

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 :

Etude d'un capteur pour le photovoltaïque

Présenté par :

Hedimi houssam eddine

Djeradi ahmed

Soutenu le 21 / 09 / 2019 devant le jury composé de :

Nadir Belgroune	docteur	USDB	Président
Aissat Abdelkader	professeur	USDB	Encadreur
Hassein-bey Abdelkader	docteur	USDB	Examineur

Blida 1-2018/2019-

Remerciements

Avant tout, nous remercions Allah le tout puissant qui nous a donné la force pour réaliser ce travail. Que nous souhaitons qu'il atteigne nos aspirations, si Dieu le veut.

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à notre promoteur Monsieur le professeur Aissat Abdelskader pour son encadrement. Pour nous avoir encadrés durant notre projet de fin d'études et nous conseillé tout le long de notre travail.

Nous transmettons mes sincères remerciements aux membres du jury (Monsieur l'examineur Dr. Hassein-bey Abdelskader et ou Dr. Nadir Belgroune le président de jury). Qui ont bien voulu consacrer de leur temps à l'examen et l'étude de son mémoire et pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de siéger à notre soutenance.

Nous tenons à remercier vivement, Mr. Saidouci abdelmoumene, (Doctorant en physique), pour son aide son soutien, et de sa sympathie.

Enfin, Nos plus chaleureux remerciements pour tous ceux qui de près et de loin ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

Dédicaces

Nous dédions ce modeste travail à :

*Nos mères, sources de tendresse et d'amours pour leurs
soutiens tout le long de notre vie scolaire.*

*Nos pères, qui nous ont toujours soutenus et qui ont fait tout
possible pour nous aider.*

Nos frères et nos sœurs, que nous aimons beaucoup.

Nos grandes familles.

Nos chers amis et collègues.

Et spécialement Pour Saidani abdesdjebar et belarbi toufik

*Tous ceux qui ont collaboré de près ou de loin à la réalisation
de ce travail.*

ملخص

في السياق العام لتنويع استخدام الموارد الطبيعية ، فإن اللجوء إلى الطاقات المتجددة وخاصة الطاقة الشمسية الضوئية أصبحت أكثر وأكثر. على هذا النحو ، فإن تطوير جيل جديد من الخلايا الضوئية بناء على الكاديوم الزنك تلوريد (CdZnTe) تبدو واعدة. في الواقع ، لقد تجاوزت كفاءة هذه الخلايا 20%.

في هذا العمل ، نحن مهتمون بالنمذجة والمحاكاة، نستخدم برنامج SCAPS 1D ، من أجل دراسة أداء الخلايا الشمسية على أساس CdZnTe. نقيم في البداية كثافة الدارة المغلقة J_{sc} ، و V_{oc} توتر الدارة المفتوحة ، ومعامل الجودة FF و المردودية η للهيكل نموذجي CdS/ CdZnTe و ZnS/CdZnTe الخصائص التي خضعت لعملية التحسين هي السمك و الحرارة و إضافة شوائب لدراسة تأثير هذه الأخيرة على المردودية الكهربائية للهيكل.

كلمات مفاتيح: الخلايا الشمسية ، طبقات رقيقة ، إضافة شوائب ، درجة الحرارة ، CdZnTe ، SCAPS.

Résumer :

Dans le contexte global de la diversification de l'utilisation des ressources naturelles, le recours aux énergies renouvelables et en particulier le solaire photovoltaïque se fait de plus en plus. A ce titre, le développement d'une nouvelle génération de cellules photovoltaïques à base de CdZnTe semble prometteur. En effet, le rendement de ces cellules a dépassé les 20 %.

Dans ce travail on s'intéresse à la modélisation et la simulation, nous utilisons le logiciel SCAPS 1D, pour étudier les performances des cellules solaires à base de CdZnTe. Nous évaluons dans un premier temps, le courant de court-circuit J_{sc} , la tension en circuit ouvert V_{oc} , le facteur de forme FF et le rendement électrique η pour deux structures typiques de CdS/ CdZnTe et ZnS/CdZnTe. Par la suite nous nous intéressons au dopage, l'épaisseur et température, pour étudier l'influence de celles-ci sur le rendement électrique de nos cellules solaires.

Mots Clés: cellules solaires, couches minces, dopage, température, CdZnTe, SCAPS.

Abstract:

In the overall context of diversifying the use of natural resources, the use of renewable energies and in particular solar photovoltaic is becoming more and more. As such, the development of a new generation of photovoltaic cells based on CdZnTe seems promising. Indeed, the efficiency of these cells has exceeded the 20%.

In this work we are interested in modeling and simulation, we use SCAPS 1D software to study the performance of CdZnTe solar cells. We first evaluate the short-circuit current J_{sc} , the open-circuit voltage V_{oc} , the form factor FF and the electrical efficiency η for a typical CdS/ CdZnTe and ZnS/CdZnTe structure. Subsequently we are interested in the doping and the thickness and temperature to study the influence of these on the electrical efficiency of the structure.

Keywords: Solar cells, thin films, doping, temperature, CdZnTe, SCAPS.

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre 01. Généralité sur les semi-conducteurs et les cellules photovoltaïques.	
I.1. Introduction	3
I.2. Le rayonnement solaire	3
I.2.1. Masse d'air	3
I.2.2. Spectre de référence	4
I.3. Les cellules solaires photovoltaïques	4
I.3.1. L'effet photovoltaïque	5
I.3.2. Principe de fonctionnement d'une cellule PV	6
I.3.3. Les différentes caractéristiques d'une cellule solaire	7
I.3.3.1. Courant de court-circuit J_{sc}	7
I.3.3.2. Tension de circuit ouvert V_{co}	7
I.3.3.3. Puissance maximale P_m	8
I.3.3.4. Facteur de forme FF	8
I.3.3.5. Le rendement η	8
I.3.3.6. L'efficacité quantique externe EQE	8
I.3.4. La conversion photovoltaïque	9
I.3.5. Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque	9
I.3.6. Générations de cellules solaires	10
I.3.6.1. Première génération	10
I.3.6.2. Deuxième génération	11
I.3.6.3. Troisième génération	11
I.3.7. Les cellules organiques	11

I.3.8. Les couches minces	13
I.3.8.1. Définition d'une couche mince	13
I.3.8.2. Caractéristiques	13
I.4. Les Semi-conducteurs	14
I.4.1. Dopage des semi-conducteurs	14
I.4.1.1. Semi-conducteur intrinsèques	14
I.4.1.2. Semi-conducteurs extrinsèques	15
I.4.1.2.1. Semi-conducteur dopé n	15
I.4.1.2.2. Semi-conducteur dopé p	16
I.4.2. La jonction P-N	16
I.4.3. bandes d'énergie	17
I.4.3.1. Bandes gap interdites direct et indirect	19
I.5. Les matériaux semi-conducteurs II-VI	19
I.5.1. Propriétés des semi-conducteurs à composer binaire ZnTe, CdTe	19
I.5.1.1. Structure cristalline	19
I.5.1.2. Structure Zinc-blende (Sphalérite)	20
I.5.1.3. Structure Würtzite (Hexagonal)	20
I.5.2. Structure de bande des semi-conducteurs II-VI	22
I.5.3. Structure de bande des binaires matériau (CdTe,ZnTe)	22
I.5.4. le choix du matériau	24
I.5.4.1. Structure d'une cellule CdZnTe	24
I.5.4.2. Le substrat	25
I.5.4.3. Le contact métallique arrière	25
I.5.4.4. L'absorbeur	25

I.5.4.5. La couche tampon	26
I.5.4.6. La couche fenêtre	26
I.5.4.7. La grille	26
I.5.5. Propriétés des ternaires $Cd_xZn_{1-x}Te$	26
I.5.5.1. Propriétés optiques	26
I.5.5.1.1. La réflexion optique	27
I.5.5.1.2. L'indice de réfraction	27
I.5.5.1.3. L'absorption	28
I.5.5.1.3. Coefficient d'absorption	29
I.5.5.2. Propriétés électriques	30
I.5.5.2.1. Le paramètre de maille	30
I.5.5.2.2. La couche contrainte	30
I.5.5.2.3. Energie du Gap	32
I.5.5.2.4. Epaisseur critique	32
I.6. Conclusion	33
 Chapitre 02. Resultat et discussions	
II.1. Introduction	34
II.2. Présentation du logiciel de simulation SCAPS	34
II.2.1. Principe de la simulation numérique	34
II.3. Structure et paramètres de la cellule étudiée	35
II.3.1. Présentation de la cellule étudiée	35
II.4. Résultats de la simulation	36
II.4.1. Introduction	36
II.4.2. Paramètres électroniques	36

II.4.2.1. Paramètre de maille	36
II.4.2.2. L'Effet de la contrainte	37
II.4.2.3. L'énergie de bande interdite	38
II.4.2.4. Epaisseur critique	39
II.4.3. Propriétés optiques	40
II.4.3.1. Le coefficient d'absorption	40
II.4.3.2. Indice de réfraction	41
II.4.3.3. Coefficient de réflexion	42
II.4.4. Cas couche tampon CdS	43
II.4.4.1. Variation de caractéristique J-V de la structure CdS/CdZnTe en fonction de la concentration du cadmium x	43
II.4.4.2. Variation de l'efficacité quantique externe (EQE) de la structure CdS/CdZnTe en fonction de la concentration du cadmium x	44
II.4.4.3. Effet de température sur les caractéristiques de la structure CdS/CdZnTe	45
II.4.4.3.1. Variation de caractéristique J-V de la structure CdS/CdZnTe en fonction de la température T.....	46
II.4.4.3.2. Variation du rendement quantique externe EQE de la structure CdS/CdZnTe en fonction de la longueur pour différentes températures	48
II.4.4.4. Influence de l'épaisseur de la couche tampon sur la structure CdS/CdZnTe pour x=0.6.....	50
II.4.4.5. Influence de dopage de la couche absorbante sur la structure CdS/CdZnTe pour x=0.6	51
II.4.5. Cas couche tampon ZnS	53
II.4.5.1. Variation de caractéristique J-V de la structure ZnS/CdZnTe en fonction de la concentration du cadmium x	53

II.4.5.2. Variation de l'efficacité quantique externe (EQE) de la structure ZnS/CdZnTe en fonction de la concentration du cadmium x	54
II.4.5.3. Effet de température sur les caractéristiques de la structure ZnS/CdZnTe	55
II.4.5.3.1. Variation de la caractéristique J-V de la structure ZnS/CdZnTe en fonction de la température T	56
II.4.5.3.2. Variation du rendement quantique externe EQE de la structure ZnS/CdZnTe en fonction de la longueur d'onde pour différentes températures	58
II.4.5.4. Influence de l'épaisseur de la couche tampon sur la structure ZnS/CdZnTe pour $x=0.6$	60
II.4.5.5. Influence de dopage de la couche absorbante sur la structure ZnS/CdZnTe pour $x=0.6$	61
II.5. Conclusion	62
Conclusion générale	63
Les références	64
Annexe	68

Liste des tableaux

Tableau (I.1). Paramètres de maille de composés semi-conducteurs II-VI	21
Tableau (I.2). Principales propriétés des composés binaires (CdTe, ZnTe)	21
Tableau (I.3). Les coefficients A, B, C, pour les principaux binaires	28
Tableau (II.1). Résultats finals de l'effet de concentration du cadmium x sur la structure CdZnTe pour CdS	43
Tableau (II.2). Résultats finals de l'effet de la température T sur la structure CdS/CdZnTe pour x=0.6	45
Tableau (II.3). Résultats finals de l'effet de la température T sur la structure CdS/CdZnTe pour x=0.7	46
Tableau (II.4). Résultats finals de l'effet de la température T sur la structure CdS/CdZnTe pour x=0.8	46
Tableau (II.5). Résultats finals de l'effet de l'épaisseur de la couche tampon sur la structure CdS/CdZnTe pour x=0.6	50
Tableau (II.6). Résultats finals de l'effet du dopage de la couche absorbante (CdZnTe) sur la structure CdS/CdZnTe pour x=0.6	51
Tableau (II.7). Résultats finals de l'effet de concentration du cadmium x sur la structure CdZnTe pour ZnS	53
Tableau (II.8). Résultats finals de l'effet de la température sur la structure ZnS/CdZnTe pour x=0.6	55
Tableau (II.9). Résultats finals de l'effet de la température sur la structure ZnS/CdZnTe pour x=0.7	56
Tableau (II.10). Résultats finals de l'effet de la température sur la structure ZnS/CdZnTe pour x=0.8	56
Tableau (II.11). Résultats finals de l'effet de l'épaisseur de la couche tampon sur la structure ZnS/CdZnTe pour x=0.6	60
Tableau (II.12). Résultats finals de l'effet du dopage de la couche absorbante (CdZnTe) sur la structure ZnS/CdZnTe pour x=0.6	61

Listes des acronymes et abréviations :

Acronymes	Signification	Unité
J_{sc}	Courant de Court-circuit	A
V_{co}	Tension de Circuit Ouvert	Volt
η	Rendement électrique	%
FF	Facteur de forme	%
P_m	Puissance maximale	$W.m^{-2}$
λ	Longueur d'onde	Nm
ϕ	L'éclairement	$W.cm^{-2}$
H	Constante de Planck	J.s
C	Vitesse de la lumière	m/s
T	Température	K
I	Courant de la cellule	A
I_m	Courant maximale	A
V_m	Tension maximale	V
Q	Charge élémentaire	C
I_{ph}	Photo-courant	A
I_0	Courant inverse de saturation	A
K	Constante de Boltzmann	$eV.K^{-1}$
R_s	Résistance en série	Ω
R_{sh}	Résistance shunt	Ω
I_D	Courant de diode	A
α	Coefficient d'absorption	cm^{-1}
E_g	Energie de bande interdite	Ev

Liste des figures

Figure (I.1). Schéma descriptif de l'incidence solaire sur la terre	3
Figure (I.2). Spectre solaire	4
Figure (I.3). Cellule solaire photovoltaïque	5
Figure (I.4). schémas représente l'effet photovoltaïque	5
Figure (I.5). Schéma simplifié d'une cellule solaire sous éclairement	6
Figure (I.6). Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	7
Figure (I.7). Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque	10
Figure (I.8). Cellule solaire tout organique sur substrat souple	12
Figure (I.9). les quatre étapes de la conversion photovoltaïque organique	12
Figure (I.10). a) Fabrication de cellules en couches minces par procédé roll-to-roll. b) Cellule flexible à base de CIGS (global Solar)	14
Figure (I.11). Structure cristalline du Silicium pur	15
Figure (I.12). Dopage d'un monocristal de silicium par un atome de Bore, dopage accepteur de type-P	15
Figure (I.13). Dopage d'un monocristal de silicium par un atome de Bore, dopage accepteur de type-n	16
Figure (I.14). Structure d'une jonction P-N	17
Figure (I.15). Distance inter atomique représentée graphiquement contre l'énergie, pour montrer la formation des bandes d'énergie dans un matériau	18
Figure (I.16). Bandes d'énergie dans différents types de matériaux	18
Figure (I.17). Les transitions optiques directes et indirectes	19
Figure (I.18). Structure cubique Zinc blende (Sphalérite)	20
Figure (I.19). Structure Würtzite (Hexagonal)	20
Figure (I.20). Structure de bande d'un semi-conducteur à gap direct	22

Figure (I.21). La zone de Brillouin pour une structure zinc-blende	23
Figure (I.22). Structure de bande pour ZnTe cubique	23
Figure (I.23). Structure de bande électronique de CdTe cubique	24
Figure (I.24). Notre structure proposée de cellule solaire à base de CdZnTe.....	25
Figure (I.25). Schéma des chemins optiques	28
Figure (I.26). L'absorption fondamentale de la lumière par les porteurs	29
Figure (I.27). Réflexion, transmission et absorption	29
Figure (I.28). Illustration des deux types de déformation	31
Figure (I.29). Illustration d'une couche contrainte	33
Figure (II.1). Structure de la cellule solaire à hétérojonction (n-ZnO/n-CdS ou n-ZnS /p- CdZnTe) étudiée	36
Figure (II.2). Variation du paramètre de maille du $Cd_xZn_{1-x}Te$ en fonction de la concentration du cadmium x	37
Figure (II.3). Variation du désaccord de maille en fonction de la concentration du cadmium x	38
Figure (II.4). Variation de l'énergie de gap du $Cd_xZn_{1-x}Te$ en fonction de la concentration du cadmium	38
Figure (II.5). Variation de l'énergie de gap du $Cd_xZn_{1-x}Te$ en fonction de la concentration du cadmium et la température	39
Figure (II.6). Variation de l'épaisseur critique du $Cd_xZn_{1-x}Te$ en fonction de la concentration du cadmium x	40
Figure (II.7). Variation du coefficient d'absorption α en fonction de la longueur d'onde pour différentes x	40
Figure (II.8). Variation du coefficient d'absorption α en fonction de l'énergie de photon Incident pour différentes x	41
Figure (II.9). Variation de l'indice de réfraction en fonction de la longueur d'onde pour différentes valeurs de concentration du cadmium x	42

Figure (II.10). Variation de coefficient de réflexion en fonction de la longueur d'onde pour différentes valeurs de concentration du cadmium x	43
Figure (II.11). Variation de caractéristique J-V pour plusieurs concentrations du cadmium x.....	44
Figure (II.12). Variation du rendement quantique externe EQE en fonction de la longueur d'onde pour différentes valeurs de concentration du cadmium x	45
Figure (II.13). Variation de caractéristique J-V pour plusieurs températures pour x=0.6	47
Figure (II.14). Variation de caractéristique J-V pour plusieurs températures pour x=0.7.....	47
Figure (II.15). Variation de caractéristique J-V pour plusieurs températures pour x=0.8	48
Figure (II.16). Variation du rendement quantique externe EQE en fonction de la longueur d'onde pour plusieurs températures pour x=0.6	49
Figure (II.17). Variation du rendement quantique externe EQE en fonction de la longueur d'onde pour plusieurs températures pour x=0.7	49
Figure (II.18). Variation du rendement quantique externe EQE en fonction de la longueur d'onde pour plusieurs températures pour x=0.8	50
Figure (II.19). (A) variation de la densité de courant de court-circuit et la tension de circuit-ouvert en fonction de l'épaisseur de la couche tampon (CdS). (B) variation de facteur de forme et le rendement en fonction de l'épaisseur de la couche tampon (CdS)	51
Figure (II.20). (C) variation de la densité de courant de court-circuit et la tension de circuit-ouvert en fonction de dopage de la couche absorbante. (D) variation de facteur de forme et le rendement en fonction de dopage de la couche absorbante	52
Figure (II.21). Variation de caractéristique J-V pour plusieurs concentrations du cadmium x.....	54
Figure (II.22). Variation du rendement quantique externe EQE en fonction de la longueur d'onde pour différentes valeurs de concentration du cadmium x	55
Figure (II.23). Variation de caractéristique J-V pour plusieurs températures pour x=0.6	57
Figure (II.24). Variation de caractéristique J-V pour plusieurs températures pour x=0.7.....	57
Figure (II.25). Variation de caractéristique J-V pour plusieurs températures pour x=0.8	58

Figure (II.26). Variation du rendement quantique externe EQE en fonction de la longueur d'onde pour plusieurs températures pour $x=0.6$	59
Figure (II.27). Variation du rendement quantique externe EQE en fonction de la longueur d'onde pour plusieurs températures pour $x=0.7$	59
Figure (II.28). Variation du rendement quantique externe EQE en fonction de la longueur d'onde pour plusieurs températures pour $x=0.8$	60
Figure (II.29). (E) variation de la densité de courant de court-circuit et la tension de circuit-ouvert en fonction de l'épaisseur de la couche tampon (ZnS). (F) variation de facteur de forme et le rendement en fonction de l'épaisseur de la couche tampon (ZnS)	61
Figure (II.30). (G) variation de la densité de courant de court-circuit et la tension de circuit-ouvert en fonction de dopage de la couche absorbante. (H) représentation de facteur de forme et le rendement en fonction de dopage de la couche absorbante	62
Figure (A.1). Classement des matériaux II-VI dans le tableau périodique	68
Figure (A.2). Panneau de démarrage de SCAPS, le panneau d'action ou principal	70
Figure (A.3). Définition de notre structure de cellule solaire	70
Figure (A.4). Paramètre de couche antireflet ZnO de notre cellule	71
Figure (A.5). Paramètre de couche tampon CdS de notre cellule	71

Introduction générale :

L'énergie est listée comme la première priorité de l'humanité pour les années prochaines. Elle est largement utilisée dans l'industrie, le transport, la communication, l'agriculture et la vie quotidienne. Elle provient sous multiple formes divisées en deux catégories principales. Le premier est la catégorie des énergies dites non renouvelables extraient du charbon, du gaz, du pétrole et d'Uranium. La deuxième est celle des énergies appelés renouvelables comme l'éolienne, la biomasse, la géothermique, l'hydroélectrique et le solaire thermique et photovoltaïque. [1]

L'inconvénient des énergies non renouvelables est qu'ils sont des ressources de disponibilité limitée d'une part et leur combustion est l'une des causes principales de la pollution de l'environnement d'autre part. Ainsi que, vu les risques d'accidents que présente, l'énergie nucléaire nécessite une commande et une sécurité très élevée pour son utilisation. [2]

Parmi les énergies renouvelables, l'énergie solaire photovoltaïque (PV) est la seule source d'énergie qui peut fournir de l'énergie de l'échelle de milliwatts à plusieurs mégawatts à partir d'une technologie modulaire. Elle est en outre, non polluante, silencieuse et sans pièces rotatives. Cette énergie est l'énergie électrique produite de la conversion directe du rayonnement solaire à l'aide des cellules solaires photovoltaïques.

