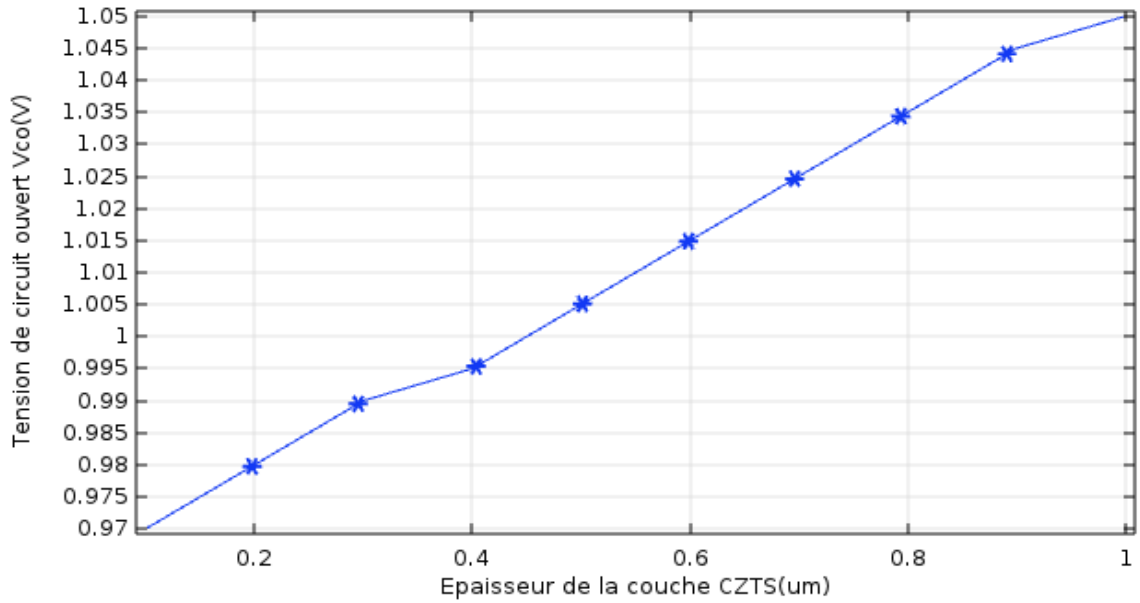
L'influence de l'épaisseur de la couche absorbante sur la densité de courant de court-circuit  $J_{cc}$  est illustrée dans la figure 3.7. Le courant de court circuit  $J_{cc}$  augmente rapidement entre 0 et 1 $\mu$ m, ensuite tend à se stabiliser lorsque tous les photons incidents ont été absorbés.



**Figure 3.7** Représentation du courant de court-circuit  $J_{cc}$  en fonction de l'épaisseur de la couche absorbante CZTS.

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

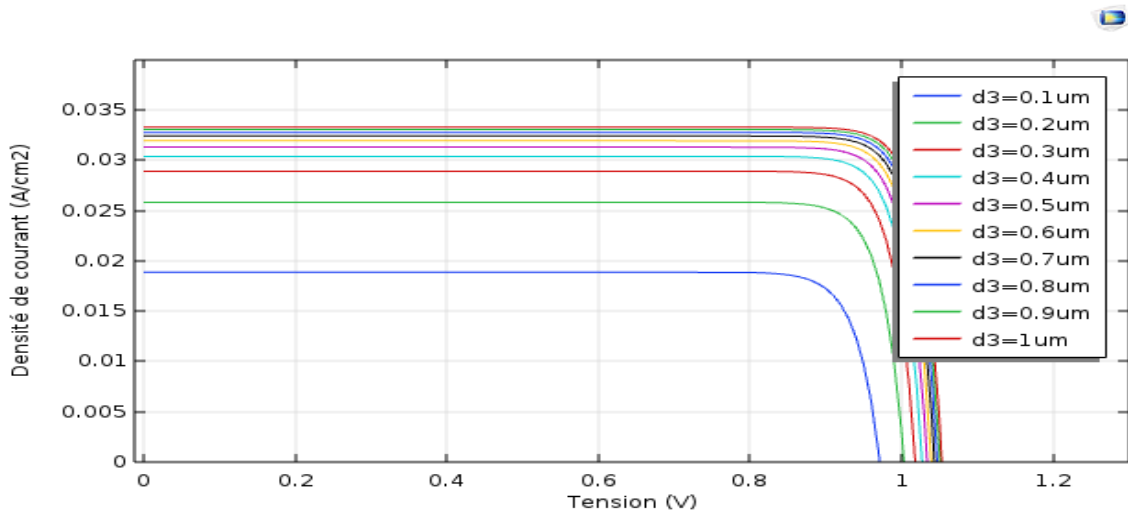
La figure 3.8 représente l'influence de l'épaisseur de la couche CZTS sur la tension de circuit ouvert. On constate que l'augmentation de l'épaisseur de la couche CZTS engendre une faible augmentation de la tension de circuit ouvert  $V_{co}$ .



**Figure 3.8** Variation de la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  en fonction de l'épaisseur de la couche CZTS.

