

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث 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

Filière Électronique
Spécialité Microélectronique

Présenté par

ASSAL Ishak

&

SLIMANI Mohamed Akram

Etude d'une cellule solaire double jonction CZTS/Si

Proposé par : NACER Said

Année Universitaire 2021-2022



Remerciements

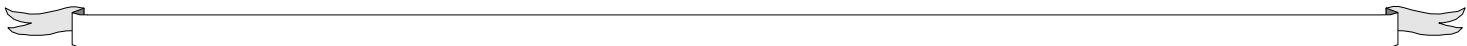
Avant tout, Nous remercions Allah le tout puissant qui nous a données la force, la volonté et le courage Pour réaliser ce Modeste travail.

Nous remercions notre encadreur Monsieur NACER SAID professeur à l'Université Saad Dahlab Blida pour nous avoir guidés dans ce travail et pour sa patience et ses précieux conseils.

Nous remercions tous les membres de jury qui ont accepté d'examiner ce modeste travail.

Nos remerciements vont à nos parents pour leur soutien, leur encouragement à tous les moments.

Nous tenons à remercier tous nos amis qui ont aidé de loin ou de près dans la réalisation de ce travail.





Dédicace

Je dédie ce travail

A mes très chers parents, source de vie,

D'amour et d'affection

A mon cher frère, mes sœurs, source de

Joie et de bonheur

A toute ma famille, source d'espoir et de

Motivation Et surtout Ahlem ma sœur aînée

Et aussi l'amie de la famille Mme A.Asia pour

Leurs efforts pour mon bien personnel

A tous mes amis,

A mon binôme ASSAL Ishak

A vous cher lecteur

SLIMANI Mohamed Akram





Dédicace

Je dédie ce travail a

Mes chers parents, pour tous leurs sacrifices,

Leur amour, Leur tendresse, Leur soutien

Et leurs prières tout au long de mes études

Mon Frère et ma Sœur pour leurs encouragements

Permanents, et leur soutien moral

A toute ma famille pour leur soutien tout au long

De mon parcours universitaire, que ce travail soit

L'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le

Fuit de votre soutien infaillible

Merci d'être toujours là pour moi

Et bien sûr à mon binôme : SLIMANI Mohamed Akram

ASSAL Ishak



ملخص :

في هذا العمل قمنا بدراسة ومحاكاة خلية شمسية مزدوجة الوصلة تعتمد على أغشية CZTS-Si الرقيقة باستخدام برنامج النمذجة والمحاكاة COMSOL Multiphysics. تم النظر في تكوينين: ترادفي وتعاقب. أجريت الدراسة من خلال تغيير سماكة الخلايا العلوية (CZTS) والسفلية (Si) مع ملاحظة اختلاف معاملاتها المميزة (J_{cc} ، V_{co} ، P_{max} ، η ، FF). السماكة المثلى للخلية العلوية التي تضمن تيارات متساوية للخلايا العلوية والسفلية هي 0.34 ميكرومتر. يتم الحفاظ على سمك الخلية السفلية (Si) بقيمتها المثلى التي تساوي 150 ميكرومتر. يُظهر الهيكل الأمثل عائدًا بنسبة 23 % في التكوين الترادفي وعائدًا بنسبة 27 % في التكوين التعاقبي.

الكلمات الرئيسية: النمذجة، الخلايا الشمسية، متعددة الوصلات، CZTS، Si، الكفاءة، الطبقات الرقيقة،
COMSOL Multiphysics

Résumé :

Dans ce travail nous avons étudié et simulé une cellule solaire double jonction à base de couches minces CZTS-Si en utilisant l'outil de modélisation et de simulation le logiciel COMSOL Multiphysics. Deux configurations ont été considérées : Tandem et cascade. L'étude s'est faite en variant les épaisseurs des cellules supérieures (CZTS) et inférieure (Si) tout en observant la variation de leurs paramètres caractéristiques (J_{cc} , V_{co} , P_{max} , η , FF). L'épaisseur optimale de la cellule supérieure assurant l'égalité des courants des cellules supérieure et inférieure est 0,34um. L'épaisseur de la cellule inférieure (Si) est maintenue à sa valeur optimale égale à 150um. La structure optimale présente un rendement de 23% dans la configuration tandem et un rendement de 27% dans la configuration cascade.

Mots clés : modélisation, cellule solaire, multijonction, CZTS, Si, rendement, couches minces,
COMSOL Multiphysics

Abstract:

In this work we have studied and simulated a double junction solar cell based on CZTS-Si thin films using the modeling and simulation tool COMSOL Multiphysics software. Two configurations were considered: Tandem and cascade. The study was done by varying the thicknesses of the upper (CZTS) and lower (Si) cells while observing the variation of their characteristic parameters (J_{cc} , V_{co} , P_{max} , η , FF). The optimal thickness of the upper cell ensuring equal currents of the upper and lower cells is 0.34um. The thickness of the lower cell (Si) is maintained at its optimal value equal to 150um. The optimal structure exhibits a 23% yield in the tandem configuration and a 27% yield in the cascade configuration.

Keywords: modeling, solar cell, multijunction, CZTS, Si, efficiency, thin layers,
COMSOL Multiphysics

Liste des Symboles et Abréviations

AM : masse d'air

F(λ) : l'irradiation spectrale

k : la constante de Boltzmann

R_s : Rayon du soleil

E_g : la bande interdite

I_{cc} : courant de court-circuit

V_{co} : La tension de circuit ouvert

η : Le rendement

P_{max} : La puissance maximale

FF : Le facteur de forme

E_F : le niveau de fermi

n,p : Les densités des porteurs

α : Le coefficient d'absorption

G : Le taux de génération

R : Taux de recombinaison

E : le champ électrique

J_n : densité de courant des électrons

J_p : densité de courant des trous

μ_n et μ_p : mobilités des électrons et des trous

λ : la longueur d'onde

h : la constante de Planck,

c : la vitesse de la lumière dans le vide

Table des matières

Dédicace.....	
Liste des Symboles et Abréviations.....	
Liste des figures.....	
Liste des tableaux.....	
Chapitre 1 : Généralités photovoltaïques.....	
1.1 Introduction	3
1.2 Historique du photovoltaïque : [1]	3
1.3 L'énergie solaire	4
1.4 Rayonnement solaire	5
1.5 Le spectre solaire	7
1.6 La cellule photovoltaïque.....	9
1.7 L'effet photovoltaïque :	9
1.8 Les différentes technologies des cellules photovoltaïques	10
1.9 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	13
1.10 Les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque	14
1.10.1 Courant de court-circuit I_{CC}	15
1.10.2 Tension de circuit ouvert V_{CO}	15
1.10.3 Facteur de forme (FF).....	15
1.10.4 La puissance maximale P_{max}	15
1.10.5 Le rendement η	15
1.11 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque	16
1.11.1 Avantages de l'énergie photovoltaïque :	16
1.11.2 Inconvénients de l'énergie photovoltaïque	16
1.12 Les semi-conducteurs	17
1.13 Les types de semi-conducteurs :.....	17
1.13.1 Semi-conducteurs type n	17
1.13.2 Semi-conducteurs type p	18
1.14 L'absorption	19
1.15 Taux de génération	20
1.16 Recombinaisons	20
1.17 Les équations des semi-conducteurs.....	22
1.17.1 Equation de Poisson.....	22
1.17.2 Les équations de continuité des électrons et des trous	22
1.18 La jonction PN	23

1.19 Conclusion.....	23
Chapitre 2 : Les cellules solaires à base de CZTS.....
2.1 Introduction	25
2.2 Les cellules solaires couches minces	25
2.3 Cellules solaires à base de CZTS.....	26
2.4 Structure d'une cellule solaire à base de CZTS	26
2.4.1 Structure cristallographique	27
2.5 Les propriétés de CZTS.....	29
2.5.1 Propriétés électroniques.....	30
2.5.2 Propriétés optiques.....	30
2.6 Avantages de CZTS	31
2.7 Cellules multi-jonctions.....	32
2.7.1 Cellule tandem	32
2.7.2 Cellule cascade :	33
2.8 Caractéristiques du matériau silicium.....	34
2.9 Conclusion.....	35
Chapitre 3 : Résultats de Simulation
3.1 Introduction	37
3.2 Présentation du logiciel COMSOL Multiphysics	37
3.3 Présentation de la cellule à étudier	37
3.4 Paramètres de simulation.....	39
3.5 Effet de l'épaisseur de la couche absorbante CZTS de la cellule supérieure	39
3.5.1 Caractéristiques courant tension J(V)	39
3.5.2 Caractéristiques puissance tension P(V)	40
3.5.3 Densité de courant de court-circuit J_{cc}	41
3.5.4 Tension de circuit ouvert V_{co}	41
3.5.5 Puissance maximale P_{max}	42
3.5.6 Le rendement η	43
3.5.7 Facteur de forme FF	43
3.6.1 Caractéristiques courant-tension J(V).....	44
3.6.2 Caractéristiques puissance-tension P(V).....	45
3.6.3 Densité de courant de court-circuit J_{cc}	45
3.6.4 Tension de circuit ouvert V_{co}	46
3.6.5 Puissance maximale P_{max}	47
3.6.6 Le rendement η (%).....	47

3.6.7 Le Facteur de Forme	48
3.7 Caractéristiques de la cellule CZTS/Si cascade.....	49
3.8 Caractéristiques de la cellule CZTS/Si tandem.....	50
3.9 Conclusion.....	52

Liste des figures

Figure 1. 1: Le physicien français Edmond Becquerel 1820-1891	4
Figure 1. 2: les modules photovoltaïques [3]	5
Figure 1. 3 : les Composants du rayonnement solaire [7]	6
Figure 1. 4: le spectre solaire [10]	8
Figure 1. 5: Classification des différents semi-conducteurs utilisés dans les cellules PV [11].....	10
Figure 1. 6: Principe de fonctionnement d'une cellule PV [17].....	14
Figure 1. 7: Caractéristique I(V) d'une cellule solaire sous obscurité et éclairement [18].....	14
Figure 1. 8: Semi-conducteurs de type n	18
Figure 1. 9: Semi-conducteurs de type P	19
Figure 1. 10: jonction PN	23
Figure 2. 1: Structure d'une cellule photovoltaïque à base de CZTS [34].....	27
Figure 2. 2: Représentation des structures stannite et kèsterite [38].....	29
Figure 2. 3: Cellule tandem.....	33
Figure 2. 4: Cellule cascade.....	34
Figure 3. 1: Schéma de la structure de la cellule solaire CZTS/Si tandem simulée.....	38
Figure 3. 2: Schéma de la structure de la cellule solaire CZTS/Si cascade simulée.....	38
Figure 3. 3: Caractéristiques courant tension pour différentes épaisseurs de la couche CZTS	40
Figure 3. 4: Caractéristiques puissance tension pour différentes épaisseurs de la couche CZTS	40
Figure 3. 5: Variation du courant de court-circuit J_{cc} en fonction de la couche CZTS	41
Figure 3. 6: Variation de la tension de circuit ouvert VCO en fonction de la couche CZTS	42
Figure 3. 7: Variation de la puissance maximale en fonction de la couche CZTS.....	42
Figure 3. 8: Variation du rendement en fonction de la couche CZTS.....	43
Figure 3. 9: Variation du facteur de forme FF en fonction de la couche CZTS.....	44
Figure 3. 10: Caractéristiques courant tension pour différentes épaisseurs de la couche Si de la cellule	44
Figure 3. 11: Caractéristiques puissance tension pour différentes épaisseurs de la couche	45
Figure 3. 12: Variation de la densité de courant de court-circuit JCC en fonction de la couche Si.....	46
Figure 3. 13: Variation de la tension de circuit ouvert VCO en fonction de la couche Si	46
Figure 3. 14: Variation de la puissance maximale en fonction de la couche Si.....	47

Figure 3. 15: Variation du rendement en fonction de la couche Si	48
Figure 3. 16: Variation du facteur de forme FF en fonction de la couche Si	48
Figure 3. 17: Caractéristiques courant-tension de la structure CZTS/Si cascade.....	49
Figure 3. 18: Caractéristiques puissance-tension de la structure CZTS/Si cascade.....	50
Figure 3. 19: Caractéristiques courant-tension de la structure CZTS/Si tandem.....	51
Figure 3. 20: Caractéristiques courant-tension de la structure CZTS/Si tandem.....	51
Figure 3. 21: Caractéristiques puissance-tension de la structure CZTS/Si tandem.....	52

Liste des tableaux

Tableau 1. 1 Absorption optique de quelques matériaux semi-conducteur [14]	10
Tableau 1. 2: Comparaison des différentes technologies [15].....	12
Tableau 2. 1: Paramètres cristallins des structures k�esterite et Stannite des compos�es CZTS rapport�es dans la littérature [36,40,41,42].	28
Tableau 2. 2: Caractéristiques du matériel silicium	35
Tableau 3. 1: Paramètres utilis�es dans la simulation	39
Tableau 3. 2: Caractéristiques de la cellule CZTS/Si cascade	50
Tableau 3. 3: caractéristiques de la cellule CZTS/Si tandem.....	52

Introduction générale

La demande sans cesse croissante d'utilisation d'énergie photovoltaïque suscite une recherche permanente de cellules moins chères et plus efficaces. Actuellement, deux principales filières permettent l'élaboration des modules et des cellules photovoltaïques : la filière du silicium massif et la filière des matériaux en couches minces. La filière du silicium massif représente de nos jours 75% de la production mondiale de systèmes photovoltaïques. L'énergie solaire est l'une des candidats les plus promoteurs en tant que source d'énergie d'avenir. Cette énergie est une source inépuisable et propre. Elle est de plus en plus considérée comme source énergétique qui peut couvrir les besoins mondiaux en électricité. En effet, le rayonnement solaire peut être converti en électricité grâce à des dispositifs appelés cellules solaires photovoltaïques. Les cellules solaires photovoltaïques (PV) présentent beaucoup d'avantages. Elles sont élégantes, non polluantes, silencieuses et sans pièces rotatives.

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 CZTS/Si. La structure de la cellule CZTS/Si se compose de deux cellules solaires, la cellule supérieure en CZTS avec une large bande interdite, et une cellule inférieure en Si avec une petite bande interdite.

La simulation de la cellule solaire sera faite par un logiciel de simulation numérique COMSOL multiphysiques. 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
- Enfin, nous terminons par une conclusion générale.

Chapitre 1 : Généralités photovoltaïques

Chapitre 1 : Généralités photovoltaïques

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, la jonction P-N et les cellules solaires avec leurs caractéristiques photovoltaïques et les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire et on terminera par les étapes du processus de conversion (l'absorption et la recombinaison) et les équations des semi-conducteurs.

1.2 Historique du photovoltaïque : [1]

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.

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.

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.

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.

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

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

Chapitre 1 : Généralités photovoltaïques



Figure 1. 1: Le physicien français Edmond Becquerel 1820-1891

1.3 L'énergie solaire

L'énergie solaire est une source d'énergie qui dépend du soleil. Cette énergie permet de produire de l'électricité à partir de panneaux photovoltaïques ou de centrales solaires thermiques grâce à la lumière du soleil captée par des panneaux solaires [2].

Chapitre 1 : Généralités photovoltaïques

L'énergie solaire est la source d'énergie renouvelable la plus disponible et la plus



Figure 1. 2: les modules photovoltaïques [3]

importante.

1.4 Rayonnement solaire

Le soleil libère en permanence beaucoup d'énergie rayonnante dans le système solaire. La Terre intercepte une infime fraction de l'énergie solaire émise dans l'espace.