Les composés semi-conducteurs sont considérés comme une classe importante des matériaux et cela grâce à la richesse de leur propriétés structurales, électroniques, optiques et diélectriques qui sont des paramètres importants et jouent un rôle majeur dans les composants optoélectroniques. [3]

Les propriétés physiques des matériaux semi-conducteurs peuvent être améliorées par l'emploi des alliages (ternaires, quaternaires,) qui présentent l'avantage de contrôler indépendamment le paramètre cristallin et la largeur de la bande interdite. [4]

L'objectif de ce présent mémoire est de faire une simulation et modélisation d'une cellule solaire à base de CdZnTe afin d'optimiser le rendement de conversion jouent sur les divers paramètres physiques (électriques et optiques) en utilisant le logiciel SCAPS 1D pour calculer les différentes caractéristiques de la cellule solaire (la densité de courant de court-circuit, tension de circuit ouvert V_{co} , facteur de forme FF, le rendement de conversion la cellule solaire étudiée η).

La présentation de cette étude a été répartie sur deux chapitres avec au début une présentation générale et se termine à la fin par une conclusion.

Nous avons commencé dans le premier chapitre par présenter succinctement l'énergie photovoltaïque, le principe de la conversion photovoltaïque et les différentes filières photovoltaïques. Nous avons fait un rappel des propriétés physiques caractérisant le matériau de Cadmium Zinc Telluride (CdZnTe).

Dans le dernier chapitre nous avons présenté la modélisation et la simulation de deux structures à hétérojonction ZnO/CdS/CdZnTe et ZnO/ZnS/CdZnTe sous logiciel SCAPS.

Chapitre 01 : Généralité sur les semi-conducteurs et les cellules photovoltaïques.

I.1. Introduction :

Le développement, l'optimisation et la caractérisation des cellules photovoltaïques impliquent une certaine connaissance de la source d'énergie utilisée. Ce chapitre présente quelques bases et notions indispensables dans la conversion photovoltaïque. La première partie de ce chapitre est consacrée au rayonnement solaire, sa forme et sa nature. Ensuite, la deuxième partie est consacrée les cellules solaires et leur effet photovoltaïques. Ainsi qu'aux différentes caractéristiques photovoltaïques. En Nous décrirons ensuite en troisième partie les semi-conducteurs et la jonction P-N. Enfin, on termine Par une brève description sur les matériaux semi-conducteurs II-VI et leurs propriétés optoélectronique.

I.2. Le rayonnement solaire :

Le soleil décharge continuellement une énorme quantité d'énergie radiante dans le système solaire, la terre intercepte une toute petite partie de l'énergie solaire rayonnée dans l'espace. Une moyenne de 1350 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 constante solaire hors atmosphère égale à 1350W/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.

I.2.1. Masse d'air :

Pour tenir compte de la longueur effective parcourue à travers l'atmosphère terrestre traversée par le rayonnement solaire direct, on introduit la notion de masse d'air (AM_x). Elle correspond à la perte de l'énergie solaire par l'absorption atmosphérique. La masse d'air est exprimée comme un multiple du parcours traversé en un point au niveau de la mer, le soleil étant directement à l'aplomb [2].

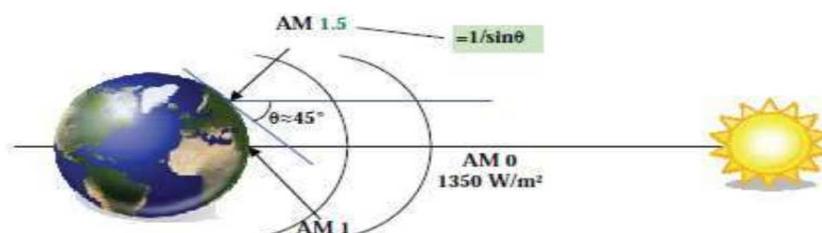


Figure (I.1): Schéma descriptif de l'incidence solaire sur la terre.

En chaque point, la valeur de la masse d'air est donnée par l'Équation (I.1):

$$AM = \frac{1}{\sin \theta} \quad . \quad (\text{I.1})$$

I.2.2. Spectre de référence :

Hors atmosphère, l'amplitude et la distribution du spectre du rayonnement solaire sont parfaitement définies. Il n'en est pas de même au niveau du sol ou en raison de multiples paramètres atmosphériques, cette amplitude et cette distribution spectrale peuvent varier. Il est donc nécessaire de définir un spectre de référence, qui puisse être adopté au niveau international pour que des mesures comparatives soient possibles [3].

Le spectre représenté sur la figure (I.2) donne en fonction de la longueur d'onde l'irradiance spectrale, c'est-à-dire la puissance associée au rayonnement par tranche de longueur d'onde et par unité de surface.

Ce spectre de référence correspond, à la traversée par le rayonnement d'une couche atmosphérique de référence spectre AM1, 5.

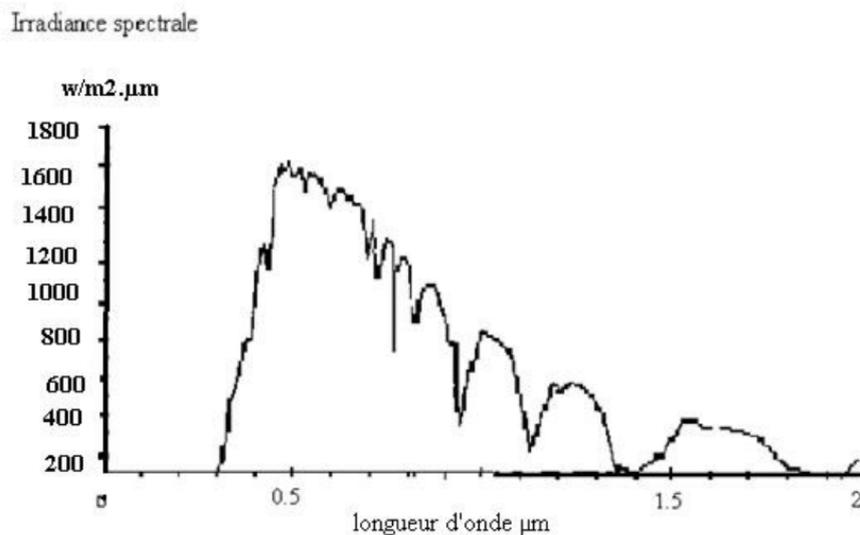


Figure (I.2) : Spectre solaire.

I.3. Les cellules solaires photovoltaïques :

Les cellules solaires photovoltaïques sont des dispositifs de conversion directe de l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique [4]. Le phénomène mis en jeu, l'effet photoélectrique, consiste à l'apparition d'une différence de potentiel produite par la génération de par excitation lumineuse au voisinage d'une jonction.



Figure (I.3) : Cellule solaire photovoltaïque.

I.3.1. L'effet photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière [5].

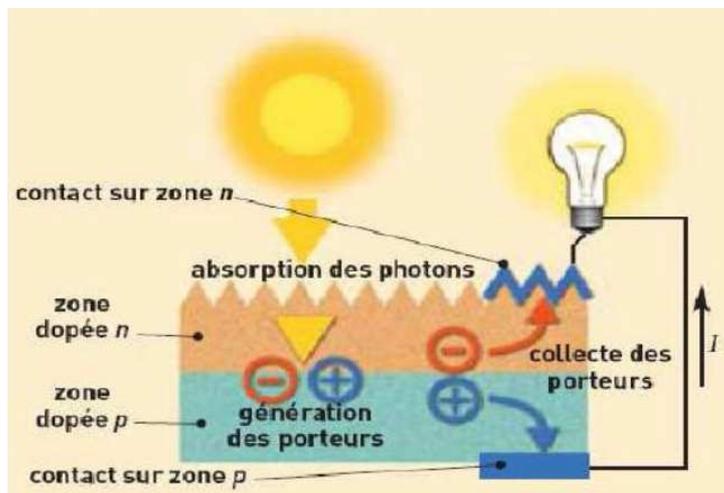


Figure (I.4) : schémas représente l'effet photovoltaïque [5].

Cette conversion est effectuée par l'intermédiaire des composants électroniques à base des matériaux semi-conducteurs, dites: les cellules solaires ou les cellules photovoltaïques (Figure (I.4)). Le groupement d'un ensemble des cellules solaires constitue le panneau solaire ou le panneau photovoltaïque.

Une cellule solaire à semi-conducteur est un dispositif constitué de deux semi-conducteurs de conductions différentes, type P (les trous sont les porteurs majoritaires) et type n (les électrons

sont les porteurs majoritaires), il permet de débiter un courant électrique dans une charge externe lorsque celui-ci est exposé à la lumière (Figure (I.5)). Les semi-conducteurs candidats pour qu'ils soient les bases des cellules solaires doivent présenter une stabilité physique pour assurer la fiabilité au cours du temps et ayant des gaps adaptés pour l'absorption du spectre solaire avec un coefficient d'absorption plus élevé.

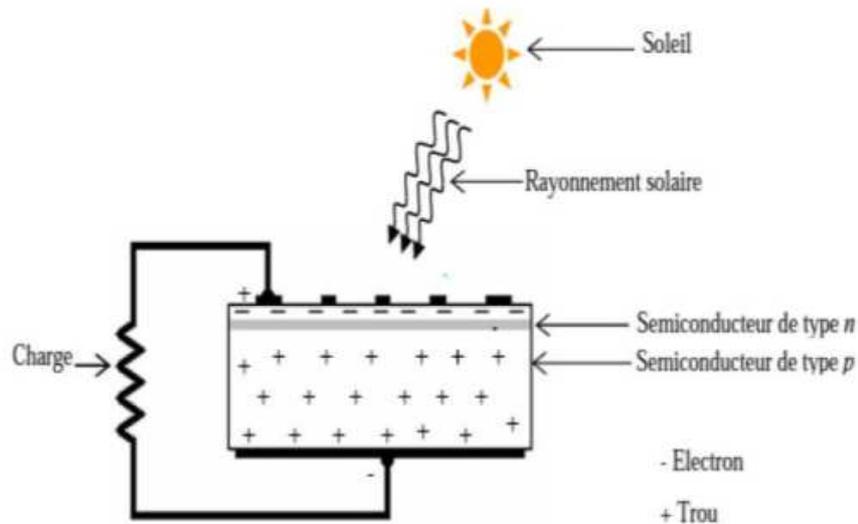


Figure (I.5) : Schéma simplifié d'une cellule solaire sous éclairage [6].

I.3.2. Principe de fonctionnement d'une cellule PV :

La conversion photovoltaïque est la transformation de l'énergie des photons en énergie électrique grâce au processus d'absorption de la lumière par la matière. Lorsqu'un photon est absorbé par le matériau, il passe une partie de son énergie par collision à un électron l'arrachant littéralement de la matière. Ce dernier étant précédemment à un niveau d'énergie inférieur où il était dans un état stable passe alors vers un niveau d'énergie supérieur, créant un déséquilibre électrique dans la matière se traduisant par une paire électron-trou, de même énergie électrique.

Les cellules solaires sont basées sur la technologie des semi-conducteurs et la jonction p-n. Un semi-conducteur (SC) est un matériau présentant une bande interdite (E_g) de quelques eV entre la bande de valence et la bande de conduction, avec le niveau de Fermi dans la bande interdite. La position du niveau de Fermi est fonction de la concentration des porteurs de charges. Le semi-conducteur est de type n lorsque les électrons sont les porteurs de charge majoritaires, dans ce cas, le niveau de Fermi se situe près de la bande de conduction. Il est de type p lorsque ce sont les trous, dans ce cas le niveau de Fermi est proche de la bande de valence [7].

L'assemblage de deux semi-conducteurs de types différents forme la jonction p-n. Comme le montre la figure (I.6). Il existe deux types de jonctions: lorsque les deux semi-conducteurs sont issus de deux matériaux différents, on parle d'hétérojonction, lorsque la jonction p-n est formée d'un seul matériau comportant des zones avec des dopages différents p et n, on parle alors d'homojonction ex : homojonction Si.

Lors du contact entre zones p et n, les porteurs majoritaires de chacune diffusent à travers la surface de contact, il se crée une zone chargée positivement du côté du semi-conducteur n et une zone chargée négativement du côté du semi-conducteur de type p. Cette zone de transition est appelée zone de charge d'espace (ZCE). Le gradient de concentration des porteurs majoritaires induit la présence d'un champ électrique permanent dans cette ZCE à l'équilibre. Les niveaux de Fermi des deux zones s'égalisent, ce qui provoque une courbure du diagramme de bande, introduisant une barrière de potentiel V_e à l'interface [7].

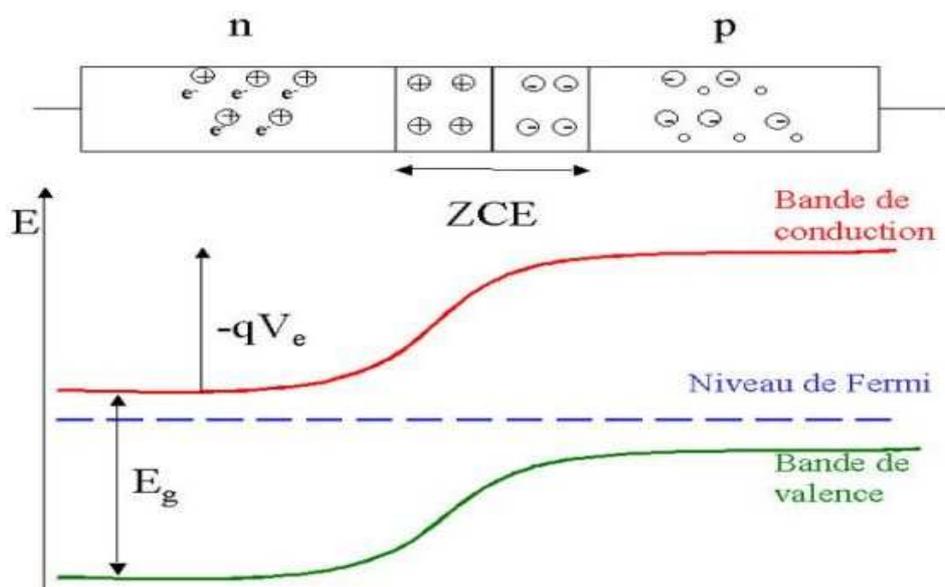


Figure (I.6) : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [8].

I.3.3. Les différentes caractéristiques d'une cellule solaire :

I.3.3.1. Courant de court-circuit J_{sc} :

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

I.3.3.2. Tension de circuit ouvert V_{co} :

C'est la tension aux bornes de la cellule lorsqu'elle est connectée à une charge de résistance

infinie. Elle dépend essentiellement du type de cellule solaire (jonction PN, jonction schottky), la nature des contacts, des matériaux de la couche active et de la couche active-électrode. Elle dépend aussi de l'éclairement de la cellule.

Pour une cellule solaire idéale la tension de circuit ouvert est donnée (obtenu pour $I=0$):

$$V_{co} = \frac{KT}{q} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1\right) \quad (\text{I-2})$$

$\frac{KT}{q}$: Potentiel thermodynamique.

T : température absolue.

q : constante de charge d'électron.

K : constante de Boltzmann.

I_{ph} : courant photonique.

I_s : courant de saturation.

I.3.3.3. Puissance maximale P_m :

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

Si V_m et I_m sont la tension et le courant pour lesquels on a ce maximum, la puissance maximale est la surface du plus grand rectangle de côté V_m et I_m .

$$P_m = I_m \cdot V_m \quad (\text{I-3})$$

I.3.3.4. Facteur de forme FF :

On appelle facteur de forme, le rapport de la puissance maximale au produit $J_{sc} V_{co}$. Le facteur de forme indique la qualité de cellule.

$$FF = \frac{P_m}{V_{co} \cdot J_{sc}} \quad (\text{I-4})$$

I.3.3.5. Le rendement η :

Le rendement de conversion d'une cellule solaire est le rapport de la puissance maximale pouvant être extraite à la puissance incidente.

$$\eta = \frac{P_m}{P_i} = \frac{FF \cdot J_{sc} \cdot V_{co}}{E \cdot S} \quad (\text{I-5})$$

Où : P_i est la puissance incidente du rayonnement solaire au sol.

I.3.3.6. L'efficacité quantique externe EQE:

Le rendement quantique, note EQE (external quantum efficiency), appelé aussi IPCE (incident photon to current conversion efficiency), est le rapport entre le nombre d'électrons dans le circuit externe et le nombre de photons incidents. Ce rendement ne prend pas en considération

les photons réfléchis et transmis. Il est donné par la relation suivante [9] :

$$EQE = \frac{J_{sc}(\lambda)}{\phi(\lambda)} \cdot \frac{E_{ph}(\lambda)}{e} = \frac{hc}{e} \cdot \frac{J_{sc}(\lambda)}{\phi(\lambda)\lambda} = 1.24 \cdot \frac{J_{sc}(\lambda)}{\phi(\lambda)} \quad \text{(I-6)}$$

Où :

J_{sc} : est la densité de courant de Court-circuit ($A.cm^{-2}$).

ϕ : est l'éclairement reçu par l'échantillon ($w.cm^{-2}$).

λ : est la longueur d'onde monochromatique (nm).

h : est la constante de Planck (J.s).

c : est la vitesse de la lumière ($J.ms^{-1}$).

e : la charge électronique.

E_{ph} : L'énergie du photon.

I.3.4. La conversion photovoltaïque :

La conversion d'énergie photovoltaïque met en jeu trois phénomènes physiques, intimement liés et simultanés :

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

Il est donc clair qu'un matériau doit avoir des propriétés optiques et électriques spécifiques pour permettre la conversion photovoltaïque.

I.3.5. Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque :

L'analogie entre le fonctionnement de la cellule photovoltaïque sous éclairement et celui d'un générateur de courant produisant un courant I_{ph} auquel se soustrait le courant de la polarisation de la diode en polarisation directe. Une ou plusieurs diodes supplémentaires, traduisant les différents mécanismes de recombinaison pouvant se produire dans la cellule (le facteur d'idéalité et la densité de courant de saturation diffèrent pour chaque diode). Un modèle à deux diodes est souvent utilisé pour les cellules solaires.

Finalement, le circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque est représenté sur la figure (I.7).

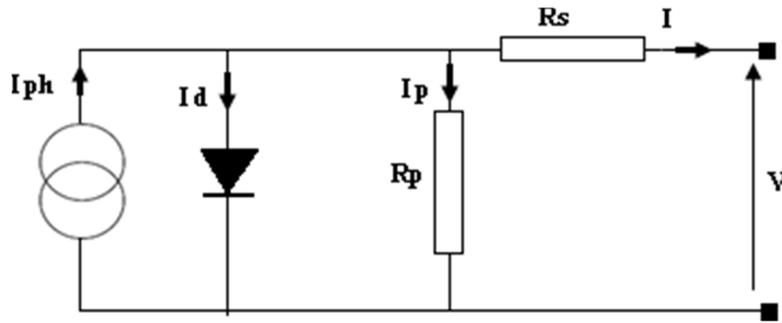


Figure (I.7) : schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.

Les différents paramètres de ce modèle sont :

- a. Le générateur de courant :** il délivre le courant I_{ph} correspondant au courant photogénéré.
- b. La résistance série R_s :** elle prend en compte la résistivité propre aux contacts entre les différentes régions constitutives de la cellule. Ce terme doit idéalement être le plus faible possible pour limiter son influence sur le courant de la cellule.
- c. La résistance R_p :** également connue sous le nom de court-circuit, elle peut être due à un court-circuit sur les bords de la cellule. On l'appelle aussi résistance de fuite.
- d. La diode :** modélise la diffusion des porteurs dans la base de l'émetteur.

I.3.6. Générations de cellules solaires :

Les cellules solaires sont classées en trois générations à base de l'ordre de leur importance. Des recherches sont menées sur l'ensemble des trois générations en même temps pour améliorer leur efficacité, tandis que les cellules solaires de première génération constituent la plus grande part de la production commerciale à propos de 89,7% en 2007.

I.3.6.1. Première génération :

Elles sont à grande surface, à haute qualité et des dispositifs formés des cellules solaires simple jonction de la première génération. La réduction des coûts de production de cette technologie est annulée en raison des coûts de main-d'œuvre élevée, et les coûts des matériaux surtout pour le silicium. Cette tendance se poursuit tant que l'industrie photovoltaïque est en expansion. Bien qu'il dispose d'une large partie d'absorption spectrale, les photons de haute énergie à la fin du bleu et violet du spectre sont gaspillés sous forme de chaleur [10].

La production de cellules solaires à haut rendement avec une efficacité énergétique de conversion élevée sont ainsi favorisées à condition de ne pas augmenter la complexité de la cellule solaire. La limite théorique de l'efficacité des cellules solaires à simple jonction de silicium est de 33%.

I.3.6.2. Deuxième génération :

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.

Ces technologies qui étaient initialement chères étaient réservées aux applications spatiales (en raison de leur poids par watt crête plus faible) et aux technologies de concentration. Avec l'augmentation des volumes de production, le prix de revient de ces technologies a baissé pour devenir compétitif avec les technologies cristallines de la première génération. 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.

