



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Amar Thelidji- Laghouat

FACULTE : TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : GÉNIE DES PROCÉDÉS

MEMOIRE DE MASTER

Présenté par : Lechlah Houda

Mahfoud Fatima Zohra

DOMAINE : Sciences et Technologies

FILIERE : Génie des Procédés

OPTION : Génie des Procédés de l'Environnement

Thème

**Etude des performances des cellules solaires à base
des couches minces CZTS.**

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	qualité
Boussouar Imane	MCB	Présidente
Adjeroud Yasmina	MCB	Examinatrice
Hannachi Manelle	MCB	Rapporteur

Promotion : JUIN 2021

Remerciements

Nous commencerons par remercier et rendre grâce à Dieu tout puissant pour nous avoir donnée les constitutifs courages et la volonté de mener à bon terme ce travail.

Nous tenons chaleureusement à remercier :

Nos premiers remerciements vont à notre particulièrement la promotrice, Mme Manelle Hannachi, enseignante à l'université, Amar Thelidji- Laghouat, qui a suivi et veillé sur le bon déroulement de ce travail avec ses conseils et ses remarques.

Nous voudrions également remercier l'honorable jury composé de Pr. Boussouar Imane, présidente et Pr. Adjeroud Yasmina, Examinatrice, d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Nous remercions Monsieur le professeur Marc Burgelman pour nous avoir aidé à mieux appréhender logiciel SCAPS ainsi que pour sa licence délivrée gratuitement.

Nous remercions également tous les professeurs de notre cursus universitaire. Sans oublier MR : TAOUTI M le chef de département de génie des procédés, et MME : BOUTASSOUNA N le chef d'option de l'Environnement. Plus largement, nous tenons à remercier tous ceux qui ont partagé ces jours de travail avec nous, qui nous ont apporté leurs expériences, leurs conseils ou leurs contributions.

Enfin nous remercions tous ceux qui ont contribué de près

Ou de loin à l'élaboration de ce modeste travail.

Dédicaces

A ma très chère Mère **KHEIRA LECHLAH** et à mon cher Père **AISSA** que Dieu ait pitié, en guise de certificat de gratitude, de respect, d'amour et d'appréciation pour leurs efforts pour atteindre mon objectif.

A mon cher fiancé **ACHOUR AISSA** a été toujours le pour me donner les conseils et pour m'encourager le long de ces années avec tout son amour.

A ma sœur **FATNA**, que Dieu ait pitié d'elle, ainsi que de son mari **BEN ADDA LECHLAH**, et de ses enfants : **BOUCHRA**, **DJAMEL** et **YACINE**.

A ma chère sœur **FATIMA**.

A mon neveu : **ABD ELBASET KHARROUBI**.

A mes frères **KUIDER** et **MOHAMMED**, sa femme **MIMOUNA HASSASI** et ses enfants : **SIRINE IKRAM**, **AYOUB** et **ACHWAK**.

A ma sœur **MASSOUDA**, son mari **OUANNAS ELZOUBIR** et ses enfants : **RADJAA**, **ABD ELMADJID**. A ma sœur **OM ELKHIR**, son mari **ABD ELKADER TAHARAT** et ses enfants **.FATNA**, **CHIFA**.

- ❖ À la personne qui a partagé ce travail avec moi : **M FATIMAZOHRA**.
- ❖ A toutes Ma famille: **LECHLAH**, et la famille **ACHOUR**.
- ❖ A mes Amis : **FATIHA D** ; **FATIMA M** ; **LILA L** ; **TORKIA B** ; **CHAIMAE** ; **FRAIHA H** ; **ZINEB B**.
- ❖ A tous mes collègues du classe 2émeannée master **GPE**.
- ❖ A toutes les personnes qui me reconnaissent.

LechlahHouda

Dédicaces

Je tien c'est avec grande plaisir que je dédie ce modeste travail :

À l'être le plus chère de ma vie, ma mère « M, Mebrouka, »

À celui que m'a fait de moi une femme mon père « Mohammed »

À mes chère frères et sœurs, « Omar, Radoinne, Hadjer, Rokia,

Brahim, Hamza, Assia, Oukacha »

➤ À toutes ma famille ; Mahfoud

➤ À mon mari : K,Toufik

➤ À mon âme sœur ; Ben TaherSiham.

➤ À la personne qui a partagé ce travail avec moi ;

L.HOIDA.

➤ À mes amis ; Ahlam ; Safaa ; Sara ; Khadidja ; Nana ;
hadjira;khaoula ;Aroua ;Souad;

➤ A tous mes collègues de classe 2MGPE.

Et toutes les personnes qui me reconnaissent.

Mahfoud Fatima Zohra

Dédicaces
Remerciements

Sommaire	
Liste des abréviations	I
Liste des Figures	II
Liste des Tableaux	III
Introduction générale	1
CHAPITRE I : Généralités sur les cellules photovoltaïques	
I.1.Introduction	3
I.2. Jonction P-N	3
I.3.Cellule solaire photovoltaïque	5
I.4.Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	6
I.4.1.Cellule solaire idéale	6
I.4.2.Cellule solaire réelle	6
I.5.Différentes caractéristiques d'une cellule solaire	7
I.5.1.Courant de court-circuit J_{cc}	7
I.5.2.Tension de circuit ouvert V_{co}	7
I.5.3.Rendement de conversion η	8
I.5.4.La puissance maximale P_{max}	8
I.5.5.Facteur de forme FF	8
I.6.Différentes technologies des cellules photovoltaïques	9
I.6.1. La première génération	9
I.6.2.Seconde génération	10
I.6.3.Troisième génération	10
I.7.Cellules Photovoltaïques à Base Couches Minces	11
I.7.1.Couches Minces CZTS	11
I.7.2.Différents composants de la cellule à Base de Couches Minces	11
I.8.Conclusion	12
CHAPITRE II : Résultats et discussions	
II.1.Introduction	15

II.2.Présentaion de la cellule étudiée	15
II.3.Propriétés physiques des différentes couches	15
II.4.Effet de la variation de l'épaisseur des couches CdS, CZTS et ZnO sur les performances de la cellule photovoltaïque à base de CZTS.	16
II-4-1- Influence de l'épaisseur de la couche absorbante CZTS	16
II-4-2- Influence de l'épaisseur de la couche tampon CdS	18
II-4-3- Influence de l'épaisseur de la couche fenêtre n-ZnO	19
II-5-Effet du dopage des couches CdS, CZTS et ZnO sur les performances de la cellule photovoltaïque à base de CZTS	21
II-5-1-Effet de dopage de la couche en CZTS	21
II-5-2-Effet de dopage de la couche en CdS	22
II-5-3-Effet de dopage de la couche en ZnO	22
II.6. L'effet de la variation de la couche tampon	23
II.7 Conclusion	24
Conclusion générale	25
Références bibliographiques	28
Résumé	

Liste des abréviations

Abréviation	Désignation
Jcc	Courant de court-circuit
Vco	Tension de circuit ouvert
η	Rendement
Pmax	La puissance maximale
Pin	La puissance d'éclairement
FF	Facteur de forme
Q	Charge élémentaire
T	Température
K	Constante de Boltzmann
CdS	Couche Tampon
CZTS	Couche Absorbent
ZnO	Couche Fenêtre
Iph	Courant
Is	Courant de saturation
Rs	Résistance série
Rsh	Résistance Shunt

Liste des figures

N°de figure	Désignation	N° de page
I.1	Schéma descriptif d'une jonction PN.	3
I.2	Schéma descriptif d'une jonction PN en équilibre thermodynamique.	4
I.3	Passage d'un électron de la bande de valence vers la bande de conduction sous l'effet de la lumière.	4
I.4	Circulation d'un courant électrique dans la jonction sous l'effet de la lumière.	5
I.5	Structure simple d'une cellule solaire.	6
I.6	Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle.	7
I.7	Les différentes technologies photovoltaïques.	9
I.8	Les différents types de cellules solaires.	10
II.1	Structure de la cellule à base de CZTS.	15
II.2	Le rendement de conversion photovoltaïque (η) de la cellule PV en fonction de l'épaisseur de la couche (n-CZTS).	18
II.3	Le rendement de conversion photovoltaïque (η) de la cellule PV en fonction de l'épaisseur de la couche (n-ZnO).	20

Liste des tableaux

N° de tableau	Désignation	N° de page
II.1	Les différents paramètres de simulation de la cellule.	16
II.2	Effet de la variation de l'épaisseur de la couche (n-CZTS) sur les paramètres caractéristiques de la cellule PV.	17
II.3	Effet de la variation de l'épaisseur de la couche (p-CdS) sur les paramètres caractéristiques de la cellule PV.	19
II.4	Effet de la variation de l'épaisseur de la couche (n-ZnO) sur les paramètres caractéristiques de la cellule PV.	20
II.5	Effet de dopage de la couche CZTS.	21
II.6	Effet de dopage de la couche tampon CdS.	22
II.7	Effet de dopage de la couche ZnO.	22
II.8	Paramètres physique utilisés dans la simulation.	23
II.9	valeurs de J_{sc} , V , FF, η de la cellule ZnO/CdS/CZTS.	24
II.10	valeurs de J_{sc} , V , FF, η de la cellule (CZTS/ZnSe/ZnO).	24
II.11	Valeurs de J_{sc} , V , FF, η de la cellule (CZTS/ZnS/ZnO).	24

عنوان المذكرة: دراسة تأثير الخلايا الشمسية بالاعتماد على الطبقات الرقيقة القائمة على CZTS .
الطالبة: لشلح هدى ، محفوض فاطمة الزهراء .

