

République algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université Saad Dahleb Blida 1



Faculté des sciences
Département de physique

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de Master en Physique

Option : Nano Physique

Thème :

**Simulation et optimisation des structures a
base des nouveaux matériaux pour le
photovoltaïque**

Présenté par :

Khouni Walid

Soutenu le 21 /10 / 2020 devant le jury composé de :

Mr. Amrane Amine	MCB	USDB	Président
Mr. Aissat Abdelkader	Professeur	USDB	Encadreur
Mr. Belgroune Nadir	MCB	USDB	Examineur

Blida 1-2019/2020-

REMERCIEMENTS

El hamdou li ALLAH le tout puissant de m'avoir donné la volonté et la santé pour mener à bien ce présent travail.

Je tiens à remercier mon promoteur monsieur A. Aissat Professeur à l'université de Blida, pour sa patience et pour m'avoir guidé et encouragé dans ce travail de recherche, sans oublier M^{elle} Manel Boubakeur pour son aide et sa sympathie.

Je remercie également les membres de jury Dr. Amine Amrane et Dr. Nadir Belgroune pour l'honneur qu'ils me font en acceptant de juger mon travail.

Nos sentiments de profonde gratitude vont à mes professeurs qui tout au long des années d'études nous ont transmis leur savoir sans réserve.

Je n'oublie pas mes collègues avec qui j'ai passé d'excellents moments durant ces dernières années.

Je ne saurais oublier de remercier toutes les personnes qui me sont chères : ma mère mon père ma grande mère mes tantes pour leurs encouragements, et le soutien moral.

ملخص

تمتع الخلايا الشمسية بالقدرة على تحويل كميات كبيرة من ضوء الشمس إلى كهرباء، وقد جذبت الخلايا الشمسية ذات طبقات الرقيقة القائمة على طبقة امتصاص CZTS اهتماماً كبيراً في مجال التكنولوجيا الكهروضوئية. في هذا العمل نستخدم برنامج المحاكاة Silvaco لدراسة أداء الخلايا الشمسية القائمة على CZTS لثلاثة هياكل [CdS / CZTS] و [ZnS / CZTS] و [ZnSe / CZTS] في النهاية سنضيف طبقة من السيليكون من النوع P لتحسين الأداء.

كلمات المفاتيح: CZTS، الخلايا الشمسية، الأداء، طبقات رقيقة، المحاكاة

Résumé

Les cellules solaires ont la capacité de convertir de grandes quantités de lumière solaire en électricité. Les cellules solaires à couche mince basées sur la couche absorbante CZTS ont attiré beaucoup d'attention dans le domaine de la technologie photovoltaïque. Dans ce travail nous utilisons le logiciel de simulation Silvaco pour étudier les performances des cellules solaires à base CZTS pour 3 structures [CdS/CZTS] et [ZnS/CZTS] et [ZnSe/CZTS]. A la fin, on va ajouter une couche de silicium type p pour améliorer le rendement de conversion

Mots clés : CZTS, cellules solaires, rendement, couches minces, Simulation

Abstract

Solar cells have the ability to convert large amounts of sunlight into electricity, CZTS absorbent layer based thin film solar cells have attracted much attention in the field of photovoltaic technology. In this work we use the Silvaco simulation software to study the performance of CZTS based solar cells for 3 structures [CdS / CZTS] and [ZnS / CZTS] and [ZnSe / CZTS] at the end we will add a layer of silicon type p to improve conversion efficiency.

Keywords: CZTS, Solar cell, conversion efficiency, thin film solar, simulation

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des symboles

Introduction générale

Chapitre 1 : généralités sur les cellules solaires

1.1 Introduction :	4
1.2 Le rayonnement solaire :	4
1.3 Les semi-conducteurs :	5
1.3.1 Les différents types des semi-conducteurs :	6
1.4 Bandes d'énergie	7
1.5 Jonction P-N	8
1.6 Les cellules photovoltaïques	9
1.6.1 Historique des cellules PV	9
1.6.2 Principe de fonctionnement d'une cellule PV	9
1.6.3 Les différentes caractéristiques d'une cellule PV	10
1.7 Les Génération des cellules Photovoltaïques	11
1.7.1 Première génération (silicium cristallin)	12
1.7.2 Deuxième génération (couches minces)	13
1.7.3 Troisième génération (Cellules multicouches, cellules organiques)	14
1.8 Conclusion :	15

Chapitre 2 : les cellules photovoltaïques « CZTS »

2.1 Introduction :	17
2.2 Les cellules solaires à base de CZTS :	17
2.3 Composition et fabrication des cellules CZTS :	17
2.4 Les propriétés optiques	18
2.4.1 L'absorption	19
2.4.2 La réflexion optique	19
2.4.3 L'indice de réfraction	20
2.5 Les propriétés électriques	21
2.6 Energie de gap	22
2.7 Structure cristallines	23
2.8 Avantages et inconvénient des cellules CZTS	24
2.9 Conclusion :	24

Chapitre 3 : résultats de simulation et discussion

3.1 Introduction	26
3.2 Présentation du logiciel SILVACO	26
3.3 Structure de la cellule CZTS	27
3.4 Paramètres utilisé dans la simulation	28
3.5 Effet des couches tampon CdS/ ZnS / ZnSe sur la couche absorbante CZTS	29
3.5.1 Caractéristiques I-V	29
3.5.2 Caractéristiques P-V	30
3.5.3 L'efficacité quantique externe EQE	30
3.6 Effet de l'épaisseur de la couche absorbante CZTS sur les caractéristiques électriques de la cellule	32
3.6.1 Courant de court-circuit J_{cc}	32
3.6.2 La tension de circuit ouvert V_{co}	33
3.6.3 Le facteur de forme FF	34
3.6.4 Le rendement de conversion η	34
3.7 Effet de la couche P-Si sur les performances de la cellule solaire à base CZTS	35
3.7.1 1Caractéristiques I-V	36
3.7.2 Caractéristiques P-V	37
3.7.3 L'efficacité quantique externe EQE	38
3.8 Conclusion.....	38

Liste des figures

Figure1. 1 Le rayonnement solaire [1].	4
Figure1. 2 Différentes positions de soleil [1].	5
Figure1. 3 Forme quatre liaisons covalentes avec un atome donneur.	6
Figure1. 4 Forme quatre liaisons covalentes avec un atome accepteur.	7
Figure1. 5 Schéma qui représente l'énergie du gap des matériaux.	7
Figure1. 6 La diffusion des trous et l'électron.	8
Figure1. 7 La zone de transition.	8
Figure1. 8 Le principe de fonctionnement d'une cellule PV [4].	10
Figure1. 9 Les étapes de fabrication des cellules PV.	12
Figure1. 10 Cellule PV poly cristalline.	13
Figure1. 11 Cellule PV monocristalline	13
Figure1. 12 Structure d'une cellule solaire multi jonction.	14
Figure1. 13 Cellule solaire organiques.	15
Figure2. 1 Structure standard d'une cellule CZTS.	18
Figure2. 2 L'absorption de la lumière par les porteurs	19
Figure2. 3 Schéma des chemins optiques au niveau d'un dioptre plan.	20
Figure2. 4 Méthodes d'extraction de la bande interdite en fonction $h\nu$.	22
Figure2. 5 Structure cristallines de $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$: (a)Kësterite (b) Stannite [22].	23
Figure3. 1 Structure de la cellule solaire à base CZTS.	27
Figure3. 2 Caractéristiques courant tension des 3 couche Cds /Zns /ZnSe.	29
Figure3. 3 La puissance délivrée par la cellule solaire CZTS en fonction de la tension pour les 3 différentes couches.	30
Figure3. 4 La variation de l'efficacité quantique externe en fonction de la longueur d'onde pour les 3 couches tampon.	31
Figure3. 5 Variation de la densité de courant court-circuit J_{CC} avec l'épaisseur d_{CZTS} .	33
Figure3. 6 Variation de la tension de circuit ouvert (V_{co}) avec l'épaisseur d_{CZTS} .	33
Figure3. 7 Variation du Facteur de forme FF avec l'épaisseur d_{CZTS} .	34
Figure3. 8 Variation du rendement de conversion (η) avec l'épaisseur d_{CZTS} .	35
Figure3. 9 Caractéristiques courant tension pour les 2 structure.	37
Figure3. 10 La puissance délivrée par la cellule solaire CZTS en fonction de la tension pour les 2 structures.	37
Figure3. 11 La variation de l'efficacité quantique externe en fonction de la longueur d'onde pour les 2 structures.	38

Liste des tableaux

Tableau 2.1 Propriétés électriques des composées CZTSSe.....	21
Tableau 3.1 Propriétés des couches CZTS et CdS et ZnS et ZnSe.....	28
Tableau 3.2 Résultats de la simulation de la cellule solaire CZTS pour différentes couches CdS/ ZnS/ ZnSe.....	29
Tableau 3.3 Effet de l'épaisseur de la couche CZTS (d_{czts}) sur les paramètres photovoltaïque de la cellule solaire à base de CZTS.....	32
Tableau 3.4 Résultats de la simulation pour les 2 structures [CdS/CZTS] et [CdS/CZTS/Si].....	35
Tableau 3.5 Les propriétés du matériau P-Si utilisé dans la simulation.....	36

Listes des acronymes et abréviations

AM : masse d'air

N_A : la concentration des dopants donneurs ionisés dans le matériau P

N_D : la concentration des dopants donneurs ionisés dans le matériau N

E_g : l'énergie de gap

K : constante de Boltzmann

J_{cc} : Courant de court-circuit

V_{co} : Tension à circuit ouvert

FF : facteur de forme

η : le rendement de conversion

P_m : puissance maximale

$h\nu$: l'énergie de photon

α : coefficient d'absorption

n : indice de réfraction

R : coefficient de réflexion

n_1 : indice de réfraction de l'air

n_2 : indice de réfraction du matériau

θ_i : angle de rayon lumineux incident

θ_r : angle de rayon lumineux réfracté

P_i : puissance incidente

EQE : l'efficacité quantique externe

I_{ph} : courant photon courant

INTRODUCTION GENERALE

Aujourd'hui 80 % de l'énergie utilisée dans le monde provient de gisements combustibles comme (le pétrole, le charbon, le gaz) ; ce sont des énergies épuisables et polluantes. C'est pourquoi les chercheurs ont développé une autre forme d'énergie dite « énergie renouvelable ». Ces énergies ont l'avantage d'être illimitées, elles ne présentent aucun danger sur la vie des humains par ce qu'elles sont non polluantes et issues des ressources naturelles, on peut citer (l'énergie éolienne, l'énergie solaire, l'énergie biomasse).

On s'intéresse à « l'énergie solaire », l'énergie solaire photovoltaïque nous permet de convertir le rayonnement solaire en électricité à l'aide des dispositifs appelés « cellule solaire » ou « cellules photovoltaïques ».

La fabrication de ces cellules photovoltaïques est basée sur les matériaux semi-conducteurs. De nombreux développements et plusieurs technologies ont émergé à ce jour, parmi les différentes technologies photovoltaïques « les cellules en couche minces » basées sur les matériaux CIGS (le sélénure de cuivre d'indium et le gallium) et CdTe (le tellure de cadmium). Mais le problème qui se pose, c'est que ce sont des matériaux toxiques et coûteux. C'est pourquoi les chercheurs ont commencé à s'intéresser au matériau CZTS.

Le cuivre, le zinc, l'étain, le soufre et le sélénium forment ensemble un matériau semi-conducteur de choix, puisqu'il est fait d'éléments courants et non toxiques. Dommage que le rendement affiché par les cellules CZTS ne soit pas plus élevé. Il devrait augmenter dans les années à venir. Le CIGS et le CdTe auront-ils bientôt un remplaçant de premier ordre ? Les cellules CZTS possèdent des propriétés optiques et électroniques similaires à celle du CIGS, tout en ayant l'avantage d'être composée d'éléments abondants (disponible dans la croûte terrestre) et non toxiques pour la santé ou l'environnement et moins chers.