La constante solaire égale à 1367 W/m^2 , c'est une moyenne obtenue pour chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère terrestre (pour une distance moyenne terre-soleil de 150 Millions de Km).

Quand le soleil bouge dans le ciel, la lumière traverse une distance plus grande et perd plus d'énergie.

Comme le soleil est au zénith pendant une courte période, donc l'énergie utilisable est inférieure à 1000 W/m^2 [4].

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.

L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement à :

Chapitre 1 : Généralités photovoltaïques

- 9% dans la bande des ultraviolets (<0,4 μm),
- 47% dans la bande visible (0,4 à 0,8 μm),
- 44% dans la bande des infrarouges (>0,8 μm) [5].

Le rayonnement solaire est constitué de photons transportant chacun une énergie E_{ph} qui répond, elle-même, à la relation suivante :

$$E_{ph} = \frac{hc}{\lambda} \quad (1.1)$$

Où E_{ph} représente la quantité d'énergie, λ la longueur d'onde, h la constante de Planck et c la vitesse de la lumière.

Le rayonnement solaire qui arrive finalement au sol avec une intensité réduite ($1000\text{W}/\text{m}^2$ au niveau de la mer) avec une bande spectrale répartie de la manière suivante : UV=5%, Visible=40%, IR=55% à cause des différentes atténuations atmosphériques et il se subdivise en trois composantes : diffuse, directe et réfléchi par le sol [6].

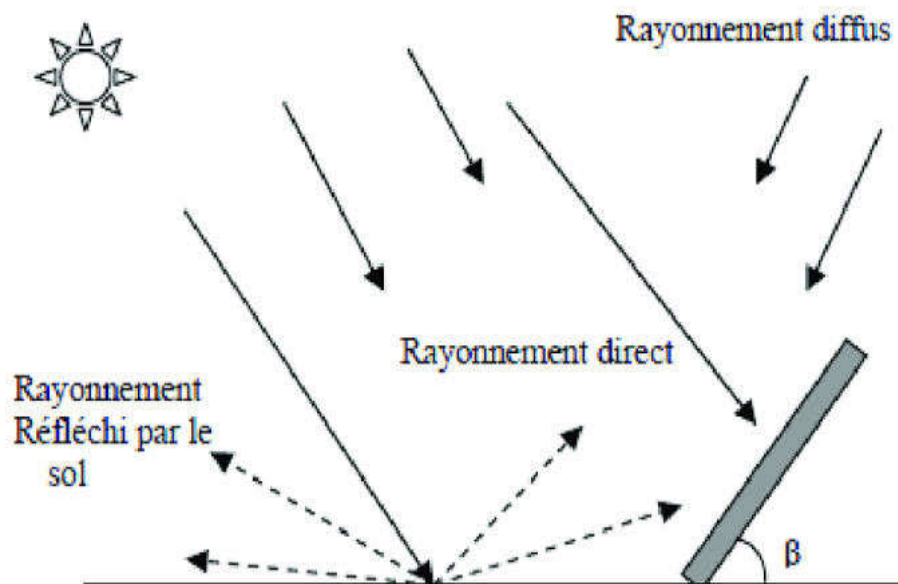


Figure 1. 3 : les Composants du rayonnement solaire [7]

Chapitre 1 : Généralités photovoltaïques

1.5 Le spectre solaire

Le spectre solaire est la distribution spectrale (en fonction de la longueur d'onde ou de la fréquence) du rayonnement électromagnétique émis par le soleil, depuis les rayonnements radio jusqu'aux rayons X.

Le rayonnement ultraviolet est un rayonnement électromagnétique de longueur d'onde plus courte que le visible (<380 nanomètres) et plus longue que les rayons X.

Le rayonnement visible est un rayonnement électromagnétique stimulant le nerf optique humain, de longueur d'ondes comprises approximativement entre 380 nm et 780 nm.

Le rayonnement infrarouge est un rayonnement électromagnétique de longueur d'onde comprise entre 780 nm et 1 mm (Figure 1.4).

Le rayonnement solaire global est le rayonnement émis par le soleil incident sur une surface donnée.

Le rayonnement direct est le rayonnement solaire incident sur un plan donné, et provenant d'un petit angle solide centré sur le disque solaire. Le rayonnement diffus est le rayonnement solaire global à l'exception du rayonnement direct. Il comprend la plus grande partie du rayonnement diffusé par l'atmosphère ainsi qu'une partie du rayonnement réfléchi par le sol, suivant l'inclinaison de la surface réceptrice [8,9]

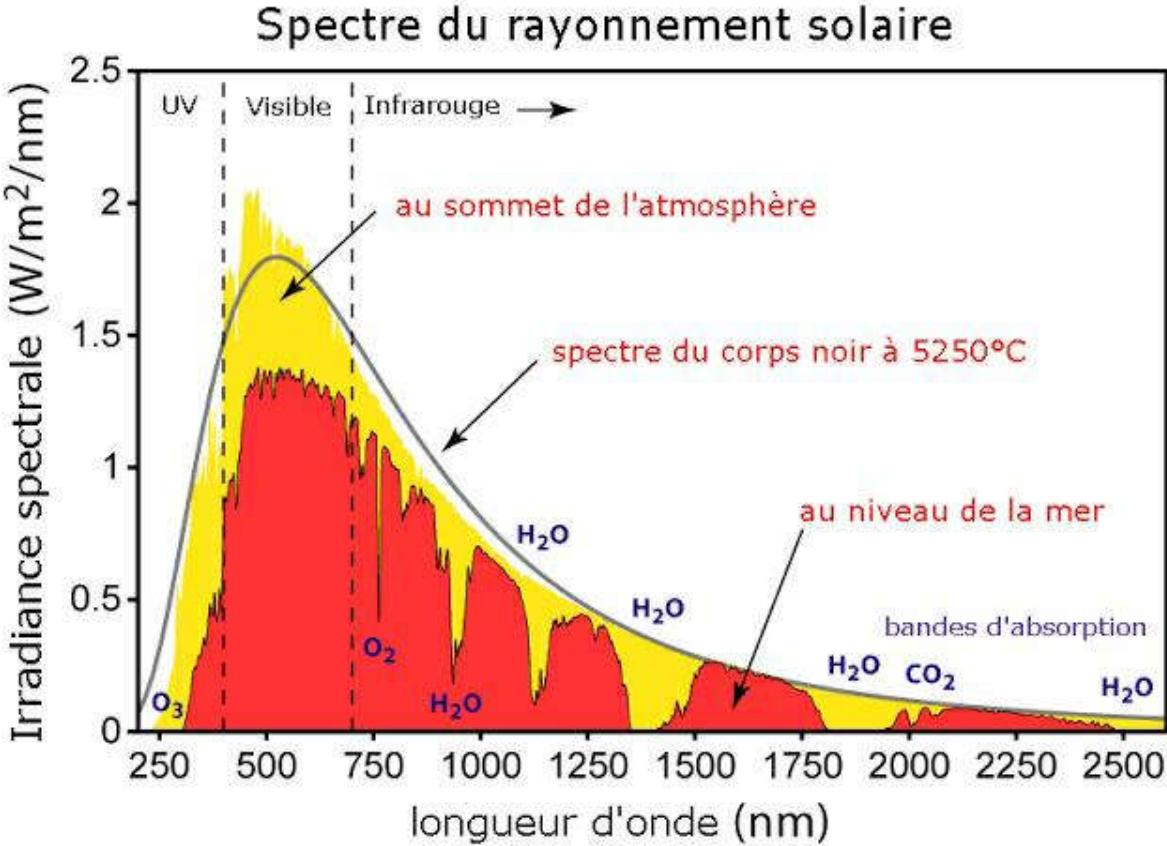


Figure 1. 4: le spectre solaire [10]

Chapitre 1 : Généralités photovoltaïques

1.6 La cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque est composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique. Le principe de fonctionnement de cette cellule fait appel aux propriétés du rayonnement et celles des semi-conducteurs [11].

Une cellule photovoltaïque fonctionne selon le phénomène physique appelé « effet photovoltaïque » établissant une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut alors varier en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température et du vieillissement de la cellule [12].

1.7 L'effet photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière [13].

Il correspond à l'apparition d'une différence de potentiel entre les deux cotés d'une jonction semi-conductrice sous l'action d'une radiation lumineuse.

Les systèmes photovoltaïques, composés de nombreuses cellules élémentaires placées en série utilisent également l'effet photovoltaïque. Le tableau 1.1 représente l'absorption optique de quelques matériaux photovoltaïques à la longueur d'onde $\lambda = 0,59\mu\text{m}$, avec α le coefficient d'absorption dépendant du matériau et de la longueur d'onde de l'énergie incidente, il s'exprime en cm^{-1} .

Matériau	$\alpha(\text{cm}^{-1})$
Silicium cristallin	4.5×10^3

Chapitre 1 : Généralités photovoltaïques

Silicium amorphe	2.4×10^4
Arséniure de gallium	5.4×10^4

Tableau 1. 1 Absorption optique de quelques matériaux semi-conducteur [14]

1.8 Les différentes technologies des cellules photovoltaïques

Les cellules photovoltaïques sont principalement fabriquées à partir de semi-conducteurs en silicium, à base de silicium monocristallin (c -Si), de silicium polycristallin (pc-Si) (plus de 80 % de la production mondiale), de silicium amorphe (a - Si) et de silicium en couche mince à base de silicium amorphe ou CIS (Cuivre Indium Sélénium).

Dans les applications terrestres, les modules de type PV pc- Si sont les plus largement appliqués, suivis par le tellure de cadmium (CdTe) et le cuivre indium gallium CIGS de séléniure, tandis que de nouveaux types de systèmes photovoltaïques comme des cellules solaires à colorant, ont été étudiés. Le silicium dans le photovoltaïque est encore le principal type de cellules utilisé dans les applications, car il a une plus grande durabilité et une plus grande efficacité que les autres photovoltaïques [11].

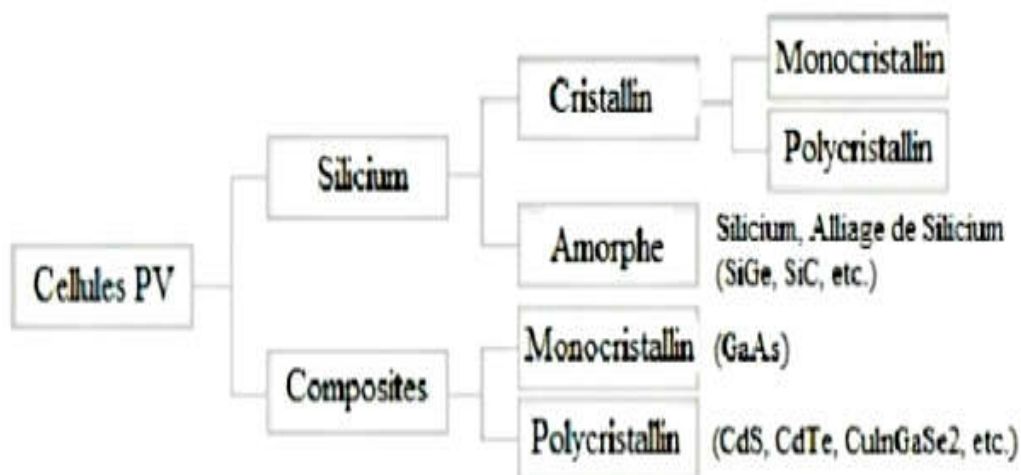


Figure 1. 5: Classification des différents semi-conducteurs utilisés dans les cellules PV [11]

Chapitre 1 : Généralités photovoltaïques

Matériau	Rendement	Longévité	Caractéristiques	Principales utilisations
Silicium mono cristallin	12 à 18% (24.7% en laboratoire)	20 a 30 ans	<ul style="list-style-type: none"> *Très performant *Stabilité de production d'énergie *Méthode de production couteuse et laborieuse 	Aerospatial e, modules pour toits, façades
Silicium poly cristallin	11 à 15 % (19.8% en laboratoire)	20 a 30 ans	<ul style="list-style-type: none"> *Adapté à la production à grande échelle. *Stabilité de production d'énergie. Plus de 50% du marché mondial. 	Modules pour toits, façades, générateurs
Amorphe	5 à 8% (13% en laboratoire)		<ul style="list-style-type: none"> *Peut fonctionner sous la lumière fluorescente. * Fonctionnement si faible luminosité. * Fonctionnement par temps couvert Fonctionnement si ombrage partiel. * La puissance de sortie varie dans le temps. En début de vie, la puissance délivrée est de 15 à 20 % supérieure à la valeur nominale et se 	Appareils électroniques (montres, calculatrices), intégration dans le bâtiment

Chapitre 1 : Généralités photovoltaïques

			stabilise après quelques mois.	
Composite mono cristallin (GaAs)			Fonctionne à puissance plus élevée, du fait d'une tension de claquage plus élevée. il possède un gap direct, ce qui lui confère des propriétés d'optoélectronique supérieures.	Systèmes de concentrateurs Aerospatial e.
Composite poly cristallin (Cds, CdTe, CuInGaSe₂, etc.)	18 à 20% (27.5% en laboratoire)		Nécessite peu de matériaux mais certains contiennent des substances polluantes.	Appareils électroniques (montres, calculatrices), intégration dans le bâtiment.

Tableau 1. 2: Comparaison des différentes technologies [15]

Chapitre 1 : Généralités photovoltaïques

1.9 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque est composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique. Le principe de fonctionnement de cette cellule fait appel aux propriétés du rayonnement et celles des semi-conducteurs.

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.

La conversion photovoltaïque met en jeu des physiques, intimement liées et simultanées :

- L'absorption de la lumière dans le matériau
- Le transfert d'énergie des photons aux charges électriques
- La collecte des charges.

Un matériau doit donc avoir des propriétés optiques et électriques spécifiques pour permettre la conversion photovoltaïque.

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p.

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 pn)

Chapitre 1 : Généralités photovoltaïques

a été formée. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones n et p, une diode est obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone n rejoignent les trous de la zone p via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel : le courant

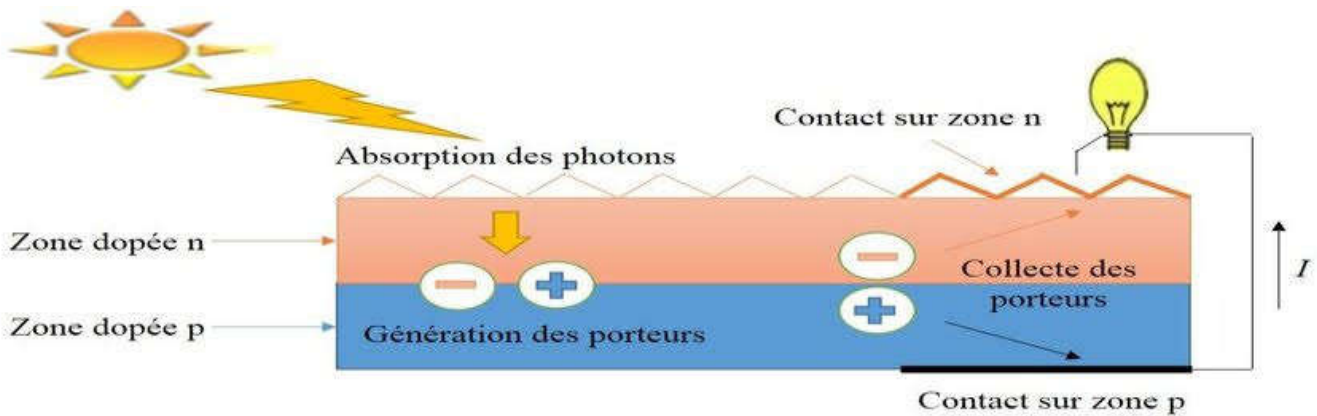


Figure 1. 6:Principe de fonctionnement d'une cellule PV [17]

électrique circule (voir figure 1.6) [16]

1.10 Les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque

Les paramètres d'une cellule photovoltaïque sont déterminés à partir de la courbe Caractéristique courant-tension (I-V) (Figur1.7) qui décrit le fonctionnement de la cellule.