I.3.6.3. Troisième génération :

La recherche pour améliorer les performances des cellules solaires en améliorant son efficacité a conduit à l'élaboration de la troisième génération des cellules solaires [11]. La piètre performance électrique de la technologie en couche mince en maintenant de faibles coûts de production de cette technologie, les technologies de non semi-conducteurs (y compris les cellules à base de polymères).

Le progrès constant de l'évolution de l'industrie photovoltaïque est le résultat de l'augmentation de l'automatisation de la production de cellules solaires à couches minces avec une plus grande efficacité et des coûts réduits. La nécessité des découvertes révolutionnaires dans l'industrie photovoltaïque est parfois interrompue par des progrès dans les matériaux photovoltaïques et les technologies de fabrication pour l'amélioration de la compétitivité des coûts et de l'expansion du marché du photovoltaïque. En brisant les anciennes limites de l'efficacité et du coût en apportant les innovations par l'exploitation de nouvelles compréhensions de la physique et de la science des matériaux deviendront une révolution [12].

I.3.7. Les cellules organiques :

Comme leurs noms les indiquent, les cellules organiques (figure I.8) autrement dit les cellules plastiques, sont composées de semi-conducteurs organiques. Ce type de cellules est apparu dans les années 90, elles constituent une tentative de réduction du coût de l'électricité photovoltaïque, et elles bénéficient en effet du faible coût des semi-conducteurs organiques ainsi que de

nombreuses simplifications potentielles dans le processus de fabrication. Son record de rendement de conversion dépasse les 10 % [13].

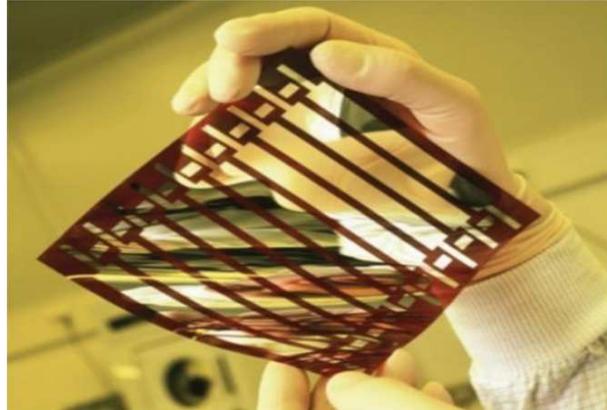


Figure (I.8) : Cellule solaire tout organique sur substrat souple [14].

Les différentes étapes de la conversion lumière-électricité d'une cellule photovoltaïque organique sont les suivantes [15] :

- Absorption des photons et création des excitons.
- Diffusion des excitons.
- Dissociations des excitons.
- Transport de porteurs de charges.

La figure (I-9) résume ces quatre étapes :

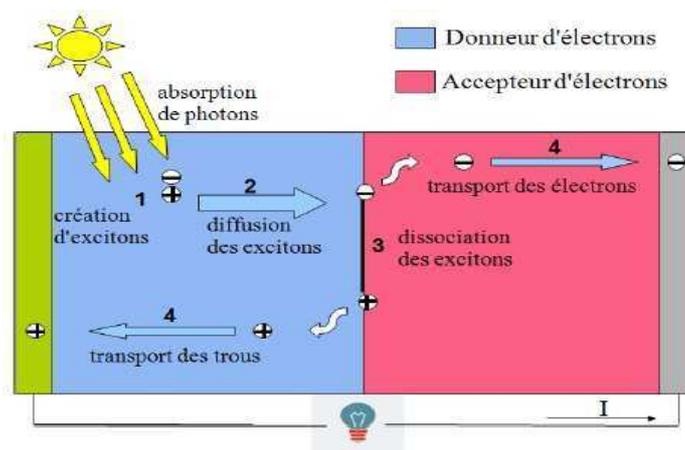


Figure (I.9) : les quatre étapes de la conversion photovoltaïque organique [15].

I.3.8. Les couches minces :

I.3.8.1. Définition d'une couche mince :

Par principe, une couche mince est une fine couche d'un matériau déposé sur un autre matériau, 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). Cette faible distance entre les deux surfaces limites entraîne une perturbation de la majorité des propriétés physiques, très souvent un tel petit nombre de couches atomiques possède des propriétés très différentes. [16]

Par exemple la réflexion optique ou l'absorption peuvent être maîtrisées de manière très précise, de même pour la conductivité électrique. La différence essentielle entre le matériau à l'état massif et celui en couches minces est liée au fait que dans l'état massif on néglige généralement avec raison le rôle des limites dans les propriétés, tandis que dans une couche mince ce sont, au contraire, les effets liés aux surfaces limites qui sont prépondérants. [16]

I.3.8.2. Caractéristiques :

L'extrême finesse (quelques m d'épaisseur) des dispositifs en couches minces implique l'utilisation d'un élément leur conférant une tenue mécanique (le substrat).

On peut noter la présence d'un oxyde transparent conducteur (TCO) pour récolter plus efficacement les charges du contact avant tout en laissant passer la lumière.

La nature du substrat peut fortement influencer sur les performances de la cellule. L'un des avantages majeurs des cellules en couches minces est qu'elles permettent l'utilisation de substrats légers, flexibles ou encore conformables. Cela ouvre de nouvelles applications, notamment en termes de mobilité. Par exemple, il est possible d'emporter une plus grande surface active avec un module photovoltaïque qui peut être roulé.

De plus, les substrats flexibles permettent d'utiliser des procédés de fabrication de type roll-to-roll, qui ont pour intérêt de réduire les coûts de fabrication. [17] Ces applications sont illustrées dans la figure (I-10).

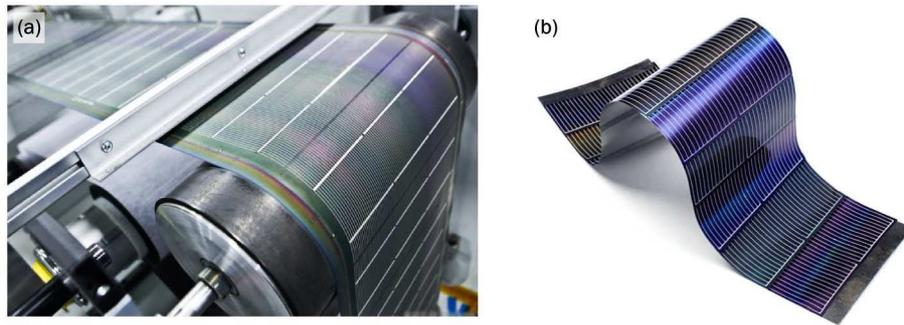


Figure (I.10) : a) Fabrication de cellules en couches minces par procédé roll-to-roll.

b) Cellule flexible à base de CIGS (Global Solar). [16]

I.4. Les Semi-conducteurs :

On appelle semi-conducteur un matériau électriquement intermédiaire entre isolant et conducteur. En effet, les valeurs usuelles de la conductivité (σ) des isolants sont comprises entre 1×10^{-11} et 1×10^{-19} S/cm et celles des conducteurs entre 6×10^7 et 1×10^4 S/cm. Il existe pourtant des corps qui ont une résistivité intermédiaire comprise entre 1×10^3 et 1×10^{-6} S/cm, on les appelle des semi-conducteurs.

I.4.1. Dopage des semi-conducteurs :

Il y a deux types de semi-conducteurs, intrinsèque et extrinsèque. Les semi-conducteurs intrinsèques sont complètement purs, signifiant qu'ils ont seulement un type d'élément ou un composé dans sa structure cristalline [18], et ayant un taux d'impuretés très faible (moins de 1 atome d'impureté pour 10^{13} atomes de l'élément semi-conducteur). Ils se comportent comme des isolants à très basse température et leur conductivité augmentent avec la température [19].

I.4.1.1. Semi-conducteur intrinsèques :

Il est impossible de créer des semi-conducteurs intrinsèques totalement purs parce qu'à un certain point pendant le processus de croissance les impuretés contaminent le matériel [18]. Si un lien de semi-conducteur intrinsèque est cassé, un électron libre et un trou sont créés simultanément, de même, si un électron est excité de la bande de valence à la bande de conduction alors un trou sera simultanément créé dans la bande de valence [20]. On peut considérer que le trou s'est déplacé par combinaisons d'électrons. La structure cristalline du silicium pur est présentée dans la figure (I-11):

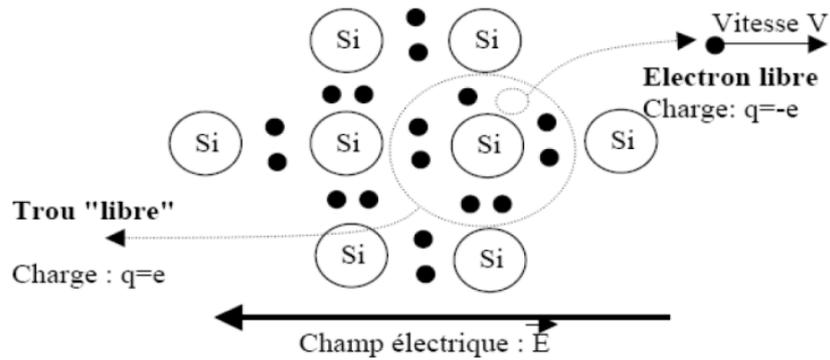


Figure (I.11) : Structure cristalline du Silicium pur [21].

I.4.1.2. Semi-conducteurs extrinsèques :

Les semi-conducteurs extrinsèques sont créés en ajoutant des atomes d'impuretés dans les matériaux intrinsèques. Heureusement, ajouter des impuretés dans un matériel peut être bénéfique aux performances du semi-conducteur. L'ajout des impuretés dans la substance avec l'intention de contrôler ses caractéristiques de fonctionnement est connu sous le nom de dopage [18], ce processus peut engendrer des changements des propriétés électriques.

Le dopage est employé pour contrôler le nombre d'électrons ou de trous dans un matériel par l'addition d'une quantité déterminée d'impuretés, avec résultats des matériaux de type-p ou de type-n en concordance avec le nombre des trous ou des électrons libres [20].

I.4.1.2.1. Semi-conducteur dopé n :

Les dopants de type-n sont également connus comme donneurs, car ils sont des éléments ou des composés avec cinq électrons de valence ou plus qui donneront un électron après que les quatre autres forment des liaisons covalentes avec le matériau intrinsèque dans lequel ils ont été placés.

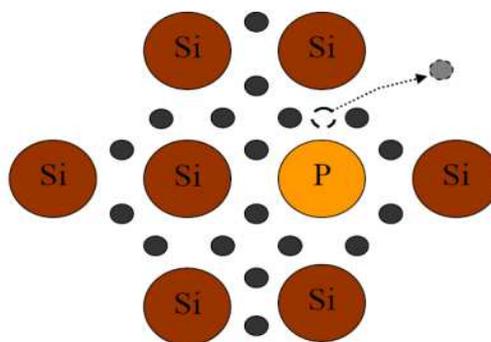


Figure (I.12) : Dopage d'un monocristal de silicium par un atome de phosphore, dopage donneur de type-n [21].

I.4.1.2.2. Semi-conducteur dopé p :

Les dopants de type-p, ou accepteurs, sont des éléments ou des composés ayant trois ou moins d'électrons de valence et acceptent des électrons, forment des liaisons covalentes avec quatre ou plusieurs de leurs cinq trous. Les matériaux de type-p ont des trous comme porteurs majoritaires et des électrons comme porteurs minoritaires [18].

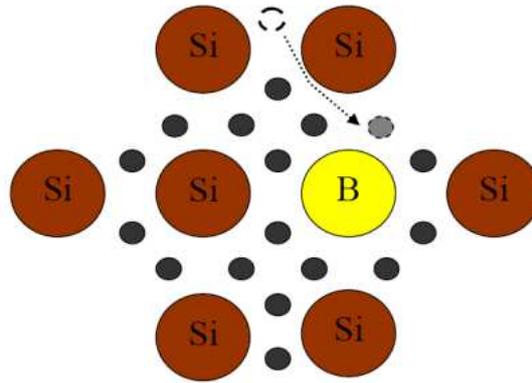


Figure (I.13) : Dopage d'un monocristal de silicium par un atome de Bore, dopage accepteur de type-P [21].

I.4.2. La jonction P-N :

Parmi tous les dispositifs à semi-conducteur, la jonction P-N est un composant essentiel à la fois pour ses applications directes et parce que la compréhension de sa physique permet la compréhension de nombreux autres dispositifs. Une jonction P-N est constituée par un cristal semi-conducteur dont la concentration en impuretés profondes varie avec x pour passer d'une région de type P à une région de type N.

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

En ajoutant des contacts métalliques sur les zones n et p, une diode est obtenue La structure de la jonction P-N peut être [22] :

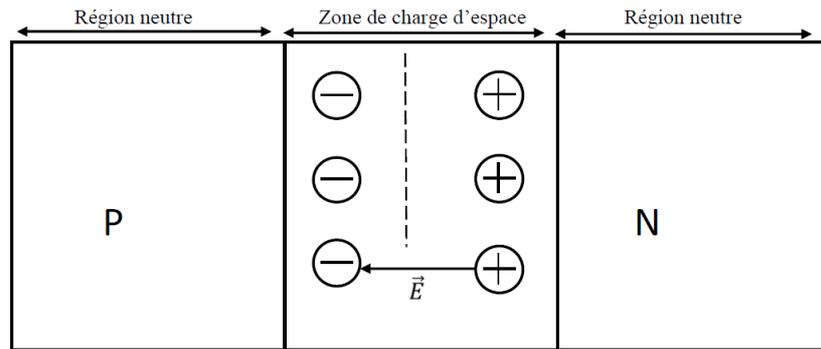


Figure (I.14) : structure d'une jonction P-N.

- **Jonction abrupte :**

Une jonction P-N est de type abrupt si la quantité $N_a - N_d$ est constante et positive dans la zone P et elle constante et négative donc la zone N.

- **Jonction graduelle :**

Une jonction est dite progressive linéaire si la quantité $N_d - N_a$ suit la loi linéaire suivante :

$$N_d - N_a = C x.$$

Où : C est une constante positive.

x : est une épaisseur de zone de charge d'espace (ZCE).

I.4.3. bandes d'énergie :

Les semi-conducteurs et les métaux possèdent une structure cristalline particulière, c'est à dire que les atomes sont groupés en réseaux régulièrement disposés dans l'espace. Dans ces réseaux, la distance inter atomique étant faible, de l'ordre de quelques Å, les atomes ne peuvent plus être considérés comme isolés, et il en résulte des interactions de nature électrostatique entre les divers atomes. Les états d'énergie électroniques sont distribués selon une loi de dispersion appelée structure de bandes, représentée par une succession de bandes permises pouvant être séparées par des bandes interdites. Toutes les directions de propagation des électrons, c'est à dire tous les points du réseau réciproque, doivent être examinées afin d'établir l'existence d'une bande interdite (le terme anglais "gap") [23].

Dans le diagramme de bande de la figure (I.15), la distance inter atomique est représentée graphiquement à l'encontre de l'énergie d'électrons. Le diagramme de bande montre que lorsque les atomes du même élément sont infiniment éloignés les uns des autres, ils ont les mêmes niveaux d'énergie. Toutefois, lorsque les atomes sont rapprochés, les électrons de chaque atome s'interagissent, et les niveaux d'énergie discrète divergente dans une bande d'énergie autorisée représentée par la partie grise du graphique de la figure (I.15).

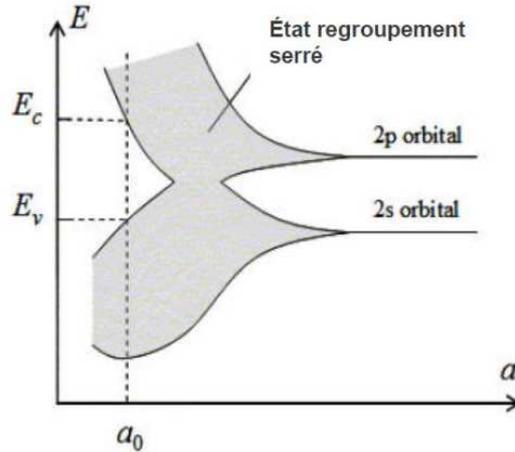


Figure (I.15) : Distance inter atomique représentée graphiquement contre l'énergie, pour montrer la formation des bandes d'énergie dans un matériau [24].

Dans un solide à 0 °K, toutes les bandes d'énergie les plus basses sont remplies, sauf la dernière qui peut être partiellement remplie ou complètement remplie. Lorsque cette bande est partiellement remplie, on a affaire à un conducteur car si on applique un champ électrique, les électrons qui ont l'énergie la plus élevée peuvent acquérir une énergie supplémentaire en occupant des niveaux d'énergie très voisins disponibles. Lorsque cette bande est remplie, on a affaire à un isolant à 0 °K car l'application d'un champ électrique ne peut fournir assez d'énergie pour lui faire franchir la bande interdite afin d'atteindre les premiers niveaux disponibles, les électrons ne peuvent acquérir un mouvement collectif correspondant au passage du courant [19].

On distingue isolants et conducteurs par la différence d'énergie qu'existe entre ces bandes, comme illustré à la figure (I.16).

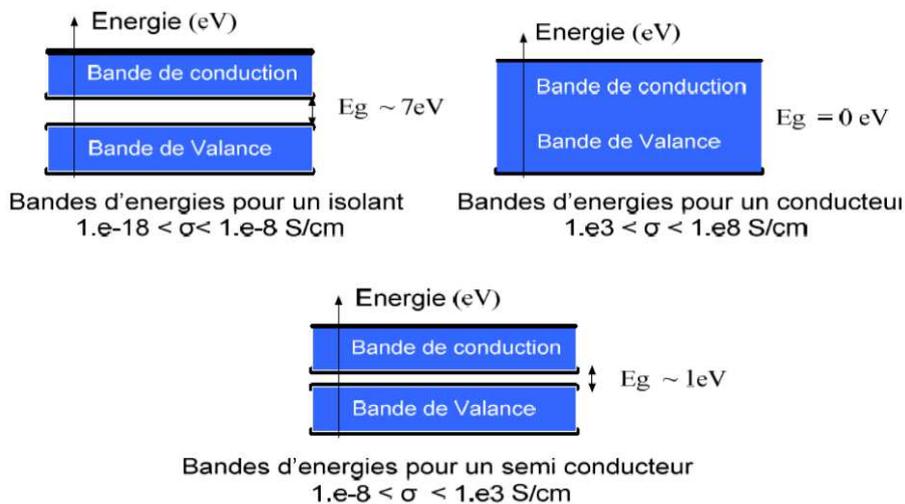


Figure (I.16) : Bandes d'énergie dans différents types de matériaux [21].

I.4.3.1. Bandes gap interdites direct et indirect :

Les structures de bandes représentées sur la figure (I.17) font apparaître deux types Fondamentaux de semi-conducteurs a et b :

a) **Les semi-conducteurs à gap direct** : si le maximum de la bande de valence et le minimum de la bande de conduction peuvent correspondre au même vecteur d'onde k .

b) **Les semi-conducteurs à gap indirect** : si le maximum de la bande de valence et le minimum de la bande de conduction ne correspondent pas au même vecteur d'onde k .

La distinction entre les semi-conducteurs à gap direct et indirect est très importante, notamment, dans les processus radiatifs, les processus d'absorption ou d'émission sont considérablement plus importants dans les semi-conducteurs à gap direct que dans les Semi-conducteurs à gap indirect [25].

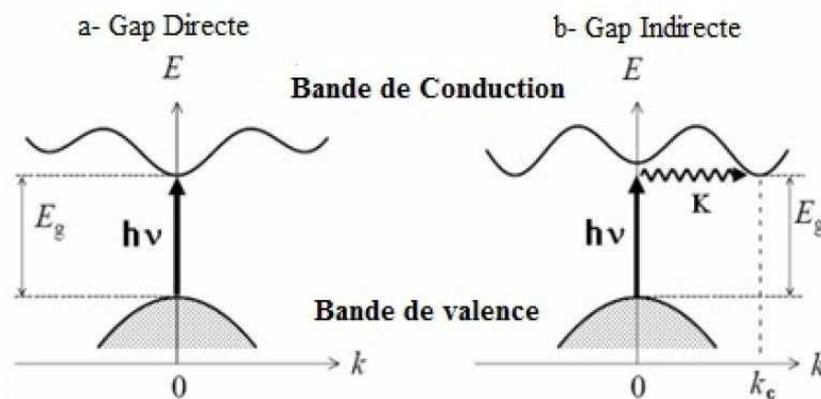


Figure (I.17) : Les transitions optiques directes et indirectes [26].

I.5. Les matériaux semi-conducteurs II-VI :

Les matériaux semi-conducteurs sur lesquels notre étude a porté sont ceux de la famille du zinc (Zn) et du cadmium (Cd). Ces derniers possèdent II électrons de valence sur leur dernière orbitale s tandis que la couche électrique périphérique des atomes des groupes VI (Te) comporte six électrons de valence dont deux sur l'orbitale s et quatre sur l'orbitale p .

I.5.1. Propriétés des semi-conducteurs à composer binaire ZnTe, CdTe :

I.5.1.1. Structure cristalline :

Les composés binaires semi-conducteurs II-VI tels que (ZnTe, CdTe) cristallisent soit dans un arrangement cubique Zinc-blende, soit en structure hexagonal Würtzite.