الإستاذة المشرفة: حناشي منال .

ملخص: في دراسة المحاكاة هذه نستخدم برنامج معرف ب SCAPS دراسة اداء الخلايا الشمسية القائمة على CZTS ، ولذاك نقوم بتقييم تأثير سماكة وشوائب الطبقات الرقيقة على جهد الدارة، تيار الدارة ،معامل الشكل ومردود الخلية، ثم قمنا بتعديل الهيكل النموذجي CZTS/CdS/ZnO عن طريق تغيير الطبقة العازلة CdS الى ZnSe ثم ZnS .

الكلمات المفتاحية: الخلية الشمسية، الطبقات الرقيقة، المحاكاة، CZTS، SCAPS .

Titre du mémoire : Etude des performances des cellules solaire à base des couches minces CZTS.

Etudiants : Lechlah Houda et Mahfoud Fatima Zohra

Encadreuse : Hannachi Manelle

Résumé :

Dans cette étude de simulation, nous utilisons le logiciel SCAPS ID pour étudier les performances des cellules solaires à base de CZTS. Nous évaluons l'impact de la variation des épaisseur des couches et des concentration de dopage sur la tension du circuit, le courant de court-circuit, le facteur de forme et le rendement de conversion . Ensuite nous avons modifié la structure de ZnO/CdS/CZTS en changeant la couche tampon CdS par la couche tampon ZnS puis par la couche tampon ZnSe et on vérifie leurs impacts sur le rendement.

Mots Clés : Cellule solaire ; couches minces ; CZTS ; simulation ; SCAPS.

films.thinCZTSonbasedcellssolarofperformancetheofStudy **title:Note**

Students: Lechlah Houda and Mahfoud Fatima Zohra

The supervising professor: Hannachi

Manelle **Abstract:**

In this present simulation study, we use the SCAPS ID software to study the performance of CZTS-based solar cells. We evaluate the impact of the variation of layer thickness and doping concentration on the circuit voltage, short circuit current, fill factor and efficiency. Then we modify the structure of ZnO/CdS/CZTS by changing the CdS buffer by ZnS layer then by ZnSe layer and we verify the impact on the efficiency.

Keywords : Solar cell ; CZTS; simulation; SCAPS (Solar Cell Capacitance Simulator).

Introduction générale

Introduction Générale

La réduction des énergies non renouvelables comme les combustibles fossiles a conduit à l'avancement de l'utilisation des énergies renouvelables. [1] L'énergie solaire est parmi les énergies renouvelables la plus prometteuse et la plus puissante. Elle est peu coûteuse, inépuisable, abondante, propre et écologique. [2]

La cellule solaire est un dispositif photovoltaïque qui peut produire de l'électricité en utilisant l'énergie solaire. Habituellement, les cellules solaires sont classées en trois générations. Les cellules solaires de première génération sont basées sur wafer (plaques), les cellules solaires de deuxième génération sont à base de couches minces, tandis que les cellules solaires de troisième génération emploient des composés organiques. [1]

Les cellules solaires à base de $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (CZTS) présentent l'avantage d'un faible coût par rapport aux technologies de cellules solaires existantes. [4] Le sulfure de cuivre et d'étain ($\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$) est l'un des matériaux les plus prometteurs dans le domaine des cellules solaires à base couches minces. Il est composé d'éléments abondants et non toxiques en terre conduit à une réduction prometteuse des prix de cellule solaire CZTS à l'avenir. [5] La bande interdite directe du CZTS (1,4 eV–1,6 eV) en fait un composé semi-conducteur quaternaire prometteur avec un coefficient d'absorption de l'ordre de 10^4 cm^{-1} . [2]

Dans cette étude nous allons utiliser le logiciel SCAPS-1D développé par l'Université de Gents. SCAPS-1D résout trois équations importantes des semi-conducteurs, l'équation de Poisson, l'équation de continuité et l'équation de transport de charge pour électrons et trous pour analyser différents paramètres caractéristiques de la cellule solaire. [7]

Ce mémoire est réparti en deux chapitres, dans le premier chapitre on fait appel aux notions générales sur l'énergie photovoltaïque, le second chapitre nous présentons les résultats de la simulation et leurs interprétations. Nous terminons ce mémoire par une conclusion générale.

Chapitre I :
Généralités sur les cellules
photovoltaïques

I.1 Introduction

En 1839, le physicien français Alexandre Edmond Becquerel a découvert l'effet photovoltaïque, qui est la conversion de l'énergie lumineuse contenue dans le rayonnement solaire en électricité par la production et la transmission d'un matériau semi-conducteur pour les charges électriques positives et négatives sous l'influence de la lumière. [8] Dans ce chapitre nous allons faire un bref aperçu sur l'effet photovoltaïque, la jonction P-N, cellule solaire photovoltaïque, fonctionnement d'une cellule photovoltaïque, les différentes caractéristiques et technologies, les cellules photovoltaïques à base de couches minces.

I.2 La jonction P-N

La jonction comporte deux parties, la première partie donne un excès d'électron et s'appelle le type n-dopé, tandis que la deuxième partie est appelée le type p-dopé. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p comme schématisé sur la **figure I.1.**[9]

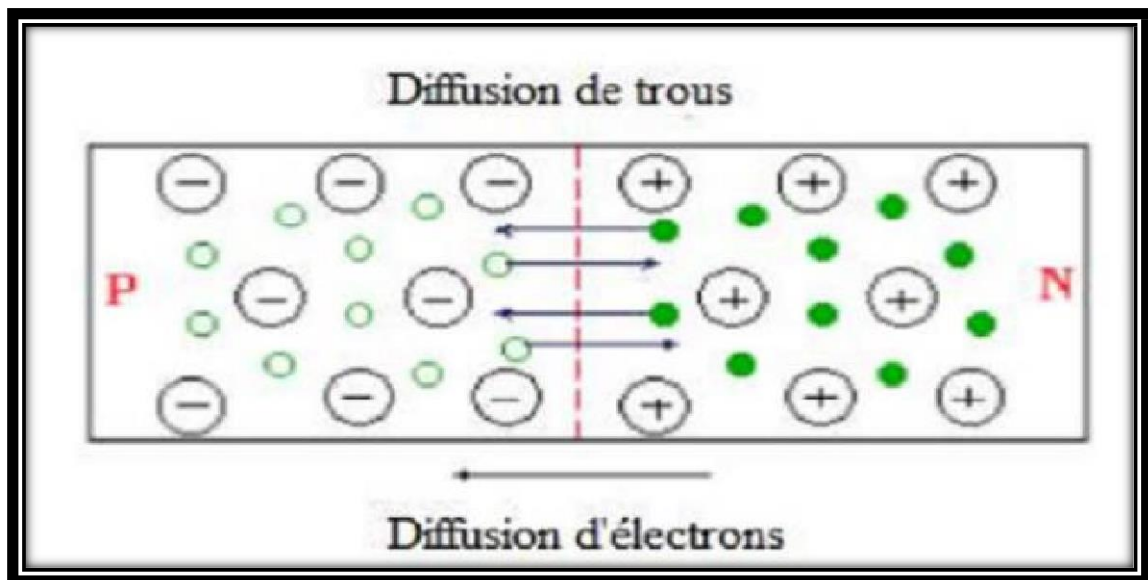


Figure I.1 : Schéma descriptif d'une jonction P-N [9]

La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p devient chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser