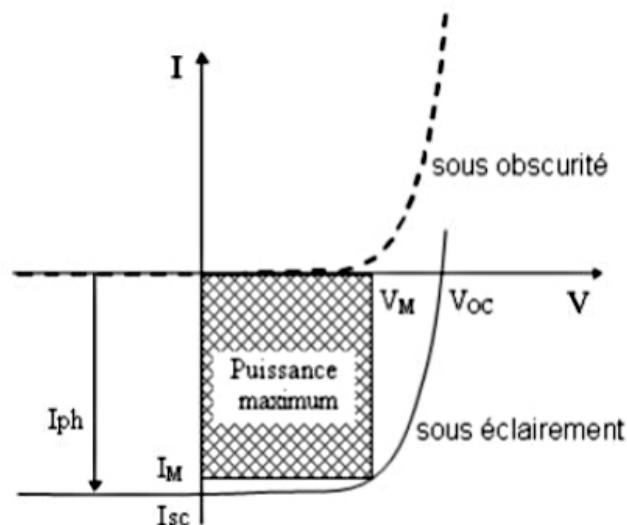


Figure 1. 7: Caractéristique I(V) d'une cellule solaire sous obscurité et éclairement [18]

Chapitre 1 : Généralités photovoltaïques

1.10.1 Courant de court-circuit I_{cc}

Le courant de court-circuit I_{cc} correspond au courant produit à tension nulle $V= 0$. Le courant est d'autant plus élevé que l'absorption de la cellule est grande et que les recombinaisons sont faibles.

1.10.2 Tension de circuit ouvert V_{CO}

La tension à circuit-ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend du type de la cellule solaire, des matériaux de la couche active et de l'éclairement de la cellule.

1.10.3 Facteur de forme (FF)

Le facteur de forme (FF) de la courbe I-V exprime la différence entre la puissance réelle débitée par la cellule et sa puissance idéale. Il détermine la qualité électrique de la cellule, il est déterminé par l'équation suivante :

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} \cdot V_{CO}} \quad (1.2)$$

1.10.4 La puissance maximale P_{max}

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

$$P_{max} = I_m \cdot V_m \quad (1.3)$$

1.10.5 Le rendement η

Il est défini comme le rapport entre la puissance maximale produite par la cellule et la puissance du rayonnement solaire qui arrive sur la cellule. Le rendement s'écrit :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}}$$

(1.4)

P_{inc} : Puissance incidente ;

Ou d'après $P_{max} = FF \times I_{cc} \times V_{CO}$

$$\eta = FF \times I_{cc} \times \frac{V_{CO}}{P_{inc}} \quad (1.5)$$

Chapitre 1 : Généralités photovoltaïques

1.11 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

L'énergie solaire apportée par des panneaux photovoltaïques a plusieurs avantages, néanmoins elle présente aussi quelques inconvénients, ils seront présentés ci-dessous :

1.11.1 Avantages de l'énergie photovoltaïque :

- L'énergie du soleil est la source la plus renouvelable parmi toutes les autres.
- Sur les sites isolés, l'énergie photovoltaïque offre une solution pratique pour obtenir de l'électricité à moindre coût.
- La revente du surplus de production permet d'amortir les investissements voire de générer des revenus.
- L'énergie photovoltaïque est totalement modulable et peut donc répondre à un large éventail de besoins. La taille des installations peut aussi être augmentée par la suite pour suivre les besoins de la charge.
- L'énergie photovoltaïque est une énergie propre et non-polluante qui ne dégage pas de gaz à effet de serre et ne génère pas de déchets.

1.11.2 Inconvénients de l'énergie photovoltaïque

- Le coût d'investissement des panneaux photovoltaïques qui reviennent cher.
- La fabrication des panneaux photovoltaïques relève de la haute technologie, demandant énormément de recherche, de développement et donc des investissements coûteux. Ce qui se produit avec un prix d'installation qui, aujourd'hui reste assez cher.
- Les rendements des panneaux photovoltaïques sont encore faibles.
- Dans le cas d'une installation photovoltaïque autonome qui ne revend pas son surplus d'électricité au réseau, il faut inclure des batteries dont le coût reste très élevé.
- Le niveau de production d'électricité n'est pas stable et pas prévisible mais dépend du niveau d'ensoleillement. De plus, il n'y a aucune production d'électricité le soir et la nuit.
- La durée de vie d'une installation photovoltaïque n'est pas éternelle mais de l'ordre de 20 à 30 ans. De plus, le rendement des cellules photovoltaïques diminue avec le temps.

Chapitre 1 : Généralités photovoltaïques

1.12 Les semi-conducteurs

Un semi-conducteur est un matériau qui a les caractéristiques électriques d'un isolant, mais pour lequel la probabilité qu'un électron puisse contribuer à un courant électrique, quoique faible, est importante. En d'autres termes, la conductivité électrique d'un semi-conducteur est intermédiaire entre celle des métaux et celle des isolants.

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.

1.13 Les types de semi-conducteurs :

1.13.1 Semi-conducteurs type n

Un matériau dopé n est un semi - conducteur dont la concentration en électrons est largement supérieure à la concentration en trous. Prenons par exemple le cas du silicium (Si) dans lequel on introduit de l'Arsenic (As) ; ce dernier possède 5 électrons sur la couche extérieure. Les quatre atomes voisins de silicium prêtent un électron chacun à l'atome de l'arsenic qui lui - même met en commun quatre de ces cinq électrons périphériques, comme le montre la figure (1.9). On associe à l'Arsenic un niveau donneur E dans la bande interdite très proche de la bande de conduction. La concentration d'électrons sera donc supérieure à la concentration de trous ce qui correspond à la définition d'un semi - conducteur dopé n.

La densité de porteurs libres « électrons » du semi-conducteur sera : [19]

$$n = P + Nd \quad (1.6)$$

Le niveau Fermi E_F :

On a la densité de porteurs

$$n = Nd = Nc \cdot e^{-\left(\frac{E_C - E_F}{kT}\right)} \quad (1.7)$$

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

Donc :

Chapitre 1 : Généralités photovoltaïques

$$E_{fn} = E_{fi} + kT \ln \frac{N_d}{n_i} \quad (1.8)$$

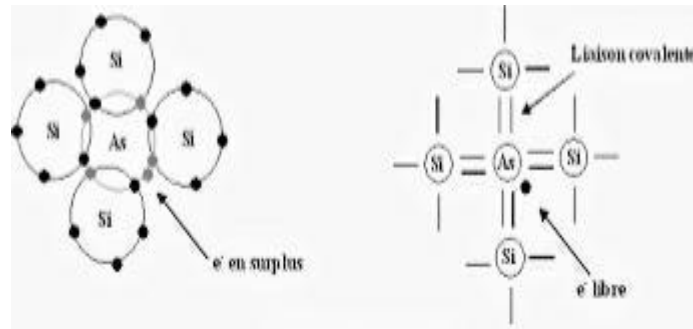


Figure 1. 8: Semi-conducteurs de type n

1.13.2 Semi-conducteurs type p

Il s'agit d'un semi-conducteur dont la concentration en trous est largement supérieure à la concentration en électron. Donc cette fois les impuretés sont de type accepteur d'électrons ce qui correspond aux atomes de la colonne III, pour un cristal constitué d'atomes de la colonne IV. La figure (1.10) donne un aperçu de ce qui se passe pour un cristal de silicium dans lequel on introduit des atomes de Bore. Le Bore se retrouve ionisé négativement (Charge fixe) et on assiste au déplacement d'un trou (libre) d'atome en atome. Donc on associe au Bore un niveau accepteur E_A dans la bande interdite très proche de la bande de valence. De la même façon que pour le semi - conducteur dopé n, la concentration en trous du semi - conducteur sera : [19]

$$p = n + N_a ; \quad n = \frac{ni^2}{N_A} \quad (1.10)$$

Le niveau de fermi E_F :

La densité de porteurs intrinsèque est donnée par :

$$n_i = N_c e^{-\left(\frac{E_C - E_F}{kT}\right)} = N_v e^{\left(\frac{E_V - E_F}{kT}\right)} = \sqrt{N_c \cdot N_v} \cdot e^{-\left(\frac{E_g}{2kT}\right)} \quad (1.11)$$

En conséquence, le niveau de Fermi E_{FP} se déplace du milieu de la bande interdite vers la bande de valence.

Donc :

Chapitre 1 : Généralités photovoltaïques

$$E_{fi} - E_{fp} = kT \ln \frac{N_A}{n_i}$$

(1.12)

$$E_{fi} = E_{fp} + kT \ln \frac{N_A}{n_i} \quad (1.13)$$

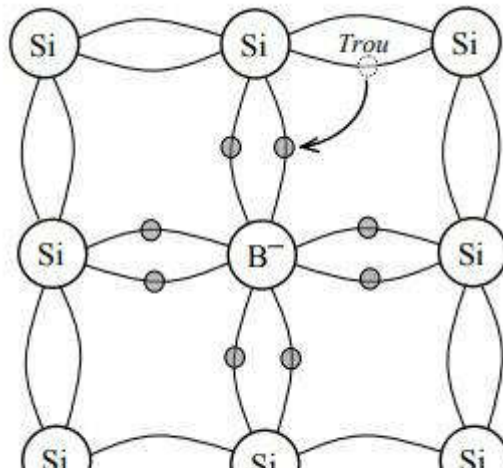


Figure 1. 9: Semi-conducteurs de type P

1.14 L'absorption

L'absorption se réfère au processus par lequel l'énergie d'un photon est prise par une autre entité, par exemple, un atome qui fait une transition entre deux niveaux d'énergie électronique. Le photon disparaît lors de ce processus. Ainsi, l'une des propriétés d'un matériau photovoltaïque est son coefficient d'absorption (α). Ce coefficient est donc lié à l'énergie du gap et à l'énergie des photons incidents [20].

- **Le coefficient d'absorption :**

L'énergie minimale nécessaire au photon incident pour provoquer la transition électronique dépend de la largeur de bande interdite du matériau, c'est la raison pour laquelle on détermine un coefficient d'absorption intrinsèque. Pour des photons d'énergie inférieure à E_g , le coefficient d'absorption est négligeable et la radiation lumineuse traverse le matériau avec une atténuation quasiment nulle [21].

A proximité du seuil d'absorption intrinsèque, le coefficient d'absorption est proportionnel à la différence $(h\nu - E_g)$:

Chapitre 1 : Généralités photovoltaïques

$$\alpha = B(h\nu - E_g)^a \quad (1.14)$$

L'indice a prend des valeurs différentes, selon que le matériau est à transition interbande directe ($a=1/2$), ou indirecte ($a=2$). Le facteur multiplicatif B dépend du matériau.

1.15 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 [22]. Le taux de génération s'écrit :

$$G = (1 - R). e^{(-\alpha x)} \quad (1.15)$$

Avec :

- R : coefficient de réflexion

- x : distance de la surface

1.16 Recombinaisons

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 ($t < 10^{-8}$ s). Ce retour de l'électron de l'état excité vers l'état stable peut avoir lieu selon plusieurs façons [23].

- **Recombinaisons Radiatives**

La recombinaison radiative correspond à la recombinaison d'un électron de la bande de conduction avec un trou de la bande de valence, avec émission d'un photon d'énergie proche de celle du gap du matériau (processus inverse de la photo génération).

Le mécanisme de recombinaison radiative est un processus dominant dans les semiconducteurs à gap direct comme le GaAs. Pour le silicium à gap indirect, ce mécanisme est relativement rare du fait que cette transition ne peut avoir lieu qu'avec l'assistance d'un photon [25].

Chapitre 1 : Généralités photovoltaïques

- **Recombinaisons en surface**

La surface d'un semiconducteur 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 $T=300^{\circ}\text{K}$ [23].

- **Recombinaisons Auger**

Ce type de recombinaison est décrit comme un mécanisme à trois entités. En effet, l'excès d'énergie issu de la recombinaison d'un électron de la bande de valence peut être transféré à une troisième particule libre, électron ou trou. Ces charges sont considérées comme quasi-libres et n'interagissant pas entre elles [25].

- **Recombinaisons RSH (Read-Shockley-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 [24].

- **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 : [26]

$$R_{n,p} = \frac{\Delta n,p}{\tau_{n,p}} \quad (1.16)$$

Avec :

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

Chapitre 1 : Généralités photovoltaïques

1.17 Les équations des semi-conducteurs

1.17.1 Equation de Poisson

L'équation de Poisson nous permet de calculer le champ électrique et le potentiel électrostatique dans les dispositifs à semi-conducteurs [22]

$$\text{div. } E = \frac{\rho}{\varepsilon} \quad (1.17)$$

E est le champ électrique, ρ la densité de charges électriques, ε la permittivité.

$$E = -\text{grad } \varphi \quad (1.18)$$

φ est le potentiel électrostatique

$$\rho = q(p - n + N_d - N_a) \quad (1.19)$$

Donc l'équation de Poisson devient :

$$\text{div}(\varepsilon E) = q(p - n + N_d - N_a) \quad (1.20)$$

1.17.2 Les équations de continuité des électrons et des trous

$$\text{div. } (J_n) = q(R - G) \quad (1.21)$$

$$\text{div. } (J_p) = q(R - G) \quad (1.22)$$

Avec : R taux de recombinaison, G taux de génération

• Les densités de courant des électrons et des trous sont données par [26] :

$$J_n = q\mu_n n \frac{\partial E_{Fn}}{\partial x} \quad (1.23)$$

$$J_p = q\mu_p p \frac{\partial E_{Fp}}{\partial x} \quad (1.24)$$

Avec :

- μ_n et μ_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

Chapitre 1 : Généralités photovoltaïques

1.18 La jonction PN

Une jonction PN est l'accolement d'une région dopée P et d'une région dopée N. Lors de cet assemblage les porteurs de charges libres s'attirent et se recombinent dans la zone de jonction où les porteurs libres disparaissent : c'est la zone de transition [27].

Les trous de la région P vont diffuser vers la région N laissant derrière eux des ions, qui constituent autant de charges négatives fixes. Il en est de même pour les électrons de la région N qui diffusent vers la région P laissant derrière eux des charges positives [28].

Le potentiel électrostatique varie dans la zone de la jonction PN et la différence de potentiel V_d , appelée tension de diffusion, atteint des valeurs non négligeables [28].