I.5.1.2. Structure Zinc-blende (Sphalérite) :

C'est une structure cubique qui comporte deux réseaux cubiques à faces centrées décalés l'un par rapport à l'autre d'un quart de la diagonale du cube, donc la structure Zinc-blende du groupe II-VI est obtenue en remplaçant les deux atomes identiques dans la maille unitaire d'une structure diamant par deux atomes différents, l'un appartenant au groupe II et l'autre au groupe VI [27], comme indique dans la Figure (I.18).

Ces atomes occupent des positions bien déterminées, définies par les coordonnées suivantes: Quatre atomes du groupe II dans les positions: $(0, 0, 0)$; $(0, 1/2, 1/2)$; $(1/2, 0, 1/2)$; $(1/2, 1/2, 0)$. Quatre atomes du groupe VI dans les positions: $(1/4, 1/4, 1/4)$; $(1/4, 3/4, 3/4)$; $(3/4, 1/4, 3/4)$; $(3/4, 3/4, 1/4)$.

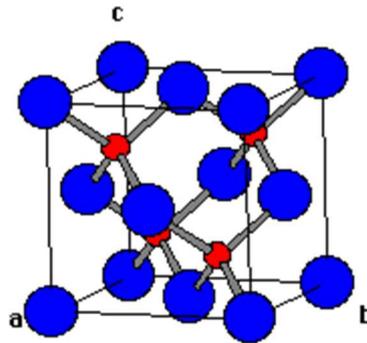


Figure (I.18) : Structure cubique Zinc blende (Sphalérite).

I.5.1.3. Structure Würtzite (Hexagonal) :

Dans cette structure; Figure (I.19), les deux atomes du groupe II occupent les positions $(2/3, 1/3, 1/8)$ et $(0, 0, 5/8)$; et les deux atomes du groupe VI occupent les positions $(0, 0, 0)$ et $(2/3, 1/3, 1/2)$.

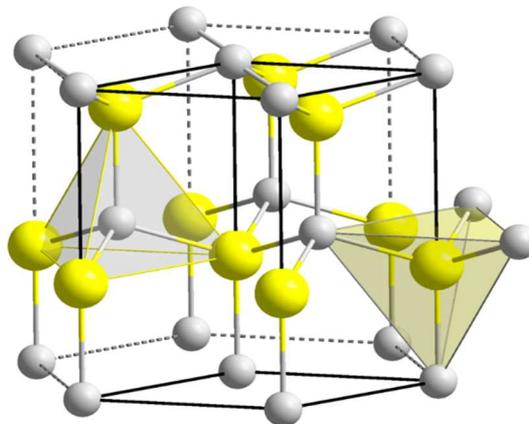


Figure (I.19) : Structure Würtzite (Hexagonal).

Tableau(I.1). Paramètres de maille de composés semi-conducteurs II-VI [28].

Composé	Paramètres de maille		
	(Zinc-blende)	Wurtzite	
	a (Å)	a(Å)	c (Å)
CdTe	6.479	4.549	7.451
ZnS	5.410	3.823	6.257
ZnSe	5.668	3.996	6.550
ZnTe	6.103	4.270	6.990

Dans notre étude nous allons nous limiter à la structure zinc-blende pour les composés binaires des matériaux II-VI car les matériaux II-VI qui nous intéressent sont plus stables en structure Zinc-Blende qu'en structure Wurtzite et ils présentent l'absence de polarisation. La différence du paramètre de maille entre CdTe ($a = 6,48 \text{ \AA}$) et ZnTe ($a = 6,10 \text{ \AA}$) est très importante (5,8%), Tableau (I.2). Ce désaccord de maille joue un rôle primordial dans la réalisation d'hétérostructures.

Les principales propriétés des composés binaires (CdTe, ZnTe) sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau(I.2) : Principales propriétés des composés binaires (CdTe, ZnTe). [29]

Parameters	CdTe	ZnTe
Paramètres de maille a (Å)	6.48	6.10
Bandgap, E_g (eV)	1.4	2.2
Electron affinity, χ (eV)	4.28	3.5
Dielectric permittivity, ϵ/ϵ_0	9	10
Effective Density of states, NC (cm^{-3})	7.8×10^{17}	1.176×10^{18}
Effective Density of states, NV (cm^{-3})	1.8×10^{19}	1.166×10^{19}
Electron mobility, U_n (cm^2/Vs)	500	330
Hole mobility, U_p (cm^2/Vs)	60	80
Electron and hole concentration, n, p (cm^{-3})	1×10^{18}	$n = 10^{17}$

I.5.2. Structure de bande des semi-conducteurs II-VI :

Les semi-conducteurs II-VI ont une bande de conduction (BC) qui est due à l'orbitale s de l'atome de la colonne II et une bande de valence (BV) qui est due à l'orbitale p de l'atome de la colonne VI; Figure (I-20).

La bande de valence se compose de trois courbures différentes :

- Bande de trous lourds (hh heavy hole).
- Bande de trous légers (lh light hole).
- Bande spin-orbite (Δ_{so}).

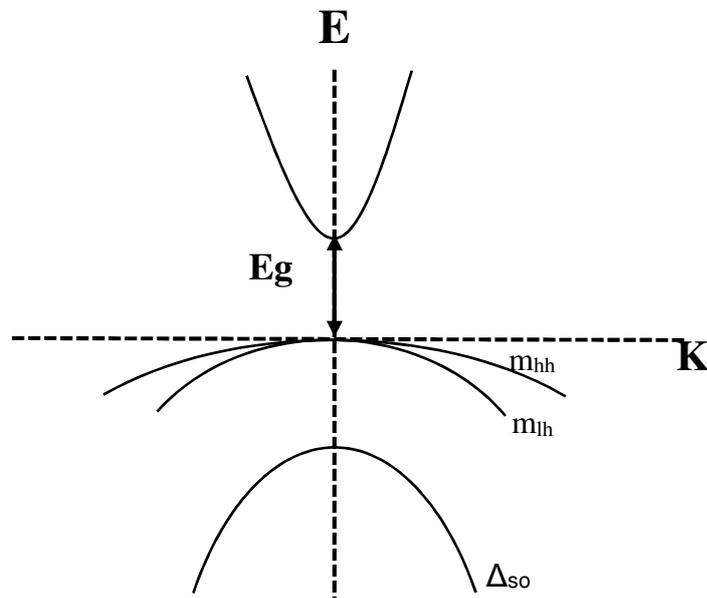


Figure (I.20) : Structure de bande d'un semi-conducteur à gap direct.

I.5.3. Structure de bande des binaires (CdTe, ZnTe) :

Les matériaux binaires, tellure de cadmium CdTe et tellure de zinc ZnTe sont des semi-conducteurs à bande interdite directe : le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence se situent dans la zone de Brillouin point Γ sur la figure (I.21). L'absorption et l'émission de lumière peuvent alors se faire avec conservation du vecteur d'onde sans appliquer d'interaction avec d'autres quasiparticules comme les photons. Figures (I.22, I.23). [30]

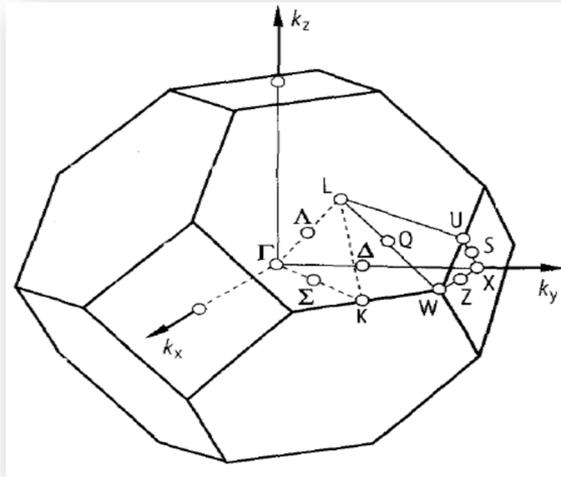


Figure (I.21) : La zone de Brillouin pour une structure zinc-blende [30].

Point Γ : le centre de zone.

Direction Δ : les directions 100.

Direction Σ : les directions 110.

Direction Λ : les directions 111.

Point X : le bord de zone suivant la direction 100.

Point K : le bord de zone suivant la direction 110.

Points L : le bord de zone suivant la direction 111.

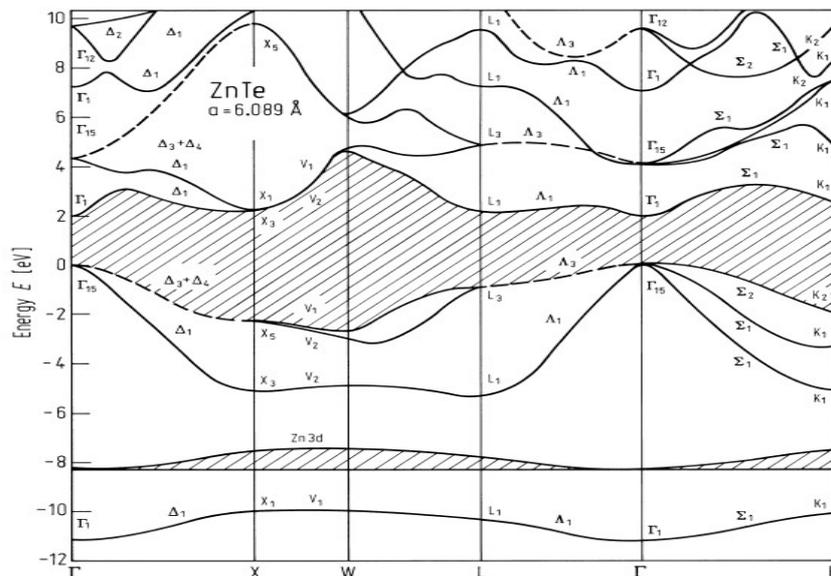


Figure (I.22) : Structure de bande pour ZnTe cubique [31].

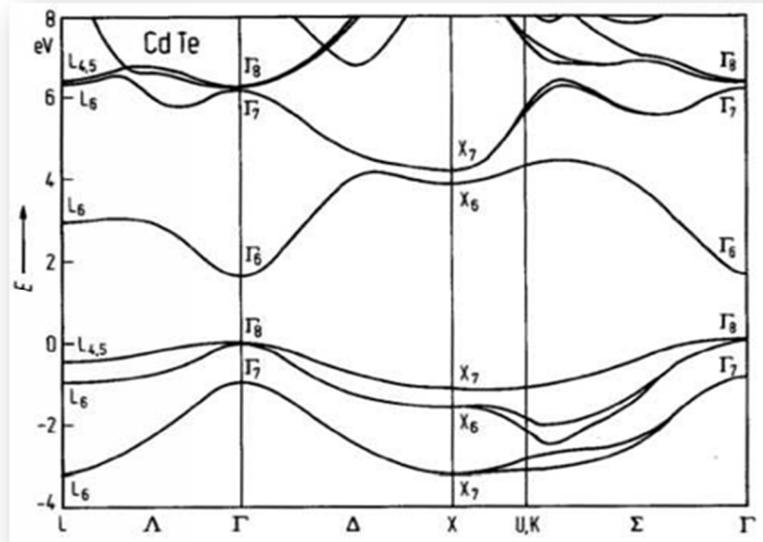


Figure (I.23) : Structure de bande électronique de CdTe cubique [32].

I.5.4. Le choix du matériau :

Les composés II-VI permettent de balayer une large plage de valeurs du gap, ce qui offre la possibilité de couvrir un large spectre de longueurs d'ondes, constituant ainsi, une propriété très importante du point de vue de l'optique.

L'intérêt pratique des matériaux II-VI est renforcé par la possibilité de fabriquer des alliages ternaires et quaternaires par substitution partielle de l'un des éléments par un élément de la même colonne.

Le ternaire $Cd_xZn_{1-x}Te$ a été étudié pendant plus d'une décennie en raison de ses applications potentielles pour l'optoélectronique dans les domaines spectrales bleu et ultraviolet. Pour son grand coefficient de Boeing, l'alliage $Cd_xZn_{1-x}Te$ baisse simultanément à la fois le paramètre de maille et la largeur de la bande interdite.

Le rendement d'une cellule solaire à base de $Cd_xZn_{1-x}Te$ est fortement dépendant des propriétés du matériau absorbeur. Comme dans le cas d'autres semi-conducteurs, la structure cristalline du $Cd_xZn_{1-x}Te$ ainsi que sa composition peuvent fortement influencer sur ses propriétés optiques et électroniques. La bonne compréhension de la structure de ce matériau est donc nécessaire dans le but d'optimiser un dispositif à base de $Cd_xZn_{1-x}Te$.

I.5.4.1. Structure d'une cellule CdZnTe :

Dans sa configuration la plus répandue, une cellule CdZnTe est formée d'un empilement de plusieurs matériaux en couches minces déposés successivement sur un substrat. Ce dernier est

généralement une plaque de verre sodocalcique (Soda-Lime Glass, SLG). la figure (I.24) représente notre structure à base de CdZnTe.

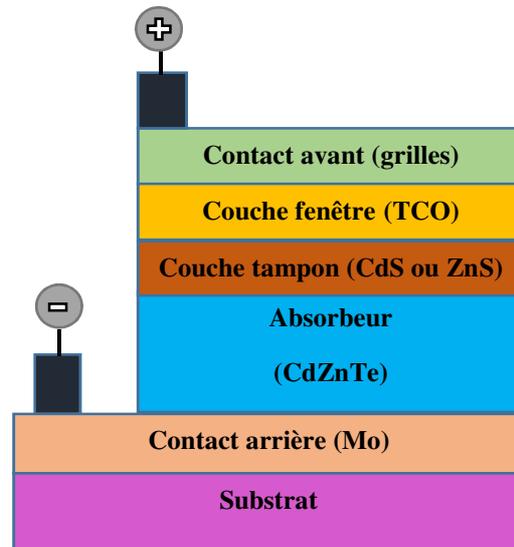


Figure (I.24) : Notre structure proposée de cellule solaire à base de CdZnTe.

I.5.4.2. Le substrat :

Le substrat est le support permettant la tenue mécanique des différentes couches, dont l'empilement ne dépasse pas quelques micromètres d'épaisseur. Il doit répondre à différents critères chimiques et mécaniques, qui le rendent apte à suivre toutes les étapes de fabrication de la cellule, sans en détériorer la qualité, tout en ayant un coût limité. Il existe trois catégories de substrat : le verre, les métaux, et les polymères. Le substrat le plus couramment utilisé est le verre sodo-calcié, qui présente toutes les propriétés requises.

I.5.4.3. Le contact métallique arrière :

La première couche déposée sur le substrat est l'électrode de contact arrière. Elle a pour rôle principal de collecter les charges générées dans la cellule. D'un point de vue électrique, elle constitue le pôle positif du générateur photovoltaïque. Cette couche est composée de molybdène (Mo) et son épaisseur est d'environ 300 nm à 1000 nm. La méthode de dépôt la plus utilisée pour le contact arrière est la pulvérisation cathodique.

I.5.4.4. L'absorbeur :

La couche située directement au-dessus du contact arrière est composée du matériau absorbeur, le CdZnTe. Il s'agit d'un semi-conducteur de type p qui forme la première partie de l'hétérojonction p-n. C'est aussi dans ce matériau que la majorité des photons est absorbée pour former les paires électron-trou. Son épaisseur est d'environ 1 μm .

Les méthodes de dépôt du CdZnTe sont variées, les plus communes étant la Co-évaporation et le recuit de précurseurs métalliques en présence de vapeurs de sélénium.

I.5.4.5. La couche tampon :

L'hétérojonction p-n avec le CdZnTe est formée en ajoutant une couche appelée « couche tampon ». Cette dénomination provient du fait qu'elle joue aussi un rôle de protection physique du CdZnTe lors du dépôt par pulvérisation cathodique des couches suivantes.

Actuellement, les meilleurs rendements sont obtenus en utilisant des couches tampon à base de sulfure de cadmium (CdS). Aussi, c'est le matériau le plus utilisé. Cependant, en raison de la toxicité du cadmium, d'importants efforts sont tournés vers le développement de couches tampon alternatives (Zn (O,S), (Zn,Mg)O, In₂(S,Se)₃, etc.). L'épaisseur typique d'une couche tampon en CdS est d'environ 50 nm. La méthode la plus courante de dépôt du CdS est le bain chimique (Chemical Bath Déposition, CBD).

I.5.4.6. La couche fenêtre :

La couche tampon est recouverte d'une couche fenêtre (Window Layer). Cette couche est composée d'un dépôt d'oxyde de zinc (ZnO) et d'un dépôt d'oxyde transparent conducteur (Transparent Conducting Oxide, TCO). La couche de ZnO est résistive et sert à limiter la formation de court-circuits dans les zones présentant un recouvrement imparfait du CdZnTe par la couche tampon. Les TCO les plus utilisés sont le ZnO dopé aluminium (ZnO: Al) et l'oxyde d'indium et d'étain (Indium Tin Oxide, ITO) déposés par pulvérisation cathodique. Le TCO permet à la couche fenêtre de constituer en partie le contact avant de la cellule photovoltaïque tout en étant transparente au rayonnement solaire, ce dernier devant être absorbé dans la couche de CdZnTe. L'épaisseur de la couche fenêtre est de l'ordre de 300 nm à 500 nm.

I.5.4.7. La grille :

Le contact avant final est réalisé en ajoutant à l'empilement une grille qui collectera les charges générées par le dispositif. Cette grille est composée d'une couche de nickel et d'une couche d'aluminium. Le Ni sert de couche d'accroche et permet d'éviter l'oxydation de l'Al liée à la présence sous-jacente du TCO. Les grilles sont déposées en général par évaporation en utilisant un masque de dépôt.

I.5.5. Propriétés des ternaires Cd_xZn_{1-x}Te :

L'alliage ternaire CdZnTe est composé de deux binaires CdTe et ZnTe. La structure cristalline reste celle de la blende de zinc et ce matériau est qualifié pour la fabrication dans les cellules solaires, il possède un gap direct continuellement ajustable.

I.5.5.1. Propriétés optiques :

Les propriétés optiques des semi-conducteurs sont intimement liées à leur structure électronique dans la mesure où elles mettent en jeu des transitions entre différents états électroniques [33].

Plusieurs domaines dans lesquels la lumière réagit avec la matière sont évidemment d'intérêt pratique. L'étude des propriétés optiques des solides (absorption, réflexion, transmission...) a été prouvée pour être un outil puissant pour la compréhension de la structure électronique et atomique de ces matériaux [34].

I.5.5.1.1. La réflexion optique :

Si une onde plane se propage entre deux milieux avec des constants diélectriques différents, elle sera divisée en deux, une onde réfléchie et une onde réfractée.

Pour une incidence normale du rayonnement sur la surface d'un solide le coefficient de réflexion s'écrit : [34]

$$R = \frac{(n-1)^2 + K^2}{(n+1)^2 + K^2} \quad (\text{I-7})$$

n est réel.

K : constante de boltzmann.

Pour $K=0$ le coefficient de réflexion deviennent :

$$R = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2} \quad (\text{I-8})$$

I.5.5.1.2. L'indice de réfraction :

L'indice de réfraction est un nombre qui caractérise le pouvoir qu'un matériau à posséder pour ralentir et à dévier la lumière. La conservation des transferts de moment du vecteur d'onde donne les lois de Snell-Descartes pour la réfraction et la réflexion :

- Les rayons incidents, réfléchis et réfractés sont dans le plan d'incidence.
- L'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence, soit $\theta_i = \theta_r$
- Les angles d'incidence et de réfraction, mesurés par rapport à la normale, sont tels que :

$$n_1 \sin\theta_i = n_2 \sin\theta_r \quad (\text{I-9})$$

avec :

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

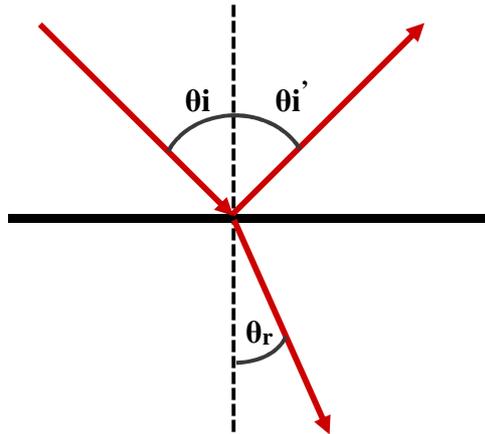


Figure (I.25) : Schéma des chemins optiques.

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.

L'indice de réfraction n , varie en fonction de la longueur d'onde λ selon la formule suivante [35]:

$$n^2(\lambda) = A + \left[\frac{B\lambda^2}{\lambda^2 - C^2} \right] \quad \text{(I-10)}$$

Tableau(I.3): les coefficients A, B, C, pour les principaux binaires.

Matériau	A	B	C
CdTe	5.68	1.53	0.366
ZnTe	4.27	3.01	0.142

Les indices de réfraction de ternaire est ensuite calculé à partir des indices des binaires selon la loi de Vegard.

$$n^2(Cd_xZn_{1-x}Te) = x \cdot n^2(CdTe) + (1 - x) \cdot n^2(ZnTe) \quad \text{(I-11)}$$

I.5.5.1.3. L'absorption :

Lorsque le photon absorbé provoque un saut d'électron d'un état occupé de la bande de valence vers un état vide de la bande conduction, on dit qu'il y a absorption. Ce phénomène présente sur la figure (I.26).