Les électrons dans la zone neutre tendent vers la zone p, **figure I.2** Une jonction (dite p-n) a été formée. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones n et p, ainsi, nous avons obtenu une diode. [9]

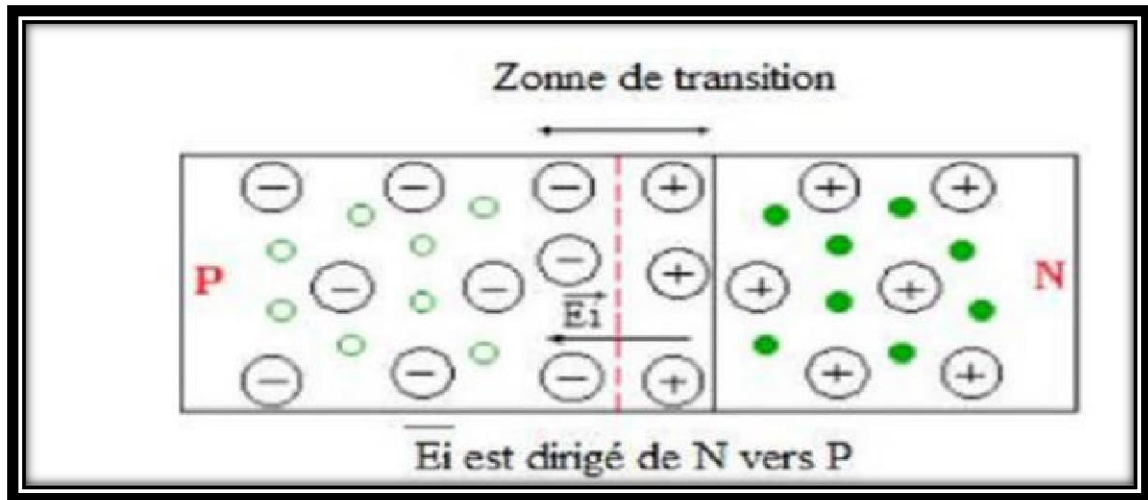


Figure I.2 : Schéma descriptif d'une jonction PN en équilibre thermodynamique

Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie supérieure ou égale à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence vers la bande de conduction et laisse aussi un trou engendrant ainsi une paire électron-trou comme le montre la **figure I. 3** ci-dessous. [9]

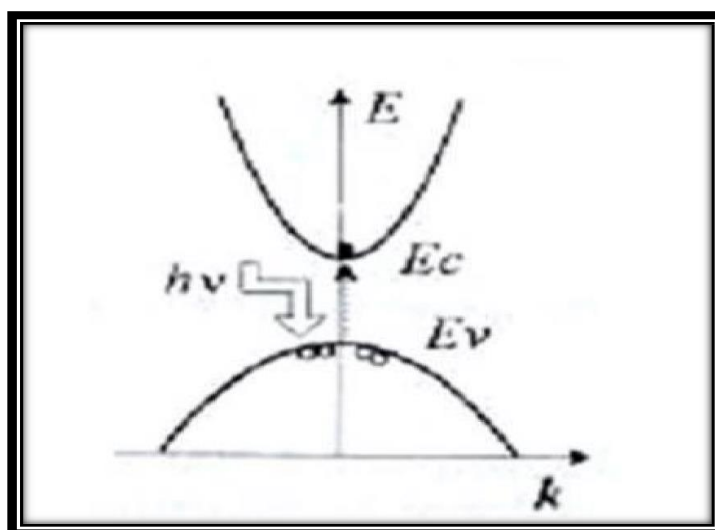


Figure I.3 : Passage d'un électron de la bande de valence vers la bande de conduction sous l'effet de la lumière [10]

L'absorption d'un photon (grain de lumière) dans le matériau semi-conducteur entraîne la formation d'une paire électron-trou. L'électron de la zone n et le trou de la zone p sont séparés sous l'effet de la différence de potentiel dans la jonction. Un courant électrique circule **figure I.4**, si on ferme le circuit par une charge extérieure (ampoule, etc...). L'effet repose donc à la base sur les propriétés semi-conductrices du matériau et son dopage afin d'en améliorer la conductivité. [10]

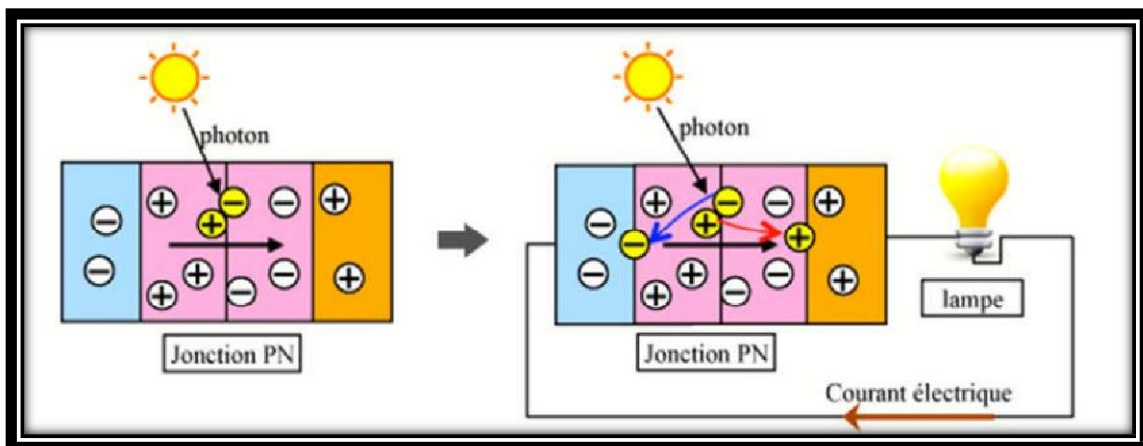


Figure I.4 : Circulation d'un courant électrique dans la jonction sous l'effet de la lumière [10]

I.3 Cellule solaire photovoltaïque

La cellule PV est constituée de matériaux semi-conducteurs et transformant directement l'énergie lumineuse en énergie électrique. Les cellules photovoltaïques sont composées:

- D'une couche semi-conductrice.
- D'une couche antireflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires,
- D'une grille conductrice sur le dessus (cathode) et d'un métal conducteur sur le dessous (anode). [11]

Les deux domaines principaux de la jonction sont appelés respectivement émetteur et base. **La figure I. 5.** Représente une structure typique d'une cellule solaire.

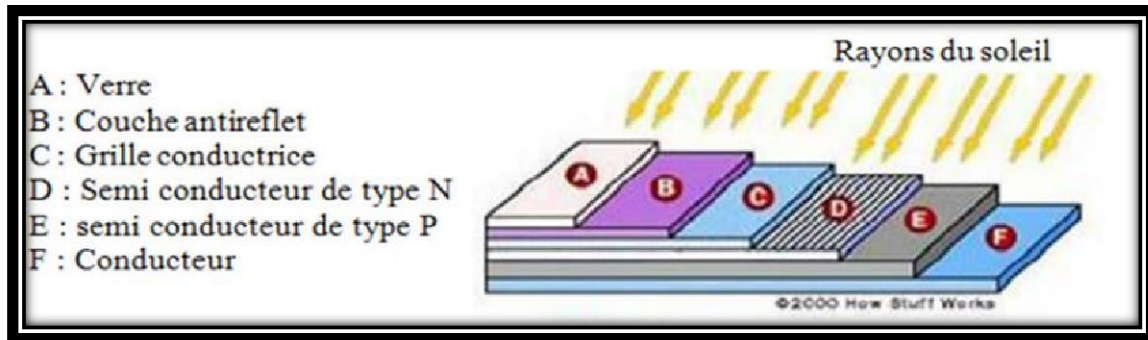


Figure I.5 : Structure simple d'une cellule solaire [11]

I.4 Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

La cellule solaire est une jonction P-N dont le fonctionnement est basé sur l'absorption du flux lumineux solaire, elle est un composant semi-conducteur qui convertit l'éclairement incident. En puissance électrique. Le phénomène mis en jeu, 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. [12]

I.4.1 La cellule solaire idéale

Si la caractéristique de la jonction est de la forme :

$$I = I_s (e^{\frac{qV}{kT}} - 1) \quad (I.1).$$

Peut admettre qu'en présence de lumière d'un photo-courant supplémentaire, I_{ph} dont le sens est opposé au courant direct. En branchant un circuit extérieur sur la cellule claire, recueille ce courant.