### 3.6.3 caractéristiques I-V

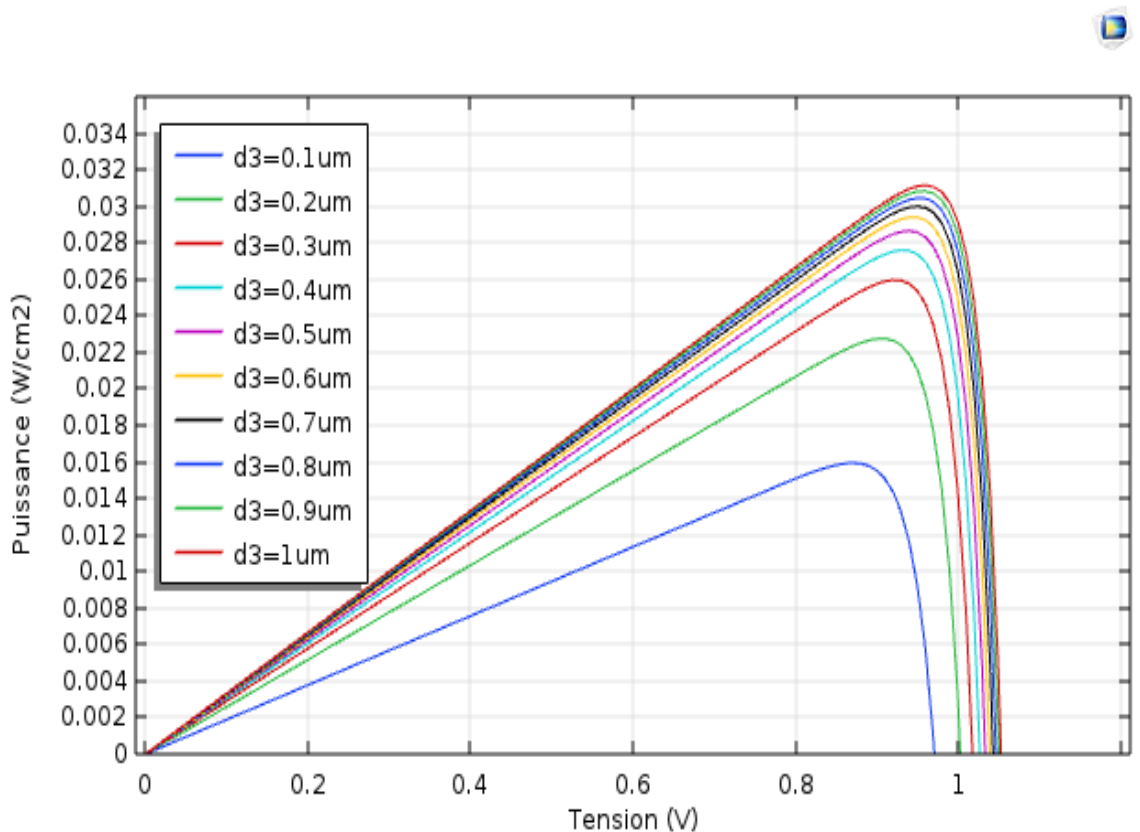
Les caractéristiques courant tension pour différentes épaisseurs de la couche CZTS sont illustrées dans la figure 3.9. On remarque que lorsqu'on augmente l'épaisseur de la couche CZTS, le courant de court circuit augmente, et la tension de circuit ouvert varie faiblement.



**Figure 3.9** Caractéristiques courant tension pour différentes épaisseurs de la couche CZTS.

### 3.6.4 Caractéristiques P-V

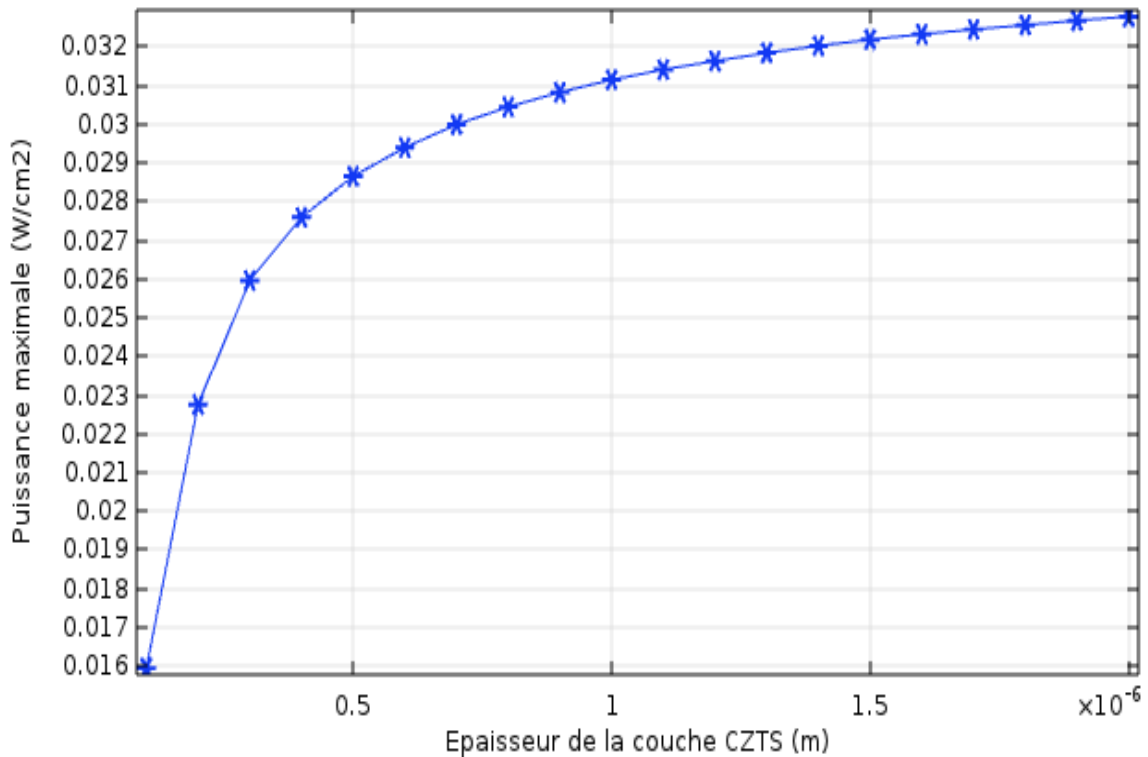
Les variations de la puissance délivrée en fonction de la tension, pour différentes épaisseurs de la couche CZTS, sont représentées sur la figure 3.10. Ces courbes présentent des maximums correspondants aux puissances maximales  $P_{\max}$ .