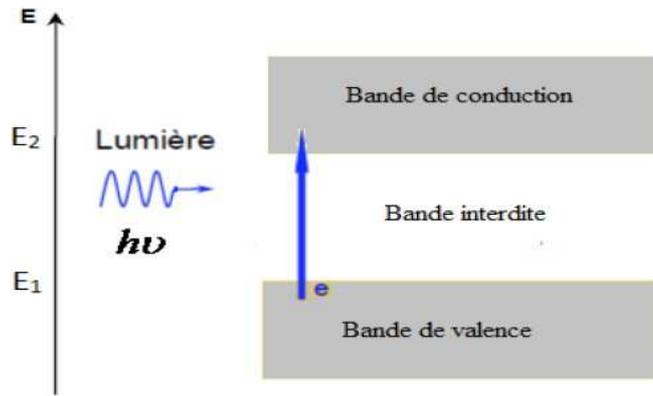
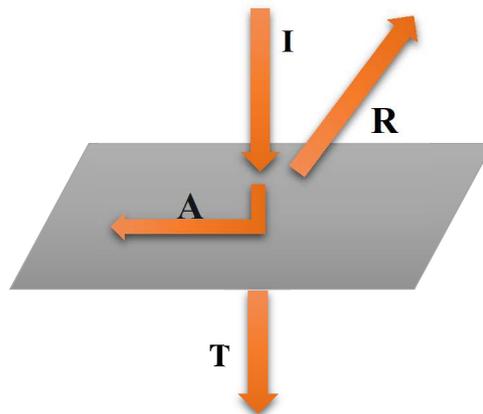


Figure (I.26) : L'absorption fondamentale de la lumière par les porteurs. [36]

Soit un faisceau lumineux d'énergie $= h v$ arrivant à la surface d'un semi-conducteur. Une partie de ce faisceau est réfléchi. Selon la longueur d'onde, le faisceau incident traverse le cristal sans ou avec atténuation. L'intensité d'une onde lumineuse I , décroît exponentiellement suivant la loi de Bouguer Lambert [37] :

$$I = I_0 e^{-ax} \tag{I-12}$$



$$I(\text{flux incident}) = R(\text{réfléchi}) + A(\text{absorbé}) + T(\text{transmis})$$

Figure (I.27): Réflexion, transmission et absorption.

Le coefficient: qui exprime la probabilité d'absorption d'un photon sur une unité de longueur s'appelle coefficient d'absorption [37].

I.5.5.1.4. Coefficient d'absorption :

Le coefficient d'absorption α peut être exprimé sous deux formes :

$$1) \quad \alpha(x, E) = \alpha_0 \frac{\sqrt{E - E_g(x)}}{E} \tag{I-13}$$

Avec $\alpha(x, E)$: coefficient d'absorption en fonction de l'énergie du photon et concentration x .

$E_g(x)$: énergie de Gap du matériau semi-conducteur pour l'alliage est en fonction de x .

Le coefficient d'absorption varie avec la longueur d'onde, selon la loi suivante :

$$2) \quad \alpha(\lambda) = \frac{4\pi k(\lambda)}{\lambda} \quad (\text{I-14})$$

I.5.5.2. Propriétés électriques :

I.5.5.2.1. Le paramètre de maille :

Dans les semi-conducteurs à structure cristallographique zinc-blende, l'espace entre deux molécules du matériau représente le paramètre de maille ou constante de réseau du matériau (a) (Lattice constant) [38].

Avec les alliages ternaires, comme par exemple dans le $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Te}$, ce paramètre est calculé à partir du paramètre de maille des matériaux binaires. On utilise la loi de Vegard pour déterminer le paramètre de maille dans un alliage ternaire.

$$a(\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Te}) = x \cdot a(\text{CdTe}) + (1 - x) \cdot a(\text{ZnTe}) \quad (\text{I-15})$$

I.5.5.2.2. La couche contrainte :

L'épitaxie de matériaux désaccordés est devenue bien maîtrisée, grâce notamment aux progrès accomplis au niveau des techniques de croissance. Ainsi, l'accord de maille n'est plus un impératif, mieux encore les effets des contraintes sont exploités dans plusieurs composants électroniques et optoélectroniques performants. En effet, l'utilisation d'hétéro structures à contrainte permet d'ajuster la longueur d'onde d'émission, en modifiant les positions en énergie des bandes de valence et de conduction.

Le substrat de paramètre de maille a_s différent de celui de la couche épitaxie a_e , impose sa maille à cette dernière, cette différence de maille provoque une déformation de la couche épitaxie, soit en tension ou en compression par des déformations bi-axiales (ϵ_{xx} et ϵ_{yy}) et uni-axiale (ϵ_{zz}) [39].

Les déformations sont données par [39] :

- Biaxiale dans le plan de croissance :

$$\epsilon_{xx} = \epsilon_{yy} = \frac{a_s - a_e}{a_e} = \epsilon_{//} \quad (\text{I-16})$$

- Uniaxiale dans la direction de croissance :

$$\epsilon_{zz} = -2 \frac{C_{12}}{C_{11}} \epsilon_{xx} = \epsilon_{\perp} \quad (\text{I-17})$$

Où :

- ϵ : La déformation ou le désaccord de maille.
- a_s : Le paramètre de maille du substrat (CdZnTe).

- a_e : Le paramètre de maille de la couche épitaxiée.
- C_{ij} : Les coefficients d'élasticité.

Dans le cas où les couches épitaxiées sont suffisamment fines ($a_e < a_s$), la maille du matériau épitaxié se déforme de manière élastique de telle sorte que le paramètre de maille s'accorde au paramètre du substrat dans la direction parallèle à l'interface. Dans la direction perpendiculaire à l'interface de croissance le réseau se déforme en s'allongeant ou se comprimant selon que le paramètre de maille de la couche est plus petit ou plus grand que celui du substrat. Dans ce cas la couche est considérée comme étant totalement contrainte (contrainte en tension). (figure 1.28. a). [40]

Dans le cas d'une couche épitaxiées plus épaisse, la déformation de la maille du matériau ne suffit plus à équilibrer l'énergie mécanique engendrée par la croissance. Le désaccord est alors rattrapé par la génération de dislocations à l'interface de croissance. [40] Ces dislocations se propagent du substrat vers l'interface de croissance et la couche commence à relaxer (contrainte en compression) (figure 1.28. b).

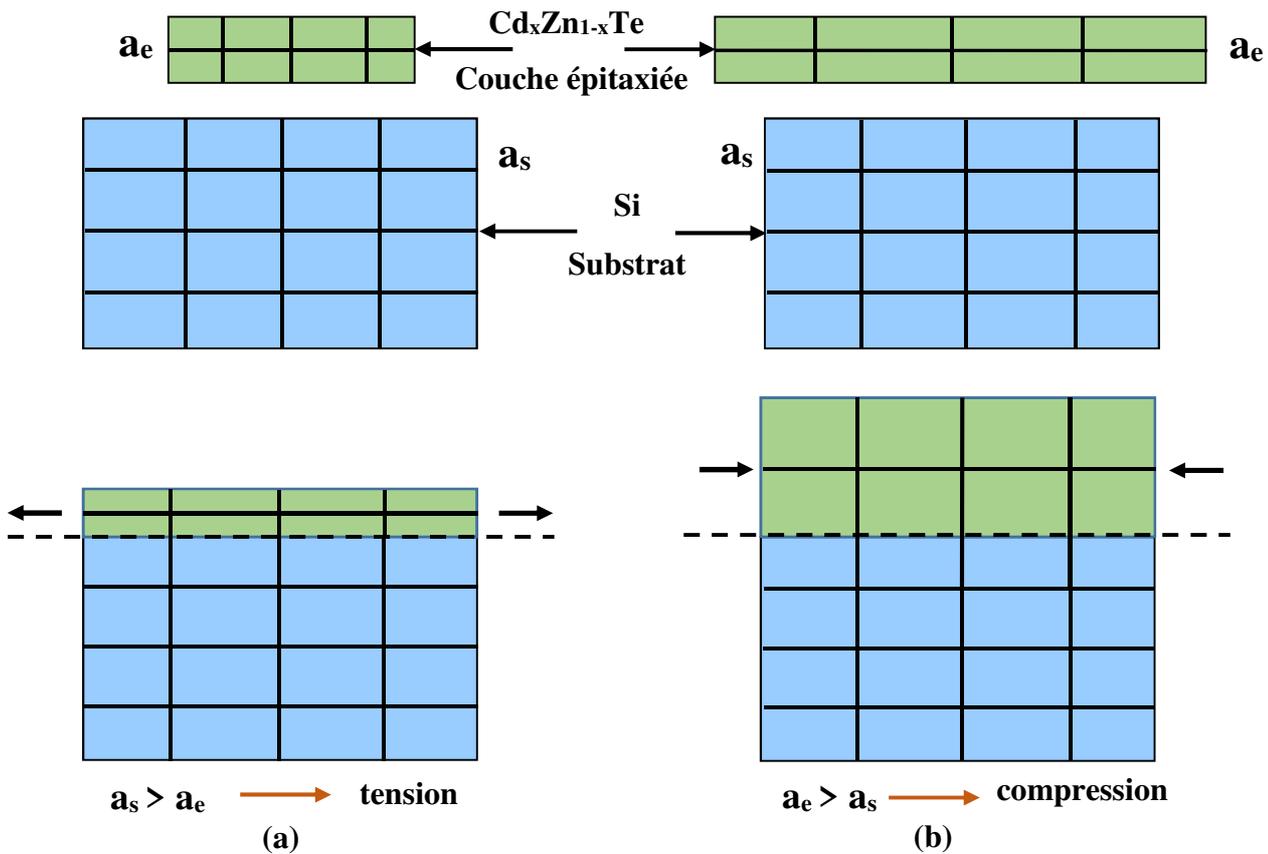


Figure (1.28) : illustration des deux types de déformation [39].

a) Couche en tension. b) couche en compression.

I.5.5.2.3. Energie du Gap :

L'énergie du Gap E_g est la mesure de la quantité d'énergie nécessaire à un électron pour passer de la bande de valence à la bande de conduction lorsque celui-ci est soumis à une excitation.

Le gap énergétique pour la plupart des alliages ternaires est approximativement donné sous la forme d'une fonction quadratique :

$$E_g(Cd_xZn_{1-x}Te) = x \cdot E_g(CdTe) + (1 - x) \cdot E_g(ZnTe) - b \cdot x \cdot (1 - x) \quad (\text{I-18})$$

b : le paramètre de courbure (bowing paramètre).

L'énergie de bande interdite varie avec la température, selon une loi empirique (la loi de Varshni), dont l'expression est la suivante [41]:

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{\beta + T} \quad (\text{I-19})$$

La loi ci-dessus est pour les binaires. Pour l'alliage la relation devient :

$$E_g(x, T) = E_g(x, 0) - \frac{\alpha(x)T^2}{\beta(x) + T} \quad (\text{I-20})$$

Pour calculer α et β nous utilisons la loi de Vegard :

$$\alpha(Cd_xZn_{1-x}Te) = x \cdot \alpha(CdTe) + (1 - x) \cdot \alpha(ZnTe) \quad (\text{I-21})$$

$$\beta(Cd_xZn_{1-x}Te) = x \cdot \beta(CdTe) + (1 - x) \cdot \beta(ZnTe) \quad (\text{I-22})$$

I.5.5.2.4. Epaisseur critique :

Le développement des techniques d'élaboration en couches minces de Composés II-VI (épitaxie par phase liquide, jets Moléculaires ou décomposition d'organométalliques) permet actuellement l'utilisation de substrats pouvant avoir des paramètres de maille (a_s) très différents de la couche épitaxie (a_e). La couche obtenue est alors sous contraintes élastiques biaxiales, jusqu'à une épaisseur critique h_c . Au-delà, les contraintes se relaxent progressivement avec l'épaisseur en générant un réseau de dislocations de désaccord de maille à l'interface. Ces contraintes ont une Influence sur les propriétés optiques et électriques de la couche. [42] Nous avons calculé l'épaisseur critique selon le modèle proposé par Matthews et Blackeslee qui nous donne l'expression suivante :

$$h_c = \frac{a_e}{\beta \cdot \sqrt{2} \cdot \pi \cdot \Delta} \cdot \frac{1 - 0.25 \cdot \gamma}{1 + \gamma} \cdot \ln \left(\frac{h_c \cdot \sqrt{2}}{a_e} + 1 \right) \quad (\text{I-23})$$

Avec

- Δ : le désaccord paramétrique qui est donné par $\Delta = \left| \frac{a_s - a_e}{a_s} \right|$
- γ : le coefficient de poisson qui est donné par $\gamma = \frac{C_{12}}{C_{11} + C_{12}}$

Où, C_{11} et C_{12} sont les constantes d'élasticité obtenues par l'interpolation linéaire des binaires.

- a_e : Paramètre de maille de la couche relaxée.
- β : est un coefficient qui prend les valeurs suivantes selon le type de la structure.

L'épaisseur critique dépend des propriétés mécaniques des matériaux (coefficients élastiques C_{11} et C_{12}), ainsi que du degré de désaccord paramétrique Δ entre le substrat et la couche épitaxiée. Si l'épaisseur de la couche épitaxiée dépasse la valeur de l'épaisseur critique, les mailles ne subissent plus les contraintes mécaniques imposées par le substrat et le paramètre de maille atteint celui du matériau massif. Le réseau est totalement relaxé [43]. (Figure 1.29. b).

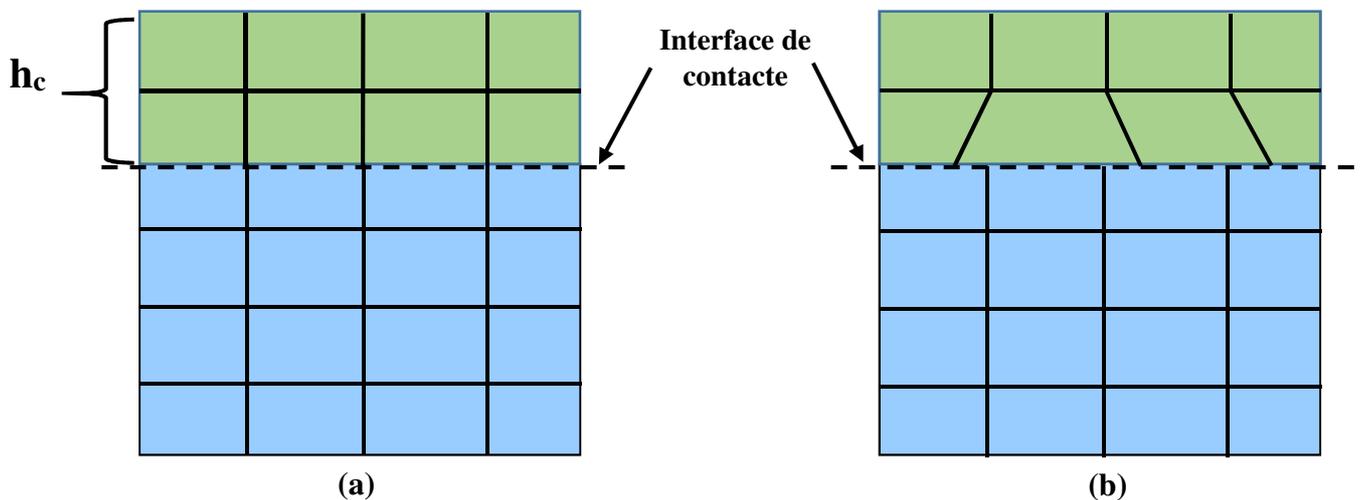


Figure (1.29) : illustration d'une couche contrainte [44].

a) Compression. b) relaxée.

I.6. Conclusion :

Dans ce chapitre nous a permis d'explorer le principe de la conversion photovoltaïque ainsi que les différentes technologies utilisées pour y parvenir.

Ce chapitre partagé en quatre parties, nous a permis en premier lieu de définir le rayonnement solaire. En second lieu nous avons donné un rappel sur les cellules photovoltaïques. Principe de base de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque, et ses caractéristiques. Nous avons décrit ensuite en troisième partie les semi-conducteurs et la jonction P-N. Et en dernier lieu nous avons fait une brève description sur les matériaux II-VI et leur paramètres optoélectroniques.

Chapitre 02 : Résultat et discussions

II.1. Introduction :

Après avoir présenté les généralités indispensables à l'étude des cellules photovoltaïques à couches minces, nous allons maintenant déterminer les caractéristiques de ces cellules à base d'un type de structure choisi.

Dans notre étude nous avons simulé ses paramètres physiques et électriques par le logiciel unidimensionnel appelé SCAPS. Pour cela nous avons choisi un modèle de structure selon la littérature et nous avons essayé de caler nos résultats simulés sur des exemples expérimentaux réels pour calibrer notre logiciel et établir un code de calcul spécifique aux structures étudiées. Par la suite nous avons défini la structure qui nous donne un rendement électrique optimal.

II.2. Présentation du logiciel de simulation SCAPS :

SCAPS (Solar Cell Capacitance Simulator) est un logiciel de simulation numérique des cellules solaires unidimensionnelles développé par le département des systèmes électroniques et informatiques (ELIS), à l'université de Gent en Belgique. Plusieurs chercheurs ont contribué au développement de ce logiciel: Alex Niemegeers, Marc Burgelman, Ce Koen Decock, Johan, Verschraegen, Stefaan Degrave.

Logiciel est disponible gratuitement pour la communauté des recherches photovoltaïques (PV) (Instituts et établissements de recherche). Il fonctionne sur PC sous les systèmes d'exploitation Windows 95, 98, NT, 2000, XP, Vista, Windows 7, Windows 8 et occupe à peu près 50 MB d'espace sur le disque.

SCAPS est originellement développé pour les structures de cellules de famille CuInSe₂ et CdTe. Cependant, plusieurs extensions ont amélioré ses capacités de façon à devenir applicable pour les cellules solaires cristallines (de la famille Si et GaAs), ainsi que les cellules solaires amorphes (a-Si et les micro-morphes Si) [45]. Les méthodes de calcul qui peuvent être spécifiées par cette instruction incluent des méthodes telles que celles de Gummel et de Newton.

II.2.1. Principe de la simulation numérique :

L'étude de la plus part des dispositifs à semi-conducteurs est basée sur la résolution simultanée de l'équation de Poisson et de l'équation de continuité. Il calcule à chaque instant et en tout point de l'espace en une suite d'éléments finis, la concentration des électrons et des trous et la

valeur du potentiel électrostatique. L'équation de Poisson définit la relation entre le potentiel et la densité des porteurs :

$$\Delta V = \frac{-q}{\varepsilon} (N_d - N_a + p - n) \quad (\text{II.1})$$

Où :

ε est la constante diélectrique.

V le potentiel.

q est la charge élémentaire d'électrons.

N_d et N_a sont les concentrations des dopants donneurs et accepteurs ionisés.

n et p sont les densités des porteurs.

L'évolution temporelle des densités de porteurs obéit aux équations de continuité (II.2) et (II.3) pour respectivement les électrons et les trous.

$$\frac{dn}{dt} = G - U_n + \frac{1}{e} \text{div} \vec{J}_n \quad (\text{II.2})$$

$$\frac{dp}{dt} = G - U_p + \frac{1}{e} \text{div} \vec{J}_p \quad (\text{II.3})$$

Où :

G et U sont respectivement les taux de génération et de recombinaison des porteurs, et sont respectivement les densités de courant des électrons et des trous. Les dérivations basées sur la théorie de transport de Boltzmann ont prouvé que la densité des courants dans les équations de continuité peut être définie par le modèle d'entraînement-diffusion. Les densités de courants sont exprimées en deux termes. Le premier correspond à l'entraînement des charges par le champ électrique et le second correspond à la diffusion des porteurs.

$$\vec{J}_n = qnD_n\vec{E} + qD_n\overrightarrow{\text{grad}} n \quad (\text{II.4})$$

$$\vec{J}_p = qpD_p\vec{E} + qD_p\overrightarrow{\text{grad}} p \quad (\text{II.5})$$

Où : D_n et D_p sont les coefficients de diffusion.

II.3. Structure et paramètres de la cellule étudiée :

II.3.1. Présentation de la cellule étudiée :

Notre travail consiste à modéliser une cellule solaire à base de CdZnTe et à simuler ces paramètres électriques, optiques et géométriques afin de concevoir une cellule ayant le rendement électrique optimal.

Dans notre étude, nous utilisons une cellule solaire composée des hétérojonctions suivantes: ZnO /CdS ou ZnS /CdZnTe/ Mo/verre. Le schéma simplifié de l'hétérostructure est représenté sur la figure (II.1).