Dans ce travail de mémoire, nous allons simuler une cellule solaire à base de CZTS pour optimiser le rendement de conversion en utilisant 3 différentes couches tampons. La couche avec le meilleur rendement on l'utilisera pour étudier l'effet de l'épaisseur de la couche CZTS sur les différentes caractéristiques de la cellule solaire. Enfin on ajoute une couche de silicium pour augmenter le rendement de conversion en utilisant le logiciel Silvaco.

Le travail est réparti en trois chapitres :

- Premier chapitre : généralité sur les cellules solaires.

- Le second chapitre : la recherche bibliographique sur les cellules solaires CZTS et les différentes propriétés.
- Le troisième chapitre : la présentation des résultats expérimentaux et discussions.

CHAPITRE 1 :

Généralités Sur les Cellules

Solaires

1.1 Introduction :

Dans ce chapitre on fait appel à quelques bases indispensables dans le domaine photovoltaïque. Nous allons voir en premier quelques notions sur l'énergie photovoltaïque en commençant par les semi-conducteurs avec ces types, la jonction P-N ensuite les cellules solaires avec leurs caractéristiques photovoltaïques, à la fin on va voir les différentes générations et les technologies existantes dans le domaine photovoltaïque.

1.2 Le rayonnement solaire :

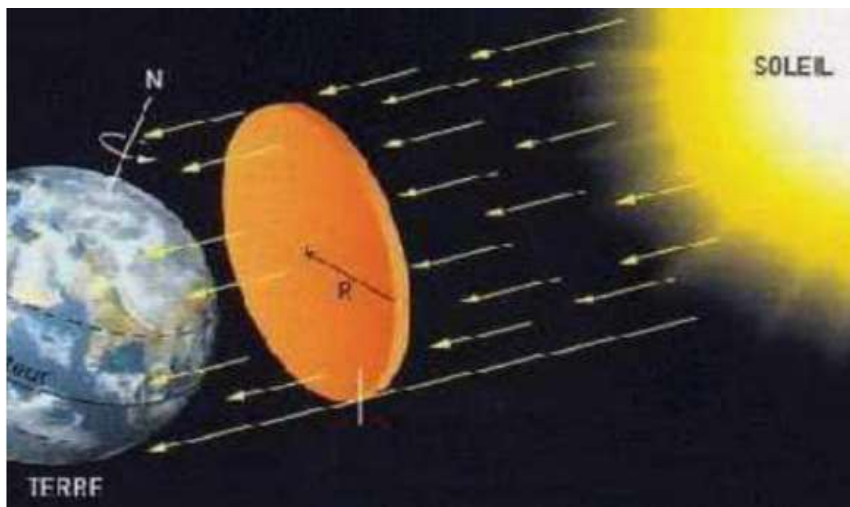


Figure1. 1 Le rayonnement solaire [1].

Le soleil décharge continuellement une énorme quantité d'énergie radiante dans le système solaire, la terre intercepte une toute petite partie de l'énergie solaire rayonnée dans l'espace figure1.1. Une moyenne de 1367 watts atteint chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère terrestre (pour une distance moyenne Terre-soleil de 150 Millions de km), c'est ce que l'on appelle la constante solaire égale à 1367W/m^2 [1]. La part d'énergie reçue sur la surface de la terre dépend de l'épaisseur de l'atmosphère à traverser. Celle-ci est caractérisée par le nombre de masse d'air AM.

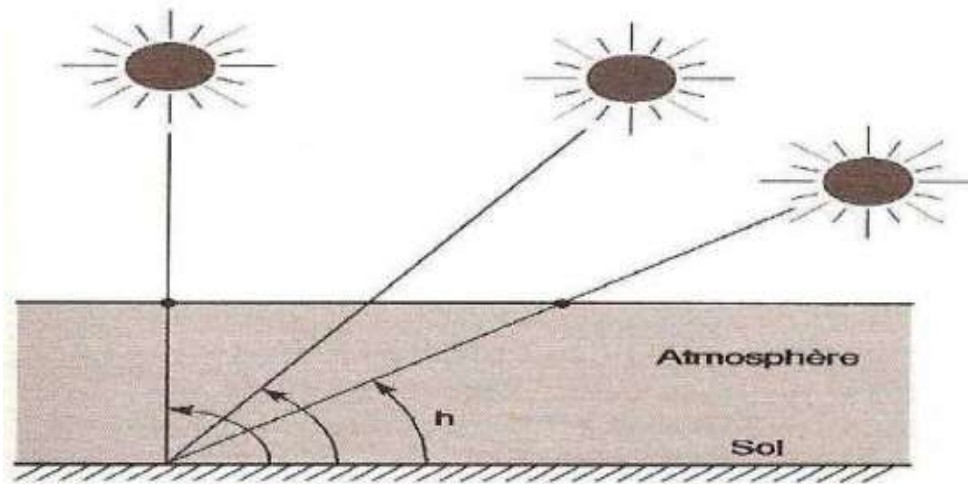


Figure1. 2 différentes positions de soleil [1].

Le rayonnement qui atteint le niveau de la mer à midi dans un ciel clair est de 1000 w/m^2 et est décrit en tant que rayonnement de la masse d'air « 1 » ou (AM1). Lorsque le soleil se déplace plus bas dans le ciel, la lumière traverse une plus grande épaisseur d'air, perdant plus d'énergie. Puisque le soleil n'est au zénith que durant peu de temps, la masse d'air est donc plus grande en permanence et l'énergie disponible est donc inférieure à 1000 w/m^2 [1]. Les scientifiques ont donné un nom au spectre standard de la lumière du soleil sur la surface de la terre : AM1.5G ou AM1.5D.

Le nombre "1.5" indique que le parcours de la lumière dans l'atmosphère est 1.5 fois supérieur au parcours le plus court du soleil, c'est-à-dire lorsqu'il est au zénith (correspondant à une inclinaison du soleil de 45° par rapport au zénith). Le « G » représente le rayonnement "global" incluant rayonnement direct et rayonnement diffus et la lettre « D » tient compte seulement du rayonnement direct. [1].

1.3 Les semi-conducteurs :

Cette classe de matériaux se situe entre les métaux (conducteurs) et les isolants (non conducteurs). La résistivité ρ des semi-conducteurs varie de 10^{-3} à $10^{+4} \Omega \cdot \text{cm}$. Les électrons libres et les trous mobiles sont les porteurs de charges responsables de la conductivité électrique. Un semi-conducteur peut être soit intrinsèque (pur) ou extrinsèque (dopé) par des impuretés [2].

1.3.1 Les différents types des semi-conducteurs :

Un semi-conducteur intrinsèque est un semi-conducteur non dopé, c'est à dire qu'il contient peu d'impuretés (atomes étrangers) n'ont pas une grande utilité, ils servent de base aux semi-conducteurs dopés.

Un semi-conducteur extrinsèque est un semi-conducteur intrinsèque dopé par des impuretés spécifiques lui conférant des propriétés électriques adaptées aux applications électroniques (diodes, transistors, etc.) et optoélectroniques (émetteurs et récepteurs de lumière, etc.). Il existe deux types de semi-conducteurs extrinsèques :

Semi-conducteur de type N : matériau dopé n est un semi-conducteur dont la concentration des électrons est largement supérieure à la concentration des trous alors la concentration des donneurs sera donc supérieure à la concentration d'accepteurs.

($N_D - N_A > 0$). Ce qui correspond à la définition d'un SC dopé n.

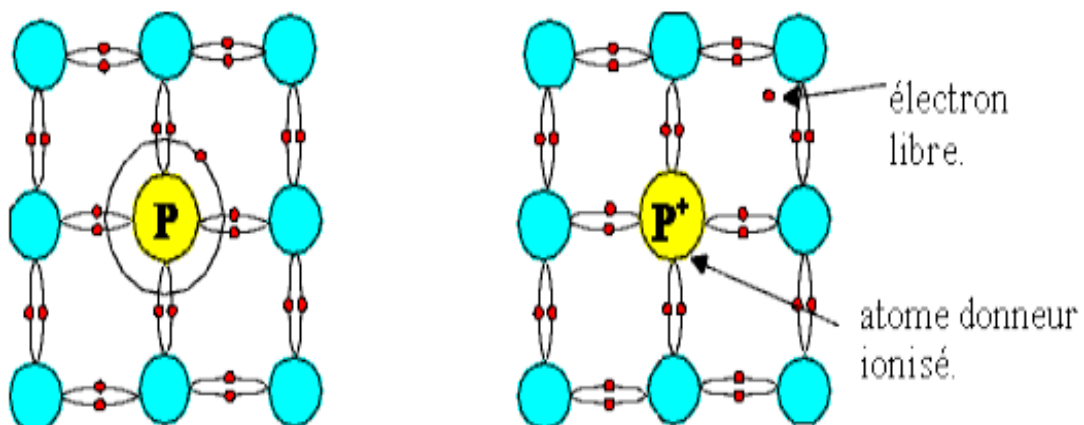


Figure1. 3 Forme quatre liaisons covalentes avec un atome donneur.

Semi-conducteur de type P : matériau dopé p est un semi-conducteur dont la concentration des trous est largement supérieure à la concentration des électrons alors la concentration des accepteurs sera donc supérieure à la concentration des donneurs ($N_A - N_D > 0$). Ce qui correspond à la définition d'un SC dopé p.

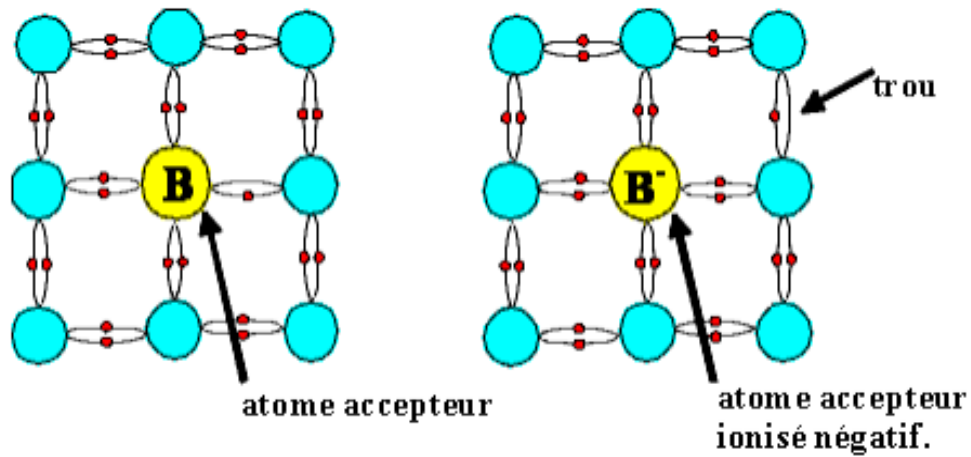


Figure1. 4 Forme quatre liaisons covalentes avec un atome accepteur.

1.4 Bandes d'énergie

On sait que dans les structures cristallines de la matière, les électrons ont des niveaux d'énergies différentes on les appelle Bandes d'énergie, les bandes de faible énergie appelées « bandes de valence » et les bandes de haute énergie appelées « bandes de conduction » on peut différencier entre ces derniers par la différence d'énergie qui existe entre ces deux bandes, appelée le "GAP" OU "Bande gap".

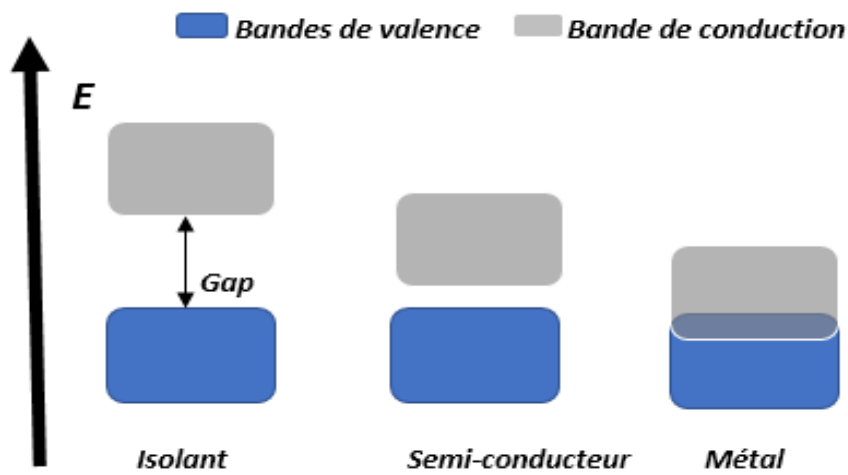


Figure1. 5 Schéma représente l'énergie du gap des matériaux.