**Figure 3.10** Représentation de la puissance délivrée par la cellule en fonction de la tension V pour différentes épaisseurs de CZTS.

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

La puissance maximale pour différentes épaisseurs de la couche absorbante est illustrée dans la figure 3.11. On constate qu'en augmentant l'épaisseur de la couche CZTS la puissance maximale  $P_{\max}$  augmente à cause de l'augmentation du courant de court circuit  $J_{cc}$  et de la tension de circuit ouvert  $V_{co}$ .

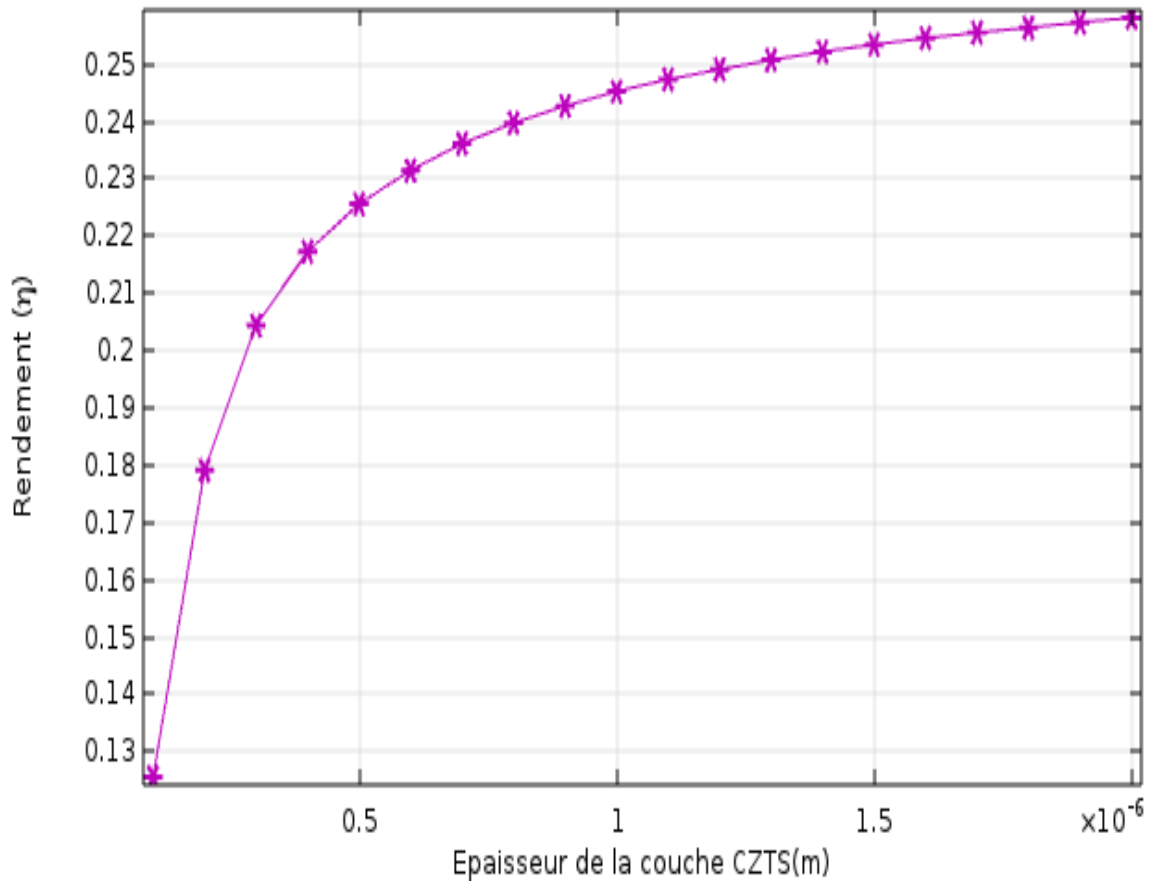


**Figure 3.11** Représentation de la variation de la puissance maximale  $P_{max}$  en fonction de l'épaisseur de la couche CZTS.

### 3.6.6 Rendement de conversion $\eta$ :

C'est le paramètre le plus important qui caractérise une cellule photovoltaïque, il exprime la capacité de la cellule à convertir efficacement les photons de la lumière incidente en courant électrique. La variation du rendement de conversion de la cellule en fonction de l'épaisseur de la couche CZTS est illustrée dans la figure 3.12. On remarque une augmentation non linéaire avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche CZTS à cause de l'augmentation de  $P_{max}$ .