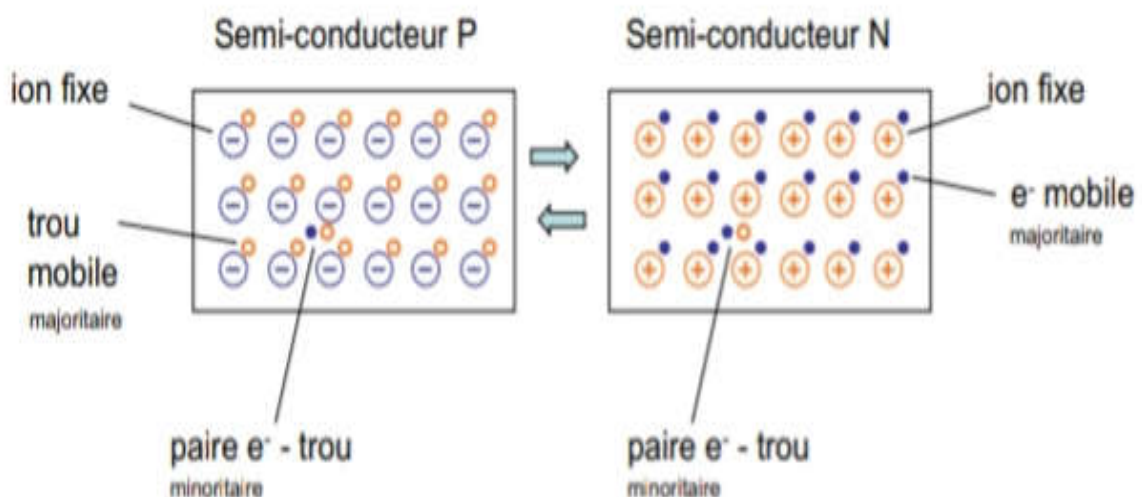


Figure 1. 10: jonction PN

1.19 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.

Chapitre 2 : Les *cellules solaires à base de CZTS*

2.1 Introduction

Ces dernières années, le secteur des énergies renouvelables continue à produire dans l'esprit des chercheurs un grand intérêt ; en particulier la technologie photovoltaïque ne cesse de croître grâce au développement de nouvelles techniques de fabrication et à l'amélioration de la conversion en efficacité des cellules solaires. De nos jours, le marché des cellules solaires est encore dominé par le silicium cristallin qui occupe environ 80% du marché [29]. Le coût élevé de ces cellules solaires est principalement dû à la grande utilisation du matériau et des processus de fabrication qui utilisent des techniques compliquées et très chères. Rendre les processus de production simple et moins cher ou fabriquer les cellules solaires qui consomment moins de matériau pourrait réduire les coûts de celles-ci. Une des alternatives est la cellule solaire en couches minces car elle consomme moins de matériau. Le problème cependant avec cette technologie est que les premières cellules solaires en couches minces qui ont montré des efficacités de 16.5 et 20.3% à savoir les filières CdTe et CIGS respectivement sont faits d'éléments rares et toxiques (Te, Cd, Ga, In, Se). Face à ces difficultés, des mesures devront être prises pour contrecarrer ces problèmes de rareté et de toxicité afin de produire des cellules solaires à bas coût et qui respectent l'environnement. Le matériau quaternaire fait de cuivre, zinc, étain et soufre connu sous l'appellation CZTS est l'une de ces mesures [30].

2.2 Les cellules solaires couches minces

Les cellules solaires en couches minces ont été développées depuis une vingtaine d'années et les deux matériaux les plus éminemment utilisés aujourd'hui dans ces technologies photovoltaïques (PV) en couches minces sont le Cu (In,Ga)Se₂ (CIGS) et le CdTe. Ces cellules solaires sont d'un grand intérêt compte tenu de leurs propriétés opto-électriques pour l'absorption de la lumière. Elles affichent aujourd'hui des rendements encourageants qui approchent ceux du silicium cristallin. Ces dernières années, le Cu₂ZnSnS₄ (CZTS) attire beaucoup d'attention comme matériau absorbeur dans les cellules PV en couches minces. Le potentiel du CZTS comme absorbeur de lumière dans les cellules solaires a été découvert en 1988 par Ito et Nakazawa [31]

Chapitre 2 : les cellules solaires à base de CZTS

2.3 Cellules solaires à base de CZTS

Le CZTS est un semi-conducteur composé de cuivre, de zinc, d'étain et de soufre, qui sont dans chaque cas pour l'instant des éléments suffisamment abondants, aucun d'entre eux nocif pour l'environnement dans Les quantités utilisées. Bien qu'il s'agisse d'un matériau relativement nouveau, il existe déjà des résultats prometteurs qui indiquent que le CZTS pourrait être utilisé comme matériau absorbant pour les cellules solaires. [32]

Les composés quaternaires $Cu_2-II-IV-VI_4$, tels que Cu_2ZnSnS_4 (CZTS) et $Cu_2ZnSnSe_4$ (CZTSe) ont attiré une attention considérable et ont été considérés comme l'une des « nouvelles générations » les plus prometteuses en raison de leur énergie de bande interdite directe presque optimale de $1,4 \sim 1,6$ eV, grande coefficient d'absorption ($>10^4 cm^{-1}$) et efficacité de conversion de puissance limite théorique de 32,2 %. Leurs constituants, Zn et Sn, sont non toxiques et abondants sur terre par rapport aux éléments In et Ga dans CIGS. Ainsi, visant à développer des cellules solaires exemptes de contaminants environnementaux, CZTS est considéré comme un candidat potentiel en tant qu'absorbant pour la prochaine génération de cellules solaires à couches minces. Le développement des cellules solaires évolue vers une cellule solaire efficace à faible coût utilisant un film mince [33]

2.4 Structure d'une cellule solaire à base de CZTS

Les cellules CZTS renferment en réalité un absorbant fait de cuivre, de zinc, d'étain, de soufre et de sélénium de formule $Cu_2ZnSn(S,Se)_4$. L'ajout d'un autre semi-conducteur dopé est requis pour former une hétérojonction, comme pour les cellules CIGS.

Chapitre 2 : les cellules solaires à base de CZTS

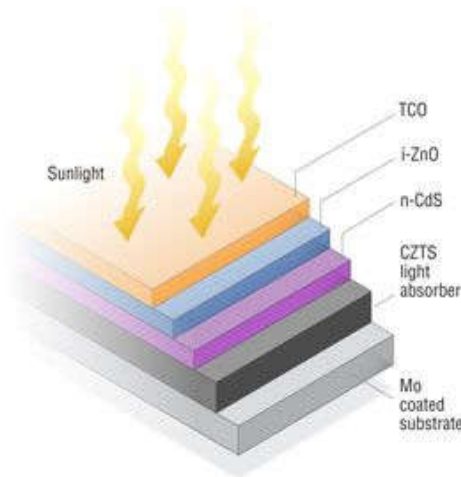


Figure 2. 1: Structure d'une cellule photovoltaïque à base de CZTS [34]

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 de [35] :

- 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 ;
- D'une couche de CZTS (épaisseur d'environ 1,5 μm) ;
- Du conducteur inférieur, généralement du molybdène (épaisseur de 300 nm) ;
- Du substrat.

2.4.1 Structure cristallographique

Dans la littérature, deux modèles structuraux de minéraux naturels : stannite (groupe d'espace

I-42m) et k esterite (groupe d'espace I-4) sont utilis es pour décrire les compos es CZTS [36][37].

La k esterite et la stannite sont des structures cristallines tétragonales qui dérivent de la structure sphalérite de ZnS et tirent leurs noms de minéraux naturels de formule générale $\text{Cu}_2(\text{Fe}_x, \text{Zn}_{1-x}) \text{SnS}_4$ (la stannite est plus riche en fer que la k esterite). Ces deux structures sont très proches. Les caractérisations aux diffractions de Rayons X (DRX) et la spectroscopie

Chapitre 2 : les cellules solaires à base de CZTS

Raman ne permettent pas de bien les dissocier. Cette difficulté de différencier les deux structures peut être observée à travers leurs paramètres de mailles présentés dans le tableau 2.1. Sur ce tableau on observe bien que les valeurs des paramètres de maille des composés CZTS k esterite et stannite sont presque égales. La raison principale pour laquelle les études structurales ne permettent pas de trancher clairement entre la k esterite et la stannite est due au fait que le cuivre et le zinc sont très proches dans le tableau périodique. Ainsi les facteurs de diffusion atomiques de ces deux éléments sont presque identiques dans les conditions expérimentales standard de laboratoire, ce qui rend pénible la différenciation de ces deux structures cristallines.

La principale différence entre ces deux structures est la distribution des cations dans le plan perpendiculaire à l'axe c (voir fig.2. 1). La position des atomes de cuivre et de zinc diffère selon les structures [39].

Cu ₂ ZnSnS ₄		
Paramètres de maille	K�esterite	Stannite
A(�)	5,326; 5,427; 5,428; 5,448	5,325; 5,436; 5,438
c(�)	10,6663;10,864;10,871, 10,889	10,629; 10,85; 10,941

Tableau 2. 1: Paramètres cristallins des structures k esterite et Stannite des composés CZTS rapportés dans la littérature [36,40,41,42].

Expérimentalement, il est très difficile de distinguer la k esterite de la stannite à cause de leurs similarités structurales. La diffraction des neutrons est la technique principalement utilis e pour différencier ces deux structures [40]. La spectroscopie de Résonance Magnétique Nucléaire (RMN) est aussi une des techniques alternatives utilis es pour vérifier qu'un échantillon CZTS, dans son ensemble, présente une structure k esterite plutôt qu'une structure stannite [39].

Chapitre 2 : les cellules solaires à base de CZTS

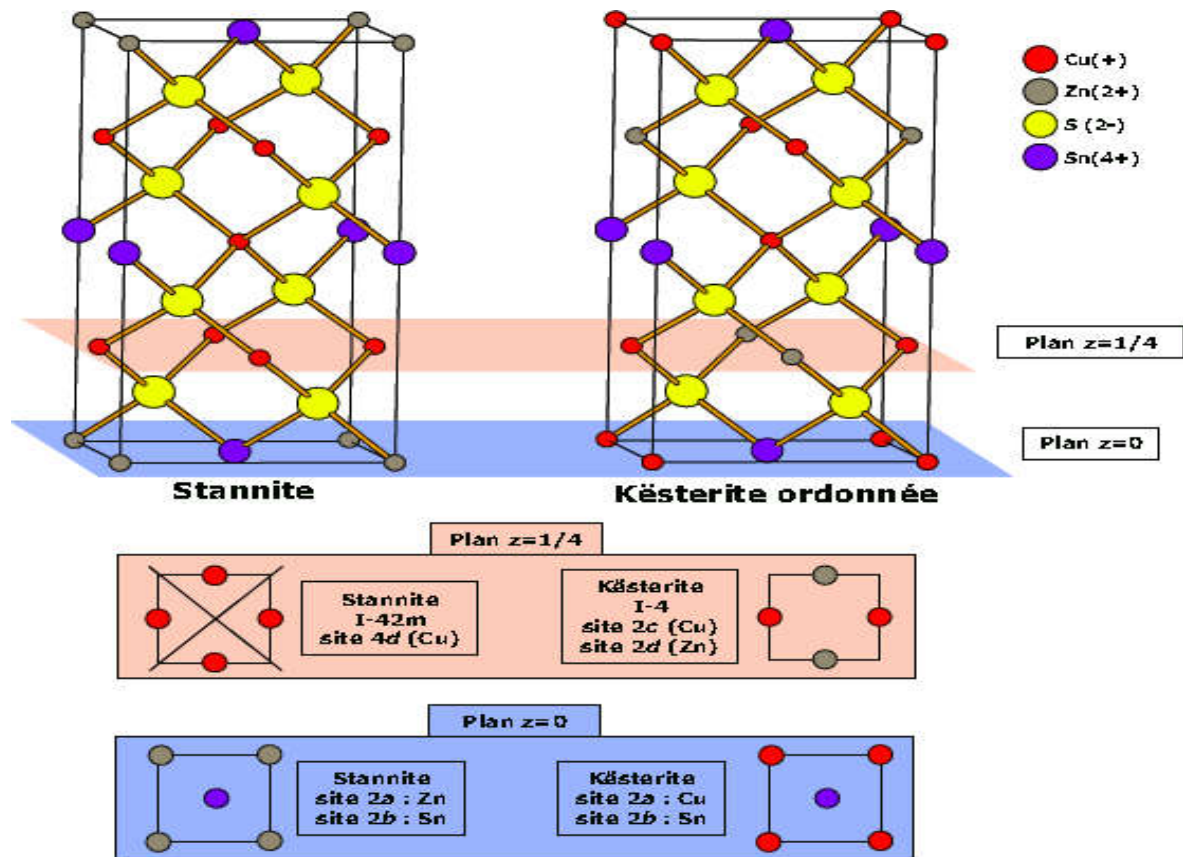


Figure 2. 2: Représentation des structures stannite et kèsterite [38].

Par ailleurs, tous les calculs *ab initio* [43,41] ont montré que la kèsterite est la structure la plus stable avec une énergie de formation faible par rapport à la structure stannite [44], la différence d'énergie entre ces deux structures est faible et serait de l'ordre de 3 meV/atome. Néanmoins, la kèsterite reste la structure la plus stable pour le CZTS. C'est ce qui fait que les composés CZTS adoptent en général la structure kèsterite [39]. Les mesures basées sur la cristallographie des composés CZTS montrent que, quelle que soit la composition chimique, leurs composés CZTS adoptent toujours la structure kèsterite [40].

2.5 Les propriétés de CZTS

Ce film semi-conducteur peut être obtenu par le remplacement de la moitié des atomes d'indium dans le CuInS_2 chalcopyrite avec du zinc, et par le remplacement de l'autre moitié avec de l'étain, ce qui est préférable pour la réalisation d'une cellule solaire à faible coût. Donc, quand CdS forme une hétérojonction avec CZTS, il doit être remplacé par le sulfure de zinc (ZnS) parce que le ZnS accorde la bande interdite [45].

Chapitre 2 : les cellules solaires à base de CZTS

Selon les calculs de bilan de photons de Shockley-Queisser, CZTS devrait avoir un rendement théorique de plus de $\sim 30\%$ [46]. Le meilleur rendement est celui des cellules solaires CZTS pauvres en Cu et riches en Zn favorisant la croissance d'autres phases au cours de la formation du film [47]. En raison de la faible proportion de Zn et la haute proportion de Cu la couche CZTS devient un semiconducteur de type p [48].

En conséquence, la couche CZTS a des propriétés similaires à la couche de CIGS. Un avantage principal de ce dispositif est que la structure standard des cellules solaires peut être adoptée [49].

2.5.1 Propriétés électroniques

Le CZTS est un matériau semi-conducteur possédant un gap direct (E_g), variant de 1.4 à 1.7 eV. La valeur optimale du gap dépend de plusieurs facteurs. Du point de vue de l'absorption des photons, il est préférable d'avoir une valeur du gap relativement réduite, permettant d'absorber un spectre plus large (plus grandes longueurs d'onde). Il en résulte un courant plus important délivré par la cellule solaire (J_{sc}). Cependant, c'est la valeur du gap qui détermine la tension maximale délivrée par la cellule. Afin de maximiser le rendement de conversion, il est donc nécessaire d'obtenir un compromis idéal entre courant et tension. La plupart des résultats expérimentaux publiés dans le domaine des cellules CZTS montrent que les meilleurs rendements sont obtenus avec un gap d'environ 1.5 eV [50].

Pour former une jonction P-N avec des matériaux photovoltaïques classiques, on procède en général à un dopage ou un recuit. Par exemple pour le cas du silicium, un dopage volontaire de type n et p sont effectués pour former l'homojonction. Dans le cas du CdTe qui est naturellement de type n, un recuit est opéré pour le rendre de type p afin de former l'hétérojonction P-N avec le CdS (type n). Contrairement à ces matériaux PV, le semi-conducteur CZTS est naturellement dopé p. Ce comportement a été attribué à la présence de défauts intrinsèques ayant une faible énergie de formation [51].

2.5.2 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. Elle varie entre ces deux valeurs pour le CZTSSe et peut être modulée grâce au taux de soufre et de sélénium dans le matériau.

Le CZTSSe possède un coefficient d'absorption supérieur à 10^4 cm^{-1} au maximum d'émission

Chapitre 2 : les cellules solaires à base de CZTS

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 micromètre [52].