1.5 Jonction P-N

La mise en contact de deux semi-conducteurs de dopages différents « N et P » conduit à une jonction appelé P-N. Lors de cette assemblage, les porteurs de charge libre s'attirent et se recombinent on crée des atomes ionisés qui génèrent un champ électrique interne au niveau de la jonction qui augmente jusqu'à atteindre une valeur qui empêche le déplacement des charges libres restants dans chaque zone de traverser la jonction pour se recombiner.

La zone ou les atomes ont été ionisés à cause du départ des porteurs de charges s'appelle la zone de transition ou la zone de déplétion.

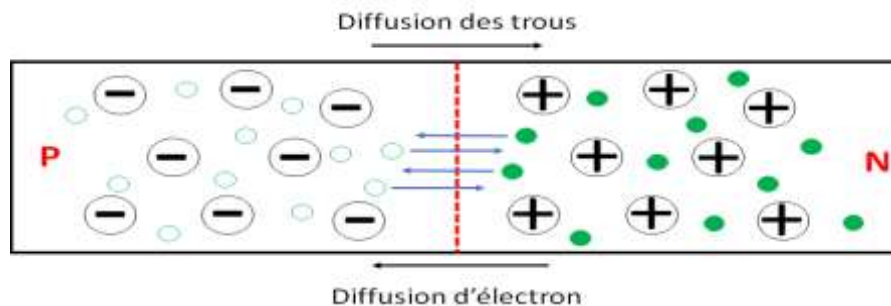


Figure1. 6 la diffusion des trous et l'électron.

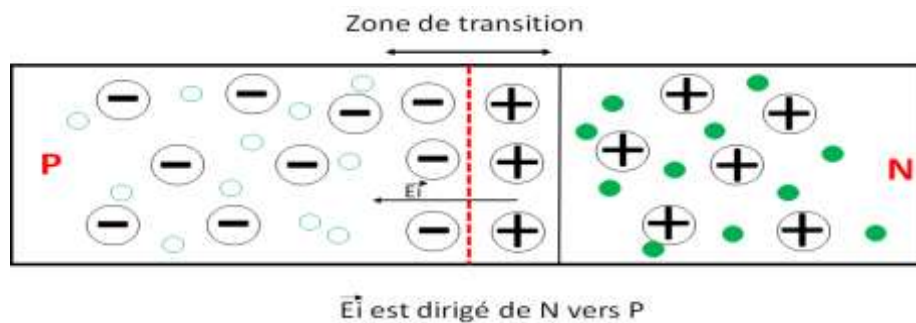


Figure1. 7 la zone de transition.

1.6 Les cellules photovoltaïques

1.6.1 Historique des cellules PV

La découverte de l'effet photovoltaïque remonte à 1839, l'année où le physicien français Alexandre Edmond Becquerel découvre la possibilité de produire de l'électricité grâce à la lumière et la présence de matériaux semi-conducteurs comme le silicium.

Après 1913, naissent les premières cellules photovoltaïques, mais ce n'est qu'en 1916 que Robert Millikan parvient à produire un courant continu.

Le premier véritable panneau solaire, avec un rendement de 6%, est développé en 1954 par les chercheurs des laboratoires Bell. Les panneaux solaires sont nés, mais sont encore trop coûteux. La recherche spatiale s'empare du sujet afin d'équiper ses satellites qui ont besoin d'une énergie durable. Suite à la prouesse des laboratoires Bell, qui étaient parvenus à un rendement de 6%, la recherche progresse jusqu'à obtenir un rendement de 9%. En 1958, les premières cellules voyagent à bord du satellite Vanguard 1. Puis c'est au tour des premiers panneaux solaires, fixés sur le satellite Explorer 6, en 1959.

La recherche continue son travail afin de pouvoir adapter les panneaux solaires à une utilisation terrestre. L'Université Delaware est à l'origine de la première maison alimentée par des cellules photovoltaïques en 1973.

Plusieurs paramètres font de l'énergie solaire une ressource de plus en plus sollicitée : l'augmentation du coût des énergies fossiles et la prise de conscience liée à l'épuisement des ressources naturelles en font partie. L'usage domestique des panneaux solaires se développe davantage d'année en année. Selon l'ADEME, environ 20 000 foyers résidentiels sont équipés d'un système d'autoconsommation en 2017 [2].

1.6.2 Principe de fonctionnement d'une cellule PV

Une cellule photovoltaïque est un composant semi-conducteur qui convertit l'éclairement incident en puissance électrique le phénomène mis en jeu est appelé (l'effet photoélectrique) consiste à l'apparition d'une différence de potentiel produite par la génération de porteurs de charge par excitation lumineuse au voisinage d'une jonction [4].

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants :

- Absorption des photons « dont l'énergie est supérieure au gap » par le matériau constituant notre dispositif
- La conversion de l'énergie du photon en énergie électrique ce qui correspond à la création des paires (électron-trou) dans le matériau semi-conducteur
- Le courant électrique continu qui se crée est recueilli par des fils métalliques connectés et reliés à la cellule suivante [4].

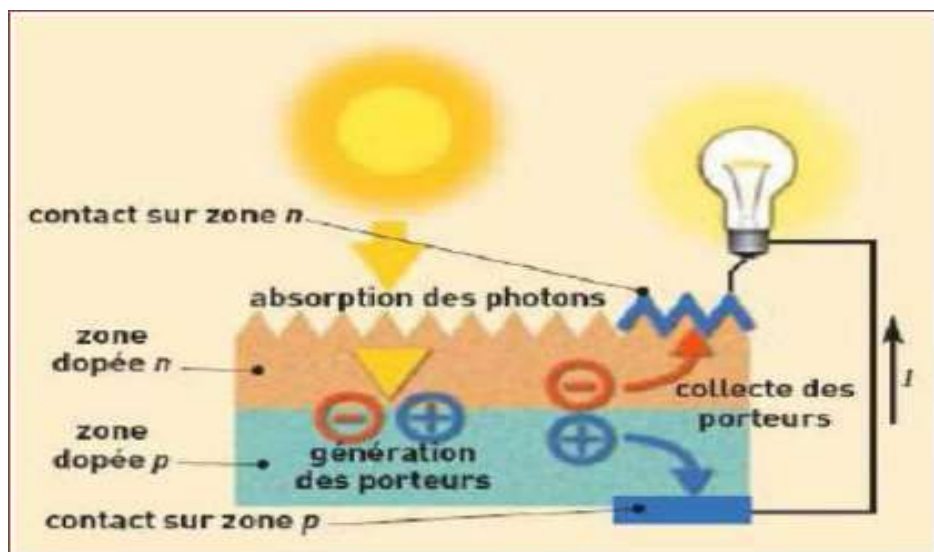


Figure1. 8 le principe de fonctionnement d'une cellule PV [4].

1.6.3 Les différentes caractéristiques d'une cellule PV

a) 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.

b) Tension de circuit ouvert V_{co} :

C'est la tension mesurée aux bornes de la cellule et pour laquelle le courant débité par la cellule solaire est nul, elle est donnée par la relation :

$$V_{co} = \frac{kt}{q} \ln(I_{ph} / I_s + 1) \quad (1.1)$$

c) La puissance maximal:

La puissance maximale d'une cellule photovoltaïque éclairée est la grandeur essentielle pour évaluer sa performance ; elle est donnée par la relation :

$$P_m = V_m \cdot I_m \quad (1.2)$$

Elle traduit sur la caractéristique I-V le point du fonctionnement $P_m (V_m, I_m)$ qui est situé au coude de caractéristique I-V et dit le point de puissance maximale ou les valeurs de tension V_m et du courant I_m appelées également tension et courant maximum respectivement [3].

d) Facteur de forme :

Le facteur de forme est le rapport de la puissance maximale au produit $J_{cc} V_{co}$.

Le facteur de forme indique la qualité de la cellule :

$$FF = \frac{P_m}{J_{cc} \cdot V_{co}} \quad (1.3)$$

e) Le rendement de conversion :

Le rendement de conversion η d'une cellule solaire est le rapport entre la puissance maximale produite par la cellule et la puissance, incident du soleil qui arrive sur la cellule [5].

$$\eta = \frac{P_m}{P_i} = \frac{FF \cdot J_{cc} \cdot V_{co}}{P_i} \quad (1.4)$$

P_i : puissance incidente

1.7 Les Générations des cellules Photovoltaïques

En réponse au développement d'une cellule solaire qui pourrait satisfaire la norme exigence des cellules photovoltaïques (PV) on a :

Le faible coût des matériaux et de la fabrication des éléments constitutifs non toxiques et facilement disponibles et une efficacité de conversion élevée sans dégradation du matériau.

Un matériau de couche absorbante approprié pour les cellules solaires à couche mince doit être développé. Actuellement, la technologie des couches minces reçoit plus d'attention que la

technologie traditionnelle « la fabrication du wafer » en raison de son utilisation beaucoup plus faible des matériaux et du coût de production qui est l'objectif de la technologie PV.

1.7.1 Première génération (silicium cristallin)

Ces cellules, généralement en silicium, ne comprennent qu'une seule jonction p-n, Le silicium fait partie de la quatorzième colonne du tableau périodique de Mendeleïev, c'est un élément dit cristallogène (il existe une forme cristalline du silicium).

La technique de fabrication de ces cellules est représentée dans la figure 1.9, basée sur la production de (wafers) à partir d'un silicium très pur :

1. La silice : matière première d'une cellule photovoltaïque.
2. Extraction purification du silicium photovoltaïque.
3. Obtention des lingots de silicium.
4. Obtention des wafers photovoltaïques.
5. Le dopage et jonction P-N.

Cette technique reste très énergivore et coûteuse

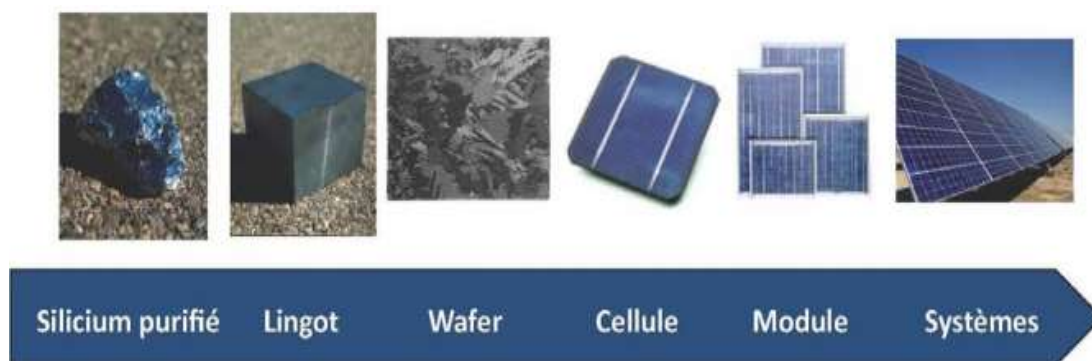


Figure 1.9 les étapes de fabrication des cellules PV.

Il y a deux catégories des cellules cristallines

- a) Cellule en silicium monocristallin : Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme [6].
- b) Cellule en silicium poly cristallin : Pendant le refroidissement du silicium, il se forme plusieurs cristaux. Ce genre de cellule est également bleu, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux [6].

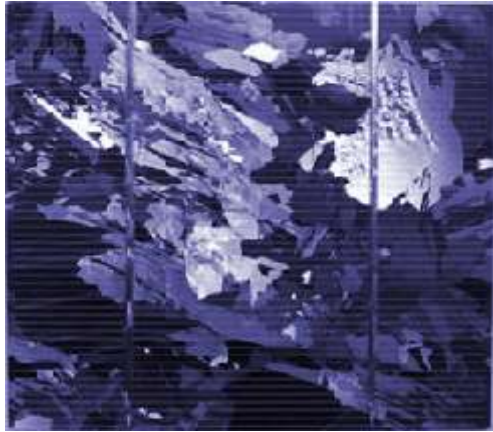


Figure1. 10 Cellule PV poly cristalline.