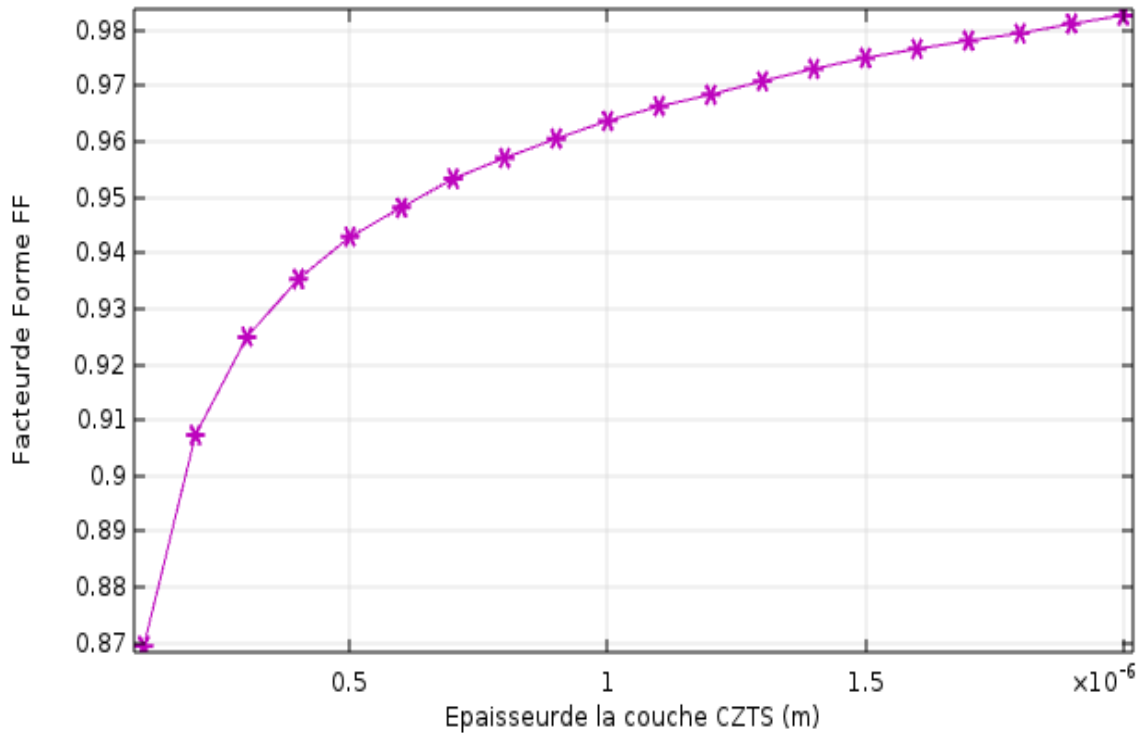
Le rendement varie de 0,12 à 0,26 (12% à 26%) lorsque l'épaisseur de la couche CZTS varie de 0,1 à 2  $\mu\text{m}$ , ensuite il se stabilise.



**Figure 3.12** Représentation du rendement de conversion  $\eta$  en fonction de l'épaisseur de la couche CZTS.

### 3.6.7 Facteur de forme FF

C'est un paramètre aussi important que le rendement pour qualifier la qualité de la cellule photovoltaïque. La variation du facteur de forme en fonction de l'épaisseur de la couche CZTS est illustrée dans la figure 3.13. On remarque une augmentation considérable du facteur de forme FF avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche CZTS, il varie de 87% à 98% lorsque l'épaisseur varie de 0,1 à 2 $\mu$ m.



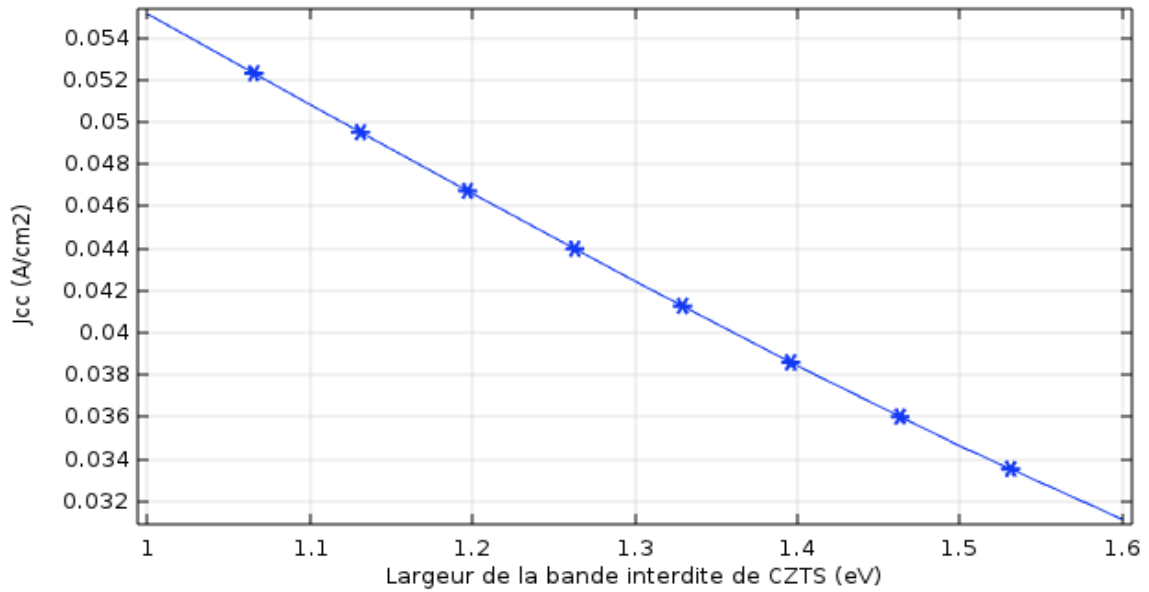
**Figure 3.13** Représentation de la variation du facteur de forme FF en fonction de l'épaisseur de la couche CZTS.

### 3.7 Effet de la largeur de la bande interdite ' gap' de la couche absorbante CZT(S,Se)

#### 3.7.1 Courant de court-circuit $J_{cc}$

L'influence du gap de la couche absorbante sur le courant de court circuit est représentée sur la figure 3.14. On constate qu'en augmentant le gap le courant de court circuit  $J_{cc}$  diminue à cause du rétrécissement du spectre absorbé.