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 [53] :

- La température.
- L'épaisseur de la couche
- La composition de la couche

2.5.2.1 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 [53].

2.5.2.2 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.[54]

2.5.2.3 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 [53].

2.6 Avantages de CZTS

- 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 cm^{-1} .
- Des éléments constitutifs de CIGS sont chers (In et Ga) et d'autres toxiques (Se). En revanche, CZTS est un matériau semi-conducteur comprenant des éléments abondants et donc à faible coût et non-toxiques.
- Une efficacité de conversion énergétique plus de (12,6% en laboratoire)

Chapitre 2 : les cellules solaires à base de CZTS

2.7 Cellules multi-jonctions

Les cellules multi-jonctions vont permettre d'inventer de nouvelles techniques de production d'électricité à travers les panneaux solaires. Un semi-conducteur comme le silicium ne peut produire de l'électricité qu'à partir d'une certaine longueur d'onde de rayon solaire.

Le principal intérêt des cellules multi-jonctions réside dans leur aptitude à convertir une partie beaucoup plus importante du spectre solaire que les cellules de première génération (avec une seule jonction) grâce à l'utilisation de différents matériaux semi-conducteurs de gaps différents.

Ainsi, une cellule multi-jonctions composée d'une infinité de cellules mono-jonction de gaps différents convertirait le spectre solaire de façon optimale.

2.7.1 Cellule tandem

Dans la configuration tandem (fig.2.3), 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 :

$$\eta = \frac{\sum V_{co} \times \min(J_{cc})}{P_i} \times FF \quad (2.1)$$

Chapitre 2 : les cellules solaires à base de CZTS

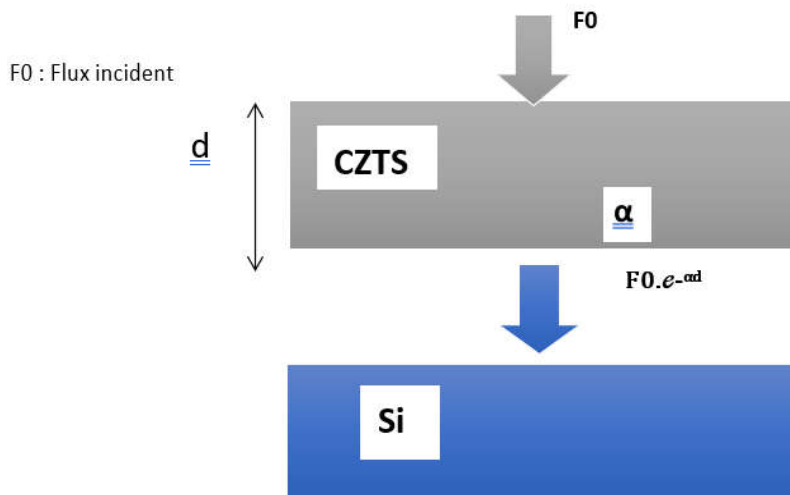


Figure 2. 3: Cellule tandem

2.7.2 Cellule cascade :

Dans la configuration cascade (Fig.2.4), 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

$$\eta = \frac{\sum P_m}{P_i} \quad (2.2)$$

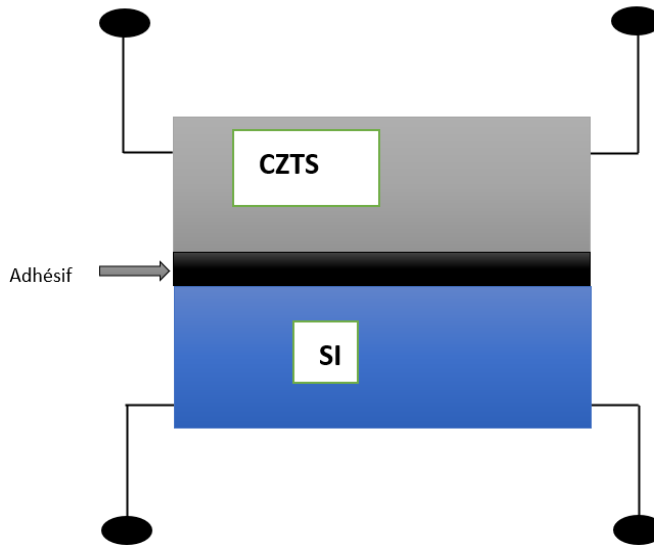


Figure 2. 4: Cellule cascade

2.8 Caractéristiques du matériau silicium

L'industrie photovoltaïque est concentrée à plus de 90% sur l'utilisation du silicium comme matériau de base. Ce semi-conducteur présente en effet, différents avantages : il est abondant sur la surface du globe car il est facilement extrait à partir du sable ; il n'est pas toxique comme certains semi-conducteurs (III-V) ; il possède un oxyde naturel (SiO_2) présentant d'excellentes propriétés électroniques et il peut se doper facilement (avec le phosphore ou le bore). Son seul véritable inconvénient est son gap indirect à 1,1 eV. Ceci entraîne une absorption du rayonnement plus faible qu'avec un matériau à gap direct. Pour absorber 90% du spectre solaire, il faudra utiliser une épaisseur de 100 μm pour le silicium, alors que seulement

1 μm de GaAs suffisent. De plus, la largeur de bande interdite du silicium fait qu'il n'est pas le mieux adapté pour capter la part optimale du spectre solaire (entre 1 et 1,7 eV).

Le silicium reste cependant le matériau le plus utilisé dans le photovoltaïque. Outre les avantages précités, il bénéficie d'une implantation importante et durable dans l'industrie de la microélectronique. Celle-ci utilise du silicium monocristallin de très haute pureté, obtenu par des méthodes telles que le tirage CZ (Czochralski). Ce type de matériau, qui présente d'excellentes qualités électroniques, est très coûteux. La part du silicium monocristallin y est plus importante, puisque les modules produits selon cette technologie ont un rendement plus élevé que ceux en silicium multicristallin. Le silicium multicristallin est quant à lui

Chapitre 2 : les cellules solaires à base de CZTS

fabriqué à partir de sources de matériau moins raffinées, mais convient aux processus de l'industrie photovoltaïque : il constitue 56,4% des modules fabriqués en 2000. [55]

Les principales caractéristiques du silicium sont regroupées dans le tableau 2.2

Permittivité relative	11.7
Durée de vie des électrons, SRH (μs)	10
Durée de vie des trous, SHR (μs)	10
Bande interdite (eV)	1.12
Affinité électronique (eV)	4.05
Densité effective d'états, bande de Valence (cm^{-3})	2.8×10^{19}
Densité effective d'états, bande de conduction (cm^{-3})	1.04×10^{19}
Mobilité électronique ($\text{cm}^2/\text{V.s}$)	1450
Mobilité des trous ($\text{cm}^2/\text{V.s}$)	500

Tableau 2. 2:Caractéristiques du matériau silicium

2.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons commencé par présenter les caractéristiques des matériaux CZTS et Si. Ensuite, nous avons présenté la structure d'une cellule solaire à base de CZTS. Enfin, nous avons abordé les cellules multi-jonctions tandem et cascade.

Chapitre 3 : Résultats de Simulation

Chapitre 3: Résultat de simulation

3.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter les résultats de la simulation numérique, par le logiciel COMSOL Multiphysics, de la cellule solaire CZTS/Si 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 η 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

Les ingénieurs et les scientifiques utilisent le logiciel COMSOL Multiphysics pour simuler des conceptions, des dispositifs et des procédés dans tous les domaines de l'ingénierie, de la fabrication et de la recherche scientifique. COMSOL Multiphysics est une plateforme de simulation qui offre des capacités de modélisation multiphysique et monophasique entièrement couplées.

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.
- Créer le maillage.
- Exécuter la simulation.
- Post-traiter les résultats.

3.3 Présentation de la cellule à étudier

La structure à étudier est constituée de deux cellules solaires, la cellule supérieure en CZTS avec une large bande interdite ($E_g=1.5\text{eV}$) dont l'épaisseur sera réglable, la cellule inférieure en Si avec une petite bande interdite ($E_g=1,12\text{eV}$) dont l'épaisseur sera fixe. L'objectif de cette structure double jonction est de convertir une large gamme de photons incidents sur la cellule pour qu'elle génère plus de puissance. Les figures 3.1 et 3.2 ci-dessous représentent la structure de la cellule CZTS/Si sous ses deux configurations tandem et cascade. La cellule

Chapitre 3: Résultat de simulation

est soumise à un éclairage de spectre solaire AM1.5 d'une densité de puissance de 1000 W/m^2 , on supposera également que les rayons solaires sont normaux à la surface.

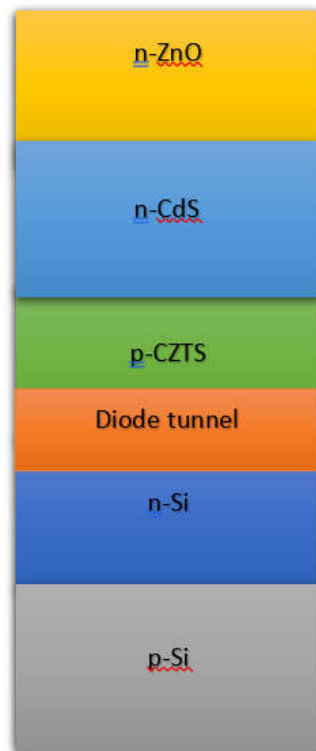


Figure 3. 1: Schéma de la structure de la cellule solaire CZTS/Si tandem simulée

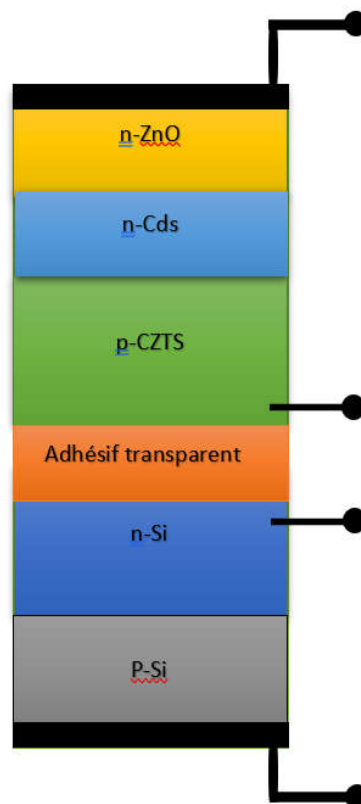


Figure 3. 2: Schéma de la structure de la cellule solaire CZTS/Si cascade simulée

Chapitre 3: Résultat de simulation

3.4 Paramètres de simulation

Les paramètres des différentes couches utilisées dans la simulation de la cellule CZTS/Si sont regroupés dans le tableau (3.1).

Paramètres	ZnO	CdS	CZTS	Si
W(um)	0.05	0.05	variable	150
E _g (eV)	3.3	2.45	1.5	1.12
X (eV)	4.45	4.45	4.45	4.45
ε _r	9	10	10	10
N _c (cm ⁻³)	2.2 x 10 ¹⁸	2.2 x 10 ¹⁸	2.2 x 10 ¹⁸	2.2 x 10 ¹⁸
N _v (cm ⁻³)	1.8 x 10 ¹⁹	1.8 x 10 ¹⁹	1.8 x 10 ¹⁹	1.8 x 10 ¹⁹
μ _n (cm ² /V.s)	100	100	100	100
μ _p (cm ² /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 de la cellule supérieure

3.5.1 Caractéristiques courant tension J(V)

La figure (3.3) 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 3μm, la variation devient de plus en plus faible. Quant à la tension de circuit ouvert, elle varie faiblement.

Chapitre 3: Résultat de simulation

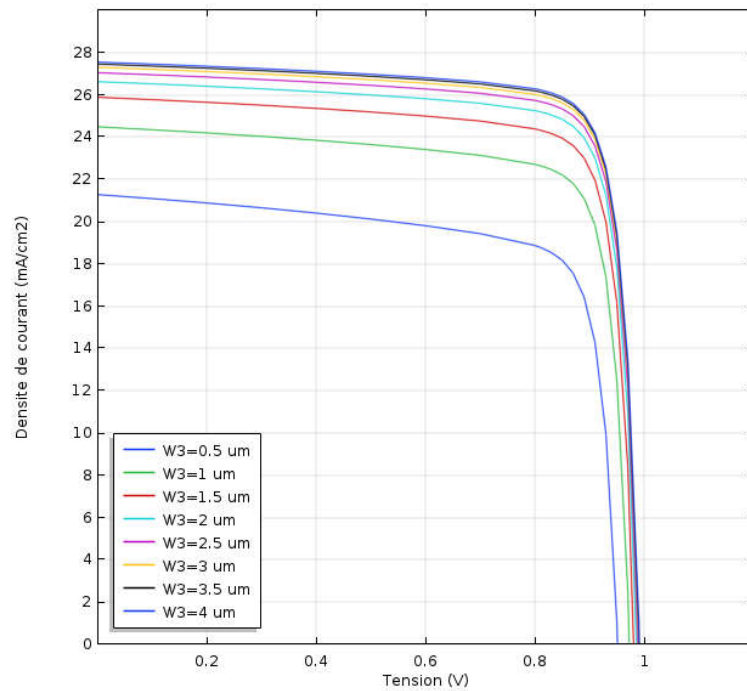


Figure 3. 3: Caractéristiques courant tension pour différentes épaisseurs de la couche CZTS

3.5.2 Caractéristiques puissance tension P(V)

La figure (3.4) 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 3 µm. Quant à la tension de circuit ouvert elle varie très faiblement.

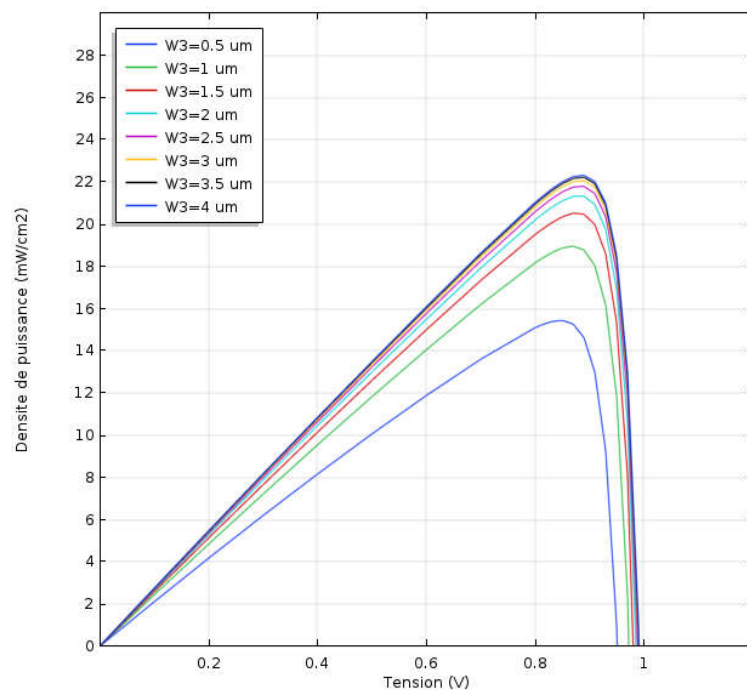


Figure 3. 4:Caractéristiques puissance tension pour différentes épaisseurs de la couche CZTS

Chapitre 3: Résultat de simulation

3.5.3 Densité de 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 (3.5). On remarque que le courant de court-circuit J_{cc} augmente très rapidement entre 0 et $3\mu\text{m}$. On remarque également qu'à partir de l'épaisseur de $3\mu\text{m}$, la variation du courant de court-circuit J_{cc} est faible.