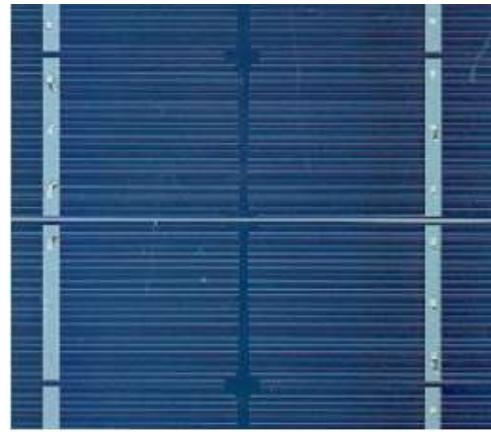


Figure1. 11 Cellule PV monocristalline.

1.7.2 Deuxième génération (couches minces)

Cette génération de cellule repose sur la déposition de matériaux semi-conducteurs en couches minces (*thin film*). Ces matériaux sont déposés par des procédés tels que PECVD (*Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition*) sur un substrat. L'épaisseur de la couche varie entre quelques nanomètres à des dizaines de micromètres.

Elles constituent ce que certains appellent les cellules de seconde génération car elles viennent historiquement juste après les cellules en silicium cristallin relativement épaisses. L'intérêt de la technologie couche mince vient de la faible quantité de matériaux nécessaire à la fabrication d'une cellule comparativement aux cellules classiques. Contrairement aux cellules silicium cristallin de première génération, on ne dépose que la quantité de matériau photosensible efficace pour absorber l'essentiel du rayonnement solaire (quelques microns d'épaisseurs suffisent). Par ailleurs, on utilise des méthodes de fabrication moins coûteuses des cellules qui permettent une intégration totale.

Parmi les technologies en couches minces qui sont exploitées industriellement (production de masse), on distingue : -CdTe : Cadmium Telluride (Telluride de cadmium), CIS / CIGS : Copper Indium Gallium Selenide, Silicium en couche mince : silicium amorphe α -Si et microcristallin. A noter que le tellurure de cadmium est un alliage de métal lourd, très toxique, et peut –tout comme le plomb ou le mercure- se concentrer dans la chaîne alimentaire. L'UE en a interdit l'usage pour les appareils électriques... exception faite pour les cellules PV...

1.7.3 Troisième génération (Cellules multicouches, cellules organiques)

Pour améliorer les rendements des cellules, la recherche se tourne actuellement vers plusieurs pistes dont notamment :

Cellules multicouches : superposition de multiples cellules aux propriétés différentes (utilisant des bandes d'énergie différentes permettant un balayage plus large du spectre solaire). Ce type de cellules est déjà commercialisé, mais principalement pour des applications spatiales. Les rendements obtenus sous concentration sont très prometteurs (au-delà de 30 %).

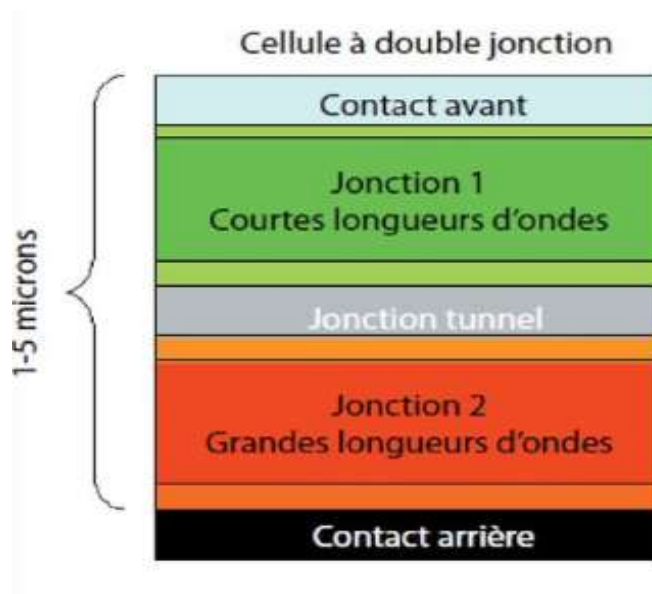


Figure1. 12 Structure d'une cellule solaire multi jonction.

Cellules organiques : Une cellule Photovoltaïque Organique (*OPV*) est généralement fabriquée sur un substrat de verre recouvert d'ITO (couche mince – 150 nm – d'oxyde d'indium et d'étain possédant des bonnes propriétés de transparence dans le visible et de conductivité électrique). Ce substrat constitue l'anode du dispositif. Parfois, on remplace le verre par une feuille plastique souple recouverte également d'ITO. Les cellules ont des dimensions de quelques cm², ce qui est suffisant pour les caractériser. Elles mettent en œuvre deux types de matériaux organiques qui ont des électronégativités différentes. Le plus avide d'électrons est qualifié d'accepteur (A), l'autre, celui qui cède facilement ses charges négatives, est appelé donneur (D) [8].

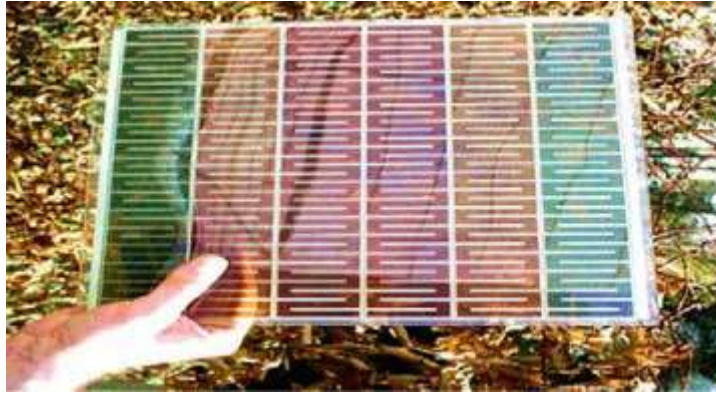


Figure1. 13 Cellule solaire organiques.

1.8 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons rappelé quelques notions sur les semi-conducteurs : le dopage, l'énergie de gap, la jonction PN. Puis on a vu les notions théoriques sur le photovoltaïque et ces applications sur les cellules solaires. On a commencé par l'historique des cellules photovoltaïques, après on a expliqué le principe de fonctionnement et les différents paramètres électriques d'une cellule solaire (le courant de court-circuit – la tension de circuit ouvert – le rendement – le facteur de forme – la puissance maximale). A la fin nous avons donné les types des cellules solaires (1^{ere}, 2^{eme} et 3^{eme} génération).

CHAPITRE 2 :

Les cellules Photovoltaïques

« CZTS »

2.1 Introduction :

De nos jours la technologie de silicium domine le secteur de la fabrication des cellules solaires. Mais actuellement, la technologie de couche mince gagne plus l'attention des fabricants car elle offre un rendement élevé et des cellules solaires à faible coût.

La technologie photovoltaïque à base de couche mince repose sur la cellule solaire chalcopyrite de cuivre-indium-galium-sélénium « CIGS » par ce que c'est un absorbant puissant, mais dans ces 20 années précédentes, les scientifiques ont commencé à s'intéresser à un autre matériau qui semble très prometteur dans le domaine PV il s'agit des cellules CZTS.

2.2 Les cellules solaires à base de CZTS :

Cuivre-zinc-étain- soufre (CZTS) est un semi-conducteur avec d'excellentes propriétés photovoltaïques tels que gap direct, le coefficient d'absorption élevé 10^4 cm^{-1} , et possède une énergie de bande optimale de 1.4 à 1.5 eV fortement souhaitée en matière photovoltaïque, toujours en phase de développement. Les cellules CZTS, fabriquées à partir de minerais non toxiques contrairement au CIGS, ont l'avantage d'être fines, et peuvent donc s'appliquer sur des supports souples.

D'autres parts, les cellules CZTS utilisent des matériaux abondants matériau non toxiques et peu coûteux. La disponibilité du cuivre, du zinc, de l'étain et du soufre sur la croûte de la terre est de 50 ppm, 75 ppm, 2,2 ppm et 260 ppm respectivement. Pendant ce temps, 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 de l'étain [9].

2.3 Composition et procédé de fabrication des cellules CZTS :

Une cellule solaire est constituée d'un ensemble de couches minces semi-conductrices avec une épaisseur totale d'environ $5 \mu\text{m}$ (figure 2.1). Le substrat de ce dispositif électronique est en verre ou en ITO. La première étape de fabrication d'une cellule photovoltaïque est le dépôt d'une couche de molybdène ou d'ITO de $1 \mu\text{m}$ d'épaisseur, Cette couche constitue le contact ohmique arrière de la cellule ; elle assure l'adhésion entre la couche active de la cellule et le substrat [10].

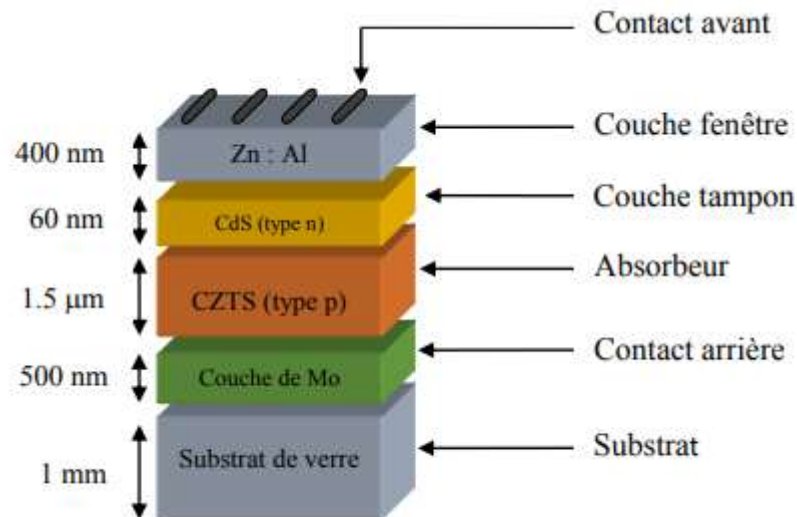


Figure2. 1 structure standard d'une cellule CZTS.

La couche la plus importante dans la cellule photovoltaïque est la couche absorbante, en l'occurrence $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ dans notre cas, car elle est responsable de l'absorption des rayonnements solaires ainsi que la génération des porteurs de charges (les électrons et les trous). Généralement il existe cinq couches principales dans une cellule solaire à couches minces figure (2.1) :

- Le substrat : généralement en verre, mais on peut utiliser des substrats flexibles ou métalliques.
- Le contact inférieur : c'est un contact ohmique, dans la plupart des cas c'est du molybdène (Mo) ou de l'ITO.
- La couche absorbante : le matériau CZTS « $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ » c'est un semi-conducteur de type p.
- La couche tampon : avec une conduction de type n, souvent en CdS, ZnS, etc.
- La couche d'oxyde transparent conducteur : en ITO (Indium Tin Oxyde) ou ZnO : Al.

2.4 Les propriétés optiques

Il est connu généralement qu'une couche mince CZTS possède un coefficient d'absorption plus élevé que 10^4 cm^{-1} .

Plusieurs domaines dans lesquels la lumière réagit avec la matière sont évidemment d'intérêts pratiques, l'étude des propriétés optiques des solides (l'absorption, la réflexion, la transmission)

a été prouvée pour être un outil puissant pour la compréhension de la structures électroniques et atomique de ces matériaux [11].

2.4.1 L'absorption

Lorsqu'un photon d'Énergie $E=h\nu$ arrive sur la surface d'un semi-conducteur il sera absorbée par un électron ce qui provoque le déplacement de ce dernier de la bande de valence vers la bande de conduction on appelle ce phénomène « L'absorption ».