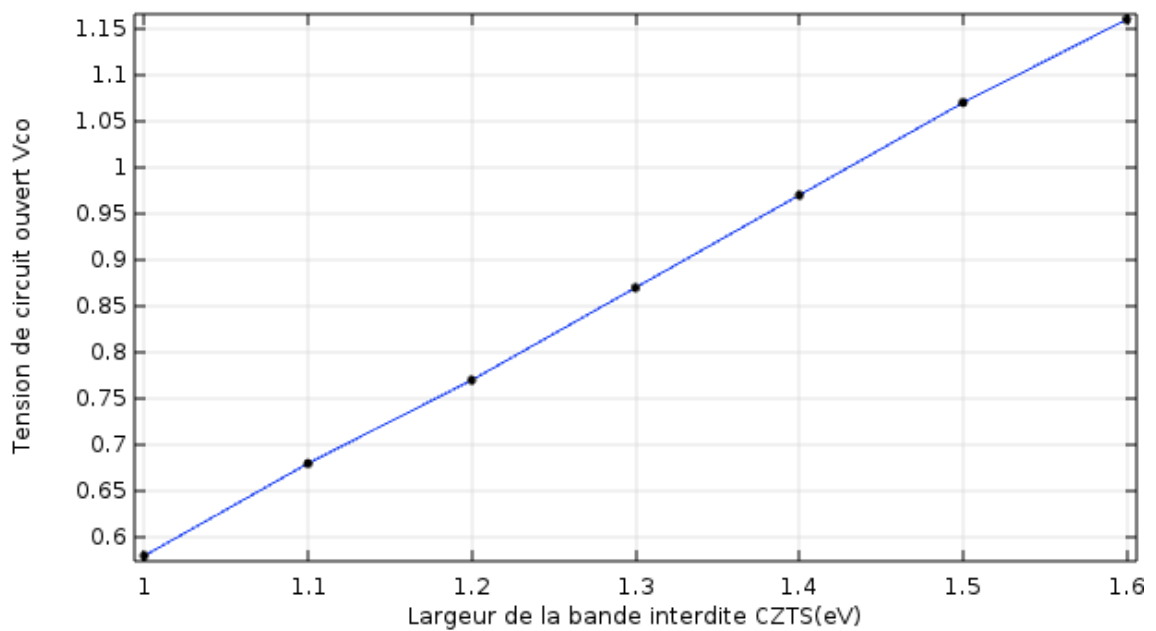




**Figure 3.14** Courant de court-circuit  $J_{cc}$  en fonction du gap de CZTS.

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

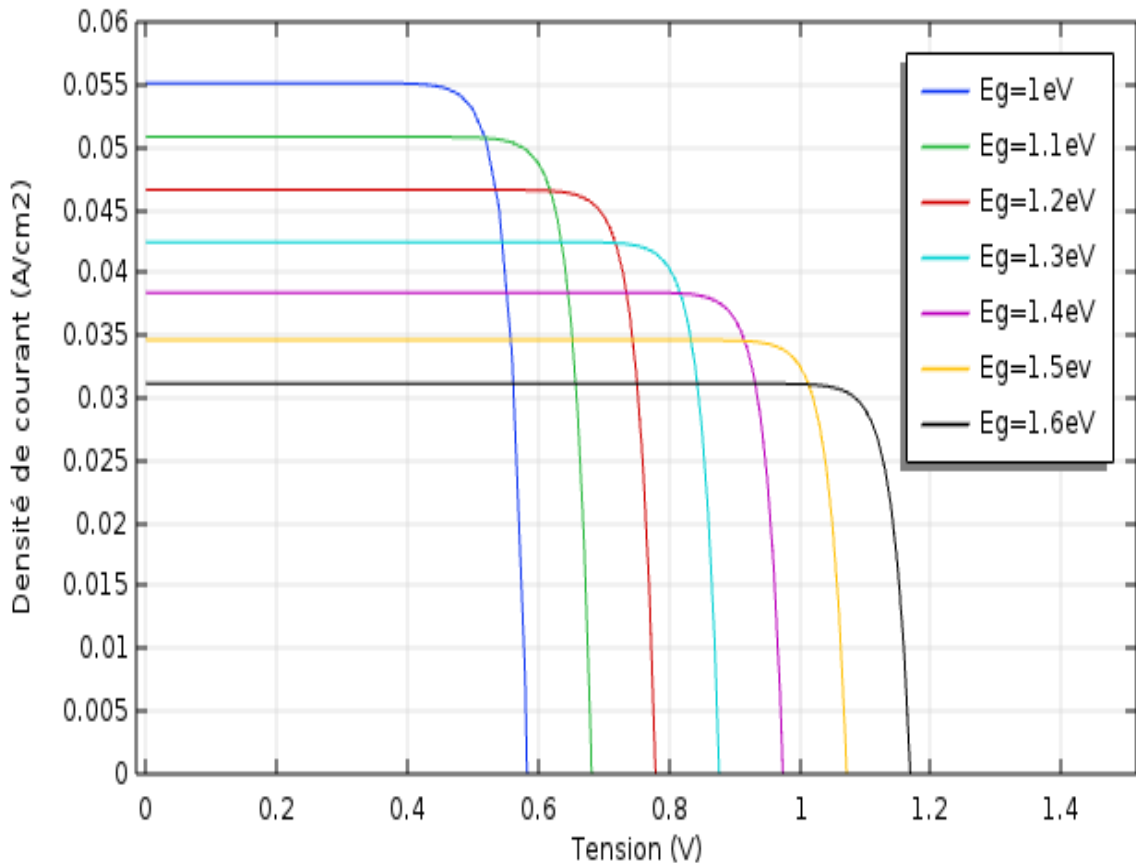
L'influence du gap de la couche absorbante sur la tension de circuit ouvert est représentée sur la figure 3.15. On constate qu'en augmentant la valeur du gap d'énergie la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  augmente.