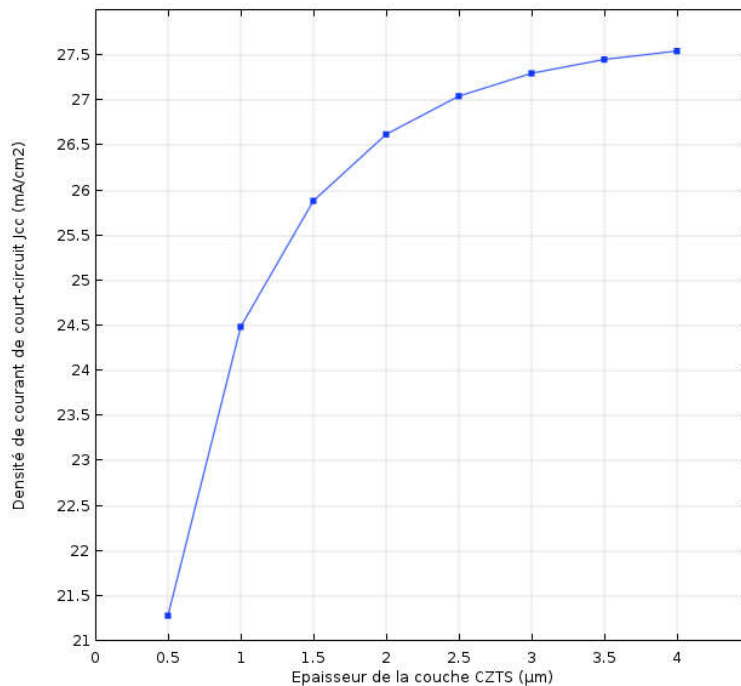


Figure 3. 5: Variation du courant de court-circuit J_{cc} en fonction de la couche CZTS

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 (3.6). On remarque que l'épaisseur de la couche absorbante a une très faible influence sur la tension de circuit ouvert V_{co} .

Chapitre 3: Résultat de simulation

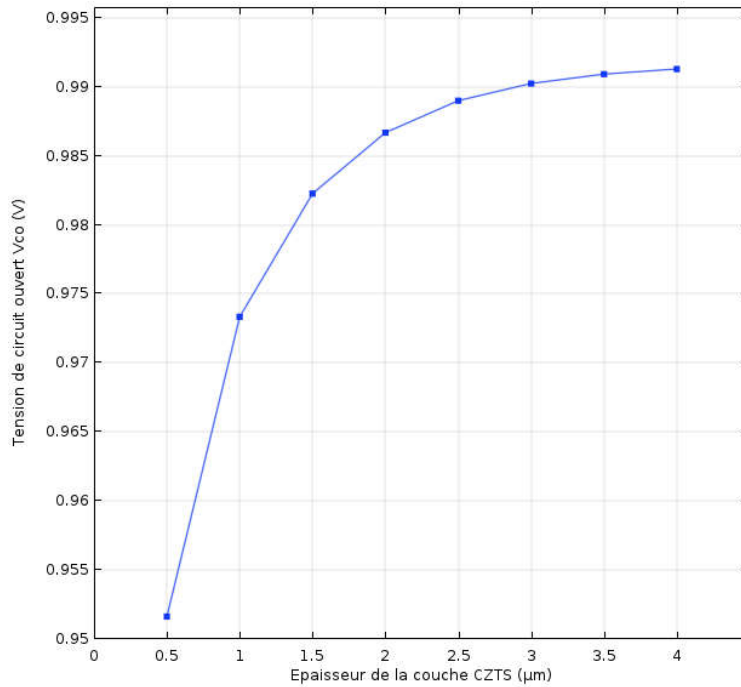


Figure 3. 6: Variation de la tension de circuit ouvert VCO en fonction de la couche CZTS

3.5.5 Puissance maximale P_{max}

Dans la figure (3.7), 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 3μm.

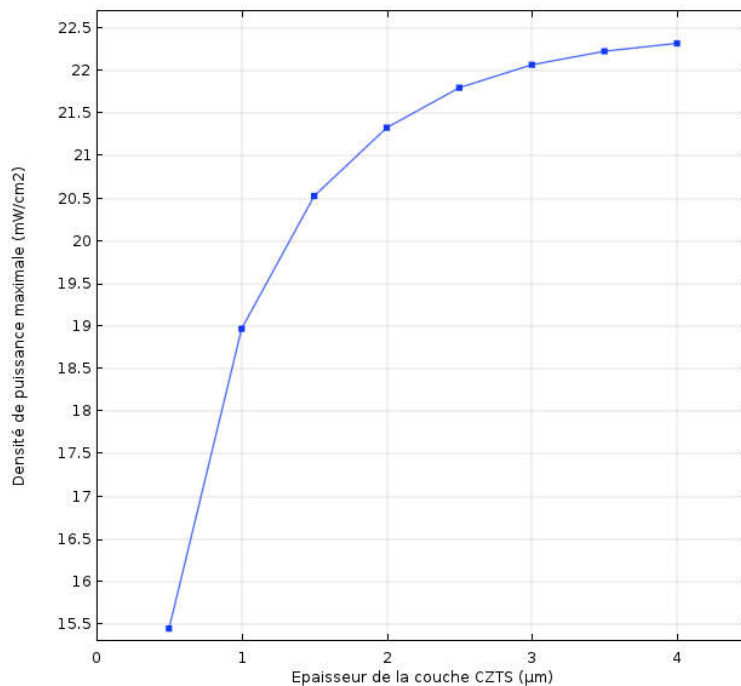


Figure 3. 7: Variation de la puissance maximale en fonction de la couche CZTS

Chapitre 3: Résultat de simulation

3.5.6 Le rendement η

La variation du rendement en fonction des épaisseurs de la couche absorbante CZTS dans la cellule supérieure est représentée dans la figure (3.8). On constate une augmentation du rendement avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche, puis à partir d'une épaisseur égale à $3\mu\text{m}$ la variation devient faible.

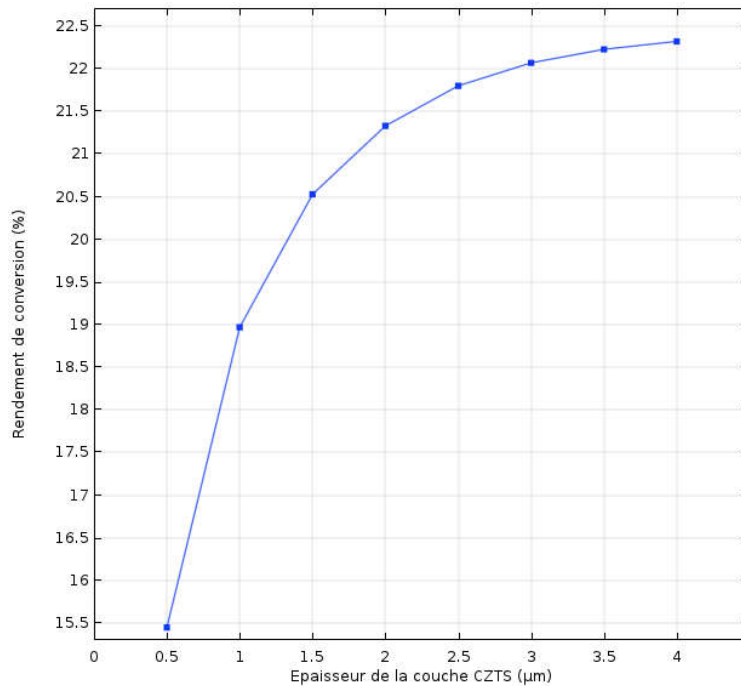


Figure 3. 8:Variation du rendement en fonction de la couche CZTS

3.5.7 Facteur de forme FF

Dans la figure (3.9) 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.

Chapitre 3: Résultat de simulation

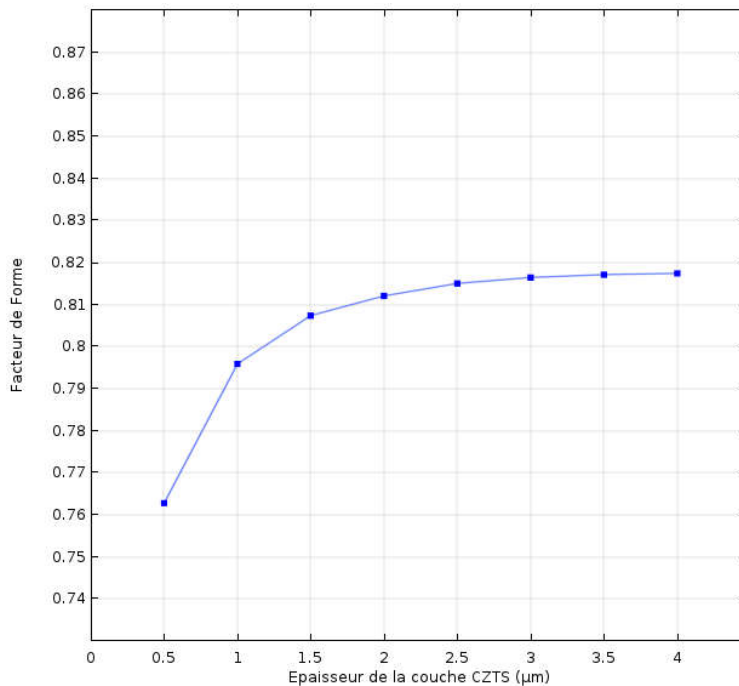


Figure 3. 9:Variation du facteur de forme FF en fonction de la couche CZTS.3.6 Effet de l'épaisseur de la cellule inférieure Si

3.6.1 Caractéristiques courant-tension J(V)

La figure (3.10) représente les caractéristiques courant-tension pour différentes valeurs de l'épaisseur de la cellule inférieure Si (W_4). On constate que le courant augmente avec l'augmentation de l'épaisseur W_4 jusqu'à la valeur $W_4=150\mu\text{m}$, ensuite la variation devient de plus en plus faible. Quant à la tension de circuit ouvert, elle augmente faiblement.

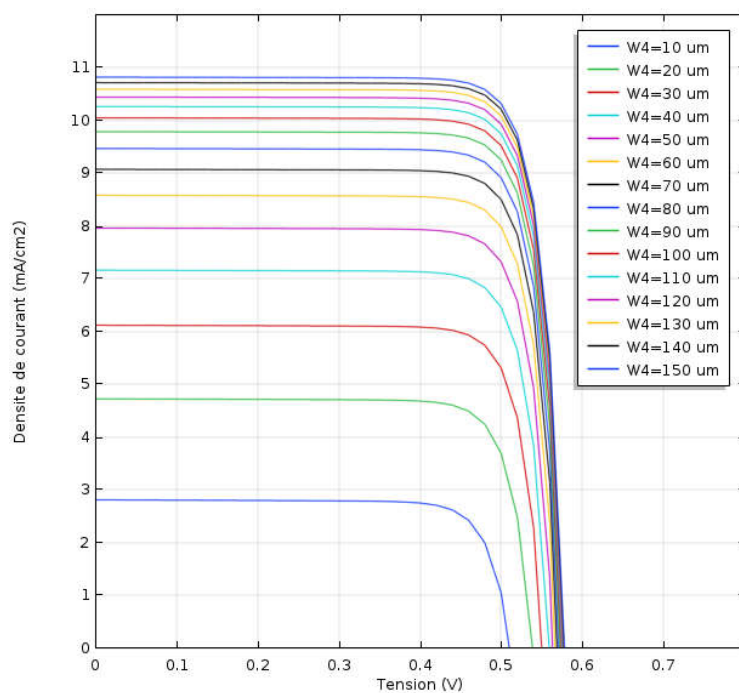


Figure 3. 10:Caractéristiques courant tension pour différentes épaisseurs de la couche Si de la cellule Inférieure

Chapitre 3: Résultat de simulation

3.6.2 Caractéristiques puissance-tension P(V)

La figure (3.11) présente les caractéristique P(V) pour différentes épaisseurs de la cellule Si. On remarque que la puissance augmente avec l'augmentation de l'épaisseur, La variation devient très faible à partir de W4=150um. Quant à la tension de circuit ouvert, elle augmente très faiblement.

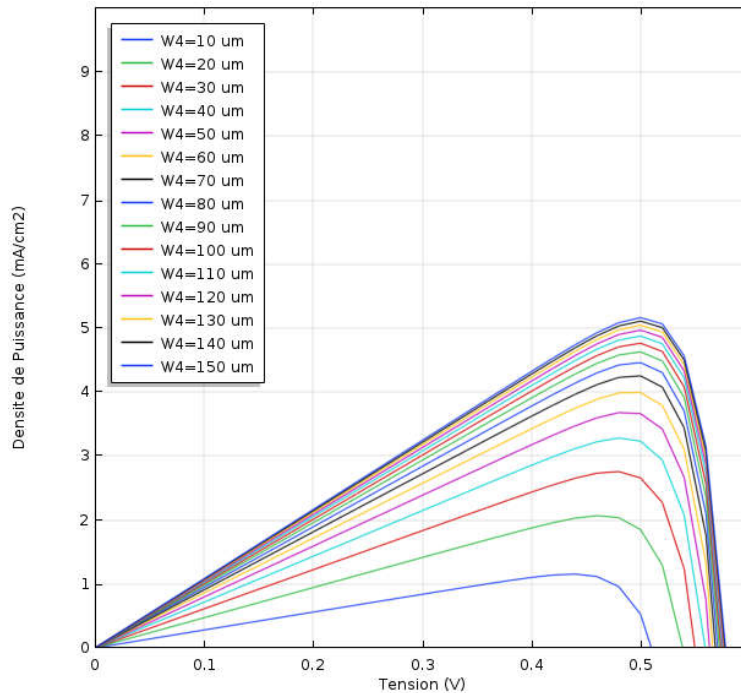


Figure 3. 11:Caractéristiques puissance tension pour différentes épaisseurs de la couche

3.6.3 Densité de courant de court-circuit J_{cc}

La figure (3.12) montre la variation du courant de court-circuit en fonction de différentes valeurs de l'épaisseur W4 de la couche absorbante Si. On remarque que le courant augmente très rapidement de 0 jusqu'à 150um et commence à se stabiliser à partir de W4=140um.

Chapitre 3: Résultat de simulation

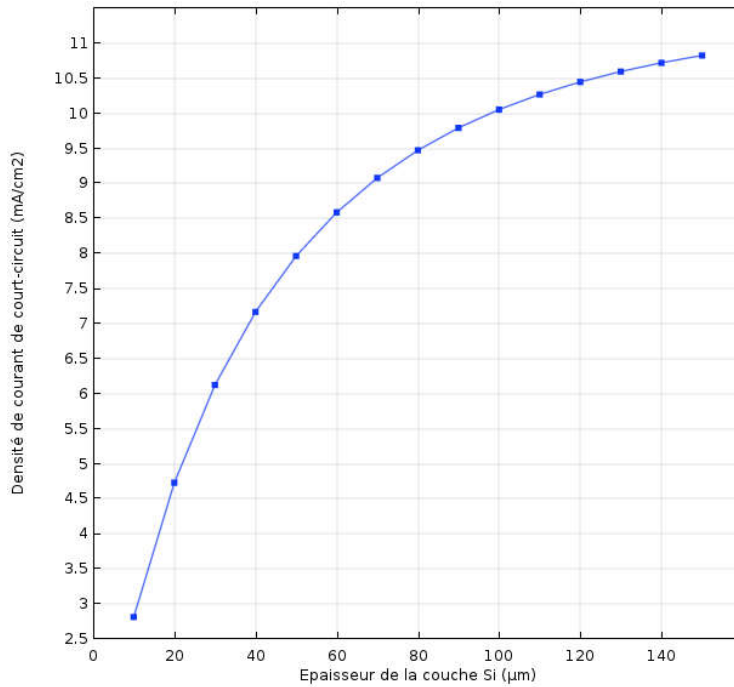


Figure 3. 12: Variation de la densité de courant de court-circuit JCC en fonction de la couche Si

3.6.4 Tension de circuit ouvert V_{co}

L'influence de l'épaisseur de la couche absorbante Si sur la tension de circuit ouvert dans la cellule inférieure est représentée sur la figure (3.13). On voit que l'épaisseur de la couche absorbante à une faible influence sur la tension de circuit ouvert V_{co} .