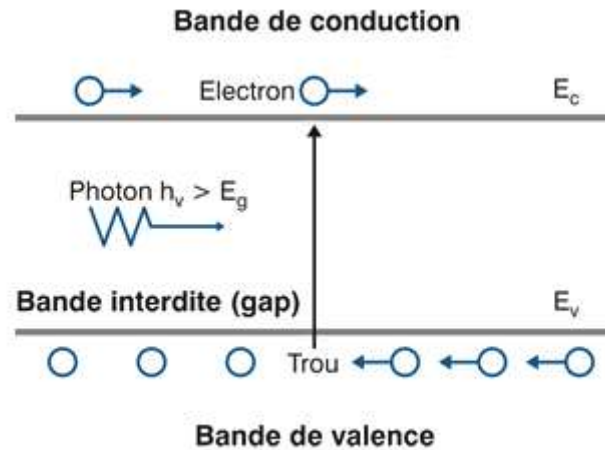


Figure2. 2 l'absorption de la lumière par les porteurs

Le coefficient d'absorption $\alpha(E)$, pour une énergie E supérieure à l'énergie de la bande interdite est donnée par :

$$\alpha(E) = \alpha_0 \frac{\sqrt{E-E_g}}{E} \quad (2.2)$$

Avec

$\alpha(E)$: coefficient d'absorption en fonction de l'énergie du photon E .

α_0 : constante.

E_g : énergie de Gap du matériau semi-conducteur.

2.4.2 La réflexion optique

La réflexion optique de la forme varie en fonction du matériau de protection antérieure de la cellule (verre, plastique), ou de l'éventuel traitement du verre. Pour le producteur il est très important de minimiser la réflexion optique afin de capter au maximum le rayonnement solaire. Pour une incidence normale du rayonnement sur la surface d'un solide le coefficient de réflexion s'écrit [11] :

$$R = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2} \quad (2.2)$$

n est réel

2.4.3 L'indice de réfraction

L'indice de réfraction provient du phénomène de réfraction qui désigne le changement de direction de la lumière au passage d'un milieu à un autre. La notion d'indice de réfraction a d'abord été introduite empiriquement comme coefficient dans les lois de Snell-Descartes [12].

$$n_1 \sin\theta_i = n_2 \sin\theta_r \quad (2.3)$$

- n_1 et n_2 : les indices de réfractifs de deux milieux.
- θ_i et θ_r : les angles des rayons lumineux par rapport à la normale.

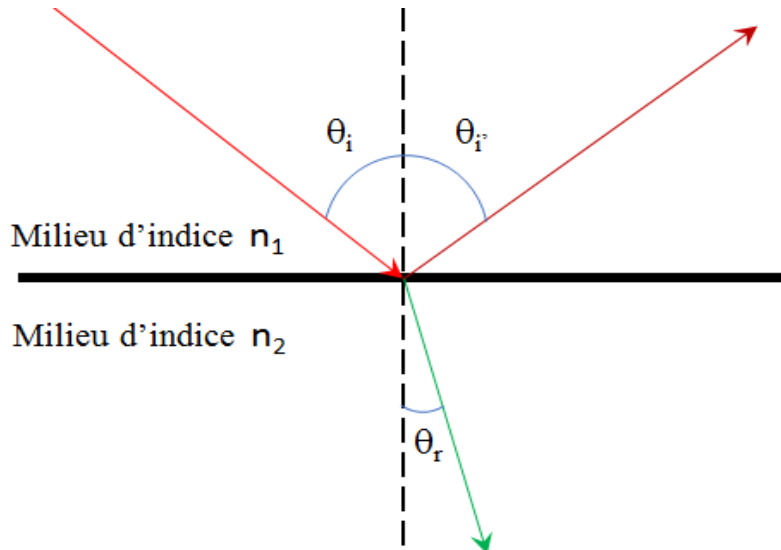


Figure2. 3 Schéma des chemins optiques au niveau d'un dioptre plan.

L'une des raisons pour laquelle nous étudions l'indice de réfraction est de réduire la réflectivité des matériaux et par conséquent, augmenter l'intensité du faisceau incident, et ce par l'introduction de couches additionnelles. Ces films doivent avoir une épaisseur bien spécifique et un indice de réfraction approprié pour pouvoir jouer le rôle de couches antireflet [12].

2.5 Les 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 au tableau (2.1) pour les films préparés à l'aide de diverses méthodes diverses telles que la pulvérisation cathodique, coévaporation 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.

Tableau2. 1 Propriétés électriques des composés CZTSSe. [13]

Composé	Densité de porteur (cm ³)	Mobilité (cm ² /vs)	Résistivité (Ω cm)	Méthodes	Références
CZTS	8.2×10^{18}	6.3	0.16	Pulvérisation cathodique	[14]
CZTS	8.0×10^{18}	6.0	0.13	Sulfuration	[15]
CZTS	$>5 \times 10^{19}$	<0.1	>1.3	Pulvérisation cathodique	[16]
CZTS			0.02-2	Pulvérisation cathodique	[17]
CZTSe	2.1×10^{17}	39.7	0.74	DRX	[18]
CZTSe			0.1-0.8	Spary	[18]

2.6 Energie de gap

Le CZTS est un semi-conducteur de type P avec 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 à 1.5 eV.

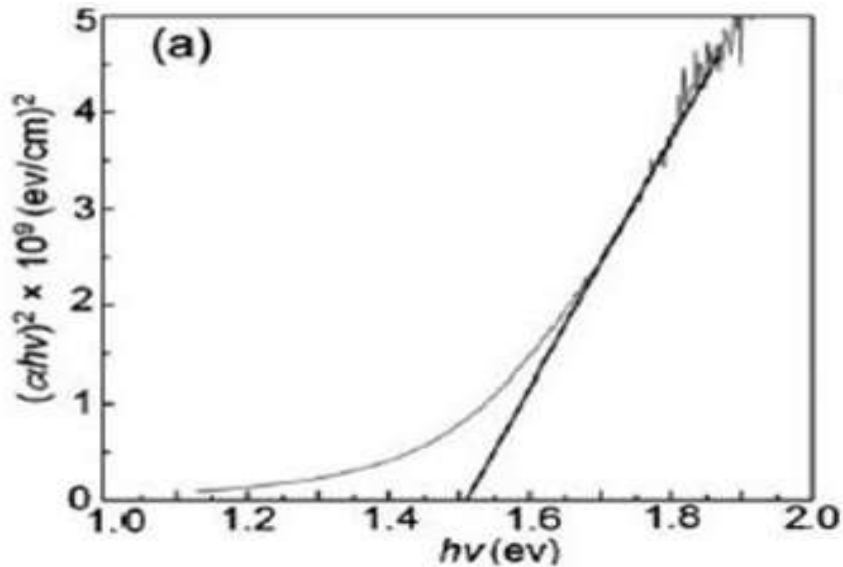


Figure 2. 4 méthodes d'extraction de la bande interdite en fonction $h\nu$ [19].

Les valeurs des largeurs de bandes interdite 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 1.3eV (fig2.4). Pour moduler la bande interdite, on ajoute le sélénium Se on obtient le matériau CZTS(Se). La largeur de la bande interdite peut être exprimée par l'équation suivant :

$$E_g(x) = (1-x) E_g(\text{CZTSSe}) + xE_g(\text{CZTS}) - bx(1-x) \quad (2.4)$$

- x : représente le taux $[S] / ([S] + [Se])$
- b : paramètre d'ajustement appelé « bowing parameter » ou $b \approx 0.1V$

2.7 Structure cristallines

$\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ cristallise généralement dans la structure Kesterite [20], ou la structure stannite. Comme le montre la Figure (2.5), il s'agit dans les deux cas d'une maille quadratique centrée. La Kesterite est considérée comme étant la maille la plus stable [21]. (Ces paramètres de maille sont $a=0.54\text{nm}$ et $c=1.09\text{nm}$ [22]). Elle est souvent représentée comme une structure dérivant de la structure chalcopyrite. La structure stannite diffère de la Kesterite seulement par le positionnement de Cu^+ et Zn^{+2} [23].

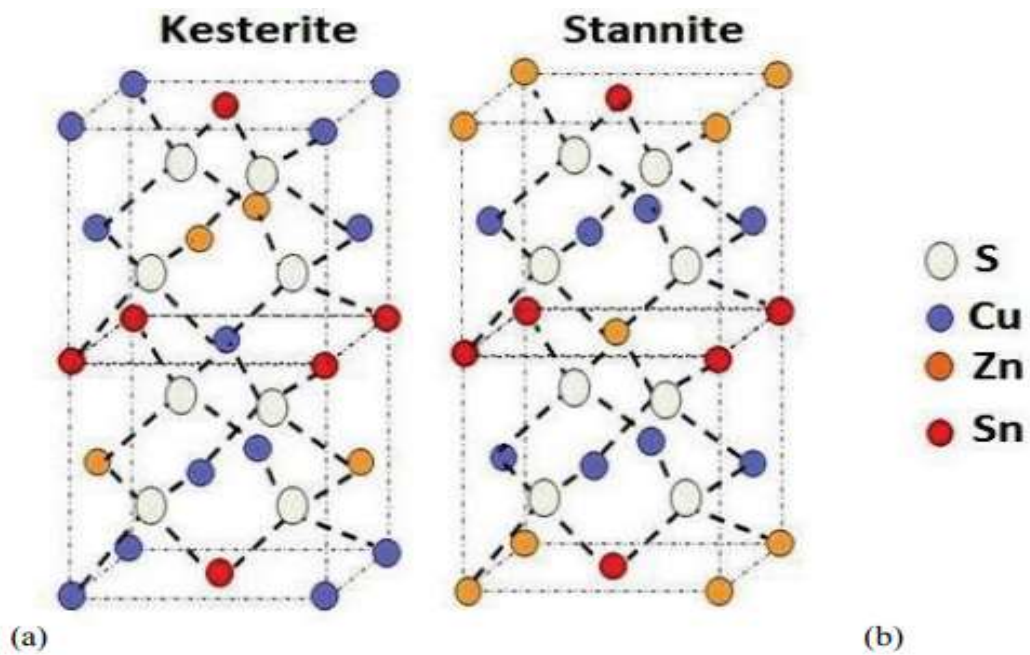


Figure 2. 5 Structure cristallines de $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$: (a) Kesterite (b) Stannite [24].

2.8 Avantages et inconvénient des cellules CZTS

Avantages

- Un gap de 1.5 eV.
- L'indice de réfraction est de 2.07 [25].
- 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 à base d'éléments abondants et donc à faible coût et non-toxiques.
- Une efficacité de conversion énergétique plus de 6.77 %.

Inconvénient

- Le faible rendement des cellules CZTS.

2.9 Conclusion :

Dans ce chapitre on a vu les propriétés fondamentales du CZTS, la composition et la fabrication des cellules CZTS. Ensuite nous avons décrit les différentes propriétés optiques (l'absorption-la réflexion totale-la réfraction) et les propriétés électriques, l'énergie du gap du matériau CZTS. A la fin nous avons donné les avantages et les inconvénients du matériau CZTS.

CHAPITRE 3 :

Résultats de simulation et
discussion

3.1 Introduction

Dans ce travail on a fait une simulation numérique pour étudier les caractéristiques de la cellule solaire a base CZTS pour 3 différentes couches tampons Cds /ZnS /ZnSe. Afin d'analyser les performances globales de la cellule solaire a base CZTS nous avons considéré trois structures [ZnO/CdS/CZTS], [ZnO/ZnS/CZTS], [ZnO/ZnSe/CZTS] avec l'étude de courant de court-circuit (J_{cc}), la tension de circuit ouvert (V_{co}), le facteur de forme (FF), le rendement (η). Nous allons prendre la structure avec les meilleurs résultats et on ajoute une couche de silicium « Si » pour améliorer le rendement de conversion.

3.2 Présentation du logiciel SILVACO

3.2.1 Présentation SILVACO :

Le SILVACO (Silicon Valley Corporation) est un logiciel qui permet de concevoir, modéliser et simuler les performances des dispositifs à semi-conducteur, avant la fabrication des prototypes d'essais. Il est très utile dans les projets de recherche-développement car il optimise le temps des essais et par conséquent réduit le coût de conception et de fabrication des dispositifs électroniques [26]

Le TCAD-SILVACO inclut de nouveaux modèles physiques qui utilisent des méthodes et des algorithmes numériques efficaces, de nouvelles techniques de maillage, des solutions linéaires d'optimisation, etc., tout en permettant d'obtenir des résultats de simulation très proches de celles de la pratique. L'avantage majeur de ce type de simulateur est de visualiser dans l'espace des phénomènes physiques difficilement accessibles et observables et de s'approprier de manière pédagogique les procédés de fabrication [27].