**Figure 3.15** Tension de circuit ouvert  $V_{co}$  en fonction du gap de CZTS.

### 3.7.3 Caractéristiques I-V

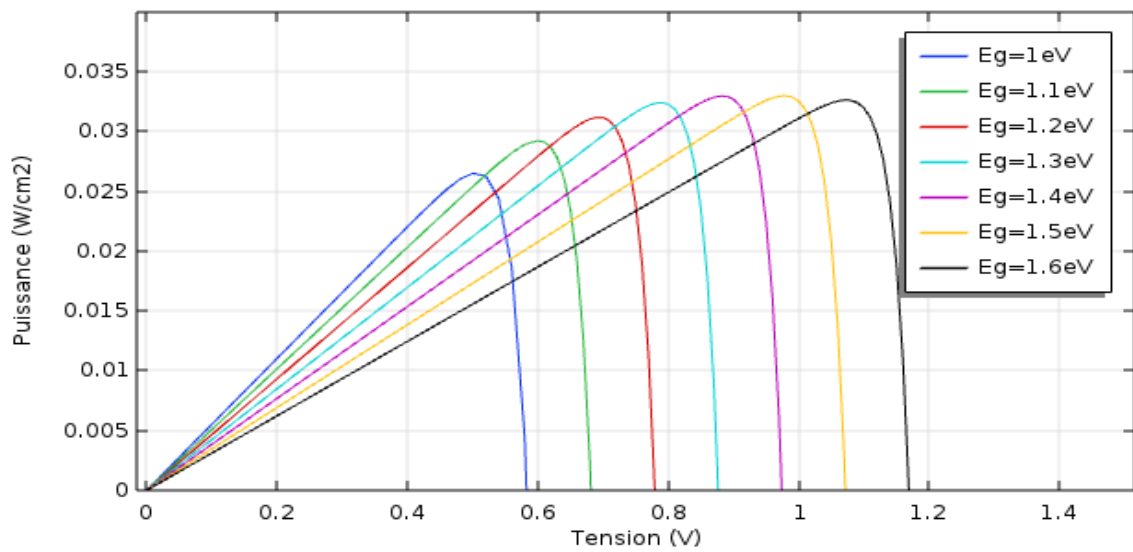
Les caractéristiques courant tension pour différents gaps de la couche CZTS sont illustrées sur la figure 3.16. On remarque que lorsqu'on augmente la largeur de la bande interdite de CZTS, le courant de court circuit  $J_{cc}$  diminue alors que la tension de circuit ouvert augmente.



**Figure 3.16** Caractéristiques courant tension pour différents gaps de CZTS

### 3.7.4 Caractéristiques P-V

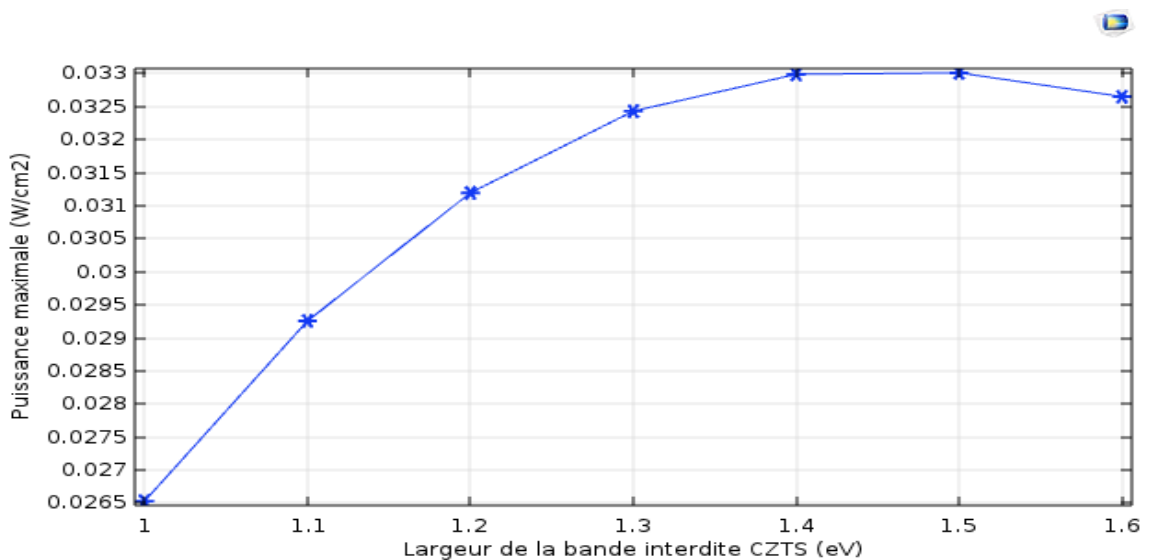
Les variations de la puissance délivrée en fonction de la tension sont représentées sur la figure 3.17 pour différentes largeurs de la bande interdite de CZTS. Ces courbes présentent des maximums correspondants aux puissances maximales  $P_{max}$ .



**Figure 3.17** Représentation de la puissance délivrée par la cellule en fonction de la tension pour différentes largeurs de la bande interdite de CZTS.