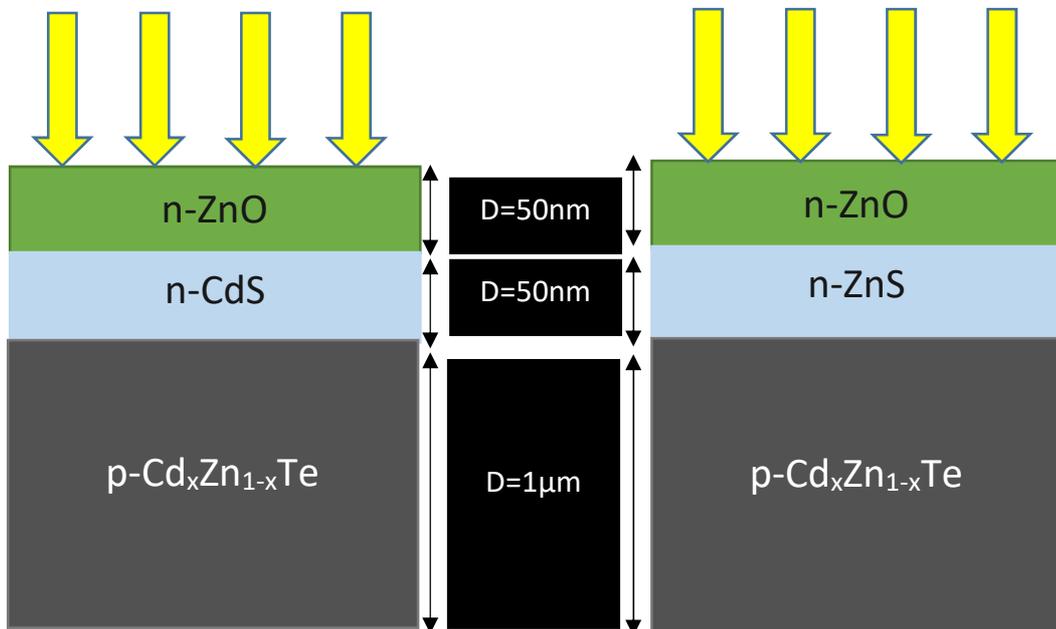


Figure (II.1): Structure de la cellule solaire à hétérojonction (n-ZnO/n-CdS ou n-ZnS /p CdZnTe) étudiée.

Les couches semi-conductrices CdZnTe (absorbeur), CdS ou ZnS (tampon) et ZnO (fenêtre), ont fait l'objet de notre étude dans les modèles numériques pour voir l'influence de celles-ci sur les performances électriques de la cellule solaire.

II.4. Résultats de la simulation :

II.4.1. Introduction:

Dans ce travail nous allons étudier l'effet de la couche CdZnTe (absorbeur) pour les deux couches tampon CdS ou ZnS sur le rendement de conversion électrique. Pour cela, dans notre simulation, nous avons fait varier les paramètres (épaisseur, dopage et température) pour différentes valeurs de la concentration de cadmium. Les résultats obtenus dans cette opération sont présentés dans la section qui suit.

II.4.2. Paramètres électroniques :

II.4.2.1. Paramètre de maille :

La figure (II.2) représente la variation de paramètre de maille en fonction de la concentration de cadmium de ternaire $Cd_xZn_{1-x}Te$. Nous pouvons voir que le cadmium a pour effet

d'augmenter le paramètre de maille. Par exemple pour $x=0.1$ $a=6,1417 \text{ \AA}$ si on augmente la concentration à 0.3 on aura une valeur de $6,2171 \text{ \AA}$. Alors on a $\Delta a=0.0454 \text{ \AA}$.

Remarque: pour: $x=0$ on a $a(\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Te})=a(\text{ZnTe})=6.103\text{\AA}$ et pour $x=1$ on a $a(\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Te})=a(\text{CdTe})=6.479\text{\AA}$. (les valeurs extraites pour la structure Zinc-blende que nous avons choisies dans notre étude. Les paramètres de maille de ces composés sont des résultats expérimentaux cités dans le tableau (I.1)).

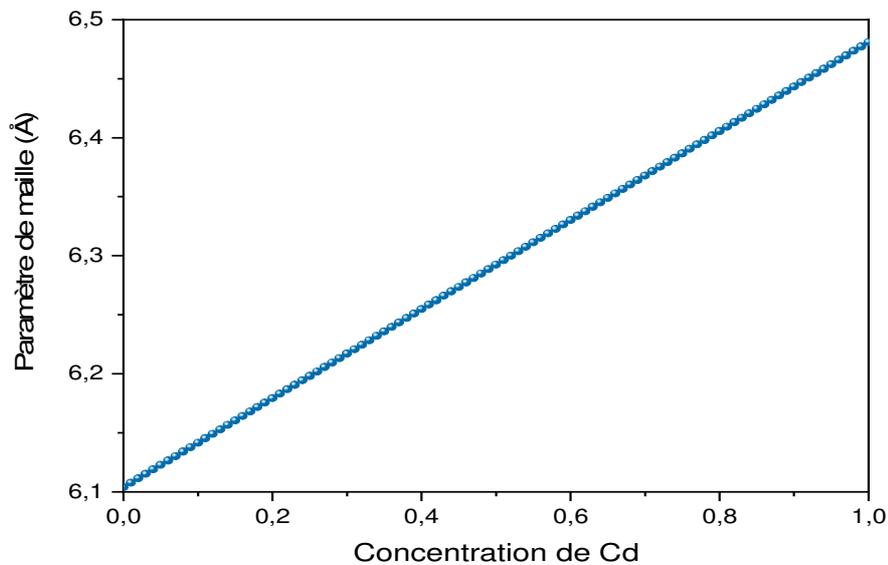


Figure (II.2): Variation du paramètre de maille du $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Te}$ en fonction de la concentration du cadmium x .

II.4.2.2. L'Effet de la contrainte :

Sur la figure (II.3), nous avons représenté la variation des déformations biaxiale ϵ_{xx} et uniaxiale ϵ_{zz} en fonction de la concentration du cadmium. Nous pouvons observer sur la figure (II.3) que la déformation biaxiale ϵ_{xx} diminue avec l'augmentation de concentration du cadmium, par contre la déformation uniaxiale ϵ_{zz} augmente. Alors on ne constate que le matériau CdZnTe soumis à une contrainte compressive.

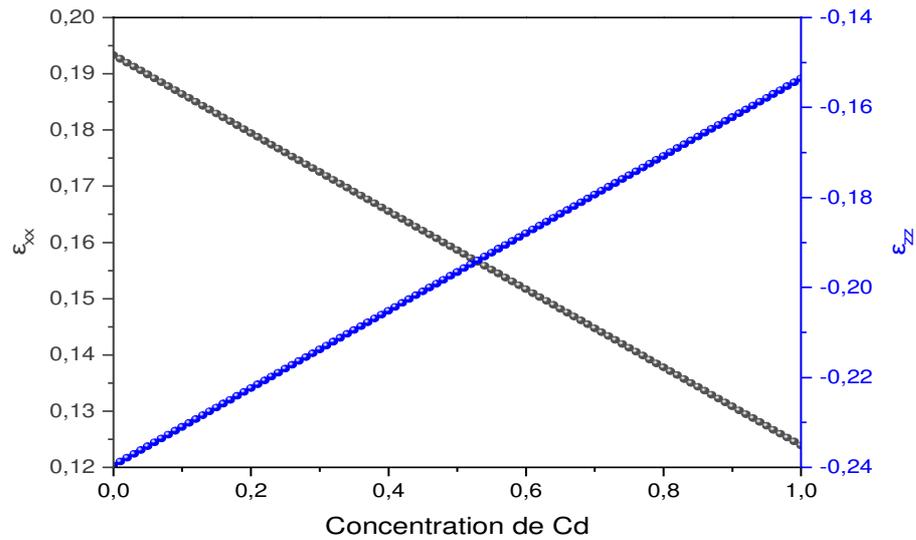


Figure (II.3): Variation du désaccord de maille en fonction de la concentration du cadmium.

II.4.2.3. L'énergie de bande interdite:

La figure (II.4) représente la variation de l'énergie de la bande interdite E_g en fonction de la concentration de cadmium. On remarque que l'énergie de gap diminue avec l'augmentation de la concentration du cadmium. Par exemple pour $x=0.1$ on a $E_g= 2.038$ eV et pour $x= 0.6$ on a $E_g= 1.502$ eV. Alors on a une diminution de $\Delta E_g= 0.536$ eV.

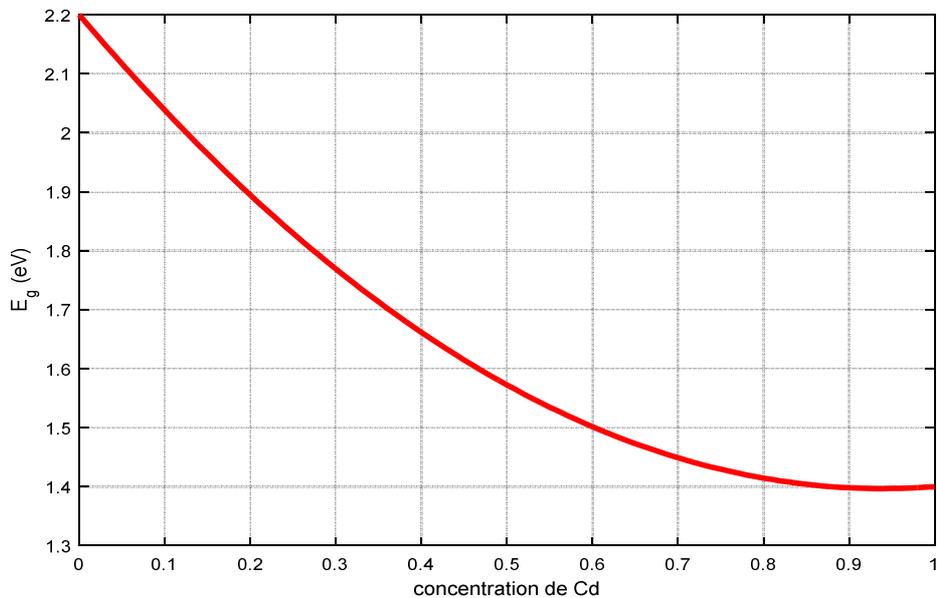


Figure (II.4): Variation de l'énergie de gap du $Cd_xZn_{1-x}Te$ en fonction de la concentration du cadmium.

La figure (II-5) représente la variation de l'énergie de gap en fonction de la concentration du cadmium et la température. On remarque que l'énergie de gap diminue lorsque la température et la concentration du cadmium augmentent. Par exemple à $T=300$ K, pour $x=0.1$ l'énergie de gap est 2.2 eV, et pour $x=0.8$ $E_g=1.6$ eV. On a une diminution de $\Delta E_g=0.6$ eV. Et pour $T=700$ K $E_g=2$ eV pour $x=0.1$ et 1.4 eV pour $x=0.8$ eV. On a une diminution de $\Delta E_g=0.6$ eV. Alors la température et la concentration du cadmium influent sur l'énergie de gap.

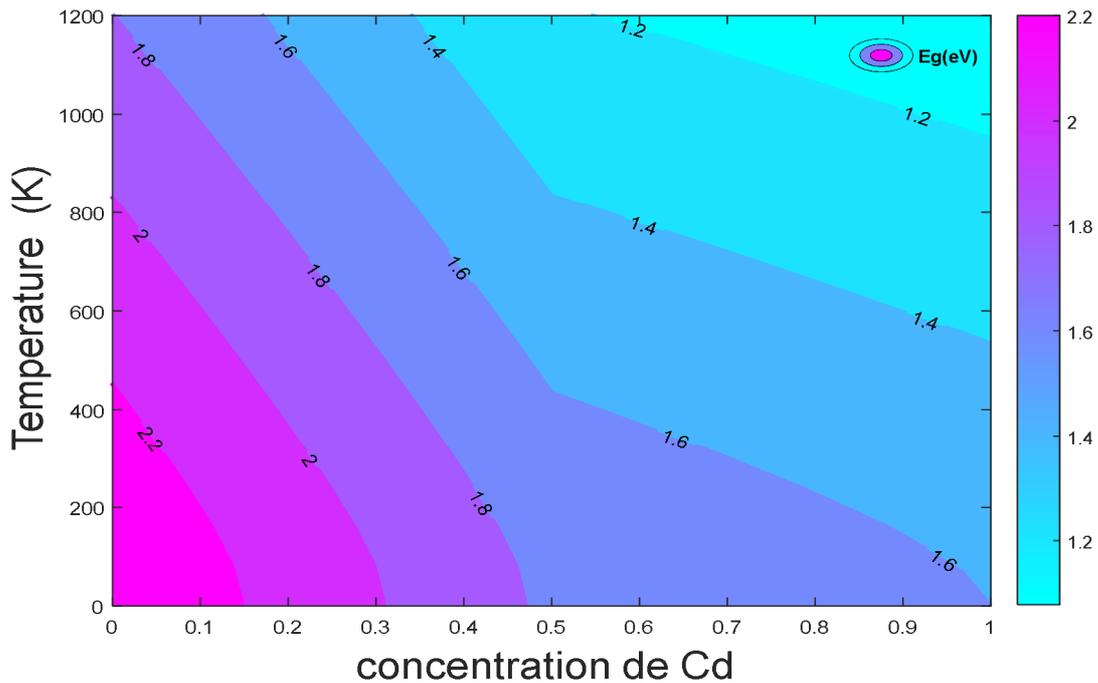


Figure (II.5): Variation de l'énergie de gap du $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Te}$ en fonction de la concentration du cadmium et la température.

II.4.2.4. Epaisseur critique:

La figure (II.6) représente la variation de l'épaisseur critique en fonction de la concentration du cadmium. On remarque que le cadmium a pour effet d'augmenter l'épaisseur critique. Par exemple pour $x=0.1$ on a une épaisseur de 4.4 \AA si on change la valeur de concentration du cadmium à 0.2 on a $L_c=4.9 \text{ \AA}$ alors on a une augmentation de $\Delta L_c=0.5 \text{ \AA}$.

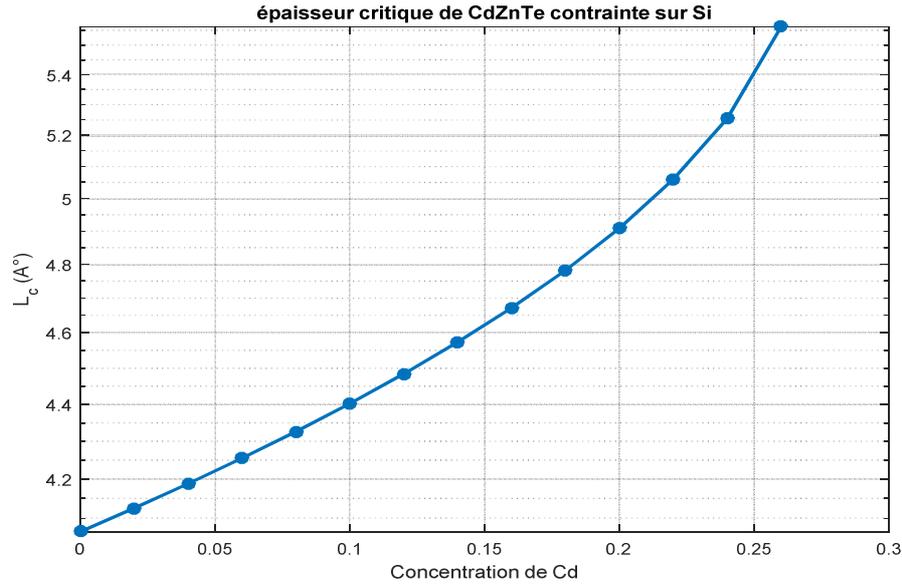


Figure (II.6): Variation de l'épaisseur critique du $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Te}$ en fonction de la concentration du cadmium x .

II.4.3. Propriétés optiques :

II.4.3.1. Le coefficient d'absorption :

La figure (II.7) représente la variation du coefficient d'absorption α en fonction de la longueur d'onde pour plusieurs concentrations du cadmium. On remarque que le coefficient d'absorption est diminué dans la plage de λ 0.2 à 0.9 nm. On trouve que pour $x=0.9$ on aura le taux d'absorption le plus élevée, par exemple pour $\lambda=0.8$ nm, $\alpha=1 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$ et pour $x=0.5$ α est nulle.

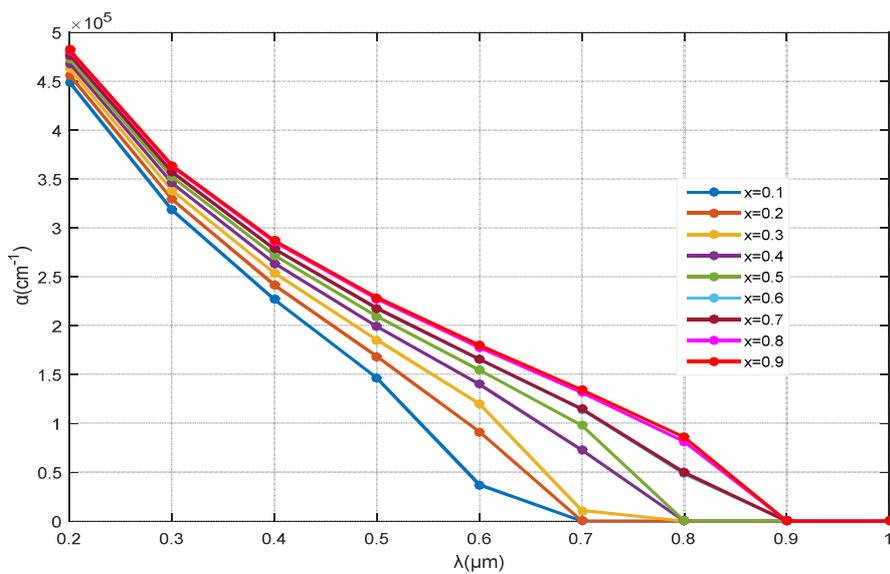


Figure (II.7): Variation du coefficient d'absorption α en fonction de la longueur d'onde pour différentes x .

La figure (II.8) représente la variation du coefficient d'absorption α en fonction de l'énergie de photon incident pour plusieurs valeurs de concentration du cadmium. On remarque que le coefficient d'absorption augmente avec l'augmentation de l'énergie des photons incidents. Par exemple pour $x=0.9$ le coefficient d'absorption augmente de $3 \cdot 10^5$ à $5.55 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-1}$ pour des énergies de photon varie de 2.5 à 7 eV. Alor on a une augmentation de $\Delta\alpha=2.5 \text{ cm}^{-1}$.

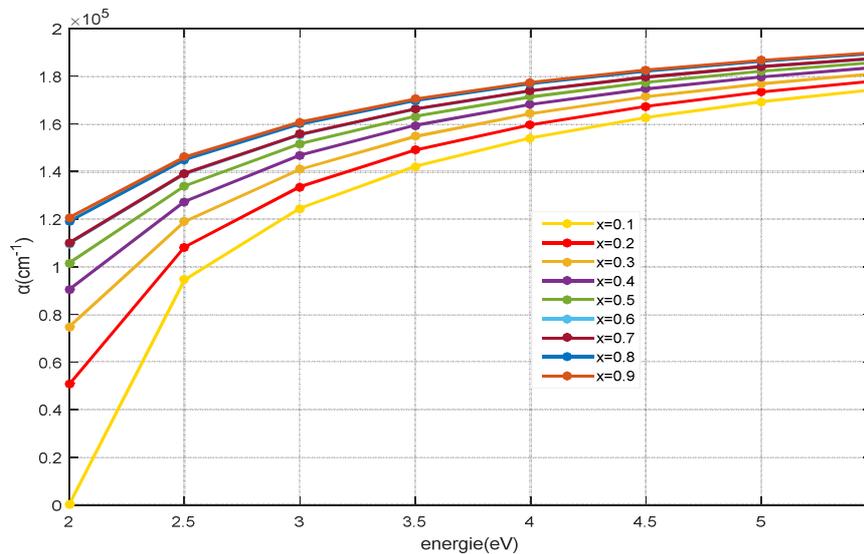


Figure (II.8): Variation du coefficient d'absorption α en fonction de l'énergie de photon incident pour différentes x .

II.4.3.2. Indice de réfraction :

La figure (II.9) représente la variation de l'indice de réfraction n en fonction de la longueur d'onde pour différentes valeurs de la concentration de cadmium x . L'indice de réfraction diminue dans l'intervalle $[0.7, 1.7]$ de la longueur d'onde. Pour une longueur d'onde donnée, n diminue pour toutes concentrations du cadmium donné. Par exemple pour λ varie de $0.9 \mu\text{m}$ à $1.3 \mu\text{m}$ on a $n_1=2.775$ et $n_2=2.75$ pour une concentration de cadmium $x = 0$, alors on a une diminution $\Delta n=0,025$. Et pour une longueur d'onde égale à $1.2 \mu\text{m}$, l'indice de réfraction diminue de 2.80 à 2.773 pour différentes concentrations du cadmium x .

Pour $x=0$ on a l'indice de réfraction est $n(\text{ZnTe})$ et pour $x=1$ on a l'indice de réfraction est $n(\text{CdTe})$, d'après loi de Vegard.

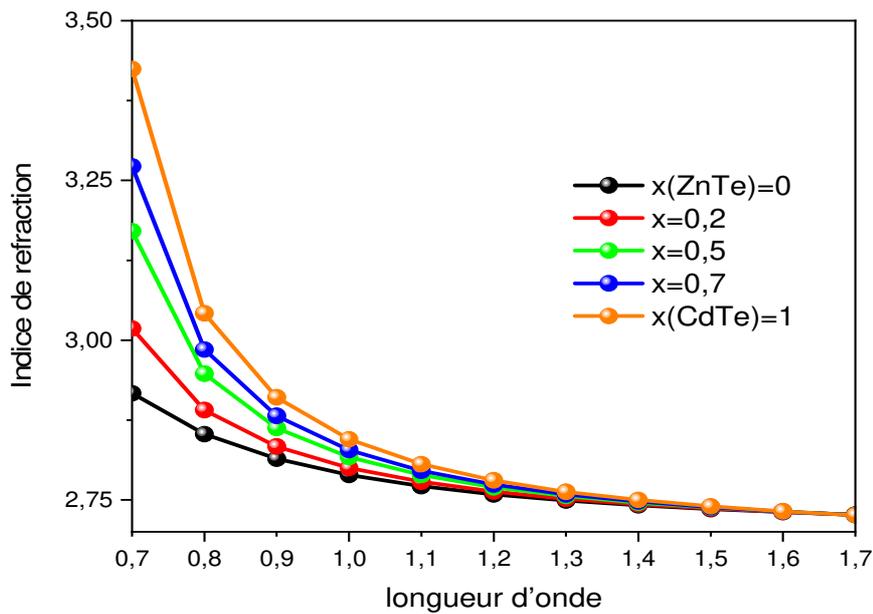


Figure (II.9): Variation de l'indice de réfraction en fonction de la longueur d'onde pour différentes valeurs de concentration du cadmium x .