Les modules de TCAD-SILVACO peuvent être utilisés pour :

- La simulation des étapes de fabrication technologique (par ATHENA, SSupreme3, SSupreme4, etc.)
- La simulation électrique des dispositifs tels que, les Diodes, les MOSFET, les transistors bipolaires. (Par ATLAS).
- Virtual Wafer Fab pour automatiser la simulation de fabrication des Wafers. Dans notre étude, les simulations sont effectuées par le module ATLAS.

3.2.2 Présentation ATLAS :

Le logiciel de simulation ATLAS est un simulateur de modélisation bidimensionnelle de composants semi-conducteurs. Il est capable de prédire les caractéristiques électriques de la plupart des composants semi-conducteurs en régime continu, transitoire ou fréquentiel.

En plus du comportement électrique, par exemple $I(V)$, il fournit des informations sur la distribution interne des variables électriques telles que le courant ou la tension (lignes de champ). ATLAS permet de simuler le comportement électrique d'un composant semi-conducteur créé et modélisé comme par exemple une diode ou un transistor. Le composant étudié est représenté comme une structure maillée où chaque nœud a des propriétés qui lui sont associés telles que le type de matériau, le type de dopage, la concentration du dopant, etc.

Ainsi, pour chaque nœud, la concentration des porteurs, le champ électrique, peuvent être calculés. Les électrodes sont représentées par des surfaces sur lesquelles les conditions aux limites sont imposées, comme par exemple, les tensions appliquées.

3.3 Structure de la cellule CZTS

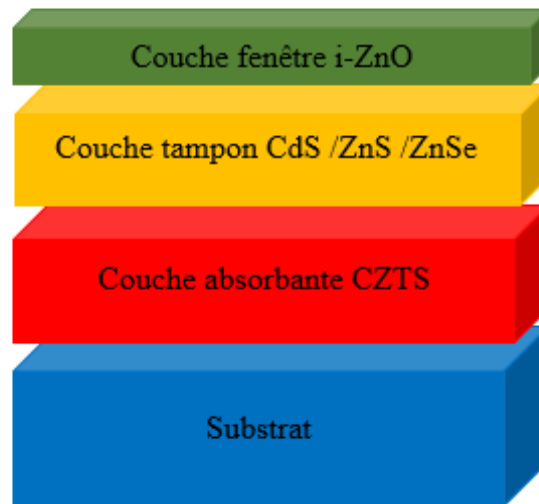


Figure3. 1 structure de la cellule solaire à base CZTS.

3.4 Paramètres utilisés dans la simulation

Propriétés des différentes couches sont illustres dont le tableau 3.1

Tableau3. 1 propriétés des couches CZTS et CdS et ZnS et ZnSe.

	i-ZnO	CdS	ZnS	ZnSe	CZTS
Epaisseur (μm)	0.2	0.05	0.05	0.05	2
Band de gap (eV)	3.3	2.4	3.5	2.9	1.45
Affinité électronique (eV)	4.4	4.2	4.5	4.1	4.5
Constante diélectrique	9	9	10	10	10
N_c (cm^{-3})	2.2×10^{18}	2.2×10^{18}	1.8×10^{18}	1.8×10^{18}	2.2×10^{18}
N_v (cm^{-3})	1.8×10^{19}	1.8×10^{19}	1.8×10^{19}	1.8×10^{19}	1.8×10^{19}
Vitesse thermique des électrons (cm/s)	10^7	10^7	10^7	10^7	10^7
Vitesse thermique des trous (cm/s)	10^7	10^7	10^7	10^7	10^7
Mobilité d'électron ($\text{cm}^2/\text{V.s}$)	100	100	100	100	100
Mobilité des trous ($\text{cm}^2/\text{V.s}$)	25	25	25	25	25
N_D (cm^{-3})	1×10^{18}	1×10^{18}	1×10^{18}	1×10^{18}	0
N_A (cm^{-3})	0	0	0	0	1×10^{17}

3.5 Effet des couches tampon CdS/ ZnS / ZnSe sur la couche absorbante CZTS

Tableau3. 2 résultats de la simulation de la cellule solaire CZTS pour différentes couches CdS / ZnS /ZnSe

Paramètres de performance	CZTS/ ZnS	CZTS/ CdS	CZTS/ ZnSe
J_{cc} (mA/cm ²)	22.66	23.98	23.02
V_{co} (V)	0.992	0.995	0.997
FF%	85.61	85.78	81.92
$\eta\%$	19.25	20.47	18.80

3.5.1 Caractéristiques I-V

Les caractéristiques courant tension pour trois différentes couches tampons dans notre cellule solaire à base CZTS sont représentés dans la figure 3.2. On remarque que le CdS a la meilleure valeur de $J_{cc}= 23.98$ (mA/cm²) après la couche ZnSe avec $J_{cc}=23.02$ (mA/cm²) en dernier la couche ZnS avec $J_{cc}=22.66$ (mA/cm²) et la tension de circuit ouvert arrive 0.9 V puis elle diminue.

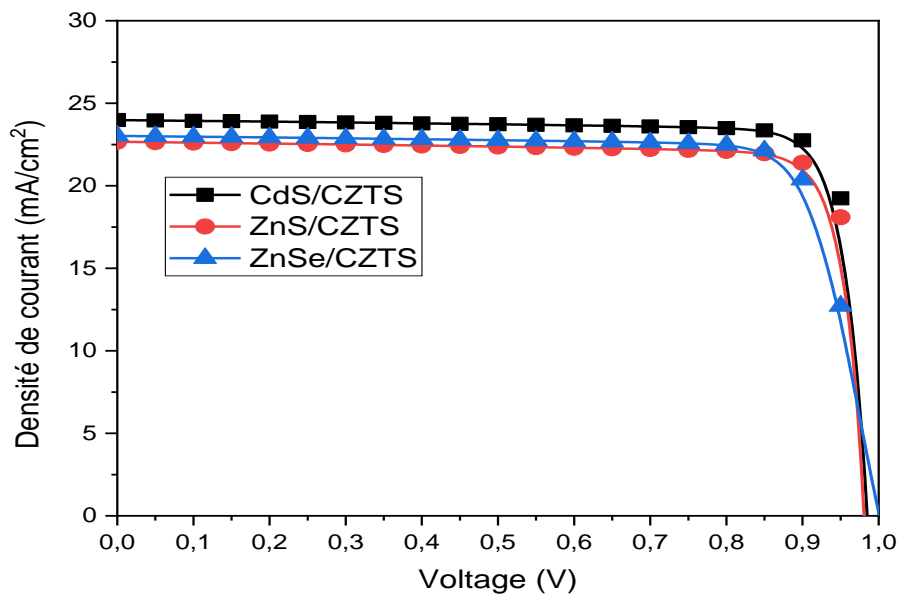


Figure3. 2 caractéristiques courant tension des trois couche CdS /ZnS /ZnSe.

3.5.2 Caractéristiques P-V

La figure 3.3 représente la puissance délivrée en fonction de la tension pour les trois différentes couches tampon dans la cellule solaire à base CZTS ; chaque courbe présente un maximum qui correspond à la puissance maximale pour chaque couche. On remarque que la puissance délivrée par le CdS est meilleure puis ZnS puis ZnSe par ce que la puissance a une relation avec le rendement. Quand le rendement augmente la puissance maximale augmente. On peut voir les résultats des rendements dans le tableau 3.1.

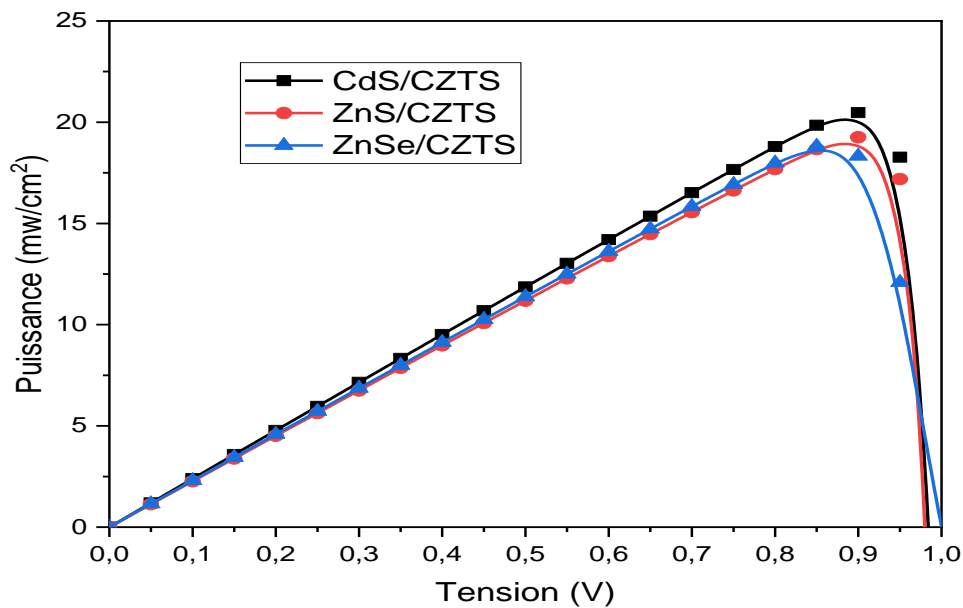


Figure3. 3 la puissance délivrée par la cellule solaire CZTS en fonction de la tension pour les trois différentes couches.

3.5.3 L'efficacité quantique externe EQE

La figure 3.4 représente la variation de l'efficacité quantique externe en fonction de la longueur d'onde pour les 3 couches tampon. D'abord l'efficacité quantique externe, c'est le rapport entre le nombre d'électrons photogénère et le nombre des photons incidents. On remarque que l'EQE de la couche CdS est égale à 21% pour une longueur d'onde égale à 0,2 μ m. On observe un maximum de cette efficacité égale à 75% à 0,4 μ m. On remarque aussi que EQE de la couche ZnSe égale à 12% pour une longueur d'onde égale à 0,2 μ m on observe un maximum de cette efficacité égale à 65% à 0,4 μ m. Et on remarque que EQE de la couche ZnS est égale à 0% pour

une longueur d'onde égale à $0.2\mu\text{m}$ et on observe un maximum de cette efficacité égale à 60% à $0.4\mu\text{m}$.

Avec les trois couches, On remarque une bonne efficacité dans l'intervalle $[0,3 ; 0,5]\mu\text{m}$ parce que c'est la gamme des longueurs d'onde visible et une diminution dans les autres longueurs.

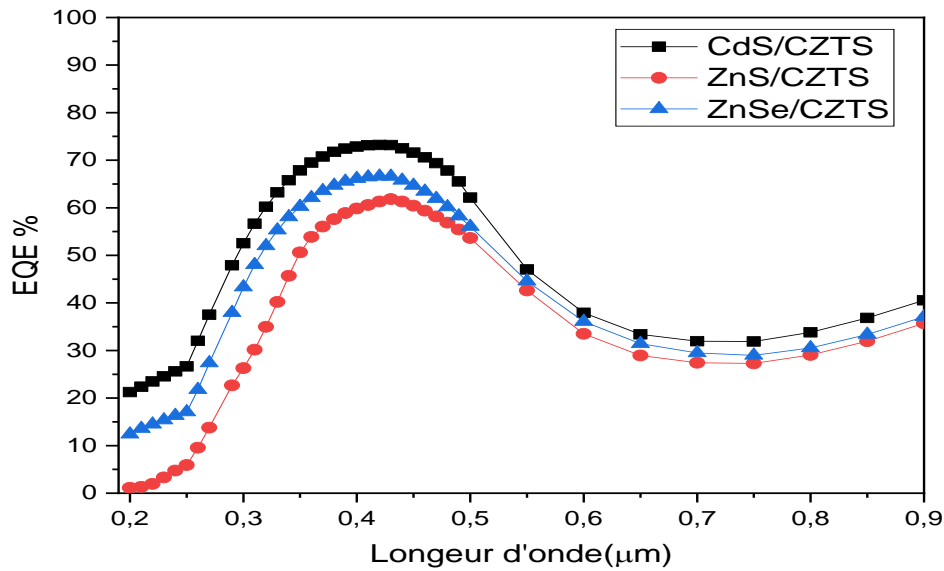


Figure3. 4 la variation de l'efficacité quantique externe en fonction de la longueur d'onde pour les trois couches tampon.