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

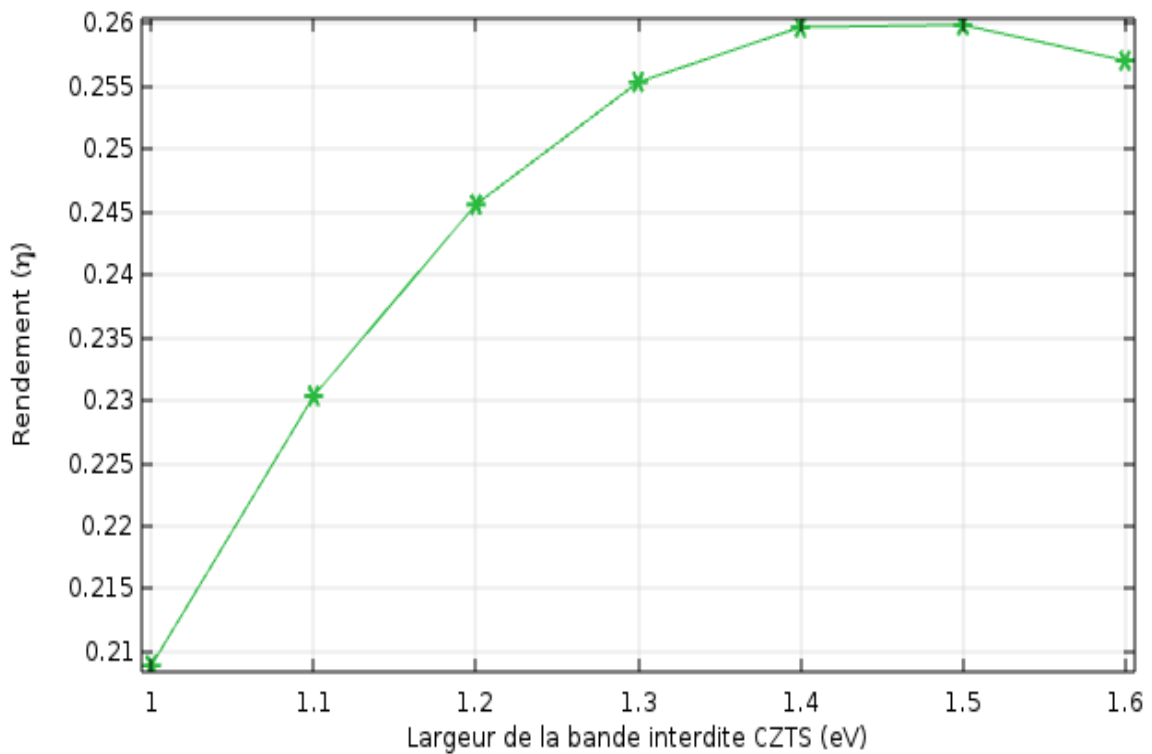
La puissance maximale pour différents gaps de CZTS est illustrée sur la figure 3.18. On constate qu'en augmentant la valeur du gap, la puissance maximale  $P_{max}$  augmente atteint un maximum pour  $E_g=1,4-1,5eV$  ensuite diminue.



**Figure 3.18** Représentation de la variation de la puissance maximale  $P_{max}$  en fonction de la largeur de la bande interdite de CZTS.

### 3.7.6 Rendement de conversion $\eta$

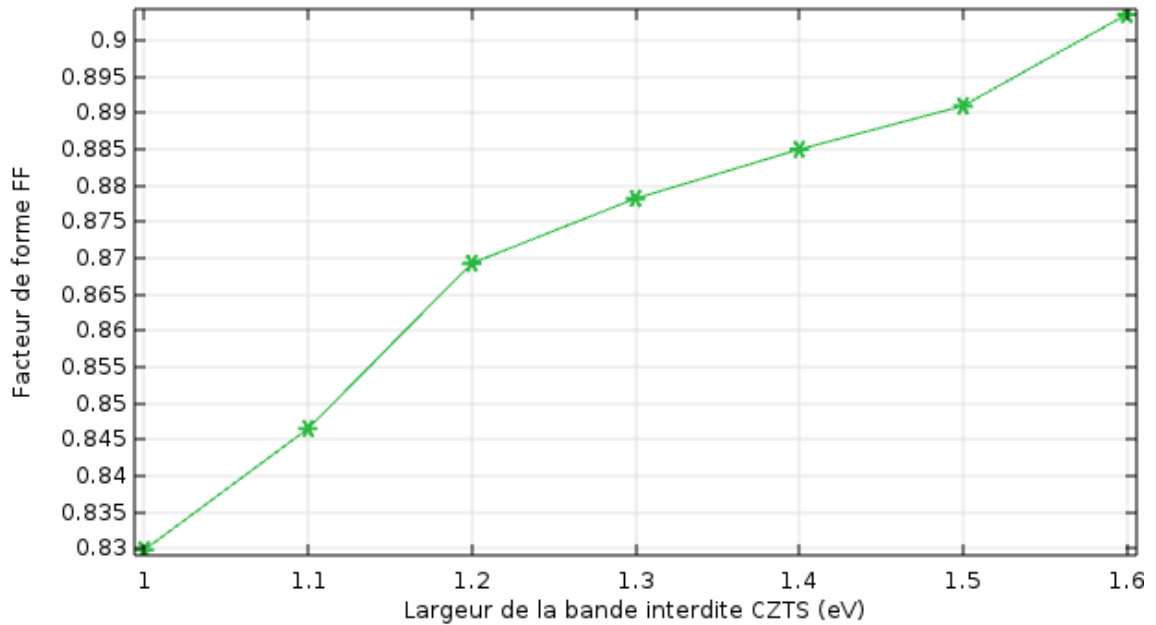
Le rendement de conversion  $\eta$  en fonction de la largeur de la bande interdite de CZTS est représenté sur la figure 3.19. Il suit la même variation que  $P_{max}$  et atteint sa valeur maximale  $\eta=26\%$  pour  $E_g=1,4-1,5\text{eV}$ .