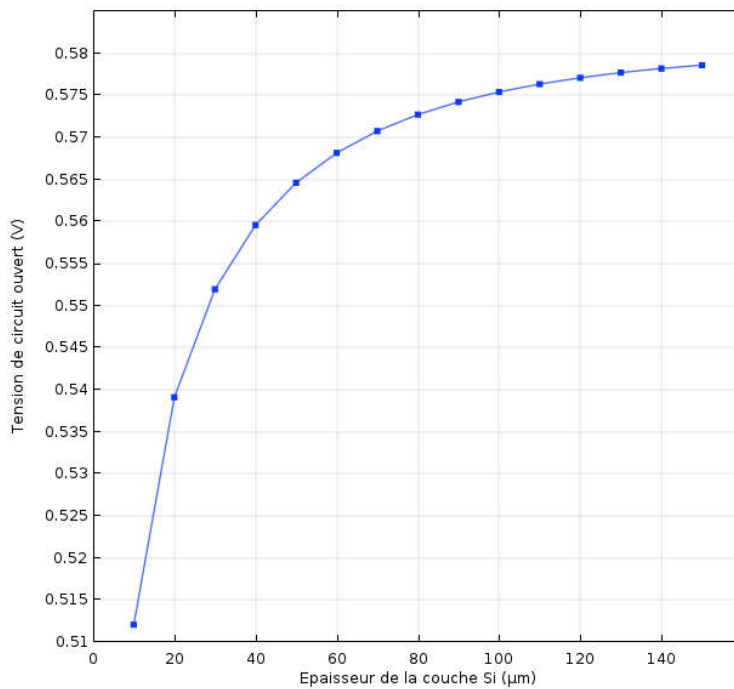


Figure 3. 13: Variation de la tension de circuit ouvert VCO en fonction de la couche Si

Chapitre 3: Résultat de simulation

3.6.5 Puissance maximale P_{max}

Dans la figure (3.14) on constate que la puissance maximale augmente avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche Si. La puissance commence à se stabiliser à partir de $W4=140\mu m$.

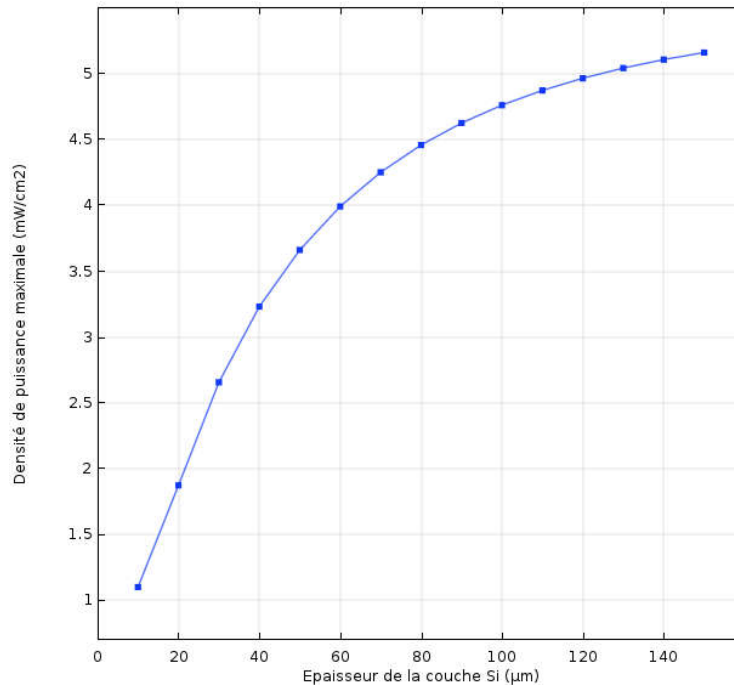


Figure 3. 14:Variation de la puissance maximale en fonction de la couche Si

3.6.6 Le rendement η (%)

La variation du rendement de la cellule inférieure en fonction de $W4$ est illustrée dans la figure (3.15). On remarque que le rendement augmente avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche absorbante. Le rendement commence à se stabiliser à partir de $W4= 140\mu m$.

Chapitre 3: Résultat de simulation

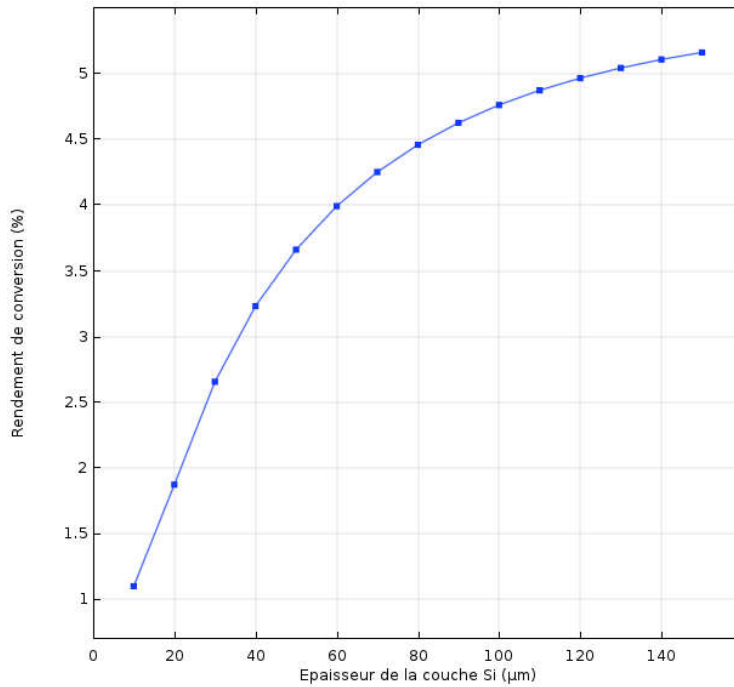


Figure 3. 15: Variation du rendement en fonction de la couche Si

3.6.7 Le Facteur de Forme

Dans la figure (3.16), est représentée la variation du facteur de forme en fonction de l'épaisseur de la couche absorbante Si dans la cellule inférieure. On remarque que le facteur de forme varie faiblement et se stabilise à une valeur de 0.825.

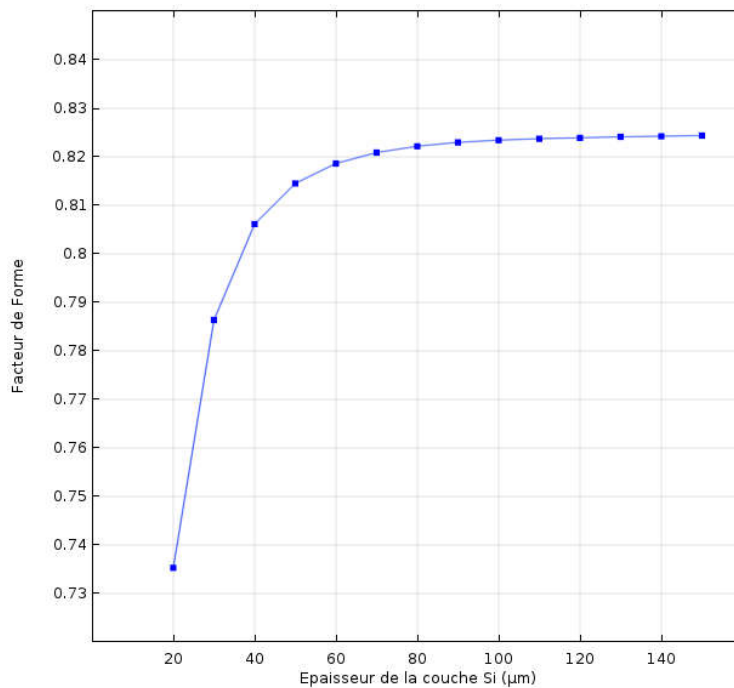


Figure 3. 16: Variation du facteur de forme FF en fonction de la couche Si

Chapitre 3: Résultat de simulation

3.7 Caractéristiques de la cellule CZTS/Si cascade

Les figures représentent les caractéristiques courant-tension et puissance-tension des cellules supérieure et inférieure pour les épaisseurs optimales des couches absorbantes CZTS et Si ($W_3=3\mu\text{m}$ et $W_4=150\mu\text{m}$).

Nous obtenons une puissance maximale optimale de l'ordre de $26\text{mW}/\text{cm}^2$ et un rendement de conversion optimal de l'ordre de 27%.

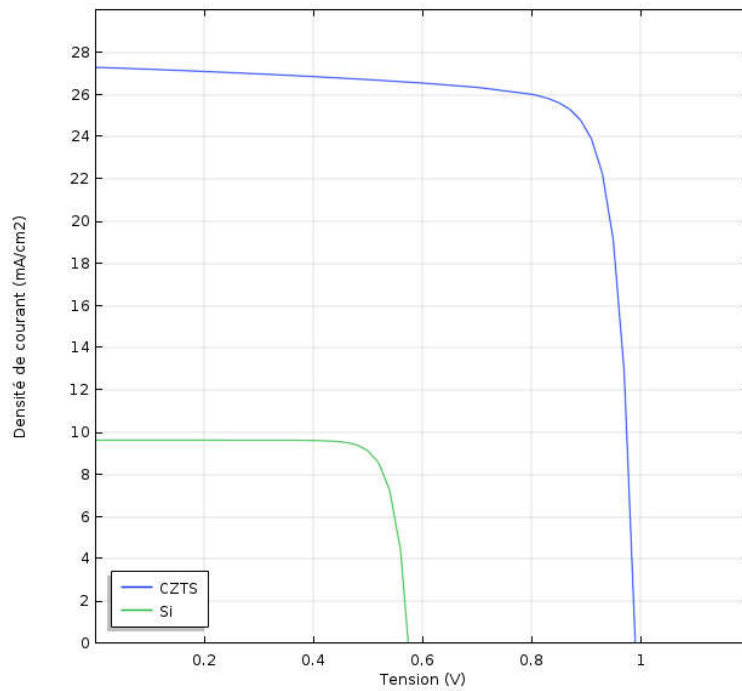


Figure 3. 17: Caractéristiques courant-tension de la structure CZTS/Si cascade

Chapitre 3: Résultat de simulation

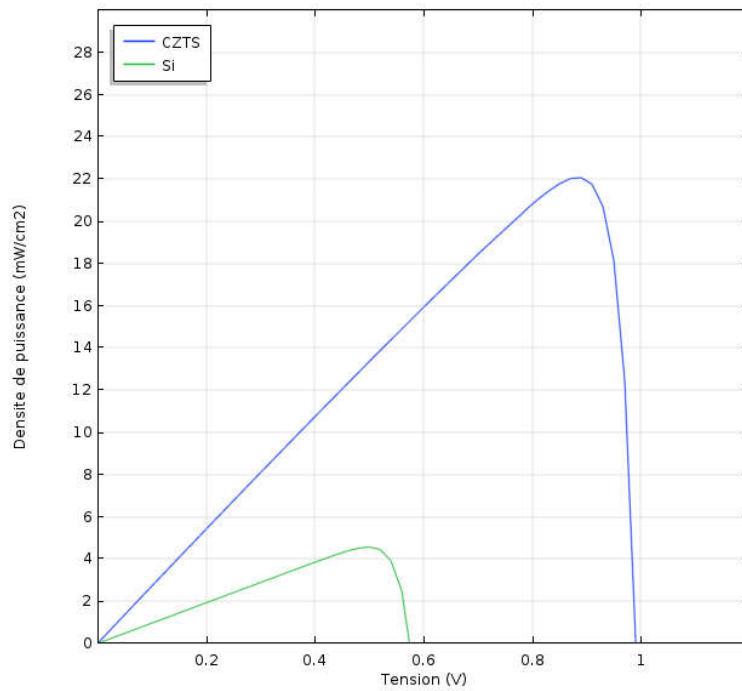


Figure 3. 18: Caractéristiques puissance-tension de la structure CZTS/Si cascade

Le tableau 3.2 regroupe les résultats obtenus pour la cellule CZTS/Si cascade

Paramètres	J_{cc} (mA/cm ²)	V_{co} (V)	P_{max} (mW/cm ²)	η (%)	FF
CZTS	27.2	0.99	22	22	0.82
Si	9.8	0.58	4.8	4.8	0.83
CZTS/Si	/	/	27	27	/

Tableau 3. 2:Caractéristiques de la cellule CZTS/Si cascade

3.8 Caractéristiques de la cellule CZTS/Si tandem

Dans la configuration tandem, les deux cellules sont en série. Le rendement est maximum lorsque les courants des deux cellules sont égaux, la figure 3.19 Représente la variation des courants de court-circuit des deux cellules en fonction de l'épaisseur de la cellule supérieure CZTS.

Chapitre 3: Résultat de simulation

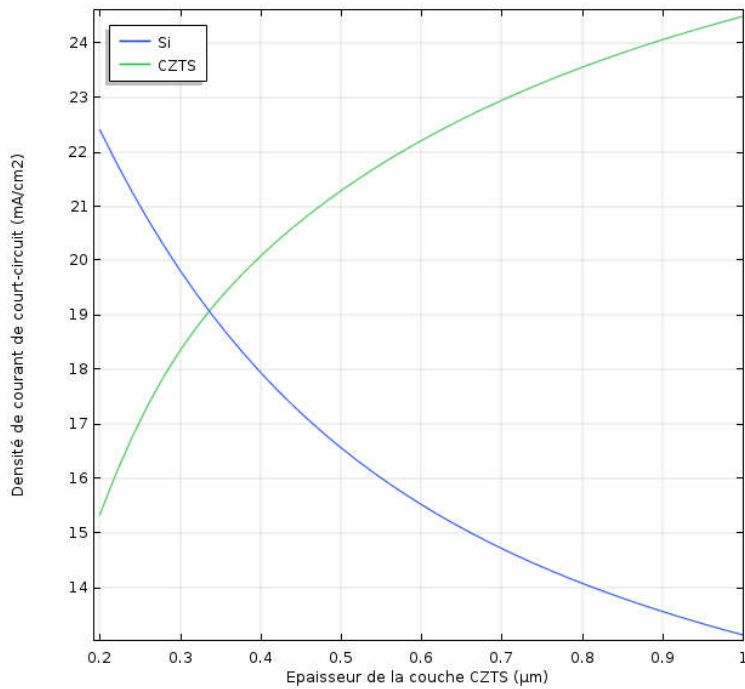


Figure 3. 19:Caractéristiques courant-tension de la structure CZTS/Si tandem D'après la représentation graphique de la variation des deux courants nous remarquons que les deux courbes se rencontrent dans un point d'intersection, la valeur du point représente le courant optimal qui est égale à 19 mA/cm^2 qui correspond à une épaisseur de la cellule CZTS égale à $0,34 \text{ µm}$. Les caractéristiques des deux cellules après optimisation sont représentées dans les figures 3.20 et 3.21.