Conclusion

D'après les résultats obtenus de la simulation faites dans la partie 1 on constate que la cellule solaire a base CZTS avec la couche tampon Cds nous a donné les meilleurs résultats. Donc dans la partie 2, on va utiliser cette structure.

3.6 Effet de l'épaisseur de la couche absorbante CZTS sur les caractéristiques électriques de la cellule

Les paramètres de la structure tirs des différentes caractéristiques représentées précédemment, sont récapitulés dans le tableau 3.3.

Tableau3. 3 Effet de l'épaisseur de la couche CZTS (d_{CZTS}) sur les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire à base de CZTS.

d_{CZTS} (μm)	J_{cc} (mA/cm^2)	V_{co} (V)	FF%	$\eta\%$
0.25	4.81	0.88	80.18	3.43
0.5	8.09	0.92	82.56	6.14
0.75	11.29	0.95	83.34	8.94
1	14.30	0.958	84.24	11.54
1.25	17.07	0.966	84.63	13.97
1.5	19.61	0.975	85.59	16.37
1.75	21.90	0.985	85.87	18.53
2	23.98	0.995	85.78	20.47

3.6.1 Courant de court-circuit J_{cc}

La figure 3.5 représente la variation de la densité du courant de court-circuit en fonction de l'épaisseur de la couche CZTS. On remarque que lorsqu'on augmente l'épaisseur de la couche CZTS le courant de court-circuit augmente jusqu'à 23.98 (mA/cm^2).

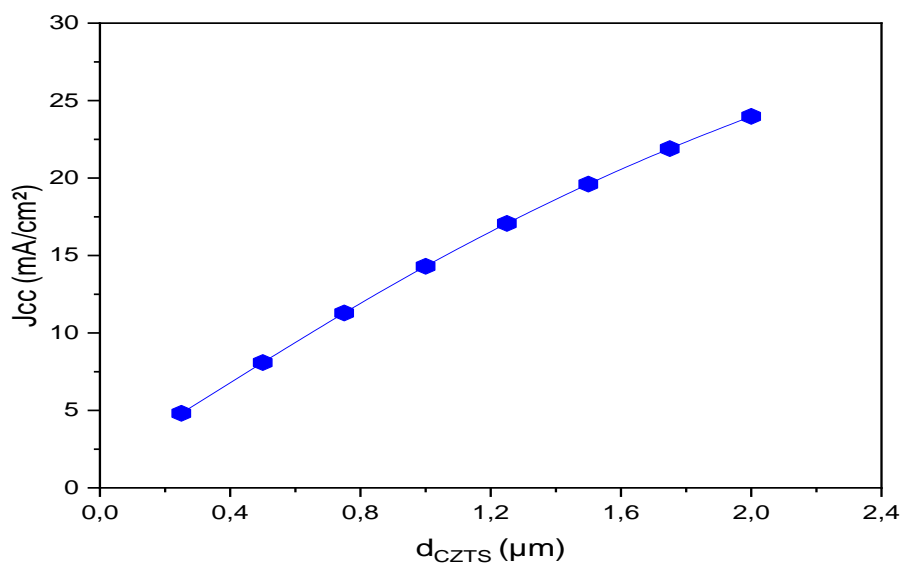


Figure3. 5 Variation de la densité de courant court-circuit J_{CC} avec l'épaisseur d_{CZTS} .

3.6.2 La tension de circuit ouvert V_{co}

La figure 3.6 représente l'influence de l'épaisseur de la couche CZTS sur la tension de circuit ouvert. On remarque que lorsqu'on augmente l'épaisseur de la couche CZTS engendre une faible augmentation de la tension de circuit ouvert de 0.88 à 0.98V.

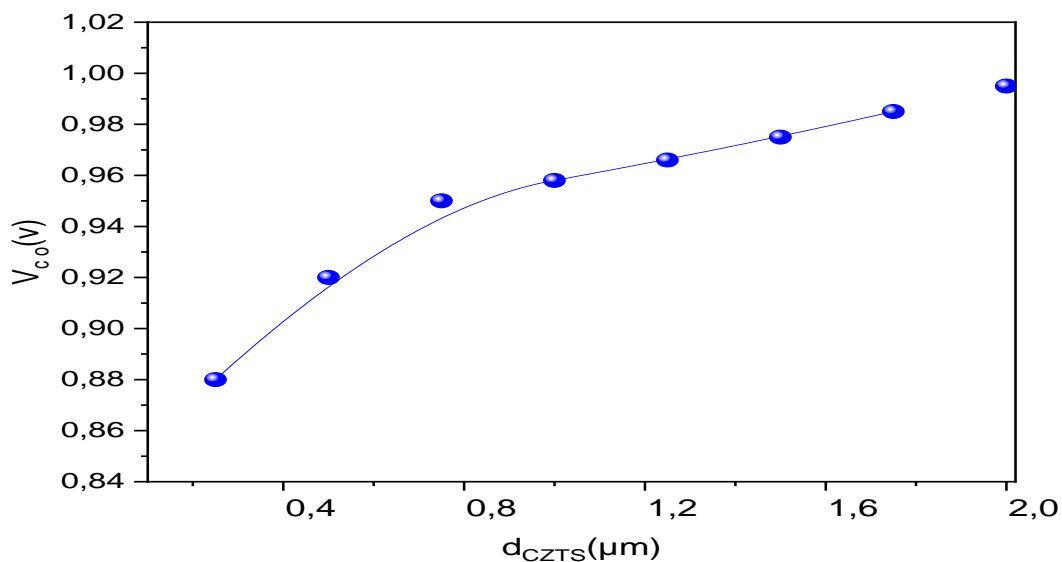


Figure3. 6 Variation de la tension de circuit ouvert (V_{co}) avec l'épaisseur d_{CZTS} .

3.6.3 Le facteur de forme FF

La figure 3.7 représente la variation du facteur de forme en fonction de l'épaisseur de la couche CZTS. On remarque une augmentation du facteur de forme avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche CZTS.

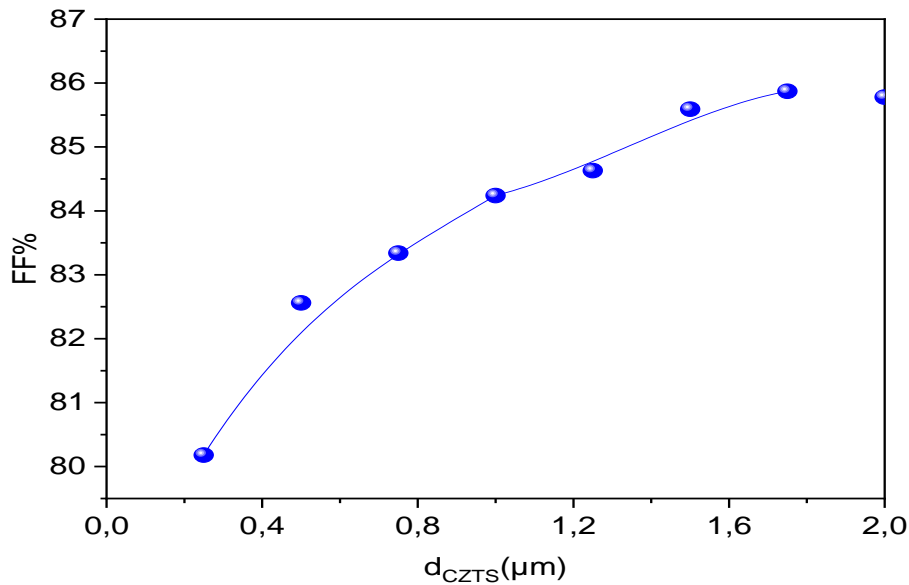


Figure3. 7 Variation du Facteur de forme FF avec l'épaisseur d_{CZTS} .

3.6.4 Le rendement de conversion η

La figure 3.8 représente la variation du rendement de conversion en fonction de l'épaisseur de la couche CZTS. Le rendement c'est le paramètre le plus important qui caractérise la cellule photovoltaïque il exprime la capacité de la cellule à convertir efficacement les photons de la lumière incidente en courant électrique. On remarque que le rendement augmente lorsqu'on augmente l'épaisseur de la couche CZTS, Le rendement varie de 3 à 20% dans l'intervalle $[0,2 ; 2] \mu\text{m}$.

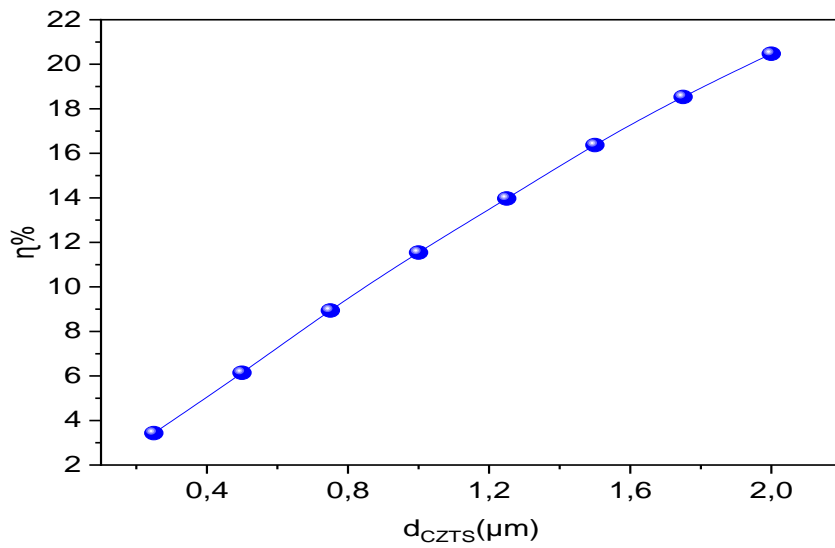


Figure3. 8 Variation du rendement de conversion (η) avec l'épaisseur d_{CZTS} .

3.7 Effet de la couche P-Si sur les performances de la cellule solaire à base CZTS

Afin d'augmenter le rendement de conversion de notre cellule solaire on a ajouté une autre couche de silicium de type p les résultats obtenue sont illustre dans le tableau 3.4

Tableau3. 4 résultats de la simulation pour les deux structures [CdS/CZTS] et [CdS/CZTS/Si].

Paramètres de performance	CdS / CZTS	CdS / CZTS / Si
$J_{\text{cc}} (\text{mA}/\text{cm}^2)$	23.98	30.66
$V_{\text{co}}(\text{V})$	0.995	0.82
FF%	85.78	84.11
$\eta\%$	20.47	21.21

Tableau3. 5 les propriétés du matériau P-Si utilise dans la simulation.

	P-Si
Epaisseur (μm)	1
Band de gap (eV)	1.12
Affinité électronique (eV)	4.05
Constante diélectrique	11.9
N_c (cm^{-3})	2.8×10^{19}
N_v (cm^{-3})	2.65×10^{19}
Vitesse thermique des électrons (cm/s)	10^7
Vitesse thermique des trous (cm/s)	10^7
Mobilité d'électron ($\text{cm}^2/\text{V. s}$)	1450
Mobilié des trous ($\text{cm}^2/\text{V. s}$)	500
N_D (cm^{-3})	0
N_A (cm^{-3})	1×10^{20}

3.7.1 Caractéristiques I-V

La caractéristique courant tension pour les deux structures sont représentées dans la figure 3.9 On remarque que la structure [CdS/CZTS/Si] arrive à une densité de court-circuit plus grande que la structure [CdS/CZTS] respectivement 30.66 (mA/cm^2) et 23.98 (mA/cm^2). Par contre la tension de circuit ouvert dans la structure [CdS/CZTS] arrive à 0.82V et pour la structure [CdS/CZTS/Si] arrive à 0.98V .