**Figure 3.19** Représentation de la variation du rendement  $\eta$  en fonction de la largeur de la bande interdite de CZTS.

### 3.7.7 Facteur de forme FF

La figure 3.20 représente la variation du facteur de forme de la structure étudiée en fonction de la largeur de la bande interdite CZTS. On remarque que le facteur de forme FF augmente et varie de 83% à 90%.



**Figure 3.20** Représentation de la variation du facteur de forme FF en fonction de la largeur de la bande interdite de CZTS.

### 3.8 Conclusion

Une étude des performances des cellules solaires CZTS par des simulations numériques a été réalisée dans ce chapitre. Les résultats de simulation ont clairement montré que les paramètres de la cellule tels que l'épaisseur et le gap de la couche absorbante jouent un rôle important sur les performances de la cellule.

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 l'ordre de  $1,5\mu\text{m}$  et un gap de  $1,4-1,5\text{eV}$ .

# Conclusion générale

---

Dans ce travail, nous avons étudié les caractéristiques électriques de la cellule solaire à hétérojonction ZnO/CdS/CZTS. La couche ZnO type n est utilisée comme une couche fenêtre qui permet à la lumière de passer avec le minimum de réflexion, la couche tampon CdS de type n permet de créer la jonction P-N avec la couche absorbante de CZTS de type p.

La cellule est soumise à l'éclairement AM1.5G et à la température de fonctionnement de (25°C)300°K.

L'effet de l'épaisseur des divers couches sur les paramètres photovoltaïques de la cellule d'intérêt, à savoir la densité de courant de court-circuit ( $J_{cc}$ ), la tension de circuit-ouvert ( $V_{co}$ ), le facteur de forme ( $FF$ ), la puissance maximale ( $P_{max}$ ) et le rendement de conversion photovoltaïque ( $\eta$ ) ont été étudiés à l'aide du logiciel de simulation COMSOL multiphysics.

l'épaisseur optimale a été déterminée pour chaque couche afin de garantir les meilleures performances de la cellule solaire, en particulier le rendement de conversion.

L'influence de la largeur de la bande interdite de CZT(S,Se) sur les caractéristiques de la cellule a été étudiée.

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 l'ordre de 1,5 $\mu$ m et un gap de 1,4-1,5eV et un rendement de conversion de l'ordre de 26% peut être atteint.

En perspective, et afin d'améliorer le rendement des cellules à couches minces, des structures multi-jonctions CZTS/CZT(S,Se) ou CZT(S,Se)/Si peuvent être envisagées.

# Bibliographie

---

[1] Etude par simulation numérique de la Cellule solaire à base de CZTS par SCAPS.

[2] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Corps\\_noir](https://fr.wikipedia.org/wiki/Corps_noir).

[3] A. Ricaud, "photopiles solaires de la physique de la conversion photovoltaïque aux filières, matériaux et procédés", ©1997. presses polytechniques et universitaires romandes.

[4] A. Laugier, "Les photopiles solaires du matériau du dispositif aux applications", Institut National des sciences appliquées-lyon 1981.

[5] S. Daniel, Modeling radiation effect on a triple junction solar cell using Silvaco atlas, Thesis Naval post graduate school Monterey California.2012

[6] chapitre 2 de la these de HAMROUNNE .Amine univ de telemcen .

[7] mémoire de fin d'étude en master intitulé : Etude par simulation numérique de la Cellule solaire à base de CZTS par SCAPS, présenté par : Ben Abderrazak Ghania

[8] mémoire de fin d'étude en master intitulé : Etude de l'effet de la couche mince CdZnS dans la cellule solaire CZTS, présenté par : NOUIRI Achouak et BOUALLEM Zineb

[9] K. Ito et T. Nakazawa, « Electrical and optical properties of stannite-type quaternary semiconductor thin films ». Jpn. J. Appl. Phys. 27, pp. 2094-2097, (1988).

[10] G.S. Babu, Y.B. Kumar, P.U. Bhaskar and V.S. Raja, « Growth and characterization of co-evaporated  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$  thin films for photovoltaic applications », J. Phys. D: Appl. Phys. 41, pp. 7, (2008).

- [11] N. Kamoun, H. Bouzouita and B. Rezig, « Fabrication and characterization of Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> thin films deposited by spray pyrolysis technique », Thin Solid Films 515, pp. 5949-5952, (2007).
- [12] G.S. Babu, Y.B. Kumar, P.U. Bhaskar and V.S. Raja, « Growth and characterization of co-evaporated Cu<sub>2</sub>ZnSnSe<sub>4</sub> thin films for photovoltaic applications », J. Phys. D: Appl. Phys. 41, pp. 7, (2008).
- [13] Hironori Katagiri, Kazuo Jimbo, Satoru Yamada, Tsuyoshi Kamimura, Win Shwe Maw, Tatsuo Fukano, Tadashi Ito, Tomoyoshi Motohiro, Appl. Phys. Express 041,201,(2008).
- [14] H. Katagiri, K. Saitoh, T. Washio, H. Shinohara, T. Kurumadani and S. Miyajima, « Technical Digest of the 11th International Photovoltaic Science and Engineering Conference », Sapporo, pp. 647, (1999).