❖ Le courant sous lumière vaut : [12]

$$I = I_{ph} - I_s (e^{\frac{qV}{kT}} - 1) \quad (I.2).$$

❖ La tension V est donné par:

$$V = \frac{KT}{q} \cdot \ln \left(\frac{I_{ph} + I_s}{I_s} - 1 \right) \quad (I.3).$$

I.4.2 La cellule solaire réelle

La figure I.6 présente le schéma équivalent d'une cellule solaire réelle, où résistances parasites sont introduits dans ce schéma, elles vont influencer la caractéristique $I(V)$ de la cellule.

La première est la résistance série R_s , cette résistance est liée de l'impédance des électrodes et de la base, il en résulte que la tension V aux bornes de la cellule est différente de la tension aux bornes de la jonction. La deuxième est la résistance shunt R_{sh} qui correspond aux pertes dans la surface et pertes dues aux défauts dans le matériau, il en résulte qu'une partie du courant I_{ph} sera drivée par cette résistance et il ne pourra être délivré à la charge. L'équation de la caractéristique I-V de la cellule photovoltaïque compte tenu des résistances R_s et I_{sh} s'écrit donc : [12]

$$I(V) = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (1.4).$$

$$I(v) = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{q(v+R_s I)}{kT}} - 1 \right) - \frac{v + R_s}{R_{sh}} \quad (1.5).$$

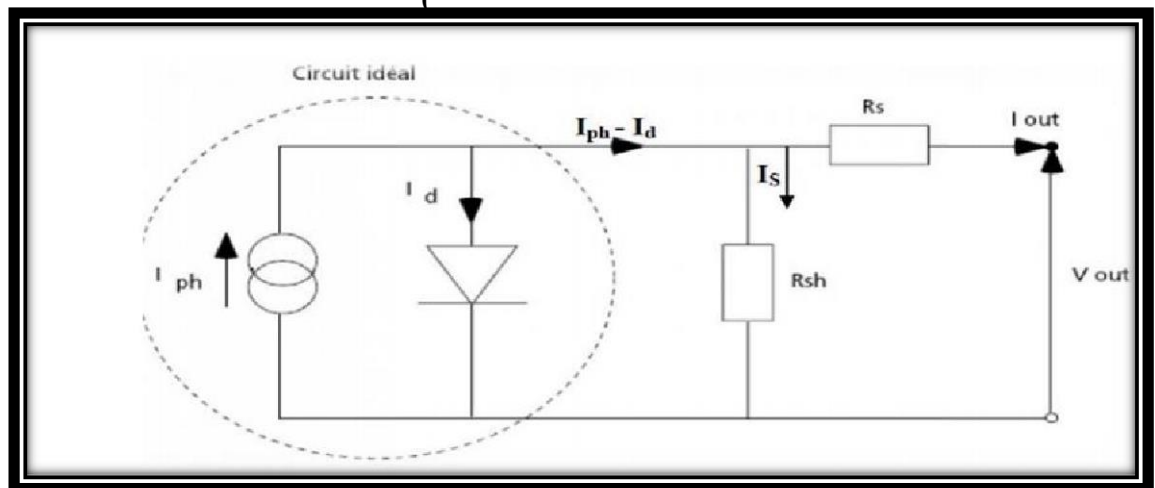


Figure I. 6. Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle [12]

I.5 Les différentes caractéristiques d'une cellule solaire

I.5.1 Courant de court-circuit J_{cc} :

Il 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. [13]

I.5.2 Tension de circuit ouvert V_{co} :

C'est la tension mesurée lorsqu'aucun courant n'est fourni par la cellule $I=0$ et elle varie peu avec l'éclairement. [13]

I.5.3 Rendement de conversion η :

C'est le facteur le plus important dans la cellule solaire, car il exprime la capacité et l'efficacité de la cellule dans la conversion des photons de lumière incidents en courant électrique. Sa valeur est déterminée à partir du rapport entre la puissance maximale P_{\max} et la puissance incidente P_{in} . [13]

$$\eta = \frac{P_{\max} - FF \cdot V_{\text{co}} \cdot J_{\text{cc}}}{P_{\text{in}}} \cdot \frac{V_{\text{co}} \cdot J_{\text{cc}}}{P_{\text{in}}} \quad (\text{I.6}).$$

Avec :

P_{in} : puissance d'éclairement reçue par unité de surface.

I.5.4 La puissance maximale P_{\max} [13]

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

$$P_{\max} = I_{\max} \cdot V_{\max} \quad (\text{I.7}).$$

I.5.5 Facteur de forme FF:

C'est la norme pour la qualité de la cellule solaire. Dans une cellule parfaite, la courbe sera un parfait rectangle et le facteur de forme sera égal à 1. Sa valeur est déterminée à partir du rapport du maximum de puissance P_{\max} produite par la cellule solaire et le produit du courant de court-circuit J_{cc} et la tension de circuit ouvert V_{co} : [13]

$$FF = \frac{P_{\max}}{V_{\text{co}} \cdot J_{\text{cc}}} \quad (\text{I.8}).$$

I.6 Les différentes technologies des cellules photovoltaïques

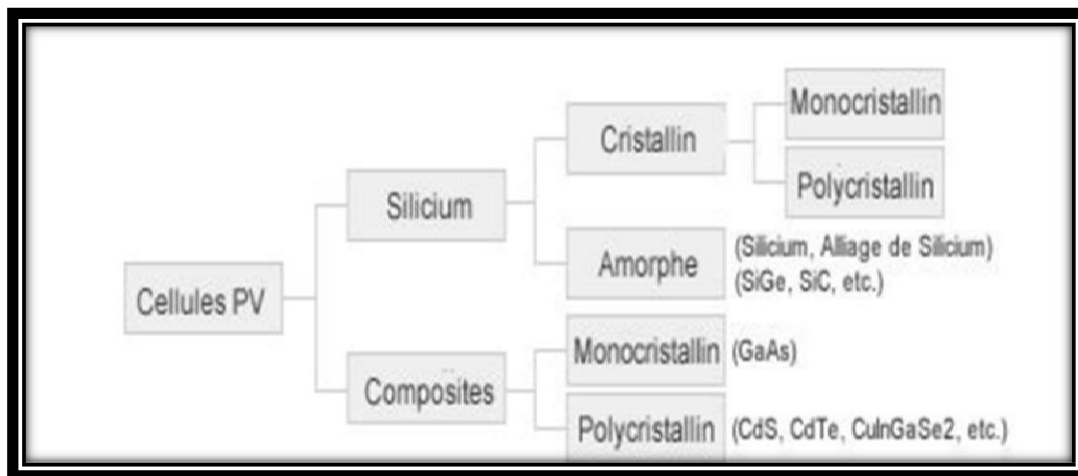


Figure I.7 : les différentes technologies photovoltaïques [14]

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

I.6.1 La première génération:

Cette génération comprend les cellules monojonction ou multijonction à base de semi-conducteurs inorganiques. Les plus courantes sont obtenues par refroidissement de Si fondu (**Figure I.8**) ce qui conduit aux cellules solaires au silicium mono-ou polycristallin avec des rendements de conversion énergétique atteignant (15 – 19) % pour les modules commerciaux et 25 % en laboratoire. Les avantages de ces cellules sont la mobilité élevée des porteurs de charge et une forte absorption spectrale ce qui permet d'atteindre des rendements de conversion relativement bons, leur stabilité à long terme. Elles représentent récemment 85% de l'ensemble des installations solaires dans le monde. Néanmoins, n'oubliez pas non plus ses points négatifs tels que leur fabrication coûteuse et énergivore, leur poids élevé et leur caractère rigide. De plus, les phénomènes d'échauffement apparaissant lors de leur fonctionnement provoquent une diminution sensible de leur rendement de conversion énergétique. [15]

I.6.2 Seconde génération:

Une seconde génération de cellules est apparue dans le but de réduire les coûts de matière et d'ouvrir de nouvelles applications. Le principe des cellules en couches minces est basé sur utilisation d'un matériau absorbeur ayant un coefficient d'absorption optique élevé par rapport au silicium cristallin ; et pour cela un matériaux sont généralement utilisés (le Si ayant un gap indirect). [16] Il en résulte la possibilité d'utiliser des matériaux absorbeurs beaucoup plus fins, de l'ordre de 2 μm d'épaisseur (100x moins que le Si cristallin), réduisant ainsi la quantité de matière première nécessaire. Les principaux matériaux utilisés comme absorbeurs en couches minces sont le Si amorphe (a-Si), le Si microcristallin ($\mu\text{c-Si}$), le CdTe, le $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)\text{Se}_2$ (CIGS) et le $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S}, \text{Se})_4$ (CZTS). En 2012, une part de marché (toutes technologies confondues) d'environ 15%.