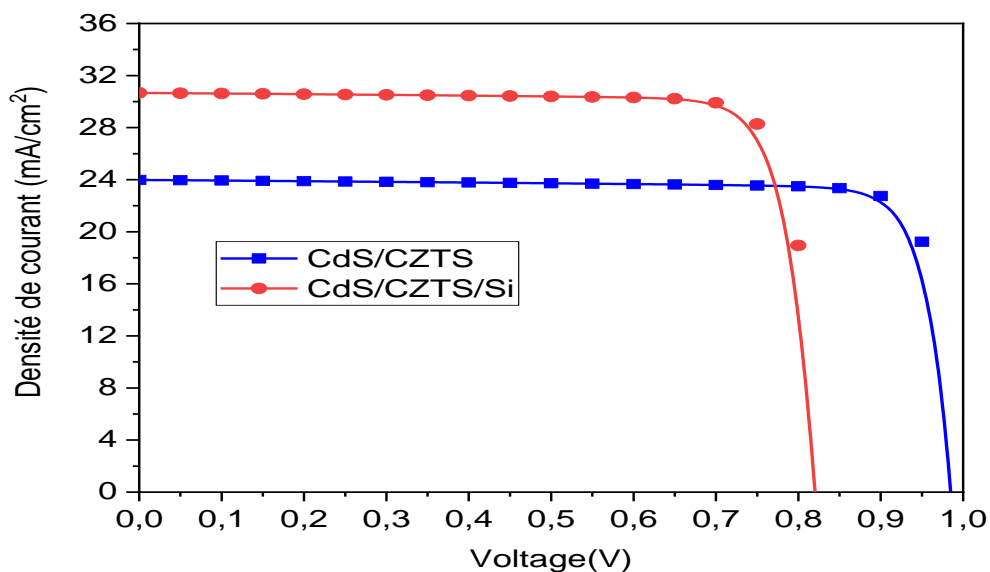


Figure3. 9 caractéristiques courant tension pour les deux structures.

3.7.2 Caractéristiques P-V

La figure 3.10 représente la puissance délivrée en fonction de la tension pour les 2 structures on constate que la puissance maximale de la structure [CdS/CZTS/Si] un peu plus grande que celle de la structure [CdS/CZTS/] à cause de l'augmentation du courant de court-circuit. Par contre la tension de circuit ouvert dans la structure [CdS/CZTS] arrive à 0.94 V et pour la structure [CdS/CZTS/Si] arrive à 0.75 V.

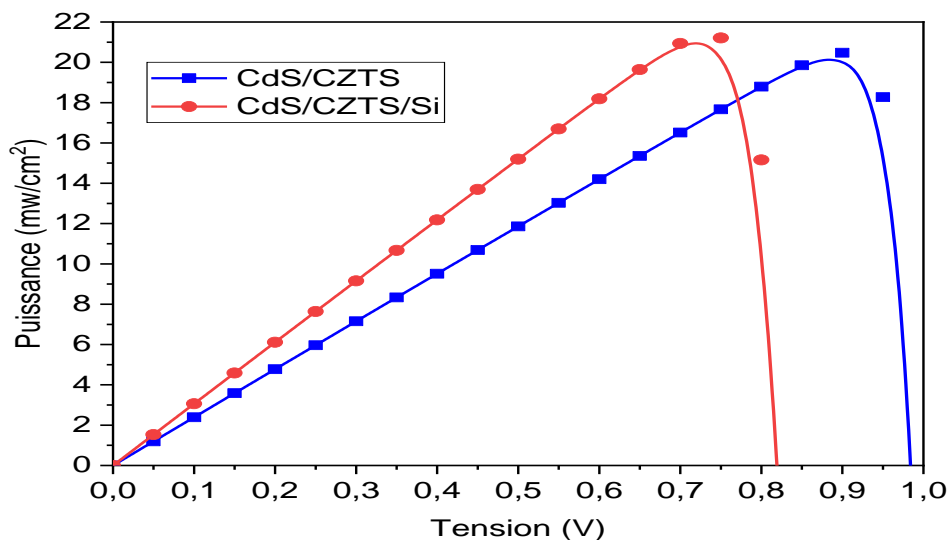


Figure3. 10 la puissance délivrée par la cellule solaire CZTS en fonction de la tension pour les deux structures.

3.7.3 L'efficacité quantique externe EQE

La figure 3.11 représente la variation de l'efficacité quantique externe en fonction de la longueur d'onde pour les 2 structures proposées.

On remarque une petite amélioration de l'efficacité quantique externe lorsqu'on a ajouté le silicium

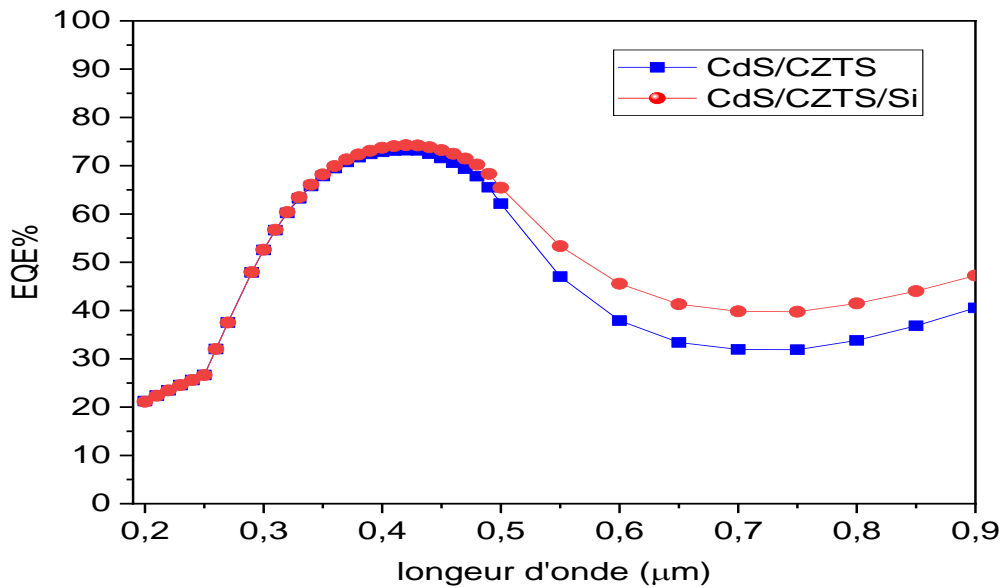


Figure3. 11 la variation de l'efficacité quantique externe en fonction de la longueur d'onde pour les deux structures.

3.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons fait une simulation d'une cellule solaire a base CZTS pour trois couches tampon différentes CdS / ZnS / ZnSe afin de prendre la meilleure structure avec le meilleur rendement CdS 20.47 %, ZnS19.25 %, ZnSe 18.80 %. On a pris le CdS malgré la toxicité.

Ensuite on a étudié l'effet de l'épaisseur de la couche absorbante CZTS sur les caractéristiques de la cellule photovoltaïque. Afin d'améliorer le rendement de conversion on a ajouté une couche de silicium à notre cellule solaire et on est arrivé à un rendement $\eta=21.21\%$.

CONCLUSION GENERALE

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

L'objectif de ce travail est d'étudier les caractéristiques électriques et augmenter le rendement de la cellule solaire CZTS. On a commencé par illustrer l'effet des différentes couches tampon sur les caractéristiques $I (v)$, $P (V)$ de la cellule solaire. L'effet de l'épaisseur de la couche absorbante CZTS sur les paramètres photovoltaïques, 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 photovoltaïques ont été obtenus à l'aide du logiciel Silvaco.

Afin d'améliorer le rendement de conversion de notre cellule a couche minces nous avons ajouté une couche de silicium de type P (P-Si) d'un μm d'épaisseur à la couche absorbante CZTS. Les résultats montrent que la couche Si fonctionne comme une deuxième couche absorbante alors plus de porteurs photogénère améliorent le rendement de la cellule solaire. Et comme conclusion de ce travail on a pu avoir un rendement de conversion $\eta=21.21\%$

Les références

- [1] Energie solaire photovoltaïque.doc / B. Flèche - D. Delagnes / juin 07
- [2]<https://www.europe-energie.com/2019/08/petite-histoire-du-photovoltaïque> vu le 3/07/2020
- [3] Medjelled Yamina (Effet de la Résistance Série sur les Performances d'une Cellule Photovoltaïque à Multi jonction sous concentration solaire. Approximation de forte injection) Mémoire de Magister, 2012.
- [4] Le photovoltaïque–Module 3 – Fonctionnement et Technologies Novembre 2010 page 3, 4, 5,6/10.
- [5] Nichapour OleKsiy (simulation, fabrication et analyse de cellule photovoltaïque à contacte arrières interdigités) Thèse de doctorat. L'institut national des sciences appliquées de Lyon 2005.
- [6]https://www.ecosources.info/dossiers/Types_de_cellules_photovoltaïques Vu le 15/07/2020
- [7] A. Luque, Practical Handbook of Photovoltaics (Second Edition)-2012.
- [8] Les cellules photovoltaïques organiques Pierre Destruel et Isabelle Seguy 16 mars 2010
- [9] Mémoire de fin d'étude en Master Etude par simulation numérique de la Cellule solaire à base de CZTS par SCAPS Ben Abderrazak Ghania 2013-2014
- [10] thèse de doctorat Synthèse et étude des matériaux semi-conducteurs quaternaires à large bande interdite : $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ Chaouche Mouna
- [11] H. Mathieu, physique des semi-conducteurs et des composants électroniques, 6 Ed DUNOD 2009
- [12] S.Kaci et al: «Etude et simulation d'une structure à base de GaInNAs/GaAs pour le photovoltaïque», Mémoire d'ingénieur d'état, Université Saad Dahleb Blida, 2011.
- [13] Memoire de fin d'étude en master intitulé: etude de l'effet de la couche mince CdZns dans la cellule solaire CZTS , presenter par NOUIRI achouak et BOUALLEM zineb
- [14]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).
- [15] 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).
- [16] N. Kamoun, H. Bouzouita and B. Rezig, « Fabrication and characterization of $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ thin films deposited by spray pyrolysis technique », Thin Solid Films 515, pp. 5949-5952, (2007).

- [17] 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).
- [18] Hironori Katagiri, Kazuo Jimbo, Satoru Yamada, Tsuyoshi Kamimura, Win Shwe Maw, Tatsuo Fukano, Tadashi Ito, Tomoyoshi Motohiro, *Appl. Phys. Express* 041,201, (2008).
- [19] T. Maeda, S. Nakamura and T. Wada, « Phase stability and electronic structure of Infree photovoltaic semiconductors, $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ and $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ by first-principles calculation », *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* 1165, 1165-M04-03, (2009).
- [20] S. Toumi, "Etude des composants électroniques (cellules solaires, diodes Schottky) en utilisant les algorithmes génétiques et le langage VHDL AMS", Thèse de Doctorat, Université de Sétif, Algérie, (2012).
- [21] S. Martinuzzi, O. Plais, M. Pasquinelli, and F. Ferrazza, *The European physical Journal Applied Physics*, 32(2005)187-192
- [22] A. Ricaud, 'Photopiles solaires. Lausanne, Suisse : Presse polytechniques et Universitaires romandes, (1997)332.
- [23] J. Szlufcik et al, 'Low-cost industrial technologies of crystalline Silicon solar cells', *Proc. of the IEEE*, 85(5)(1997)711-729
- [24] Samira Guitoni Elaboration et étude de structures à base de couches minces de ZnO et de chalcogénures (CIS, CZTS) pour des applications photovoltaïques. Thèse de doctorat 2017/2018
- [25] D. S. Su and S. H. Wei, « Kesterites and Chalcopyrite : A Comparison of Close Cousins », *Appl. Phys. Lett.* 74, pp. 2483–2485, 1999.
- [26] http://www.Silvaco.com/products/device_simulation/atlas.html. Mai 2012. Vu le 01/10/2020
- [27] Jean-Marc Gallière, Jérôme Boch, « Mise en oeuvre de la simulation mixte électrique/TCAD pour décloisonner l'enseignement de la microélectronique », 10es Journées Pédagogiques du CNFM, 2008.