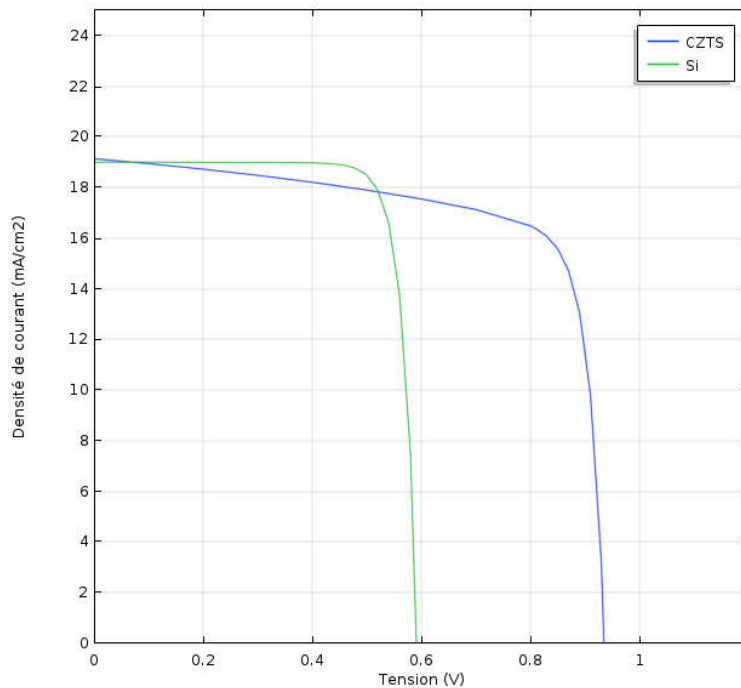


Figure 3. 20:Caractéristiques courant-tension de la structure CZTS/Si tandem

Chapitre 3: Résultat de simulation

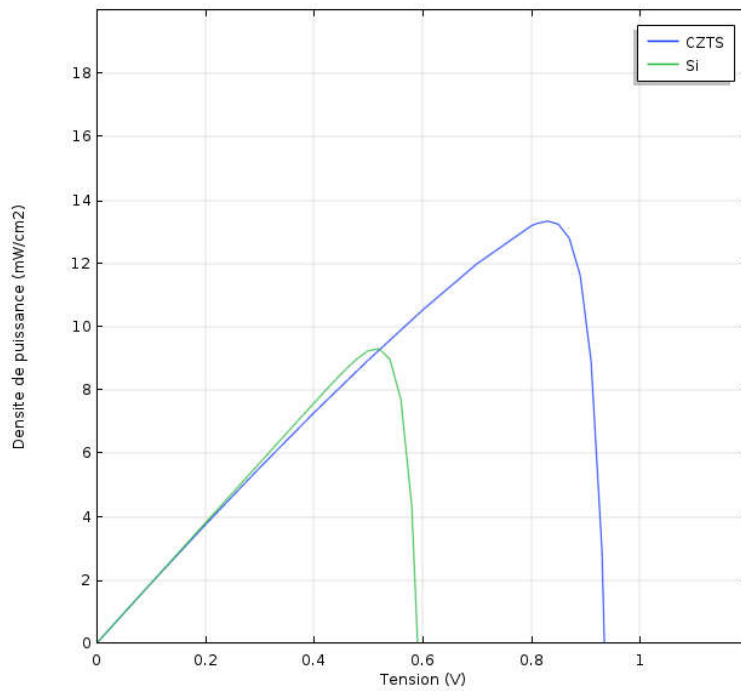


Figure 3. 21:Caractéristiques puissance-tension de la structure CZTS/Si tandem

Paramètres	$J_{cc}(\text{mA}/\text{cm}^2)$	$V_{co}(\text{V})$	$P_{max}(\text{mW}/\text{cm}^2)$	$\eta(\%)$	FF
CZTS	19	0.93	13.5	13.5	0.75
Si	19	0.58	9.3	9.3	0.83
CZTS/Si	19	1.51	22.8	22.8	0.79

Tableau 3. 3:caractéristiques de la cellule CZTS/Si tandem

3.9 Conclusion

Dans ce chapitre, les performances optimales de la cellule solaire à double jonction CZTS/Si cascade et tandem 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% et 23% pour les configurations cascade et tandem respectivement.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce travail, nous avons fait l'étude et la simulation d'une cellule solaire double jonction CZTS/Si.

L'utilisation de l'outil de simulation le logiciel Comsol a permis à travers la détermination de la caractéristiques (J-V) de la cellule d'obtenir les différentes caractéristiques à savoir : le courant de court-circuit J_{cc} , la tension de circuit ouvert V_{co} , le rendement de conversion η et le facteur de forme FF

Les résultats obtenus dans cette étude ont permis de constater que les performances optimales de notre structure dans la configuration cascade sont obtenues pour une épaisseur de la couche absorbante de la cellule supérieure de l'ordre de $3\mu\text{m}$ et de la cellule inférieure de l'ordre de $150\mu\text{m}$ et un rendement de conversion optimal de l'ordre de 27% peut être atteint. Et dans la configuration tandem, les performances optimales sont obtenues pour une épaisseur de la couche absorbante de la cellule supérieure de l'ordre de $0.34\mu\text{m}$ et de la cellule inférieure de l'ordre de $150\mu\text{m}$ et un rendement de conversion optimal de l'ordre de 23% peut être atteint.

Tous ces résultats simulés permettent de conclure que l'optimisation des paramètres de la structure est prometteuse et peut améliorer le rendement de la cellule solaire CZTS.

En perspective, la suite de ce travail peut être envisagé en considérant d'autres matériaux pour la cellule supérieure tels que CIGS ou pérovskite.

Bibliographie

[1] Z. Bendjellouli, « Contribution à la modélisation d'une cellule solaire », Mémoire de magister, Université de Béchar, 2009.

[2]<https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/qu-est-ce-que-l-energie-solaire> .

[3] <https://www.energie-solaire-photovoltaique.com/>

[4] R. Bettignies, “Cellules photovoltaïques organiques dérivées de nouveaux systèmes conjugués”, Thèse de doctorat, Angers, 2003

[5] G, Adam. R, Modeling heterogeneous carbon nanotube networks for photovoltaic application using silvaco atlas software”, Thesis Naval postgraduate school Monterey California. 2012.

[6] Anne Labouret, Michel Viloz, Energie Solaire Photovoltaïque, 3ème édition, Dunod, Paris, 2006.

[7]<https://www.researchgate.net/figure/Composantes-du-rayonnement-solaire-Le-rayonnement-solaire-arrive-au-sol-directement>.

[8] Anne Labouret, Michel Viloz, Energie Solaire Photovoltaïque, 3ème édition, Dunod, Paris, 2006.

[9] Jack Bernard, Energie solaire calcul et optimisation, 2004, France

[10] 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.

[11] Yiannis Tripanagnostopoulos . Hybrid Photovoltaic / Thermal Collectors. Building Integration of Solar Thermal Systems - TU1205 - BISTS, Univ. of Patras, Patra, Greece

[12] REYNAUD Jean-François. « Recherches d'optimums d'énergies pour charge/décharge d'une batterie à technologie avancée dédiée à des applications », T H E S E En vue de l'obtention du DOCTORAT Université Toulouse III Paul Sabatier 2011.

[13] Le photovoltaïque—Module 3 – Fonctionnement et Technologies Novembre 2010 page 3,4,5,6/10.

Bibliographie

[14] ANNE LABOURET, MICHEL VILLOZ « Energie solaire photovoltaïque », deuxième édition, Paris 2003,2005.

[15] Energie solaire photovoltaïque.doc / B . Flèche - D. Delagnes / juin 07

[16] Dr. BELAID LALOUNI Sofia, Maître de Conférences Classe B. Cours Energie Solaire Photovoltaïque Université A. MIRA de BEJAIA 2015.

[17]<https://mcenergiereouvelables.wordpress.com/equipement-photovoltaique/principe-de-fonctionnement-dun-panneau-photovoltaique/>

[18] OUSSIDHOUM Samira : 'Etude comparative des performances des cellules solaires à jonctions simples et multiples', Mémoire de magister, Université MOULOUD MAMMERI Tizi - Ouzou, 2015

[19] M. KAABACHE CHOKRI : 'SIMULATION ET ETUDE DES CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES D'UN CONTACT METAL SEMI - CONDUCTEUR A BASE DU GaAs', Mémoire de master, Université A.MIRA-BEJAIA,2016.

[20]<https://www.techno-science.net/definition/2906.html>

[21] S. Khlifi, Modélisation d'une Cellule Solaire $Ga_{1-x}Al_xAs(n)-GaAs(i)-GaAs(p)$ ", Mémoire magistère, Universitaire de Béchar. 2003.

[22] 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

[23] 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.

[24] BELAIDI Siham : ' Simulation par Excel d'une cellule solaire conventionnelle en Silicium ' , Projet de Fin d'Etudes master , Université Abdel Hamid Ibn Badis de Mostaganem , 2018 .

[25] O. Hardouin Duparc : Pierre Auger - Lise Meitner, *Contributions Comparées à l'effet Auger, Reflets de la Physique*, (2010)

Bibliographie

[26] Mémoire de master thème "Etude et simulation d'une cellule solaire à base couches minces CZTS " présenté par Oubouchou Amina

[27] <https://www.emse.fr/~dutertre/enseignement.html>

[28] H. Mathieu, « Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques », Edition Masson, Paris, 1996.

[29] G. ADIBOINA, Energy eMagazine (published on line), (2010)

[30] Performances des cellules solaires à base de $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (CZTS) : Une analyse par simulations numériques via le simulateur SCAPS Joël Hervé NKUISSI TCHOGNIA^{1,2*}, Bouchaib HARTITI¹, Jean-Marie NDJAKA², Abderraouf RIDAH¹ et Philippe THEVENIN³

[31] K. Ito and T. Nakazawa, "Electrical and Optical Properties of Stannite-Type Quaternary Semiconductor Thin Films," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 27, no. Part 1, No. 11, pp. 2094– 2097, 1988

[32] Bär, M., I. Repins, M. A. Contreras, L. Weinhardt, R. Noufi, and C. Heske. "Chemical and electronic surface structure of 20%-efficient Cu (In, Ga) Se 2 thin film solar cell absorbers." Applied Physics Letters 95 2009].

[33] Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences Review of CZTS Thin Film Solar Cell Technology Md. Fakhrul Islam^{1,2}, Nadhrah Md Yatim^{1, *}, Mohd Azman Hashim -2021

[34] www.futura-sciences.com/planete/dossiers/developpement-durable-cellules-photovoltaiques-coeur-panneaux-solaires-1688/page/12/

[35] <http://www.esdnews.com.au/wp-content/uploads/2016/05/Schematic-of-CZTS-solar-cell>

[36] S. R. Hall, J. T. Szymanski, and J. M. Stewart, "Kesterite, $\text{Cu}_2(\text{Zn,Fe})\text{SnS}_4$ and stannite, $\text{Cu}_2(\text{Fe,Zn})\text{SnS}_4$, structurally similar but distinct minerals. The Canadian Mineralogist," pp. 131–137, 1978.

[37] P. Bonazzi, L. Bindi, G.P. Bernardini, and S. Menchetti, "Can. Mineral.," Can. Mineral., p. 639, 2003.

Bibliographie

- [38] Lafond, L. Choubrac, C. Guillot-Deudon, P. Deniard, and S. Jobic, "Crystal Structures of Photovoltaic Chalcogenides, an Intricate Puzzle to Solve: The Cases of CIGSe and CZTS Materials," *Z. Für Anorg. Allg. Chem.*, vol. 638, no. 15, pp. 2571–2577, décembre 2012.
- [39] L. CHOUBRAC, "Cristallochimie de composés dérivés de $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ pour des applications photovoltaïques." Nantes, 2014.
- [40] S. Schorr, H.-J. Hoebler, and M. Tovar, "A neutron diffraction study of the stannite-kesterite solid solution series," *Eur. J. Mineral.*, vol. 19, no. 1, pp. 65–73, Feb. 2007.
- [41] C. Persson, "Electronic and optical properties of $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ and $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$," *J. Appl. Phys.*, vol. 107, no. 5, p. 053710, Mar. 2010.
- [42] H. Matsushita, T. Maeda, A. Katsui, and T. Takizawa, "Thermal analysis and synthesis from the melts of Cu-based quaternary compounds Cu-III-IV-VI_4 and $\text{Cu}_2\text{-II-IV-VI}_4$ (II= Zn, Cd; III = Ga, In; IV = Ge, Sn; VI = Se)," *J. Cryst. Growth*, vol. 208, no. 1–4, pp. 416–422, 2000.
- [43] J. Paier, R. Asahi, A. Nagoya, and G. Kresse, " $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ as a potential photovoltaic material: A hybrid Hartree-Fock density functional theory study," *Phys. Rev. B*, vol. 79, no. 11, p. 115126, Mar. 2009.
- [44] S. Chen, X. G. Gong, A. Walsh, and S.-H. Wei, "Crystal and electronic band structure of $\text{Cu}_2\text{ZnSnX}_4$ (X= S and Se) photovoltaic absorbers: first-principles insights," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 94, no. 4, pp. 041903–041903, 2009.
- [45] Rachel Hoffman, 2009, "Materials for CZTS Photovoltaic Devices", Chemical Engineering, Cornell University.
- [46] W. Shockley, H. J. Queisser, Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n junction solar cells, *J. Appl. Phys.* 32, 510-519 (1961).
- [47] H. Katagiri, K. Jimbo, M. Tahara, H. Araki, K. Oishi, in : A Yamada, C. Heske, M. Contreras, M. Igalson, S. J.C. Irvine (Eds.), "Thin-Film Compound Semiconductor Photovoltaics" 2009, San Francisco, U. S. A., April 13-17, 2009, *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*, 1165, 2009, 1165-M04-01.

Bibliographie

[48] H. Katagiri, K. Jimbo, S. Yamada, T. Kamimura, W.S Maw, T. Fukano, T. Ito, T. Motohiro, Applied Physics. Exp 1.

[49] Maeda, T.; Nakamura, S. ; Wada, T.: Electronic Structure and Phase Stability of In -Free Photovoltaic Semiconductors, Cu₂ZnSnSe₄ and Cu₂ZnSnS₄ by First-principles Calculation.I: Mater. Res. Soc. Symp. Proc. 1165 (2009).

[51] Taoufik Slimani, « Etude expérimentale de films minces de Cu₂ZnSnS₄ élaborés par électrodéposition et spray ultrasonique : Application à la conversion photovoltaïque », Thèse de Doct orat, Université Mohammed V – Rabat Marok, 2016.

[50] Alphousseyni Sagna, « Etude et élaboration par Close-Spaced Vapor Transport (CSV), d'absorbeurs Cu₂ZnSnS₄ en couches minces polycristallines destinées à la réalisation de photopiles à faible coût.», thèse de doctorat, Universite de perpignan via domitia, 2016.

[52] THÈSE “ Etude des propriétés électroniques de couches minces de CZTSSe”, Présentée par Raphaël FILLON, UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

[53] 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

[54] MAGISTER EN PHYSIQUE ELECTRONIQUE ET MODELISATION thème (ETUDEDES PROPRIETES OPTOELECTRONIQUES DES SEMICONDUCTEURS III-V A BASEDE GALIUM) Par Mme BAGHDADLI Nawel 2010

[55] RABIA,Ahmed Yassine «Propriétés Optiques et Électriques du SiliciumAmorphe Hydrogéné» Mémoire Thèse de doctorat Master Académique UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M’SILA