II.4.3.3. Coefficient de réflexion:

La figure (II.10) représente la variation du coefficient de réflexion R en fonction de la longueur d'onde pour différentes valeurs de la concentration de cadmium x . Le coefficient de réflexion présente des valeurs faibles de l'ordre de 0.2 pour des concentrations de cadmium autour de 0 à 1, ce qui permet d'avoir une meilleure absorption de la lumière.

Pour $x=0$ on a le coefficient de réflexion est $R(\text{ZnTe})$ et pour $x=1$ on a le coefficient de réflexion est $R(\text{CdTe})$, d'après la loi de Vegard.

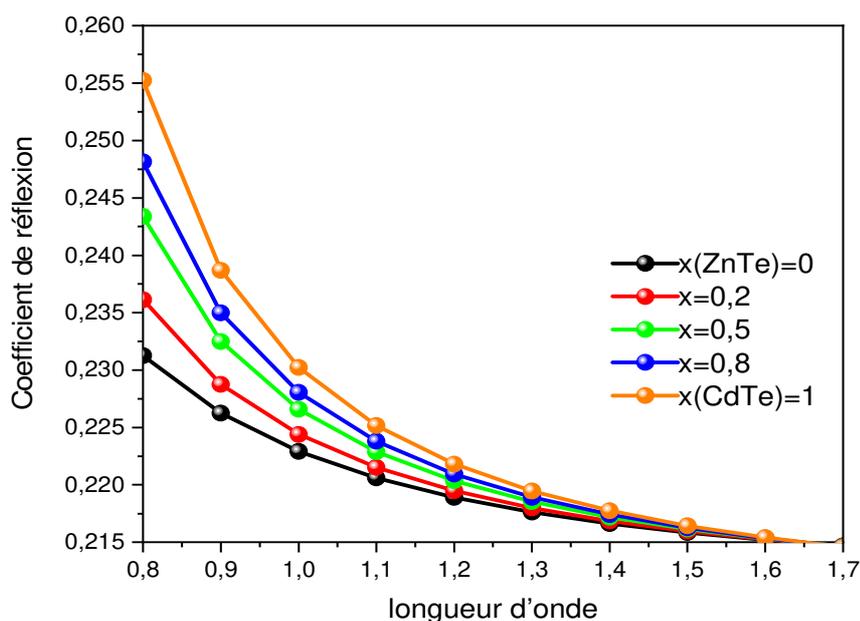


Figure (II.10): Variation de coefficient de réflexion en fonction de la longueur d'onde pour différentes valeurs de concentration du cadmium x .

II.4.4. Cas couche tampon CdS :

II.4.4.1. Variation de caractéristique J-V de la structure CdS/Cd_xZn_{1-x}Te en fonction de la concentration du cadmium x :

Tableau (II.1): Résultats finals de l'effet de la concentration du cadmium x sur la structure CdS/ Cd_xZn_{1-x}Te.

X	V _{co} (Volt)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
0.1	1.483400	10.51550239	55.8566	8.7129
0.2	1.349363	14.65524405	61.2429	12.1109
0.3	1.242674	17.33302952	69.1170	14.8873
0.4	1.153419	20.31659782	77.7783	18.2262
0.5	1.067423	23.06472891	82.8352	20.3939
0.6	0.992433	25.26985633	84.6856	21.2380
0.7	0.933305	25.31224458	85.2702	20.1443
0.8	0.853215	27.95335767	85.7147	20.4432
0.9	0.799169	29.30407784	84.8539	19.8719

La figure (II.11) représente la variation de la densité de courant en fonction de la tension pour plusieurs concentrations de cadmium x . On note que lorsque la concentration x augmente, la tension de circuit ouvert V_{co} diminue. Par exemple à $x=0.2$ on trouve $V_{co}=1.3493V$ et pour $x=0.8$ on obtient $V_{co}=0.8532V$, avec une variation de $\Delta V_{co}=0.4961V$. Et pour la densité de courant de court-circuit le J_{sc} augmente avec l'augmentation de concentration du cadmium x . Par exemple à $x=0.2$ on trouve $J_{sc} =14.655 \text{ mA/cm}^2$ et pour $x=0.8$, le J_{sc} est de 27.9533 mA/cm^2 , avec une variation de $\Delta J_{sc} =13.2983 \text{ mA/cm}^2$ trouvée.

Ces résultats sont plus clairs dans le Tableau (II.1). On remarque que le rendement augmente avec l'augmentation de concentration du cadmium jusqu'à $x=0.6$. Concernant le facteur de forme représenté sur le Tableau (II.1), il augmente de 55.85 % jusqu'à 85.71 % dans la plage de $x=0.1$ à 0.8. Les résultats obtenue montrés que $x=0.6$ est la concentration optimale qui donne le meilleur rendement de conversion.

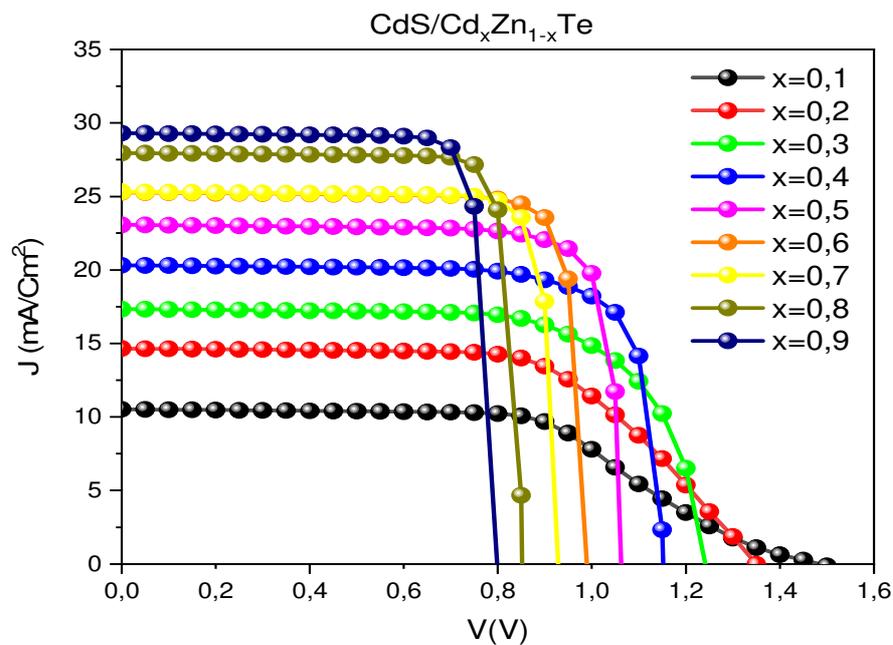


Figure (II.11): Variation de caractéristique J-V pour plusieurs concentrations du cadmium x .

II.4.4.2. Variation de l'efficacité quantique externe (EQE) de la structure

CdS/ Cd_xZn_{1-x}Te en fonction de la concentration du cadmium x :

La figure (II.12) représente la variation de l'efficacité quantique externe en fonction de la longueur d'onde pour plusieurs concentrations de cadmium x . On note que l'efficacité quantique externe augmente dans la plage de [300 ; 500 nm] jusqu'à une valeur maximale de 95.13 %. On remarque une bonne efficacité dans l'intervalle [300 ; 600 nm] presque c'est l'intervalle de gamme des longueurs d'onde visibles. Après on observe une diminution rapide

jusqu'à 0% dans l'intervalle [600 ; 900 nm], cette diminution commence pour les faibles concentrations jusqu'aux fortes concentrations.

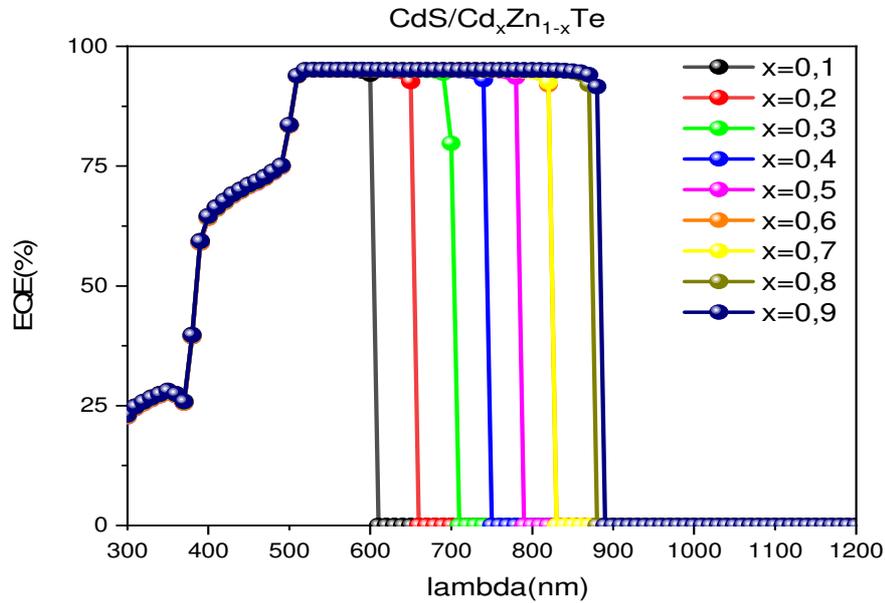


Figure (II.12): Variation du rendement quantique externe EQE en fonction de la longueur d'onde pour différentes valeurs de concentration du cadmium x.

II.4.4.3. Effet de température sur les caractéristiques de la structure CdS/ Cd_xZn_{1-x}Te :

Tableau (II.2): Résultats finals de l'effet de la température T sur la structure CdS/ Cd_xZn_{1-x}Te pour x=0.6

T (K)	V _{co} (Volt)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
300	0.992433	25.26985633	84.6856	21.238
320	0.957496	25.29115500	84.6726	20.5045
340	0.921865	25.31188857	84.4294	19.7009
360	0.890174	25.33218894	83.6872	18.8715
380	0.856379	25.35214238	82.8387	17.9851

Tableau (II.3): Résultats finals de l'effet de la température T sur la structureCdS/ Cd_xZn_{1-x}Te pour x=0.7

T(K)	Vco(Volt)	Jsc (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
300	0.933305	25.31224458	85.2702	20.1443
320	0.90030	25.33427046	84.6658	19.3110
340	0.860294	25.35558481	84.3944	18.4092
360	0.823166	25.37632902	83.6607	17.4758
380	0.789152	25.39661090	82.5009	16.5347

Tableau (II.4): Résultats finals de l'effet de la température T sur la structureCdS/ Cd_xZn_{1-x}Te pour x=0.8

T(K)	Vco (Volt)	Jsc(mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
300	0.853215	27.95335767	85.7147	20.4432
320	0.813806	27.97496923	85.0749	19.3683
340	0.777749	27.99589434	84.0358	18.2978
360	0.745256	28.01629742	82.4869	17.2227
380	0.708268	28.03631105	81.3544	16.1547

II.4.4.3.1. Variation de caractéristique J-V de la structure CdS/ Cd_xZn_{1-x}Te en fonction de la température T :

Les figures (II.13,14,15) représentent la variation du J-V pour plusieurs températures à des concentrations du cadmium x=0.6, 0.7 et 0.8. On constate que la température n'a pas une grande influence sur la densité de courant de court-circuit. Par contre, elle influe sur la tension de circuit-ouvert. Plus la température augmente plus le Vco diminue donc le rendement diminue.

On remarque que le rendement de la conversion diminue avec l'augmentation de la température. Ces résultats sont plus clairs dans les Tableau (II.2, 3,4). On a obtenu une valeur maximale de 21.23 % à la température T=300 K pour x=0.6.

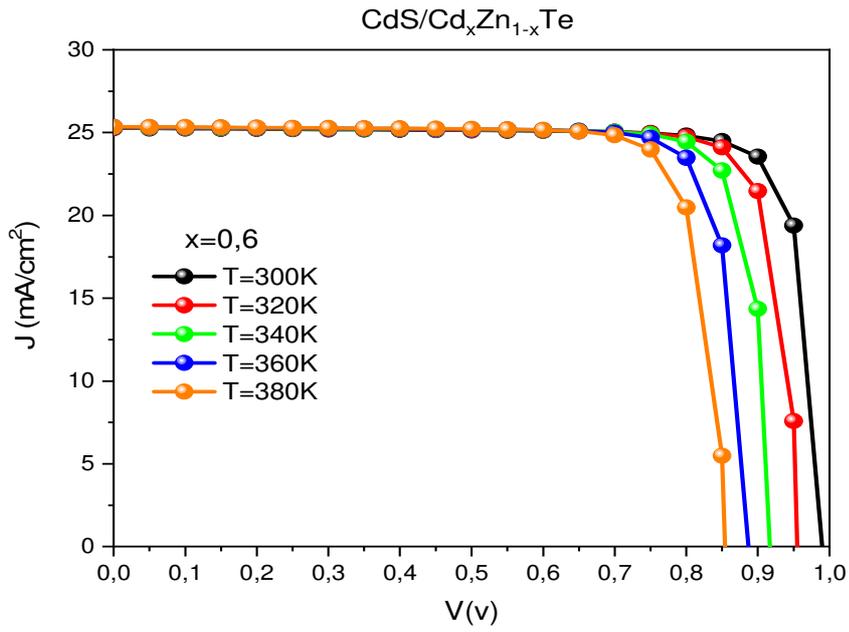


Figure (II.13): Variation de caractéristique J-V pour plusieurs températures pour x=0.6

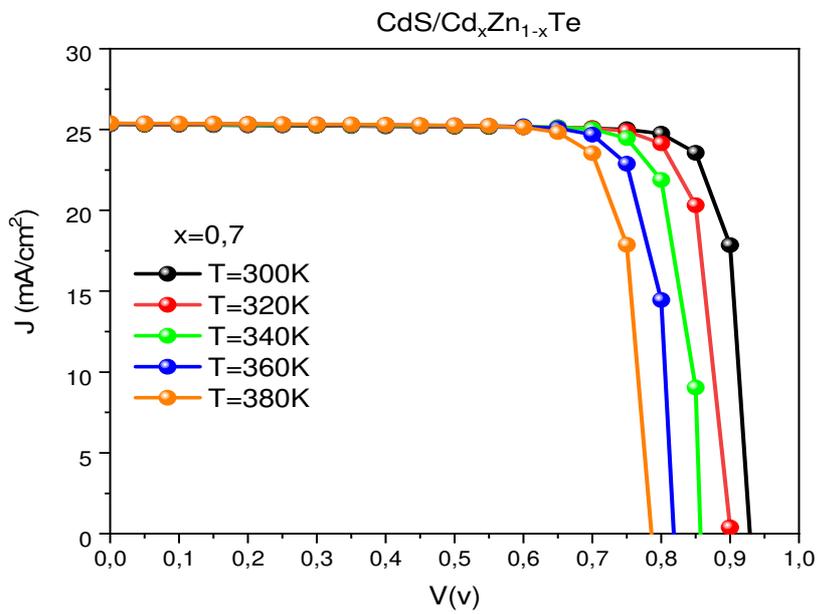


Figure (II.14): Variation de caractéristique J-V pour plusieurs températures pour x=0.7

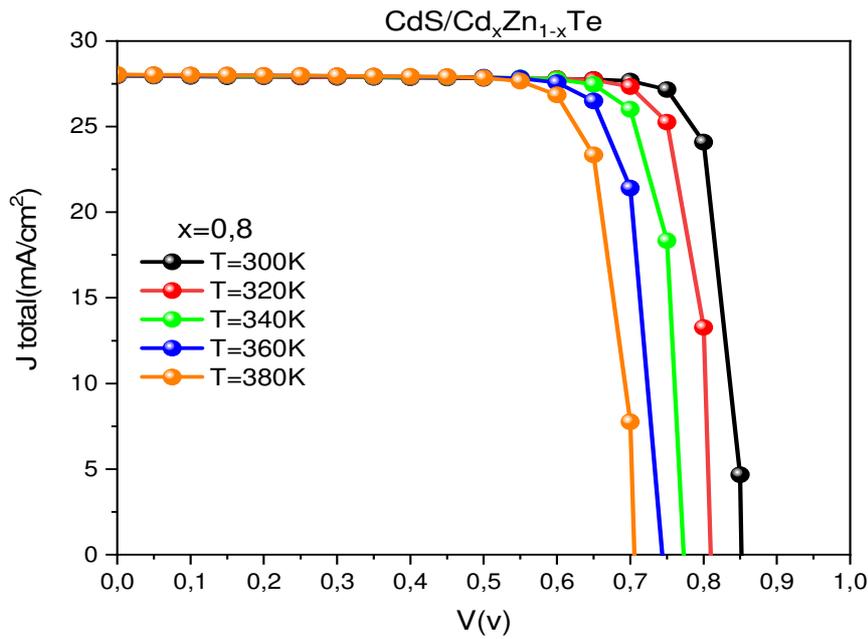


Figure (II.15): Variation de caractéristique J-V pour plusieurs températures pour $x=0.8$

II.4.4.3.2. Variation du rendement quantique externe EQE de la structure

CdS/ Cd_xZn_{1-x}Te en fonction de la longueur d'onde pour différentes températures :

Les figures (II.16, 17,18) représentent l'efficacité quantique externe on fonction de la longueur d'onde pour plusieurs températures pour les concentrations $x=0.6, 0.7$ et 0.8 . On remarque que l'efficacité quantique externe est presque la même pour toutes les valeurs de température, ce qui signifie que la température elle n'a pas une grande influence sur l'efficacité quantique externe.

On note que dans la plage de 300-500 nm, l'efficacité quantique externe augmente avec une valeur maximale de 95.13 %, et dans la plage de 500-800 nm, l'efficacité quantique est constante, après on observe une diminution rapide jusqu'à 0%.