I.6.3 Troisième génération :

La troisième génération s'attache à réduire les coûts de fabrication en proposant de nouvelles approches telles que les cellules solaires organiques comme les hétérojonctions en volume et les systèmes hybrides organique inorganique comme les hétérojonctions en volume associant un polymère et des nano cristaux d'oxyde ou de sulfure métallique. Cette génération regroupe l'ensemble des nouvelles approches proposées et développées depuis quelques années.

[17]

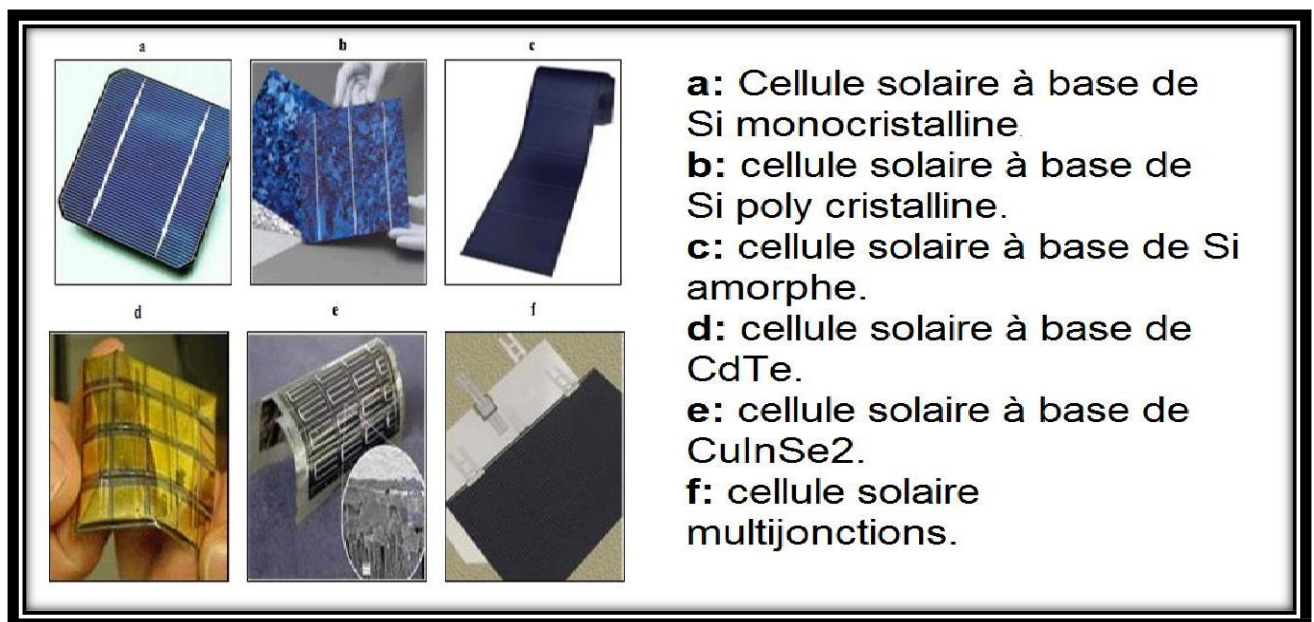


Figure I. 8 : Les différents types de cellules solaires [17]

I.7. Les Cellules Photovoltaïques à Base Couches Minces

I.7.1 Les Couches Minces CZTS

Une couche mince est une couche mince d'une substance qui est déposée sur une autre substance, appelé "substrat" dont l'une des dimensions qu'on appelle l'épaisseur a été fortement réduite de telle sorte qu'elle varie de quelques "nm" à quelques "µm" (typiquement ce sont des couches de 10 ... 100 nanomètres d'épaisseur). [18]

I.7.2 Différents composants de la cellule à Base de Couches Minces

Une cellule photovoltaïque en couches minces à base des composés

$Cu_2-II-IV-VI$, se compose de :

- ❖ **Un substrat:** est une couche de verre sodé, ainsi que des substrats flexibles (type Upolex) ou métalliques sont utilisés, d'épaisseur allant de 1 à 3 mm, le plus utilisé.
- ❖ **Un contact ohmique inférieur :** constitué d'une fine couche de molybdène (Mo) d'environ 0.2-1 µm.
- ❖ **Une couche absorbante:** elle est souvent composé d'un semi-conducteur de type p et d'une épaisseur de 1 à 2 µm et doit être caractérisée par:

1. un grand coefficient d'absorption dans le domaine du visible

(CZTS – 10^4cm^{-1}) [7].

2. une bande interdite directe d'une largeur de l'ordre de 1.1-1.7 eV (CZTS-1.5 eV)[13].

3. une conductivité de l'ordre de $1-10^{-2}(\Omega.\text{cm})^{-1}$.

- ❖ **Une couche tampon (bufferlayer):**

Il est le plus réussi d'introduire une fine couche (10-50 nm), dite couche tampon, entre les deux composés (une jonction semi-conducteur absorbant/oxyde) pour améliorer les performances de la cellule. Elle doit être caractérisée par :

- 1- Un gap d'une valeur comprise entre 2.4 et 3.2eV permettant une transition souple entre la bande interdite de la couche absorbante et celle de la couche d'oxyde transparent conducteur.

2. une conductivité de type n de l'ordre de $10^{-3} (\Omega \text{ cm})^{-1}$ plus faible que celle de la couche absorbante pour former la jonction avec la couche absorbante.

3. une morphologie très homogène afin d'éviter tout effet de court-circuit à un niveau des joints de grains. Parmi les couches tampon qui répondent à ces critères nous citons: CdS, ZnS, ZnSe, InS, ZnO. [19]

❖ **Une couche d'oxyde transparent conducteur (OTC):**

Elle est constituée d'un matériau conducteur et transparent avec une conductivité supérieure à $10^3 (\Omega \text{ cm})^{-1}$ de telles propriétés sont obtenues en utilisant des couches minces formées de matériaux binaires de $(\text{In}_2\text{O}_3 / \text{SnO}_2)$, connue sous le nom ITO plus de ZnO. [19] La couche ITO qui est conductrice peut remplacer le contact ohmique supérieur.

❖ **Un contact ohmique supérieur (grille métallique) :** c'est une couche d'environ 50 nm de Ni sur une couche d'Al d'environ 2 à 3 μm et parfois une couche antireflet (MgF_2) est ajoutée. [20]

I.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons rappelé le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule solaire est composée de matériaux semi-conducteurs et transformant directement l'énergie lumineuse en énergie électrique, il y a deux fonctionnements de cellule solaire (idéale ; réelle), leurs propriétés et proposées les types des cellules solaires et les différentes technologies (1^{ère}, 2^{ème} et 3^{ème} génération). Ensuite, nous avons donné le principe de cellule solaire à base de couches minces et présenté la définition de couches minces CZTS et les différents composants de cette cellule.

Chapitre II

Résultats et discussions

II.1. Introduction

Dans ce présent travail, nous avons utilisé la simulation numérique pour étudier les caractéristiques de la cellule solaire ZnO/CdS/CZTS en utilisant le logiciel de simulation SCAPS. Nous avons étudié l'effet de l'épaisseur des différentes couches sur le courant de court-circuit J_{cc} , la tension de circuit ouvert V_{co} , le facteur de forme FF et le rendement η . puis, l'effet du dopage des couches sur les différents paramètres de la cellule.

II.2. Présentation de la cellule étudiée

Notre travail consiste à modéliser une cellule solaire à base de CZTS et à simuler ces paramètres afin de concevoir une cellule ayant le rendement électrique optimal. Dans notre étude, nous utilisons une cellule solaire composée des hétérojonctions suivantes :

grille/ZnO/CdS/CZTS/ Mo/verre. Le schéma simplifié de l'hétéro structure est représenté sur la figure II.1.

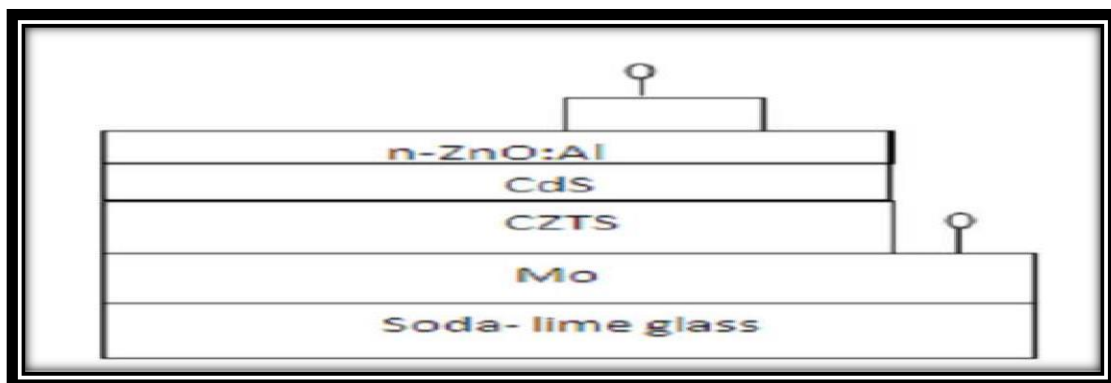


Figure II.1: Structure de la cellule à base de CZTS [21]

II.3. Propriétés physiques des différentes couches

Les valeurs des propriétés des différentes couches qui ont été utilisés dans cette simulation en utilisant le logiciel SCAPS sont prises de la littérature et sont résumées dans le tableau en dessous. [22]

Tableau II.1 : Les différents paramètres de simulation de la cellule [22]

	Absorbeur, p-CZTS	Couche Tampon, n-CdS	Couche fenêtre, n-ZnO
Epaisseur (μm)	2.2	0.05	0.2
Affinité électrique (eV)	1.50	2.410	3.300
Constante diélectrique	4.500	4.500	4.600
Densité, N_C (cm^{-3})	10.000	9.00	9.00
Densité, N_V (cm^{-3})	$2.2 \cdot 10^{18}$	$1.8 \cdot 10^{19}$	$2.2 \cdot 10^{18}$
μ_e (cm^2/Vs)	$1.8 \cdot 10^{19}$	$2.4 \cdot 10^{18}$	$1.8 \cdot 10^{19}$
μ_{hole} (cm^2/Vs)	100	35	100
Donneur, N_D (cm^{-3})	25	50	25
Accepteur, N_A (cm^{-3})	$1.00 \text{ E}+1$	$1 \cdot 10^{17}$	$1 \cdot 10^{18}$
Vitesse électron, V_e (cm/s)	$2.0 \cdot 10^{14}$	0.0	0.0
Vitesse trou, V_{hole} (cm/s)	$1.0 \cdot 10^7$	$1.0 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^7$

II.4. Effet de la variation de l'épaisseur des couches CdS, CZTS et ZnO sur les performances de la cellule photovoltaïque à base de CZTS

II.4.1. Influence de l'épaisseur de la couche absorbante CZTS

Nous avons varié les épaisseurs de la couche absorbeur CZTS de $1\mu\text{m}$ jusqu'à $3\mu\text{m}$ pour simuler la variation des paramètres photovoltaïques de la cellule solaire. Les résultats de la simulation sont présentés dans le tableau. II.2.

- Nous avons fixé les épaisseurs des couches (**n-ZnO**= $0.2\mu\text{m}$) et (**p-CdS**= $0.05\mu\text{m}$)

Tableau. II.2. Effet de la variation de l'épaisseur de la couche (n-CZTS) sur les paramètres caractéristiques de la cellule PV

➤ L'épaisseur n-CZTS	Jsc (mA/cm ²)	Voc (V)	FF (%)	η (%)
1	27.65364	1.0774	68.25	20.33
1.2	27.93911	1.1491	64.36	20.66
1.4	28.118357	1.2391	60.07	20.93
1.6	28.238350	1.3426	55.81	21.16
1.8	28.320920	1.4532	51.89	21.35
2	28.381429	1.5663	48.41	21.52
2.2	28.424467	1.6793	45.33	21.64
2.4	28.455757	1.7907	42.73	21.77
2.6	28.478960	1.9000	40.44	21.88
2.8	28.496717	2.0069	38.42	21.97
3	28.510213	2.1112	36.62	22.04

L'influence de l'épaisseur de la couche (n-CZTS) dans l'intervalle (1-3μm) sur le rendement de conversion photovoltaïque (η) de la cellule PV est représentée sur la figure (II.2).

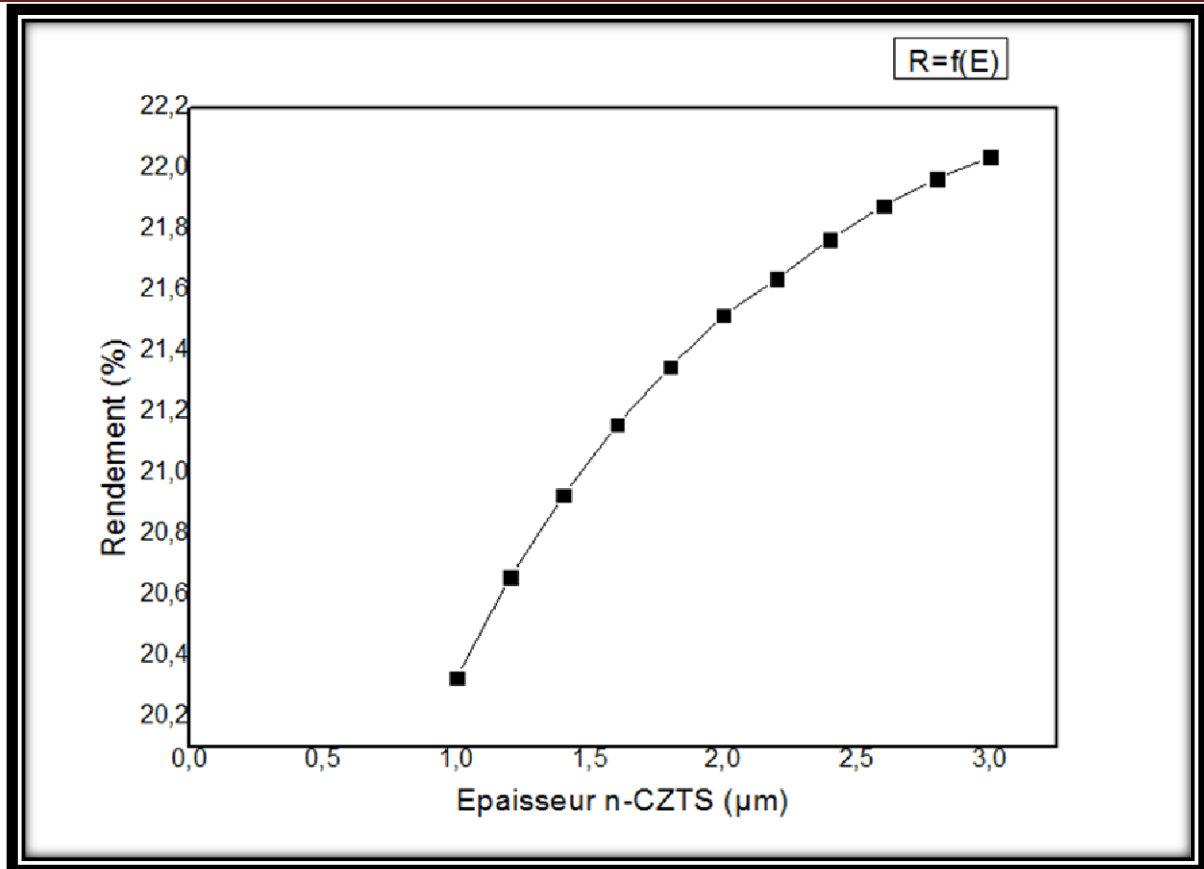


Figure (II.2) : Le rendement de conversion photovoltaïque (η) de la cellule PV en fonction de l'épaisseur de la couche (n-CZTS)

D'après le tableau (II.2) on peut constater que la tension de circuit ouvert (V_{co}) et la densité de courant de court-circuit (J_{sc}) de la cellule photovoltaïque à base de CZTS s'améliorent avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche absorbante CZTS.

A partir de la figure (II-2) nous remarquons que lorsqu'on augmente l'épaisseur de la couche absorbante CZTS Le rendement de conversion photovoltaïque (η) de la cellule PV augmente. Cette augmentation est due à la diminution du gap optique.

II.4.2 Influence de l'épaisseur de la couche tampon CdS

Afin d'étudier l'influence de l'épaisseur de la couche tampon CdS sur les paramètres photo voltaïques de la cellule solaire. Nous allons varier l'épaisseur de cette couche sur un intervalle de (0.01-0.1μm).

- Nous avons fixé les épaisseurs des couches (**n-ZnO**=0.2 μm) et (**n-CZTS**=2.2 μm)

Tableau. II.3. Effet de la variation de l'épaisseur de la couche (p-CdS) sur les paramètres caractéristiques de la cellule PV

L'épaisseur p-CdS	Jsc (mA/cm ²)	Voc (V)	FF (%)	η (%)
0.01	28.425822	1.6754	45.43	21.64
0.02	28.425259	1.6777	45.37	21.64
0.03	28.424896	1.6787	45.35	21.64
0.04	28.424663	1.6791	45.33	21.64
0.05	28.424467	1.6793	45.33	21.64
0.06	28.424355	1.6794	45.33	21.64
0.07	28.424204	1.6794	45.33	21.64
0.08	28.424063	1.6794	45.33	21.64
0.09	28.423931	1.6795	45.33	21.64
0.1	28.423806	1.6795	45.32	21.64

A partir de nos résultats numériques représentés dans le tableau (II.3) obtenue par SCAPS version 3.3.09. Nous remarquons que l'influence de l'épaisseur de la couche tampon CdS sur les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire et le rendement de conversion (η) est très faible, ils sont presque constant sur toute la plage des épaisseurs de la couche CdS considérées.

II.4.3 Influence de l'épaisseur de la couche fenêtre-ZnO

Le Tableau (II-4) résume l'influence des épaisseurs de la couche fenêtre n-ZnO sur les paramètres suivants; Voc, Jsc, FF et le rendement de conversion photovoltaïque (η). Tandis que la figure (II-3) représente la variation du rendement de conversion photovoltaïque de la cellule pour différentes épaisseurs de la couche fenêtre ZnO.

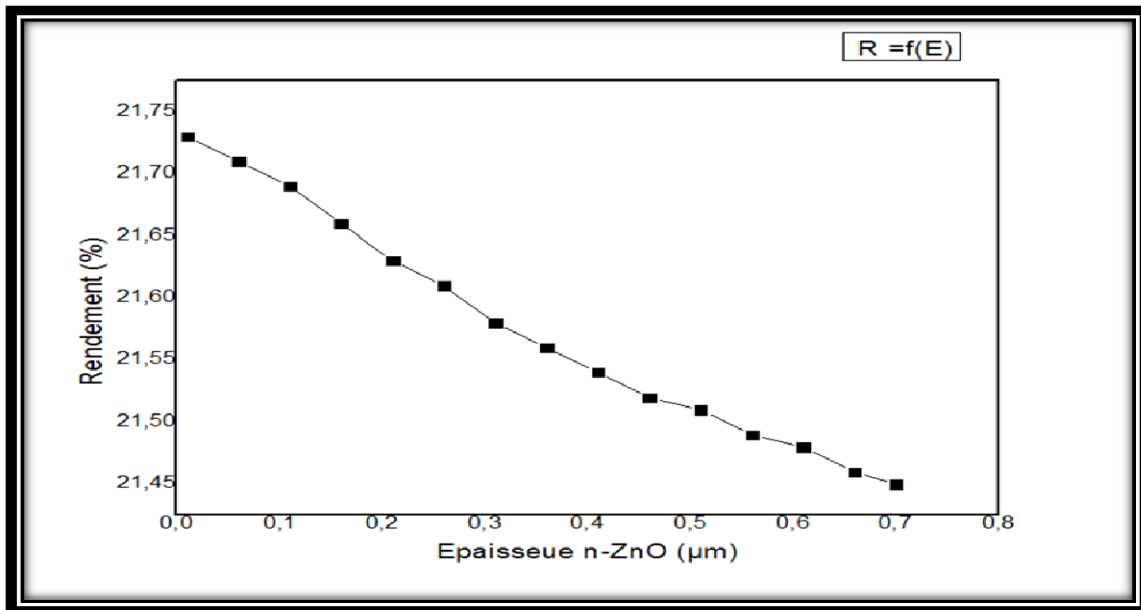


Figure (II- 3): Le rendement de conversion photovoltaïque (η) de la cellule PV en fonction de l'épaisseur de la couche (n-ZnO)

➤ Nous avons fixé les épaisseurs des couches (**n-CdS**=0.05 μm) et (**n-CZTS**=2.2 μm)

Tableau.II.4. Effet de la variation de l'épaisseur de la couche (n-ZnO) sur les paramètres caractéristiques de la cellule PV

L'épaisseur n-ZnO	Jsc (mA/cm)	Voc (V)	FF (%)	η (%)
0.01	28.545767	1.6830	45.24	21.73
0.06	28.519356	1.6822	45.26	21.71
0.11	28.485191	1.6811	45.28	21.69
0.16	28.450922	1.6801	45.31	21.66
0.21	28.418044	1.6791	45.33	21.63
0.26	28.387161	1.6781	45.36	21.61
0.31	28.358364	1.6773	45.38	21.58
0.36	28.331594	1.6764	45.40	21.56
0.41	28.306731	1.6757	45.42	21.54
0.46	28.283638	1.6750	45.44	21.52
0.51	28.262174	1.6743	45.45	21.51
0.56	28.242207	1.6737	45.47	21.49
0.61	28.223608	1.6731	45.48	21.48
0.66	28.206263	1.6726	45.49	21.46
0.7	28.193217	1.6722	48.50	21.45

Le tableau (II.4) et la figure (II.3) montrent que le rendement de conversion photovoltaïque (η) de la cellule PV décroît avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche fenêtre (n-ZnO). Cette diminution est due à la diminution de la création des paires électron-trou lorsque la couche (n-ZnO) est très épaisse.

II.5. Effet du dopage des couches CdS, CZTS et ZnO sur les performances de la cellule photovoltaïque à base de CZTS

II.5.1 Effet de dopage de la couche en CZTS

Nous avons varié la concentration de dopage N_d de la couche absorbante dans la gamme 2×10^{10} à 10^{20} cm^{-3} . Les dopages N_d des couches CdS et ZnO sont respectivement 1.1×10^{17} et 10^{18} .

Tableau II.5. Effet de dopage de la couche CZTS.

Dopage CZTS	η
NA	(%)
2.0×10^{10}	14.69
2.0×10^{12}	17.93
2.0×10^{14}	21.65
2.0×10^{16}	21.53
2.0×10^{18}	20.87
2.0×10^{20}	20.84

D'après le tableau en-dessus on remarque que le rendement de conversion photovoltaïque augmente lorsqu'on augmente le dopage de la couche absorbante.

II.5.2 Effet de dopage de la couche en CdS

Nous avons varié la concentration de dopage N_D de la couche tampon dans la gamme 2×10^{14} à 10^{19} cm^{-3} . Les dopages des couches CZTS et ZnO sont respectivement 1.1×10^{18} et 10^{18} .

Tableau II.6. Effet de dopage de la couche tampon CdS

Dopage CdS	η
NA	(%)
10^{14}	21.31
10^{15}	21.93
10^{16}	22.04
10^{17}	22.06
10^{18}	22.05
10^{19}	22.03

La barrière de potentiel dans l'hétérojonction CdS/CZTS diminue et permet une augmentation de la zone de charge d'espace d'où une amélioration de la collecte des porteurs photo générés et donc une augmentation du rendement de conversion.

II.5.3 Effet de dopage de la couche en ZnO

Nous avons varié la concentration de dopage N_D de la couche fenêtre dans la gamme 2×10^{15} à 10^{20} cm^{-3} . Les dopages N_A des couches CdS et CZTS sont respectivement 1.1×10^{18} et 10^{14} cm^{-3} .

Tableau II.7. Effet de dopage de la couche ZnO.

Dopage ZnO	η
NA	(%)
10^{15}	21.95
10^{16}	22.01
10^{17}	22.05
10^{18}	22.06
10^{19}	22.06
10^{20}	22.06

La barrière de potentiel dans l'hétérojonction ZnO/CdS/CZTS diminue avec l'augmentation de dopage de la couche ZnO et permet une augmentation de la zone de charge d'espace, d'où une amélioration de la collecte des porteurs photo générée et donc une augmentation du rendement de conversion. [23]

II.6 L'effet de la variation de la couche tampon

Tableau II.8 : Paramètres physique utilisés dans la simulation [24]

	Couche Tampon, ZnS	Couche Tampon, ZnSe
Epaisseur(μm)	100	100
Bande degap(eV)	2.944	2.9
Affinité électrique(eV)	4.022	4.09
Constante diélectrique	9	10
Densité, $N_C(\text{cm}^{-3})$	$2.2 \cdot 10^{18}$	$1.5 \cdot 10^{18}$
Densité, $N_V(\text{cm}^{-3})$	$1.8 \cdot 10^{19}$	$1.8 \cdot 10^{19}$
$\mu_e(\text{cm}^2/\text{Vs})$	100	50
$\mu_{\text{hole}}(\text{cm}^2/\text{Vs})$	25	20
Donneur, $N_D(\text{cm}^{-3})$	$1 \cdot 10^{17}$	$5.5 \cdot 10^7$
Accepteur, $N_A(\text{cm}^{-3})$	$1 \cdot 10^{17}$	$5.5 \cdot 10^7$
Vitesse électron, $V_e(\text{cm/s})$	$1.0 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^7$
Vitesse trou, $V_{\text{hole}}(\text{cm/s})$	$1.0 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^7$

- Dans cette partie nous avons simulé la cellule à base de CZTS avec différentes couches tampon en calculant (J_{sc} , V , FF et η).

Tableau. II.9. valeurs de J_{sc} , V , FF , η de la cellule ZnO/CdS/CZTS

Cellule PV			
ZnO/CdS/CZTS (0.05μm)			
Jsc	V	FF	η
1.6793	28.424467	45.33	21.64

Tableau. II.10. valeurs de J_{sc} , V , FF , η de la cellule (CZTS/ZnSe/ZnO)

Cellule PV			
ZnO/ZnSe/CZTS (0.05μm)			
Jsc	V	FF	H
0.8907	28.369030	31.97	8.08

Tableau. II.11. Valeurs de J_{sc} , V , FF , η de la cellule (CZTS/ZnS/ZnO).

Cellule PV			
ZnO/ZnS/CZTS (0.05μm)			
Jsc	V	FF	H
1.0759	14.778107	10.56	1.68

On constate que le bon rendement est de la cellule ZnO/CdS/CZTS Parmi les cellules simulées.

II.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié la cellule solaire à base de CZTS par le logiciel de simulation SCAPS. Nous avons fait varier les épaisseurs des différentes couches constituant la cellule (couche tampon, couche absorbante, couche fenêtre) ; puis nous avons variés le dopage de chaque couche.

Nous avons étudié aussi l'impact de varier la couche tampon sur les performances de la cellule solaire à base de CZTS.

Conclusion Générale

L'énergie photovoltaïque résulte de la conversion d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique à travers la cellule solaire basée sur un phénomène appelé effet photovoltaïque, qui produit un courant électrique lorsque la surface de la cellule est exposée à la lumière.

Notre travail vise à étudier l'intégration des couches minces dans la technologie photovoltaïque et son impact sur le rendement électrique. La modélisation et la simulation de la cellule solaire à base de $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (CZTS) ont été faites par le logiciel SCAPS. Ou nous avons étudié l'effet des trois couches ZnO, CdS et CZTS sur le rendement de conversion photovoltaïque. Premièrement nous sommes intéressés aux épaisseurs et aux dopages des trois couches, en variant l'épaisseur ou le dopage de l'une tout en gardant constants ceux des deux autres pour voir l'influence de ces deux paramètres sur le rendement de conversion.

Les résultats aboutis par cette simulation sont :

- Le rendement de conversion photovoltaïque (η) de la cellule PV à base de CZTS augmente lorsqu'on augmente l'épaisseur et le dopage de la couche absorbante CZTS.
- l'influence de l'épaisseur de la couche tampon CdS sur les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire et le rendement de conversion (η) est très faible, tandis qu'une augmentation du dopage de la couche conduit à une amélioration du rendement de conversion.
- une augmentation du rendement de conversion avec l'augmentation du dopage de la couche ZnO, et une décroissance avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche fenêtre (n-ZnO).

Ensuite nous avons simulé la cellule à base de CZTS avec différentes couches tampon en calculant (J_{sc} , V, FF et η) ou le rendement très élevé a été abouti par la couche tampon CdS.

Références bibliographiques

Références bibliographiques :

- [1] N. Suresh Kumar, K. Chandra Babu Naidu. 8 April 2021. «A review on perovskite solar cells (PSCs), materials and applications». Journal of Materiomics.
- [2] K.L. Sreevidya, Nelsa Abraham, Chaithra sajeev. 10 November 2020. «Simulation studies of CZTS thin film solar cell using different buffer layers». Materials Today: Proceedings, 43(2021)3684-3691.
- [4] Atul Kumar. «Efficiency enhancement of CZTS solar cells using structural engineering». Superlattices and Microstructures, 153(2021)106872.
- [5] Jaymin Ray, Kinjal Patel, Keyur Patel, Gopal Bhatt, Usha Parihar. 6 October 2020. «Studies on Cu₂ZnSnS₄(CZTS) powder and thin film prepared from Molecular ink». Materials Today: Proceedings, 42(2021)1723-1726.
- [7] Ashutosh Srivastava, Piyush Dua, T.R. Lenka, S.K. Tripathy. 31 October 2020. «Numerical simulations on CZTS/CZTSe based solar cell with ZnSe as an alternative buffer layer using SCAPS-1D». Materials Today: Proceedings, 43(2021)3735-3739.
- [8] BOUDJERAD Fatiha épouse MEGHNINE, 2013. « Amélioration du Rendement Énergétique de Cellules Photovoltaïques en Couches Minces à base de CZTS » .Mémoire de Master.
- [9] Collection « physique des semi-conducteurs: Fondamentaux » Noël SERVAGENT -Ecole des Mines de Nantes, 2007.
- [10] BELGHITRI HOUDA, 2010. « Modélisation, simulation et optimisation d'un système hybride éolien-photovoltaïque » Mémoire de Magister.
- [11] Angel Cid Pastor, 2006. «Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques» Thèse de Docteur. Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse.
- [12] S.M.Sze, Physics of semiconductor Devices, second édition, Copyright.C.1981 by John, Wiley and Son, Inc.
- [13] OUBOUCHOU Amina, 2018. «Etude et simulation d'une cellule solaire à base couches minces CZTS». Mémoire de Master.
- [14] A. Luque, Practical Handbook of Photovoltaics (Second Edition)-2012.

- [15] M.A.Green, A.W.Blackers, C.R.Osterwald, J.Appl.Phys, 58((1985)676; b) D.J.Friedman, S.R.Kurtz, K.A.Bertness, A.E.Kibbler, C.Kramer, J.M.Olson, D.L.King, B.R.Hansen, J.K.Snyder, Prog.Photovolt.,3(1995)47.
- [16] G.Masson, M.Latour, M.Rekinge, I.T.Theologitis, and M.Papoutsis. Global Market Outlook for photovoltaics. Technical report, EPIA, (2013).
- [17] W.U.Huynh, J.J.Dittmer, A.P.Alivisatos, Science, 295((2002)2425 ; b) B.Sun, E.Marx, N.C.Greenham, Nano Lett,3(2003)961.
- [18] Selma MOSTEFA KARA, 2012. «Étude et simulation de cellules photovoltaïques à couches minces à base de CIS et CIGS » Mémoire de Magister .
- [19] F.Ynineb, , 2010 "Contribution à l'élaboration de couches minces d'Oxydes Transparents Conducteurs (TCO)", Thèse de magister, université Constantine.
- [20] <http://www.fruitymag.com/inconv%C3%A9nients-d%27avantages50178.htm>.
- [21] Nowshad Amin Mohammad Istiaque Hossain, Puvaneswaran Chelvanathan, A.S.M.Mukter Uzzaman, Kamaruzzaman Sopian, 2010. «Prospects of Cu₂ZnSnS₄ (CZTS) Solar Cells from Numerical Analysis »
- [22] MOSTEFA KARA selma, 2012. «ETUDE ET SIMULATION DE PHOTOVOLTAÏQUES A COUCHES MINCES A BASE DE CIS et CIGS». Mémoire de Magister.
- [23] Medjdoub Sarra, 2016. «Etude structurelle des cellules solaires deuxième et troisième génération », Mémoire de master, Systèmes et Energies Renouvelables, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen.
- [24] M. MJINKWI WANDA, S. OUEDRAOGO, F. TCHOFFO, F. ZOUGMORE, and J. M. B. NDJAKA, «Numerical Investigations and Analysis of Cu₂ZnSnS₄ Based Solar Cell by SCAPS-1D », Volume 2016 (2016), Article ID 2152018, 9p.