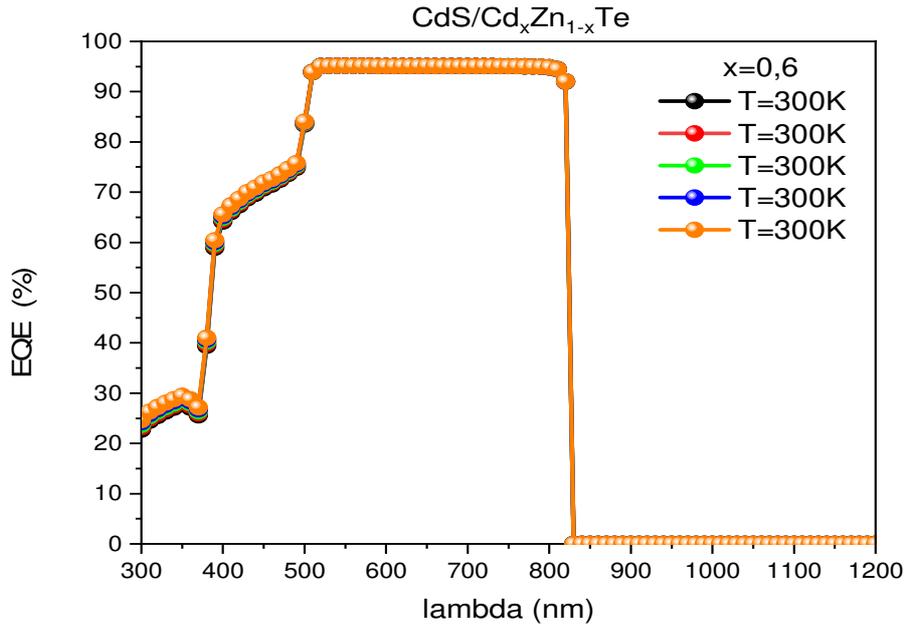


Figure (II.16): Variation du rendement quantique externe EQE en fonction de la longueur d'onde pour plusieurs températures pour $x=0.6$

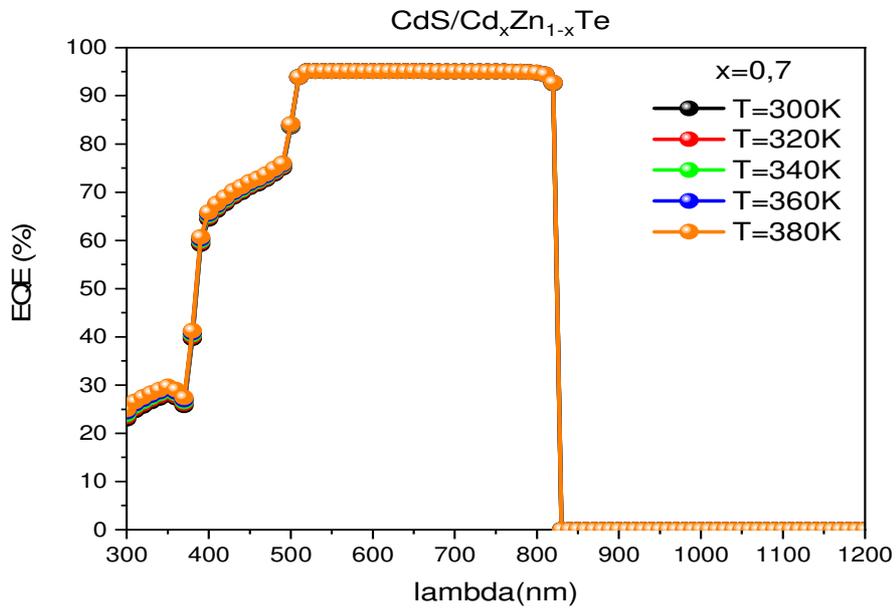


Figure (II.17): Variation du rendement quantique externe EQE en fonction de la longueur d'onde pour plusieurs températures pour $x=0.7$

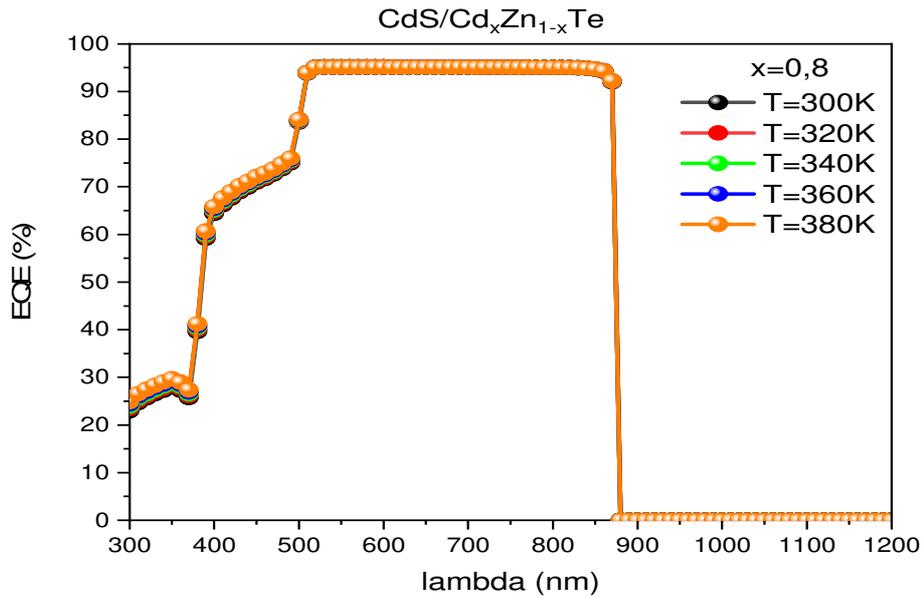


Figure (II.18): Variation du rendement quantique externe EQE en fonction de la longueur d'onde pour plusieurs températures pour $x=0.8$

II.4.4.4. Influence de l'épaisseur de la couche tampon sur la structure CdS/ Cd_xZn_{1-x}Te pour $x=0.6$:

Tableau (II.5): Résultats finals de l'effet de l'épaisseur de la couche tampon sur la structure CdS/ Cd_xZn_{1-x}Te pour $x=0.6$

	V _{co} (Volt)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
50(nm)	0.922	25.269	84.69	21.24
70(nm)	0.991	24.450	85.68	20.77
90(nm)	0.990	23.77	86.43	20.35
100(nm)	0.990	23.48	86.70	20.16

La figure (II.19) représente la variation de la densité de courant de court-circuit en fonction de la tension de circuit ouvert pour plusieurs valeurs de l'épaisseur de couche tampon CdS. On note que lorsqu'on augmente l'épaisseur de 50 nm à 70 nm, la tension de circuit ouvert V_{co} augmente, Par exemple à l'épaisseur de 50 nm on trouve V_{co}=0.922V et pour l'épaisseur de 70 nm on obtient V_{co}=0.991V, avec une variation de ΔV_{co}=0.069V. La tension de circuit ouvert est constante pour l'épaisseur entre 70 nm et 100 nm. Par contre le courant de court-circuit est diminué jusqu'à 23.4 mA/cm² pour une épaisseur de 100 nm. Ces résultats sont plus clairs dans

le Tableau (II.5). On remarque que le facteur de forme augmente avec l'augmentation de l'épaisseur, par exemple à 50 nm on a $FF=84.69\%$ et si on change à 70 nm on aura $FF=85.68\%$. Concernant le rendement représenté sur la figure (II.19), il diminue de 21.24% jusqu'à 20.16% dans la variation de l'épaisseur 50 nm-100 nm.

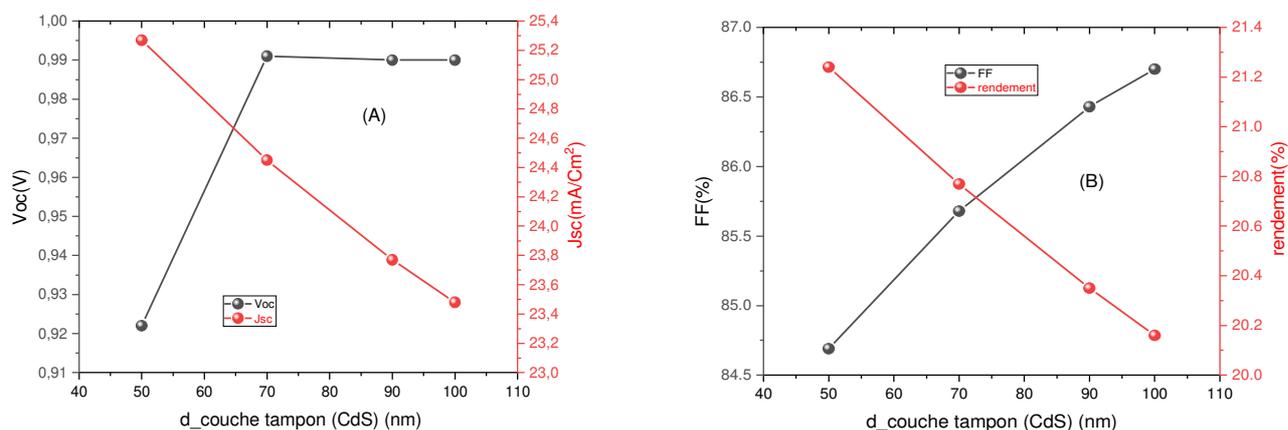


Figure (II.19): (A) variation de la densité de courant de court-circuit et la tension de circuit-ouvert en fonction de l'épaisseur de la couche tampon (CdS). (B) variation de facteur de forme et le rendement en fonction de l'épaisseur de la couche tampon (CdS).

II.4.4.5. Influence de dopage de la couche absorbante sur la structure CdS/ Cd_xZn_{1-x}Te pour x=0.6 :

Tableau (II.6): Résultats finals de l'effet du dopage de la couche absorbante (CdZnTe) sur la structure CdS/ Cd_xZn_{1-x}Te pour x=0.6

	Vco (Volt)	Jsc(mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
10 ¹⁴	0.992	25.269	84.691	21.24
10 ¹⁵	0.994	25.450	83.75	21.20
10 ¹⁶	1.00	25.883	80.54	20.93
10 ¹⁷	1.040	25.73	79.71	21.04
10 ¹⁸	1.098	24.66	81.44	22.07

La figure (II.20) représente la variation de la densité de courant de court-circuit en fonction de la tension de circuit ouvert pour plusieurs concentrations de dopage de la couche absorbante. On note que lorsque le dopage au tour de 10^{14} cm^{-3} à 10^{18} cm^{-3} , la tension de circuit ouvert V_{co} augmente. Par exemple pour un dopage de 10^{14} cm^{-3} on trouve $V_{co}=0.992\text{V}$ et pour un dopage de 10^{16} cm^{-3} on obtient $V_{co}=1\text{V}$, on a une variation de $\Delta V_{co}=0.008\text{V}$. Et pour la densité de courant de court-circuit, lorsque le dopage au tour de 10^{14} cm^{-3} à 10^{16} cm^{-3} le J_{sc} augmente. Apprêt diminue jusqu'à une valeur de 24.66 mA/cm^2 pour un dopage de 10^{18} cm^{-3} . Ces résultats sont plus clairs dans le Tableau (II.6). On remarque que le facteur de forme diminue avec l'augmentation de dopage par exemple à 10^{14} cm^{-3} on a $FF=84.691 \%$ et si on change à 10^{18} cm^{-3} on aura $FF=81.44\%$. Concernant le rendement représenté sur la figure (II.20, D), il augmente de 21.24% jusqu'à 22.07% dans la variation de dopage de 10^{14} cm^{-3} à 10^{18} cm^{-3} .

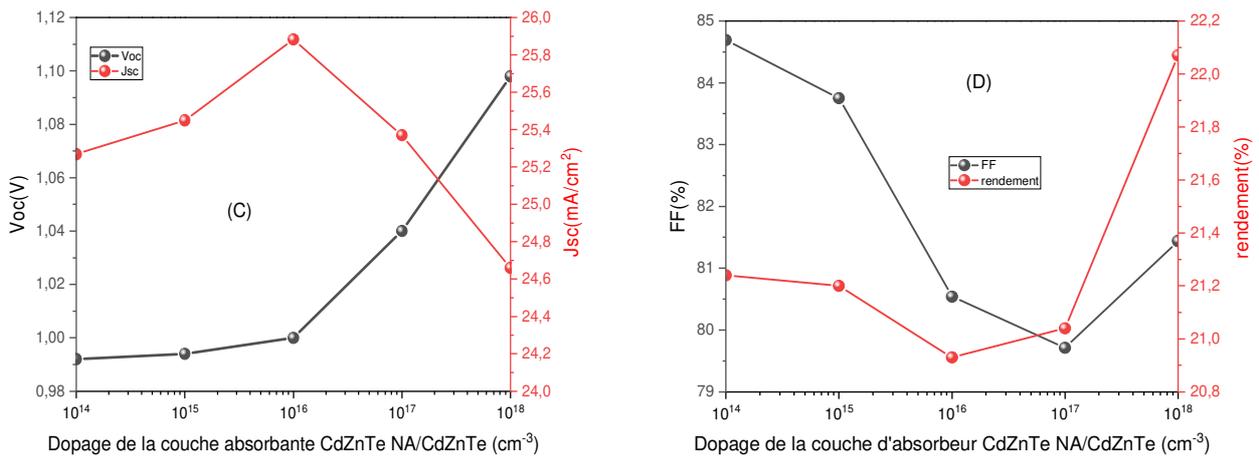


Figure (II.20): (C) variation de la densité de courant de court-circuit et la tension de circuit-ouvert en fonction de dopage de la couche absorbante. (D) variation de facteur de forme et le rendement en fonction de dopage de la couche absorbante.

II.4.5. Cas couche tampon ZnS :

II.4.5.1. Variation de caractéristique J-V de la structure ZnS/ Cd_xZn_{1-x}Te en fonction de la concentration du cadmium x :

Tableau (II.7): Résultats finals de l'effet de concentration du cadmium x sur la structure ZnS/ Cd_xZn_{1-x}Te.

X	V _{co} (Volt)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
0.1	1.488419	11.97541506	57.5886	10.2648
0.2	1.350266	16.12325282	63.4354	13.8103
0.3	1.244929	18.81082202	73.4684	17.2049
0.4	1.154891	21.80143605	82.6890	20.8197
0.5	1.069342	24.55267468	85.7816	22.5221
0.6	0.995341	26.75672274	86.4007	23.0103
0.7	0.935325	26.78420746	86.2616	21.6102
0.8	0.854395	29.42713228	86.3920	21.7210
0.9	0.800572	30.77014430	85.2978	21.0120

La figure (II.21) représente la variation de la densité de courant en fonction de la tension pour plusieurs concentrations de cadmium x. On note que lorsque x augmente, la tension de circuit ouvert V_{co} diminue. Par exemple à x=0.2 on trouve V_{co}=1.35V et pour x= 0.8 on obtient V_{co}=0.8543V, avec une variation de ΔV_{co}=0.4957 V. Et pour la densité de courant de court-circuit, le J_{sc} augmente avec l'augmentation de concentration du cadmium x. Par exemple à x = 0.2 on trouve J_{sc} =16.1232mA/cm² et pour x=0.8, le J_{sc} est de 29.427 mA/cm², avec une variation de ΔJ_{sc}= 13.3038mA/cm² trouvée.

Ces résultats sont plus clairs dans le Tableau (II.7). On remarque que le rendement augmente avec l'augmentation de concentration du cadmium jusqu'à x= 0.6. Concernant le facteur du forme représenté sur le Tableau (II.7), il augmente de 57.58 % jusqu'à 68.39% dans la plage de x= 0.1 à 0.8. Les résultats obtenue montre que x= 0.6 est la concentration optimale qui donne le meilleur rendement de conversion.

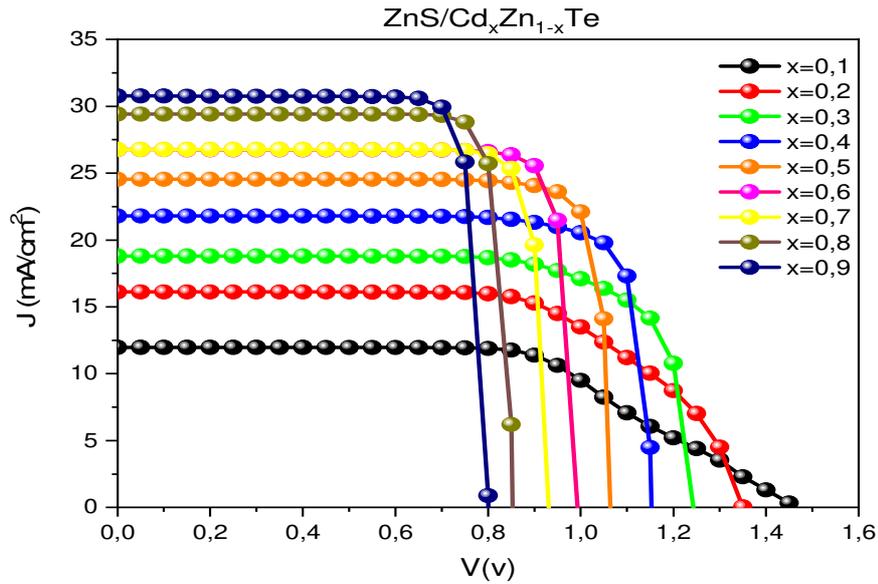


Figure (II.21): Variation de caractéristique J-V pour plusieurs concentrations du cadmium x.

II.4.5.2. Variation de l'efficacité quantique externe (EQE) de la structure ZnS/ Cd_xZn_{1-x}Te en fonction de la concentration du cadmium x :

La figure (II.22) représente la variation de l'efficacité quantique externe en fonction de la longueur d'onde pour plusieurs concentrations de cadmium x. On note que l'efficacité quantique externe augmente dans l'intervalle [300 ; 500 nm] jusqu'à une valeur maximale de 95.17%. On remarque une bonne efficacité dans l'intervalle [300 ; 600 nm], Presque c'est l'intervalle de gamme des longueurs d'ondes visibles. Après on observe une diminution rapide jusqu'à 0% dans l'intervalle [600 ; 900 nm]. Cette diminution commence pour les faibles concentrations jusqu'aux fortes concentrations.

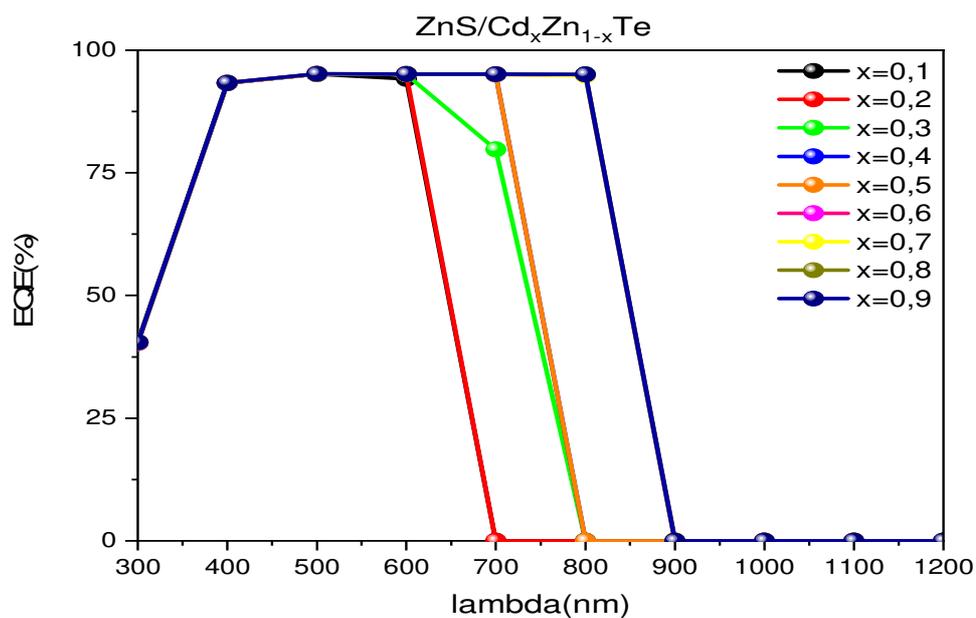


Figure (II.22): Variation du rendement quantique externe EQE en fonction de la longueur d'onde pour différentes valeurs de concentration du cadmium x .

II.4.5.3. Effet de température sur les caractéristiques de la structure ZnS/ Cd_xZn_{1-x}Te:

Tableau (II.8): Résultats finals de l'effet de la température sur la structure ZnS/ Cd_xZn_{1-x}Te pour $x=0.6$

T(K)	V _{co} (Volt)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
300	0.995341	26.75672274	86.4007	23.0103
320	0.959153	26.75938393	86.2956	22.1489
340	0.924115	26.7620566	85.8274	21.2262
360	0.893142	26.76474066	84.8001	20.2712
380	0.858278	26.76743154	83.9275	19.2814

Tableau (II.9): Résultats finals de l'effet de la température sur la structure ZnS/ Cd_xZn_{1-x}Te pour x=0.7

T(K)	V _{co} (Volt)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
300	0.935325	26.78420746	86.2616	21.6102
320	0.901488	26.78744465	85.6202	20.6760
340	0.861846	26.79070161	85.2318	19.6795
360	0.825156	26.7939360	84.3821	18.6562
380	0.791675	26.79713113	83.0820	17.6255

Tableau (II.10): Résultats finals de l'effet de la température sur la structure ZnS/ Cd_xZn_{1-x}Te pour x=0.8

T(K)	V _{co} (Volt)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
300	0.935325	26.78420746	86.2616	21.6102
320	0.901488	26.78744465	85.6202	20.6760
340	0.86184	26.7907016	85.2318	19.6795
360	0.825156	26.79393607	84.3821	18.6562
380	0.791675	26.79713113	83.0820	17.6255

II.4.5.3.1. Variation de la caractéristique J-V de la structure ZnS/Cd_xZn_{1-x}Te en fonction de la température T:

Les figures (II.23,24,25) représentent la variation du J-V pour plusieurs températures à des concentrations du cadmium x=0.6, 0.7 et 0.8. On constate que la température n'a pas une grande influence sur la densité de courant de court-circuit. Par contre, elle influe sur la tension de circuit-ouvert. Plus la température augmente plus le V_{co} diminue.

On remarque que le rendement de la conversion diminue avec l'augmentation de la température. Ces résultats sont plus clairs dans les Tableau (II.8, 9,10), on a obtenu une valeur maximale de 23.01 % à la température T=300 K pour x=0.6.

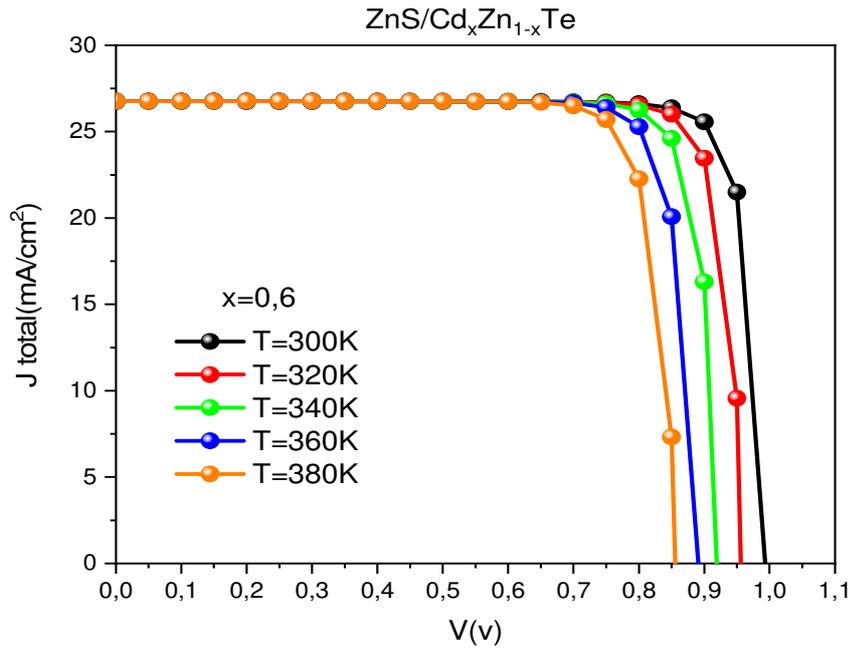


Figure (II.23): Variation de caractéristique J-V pour plusieurs températures pour $x=0.6$

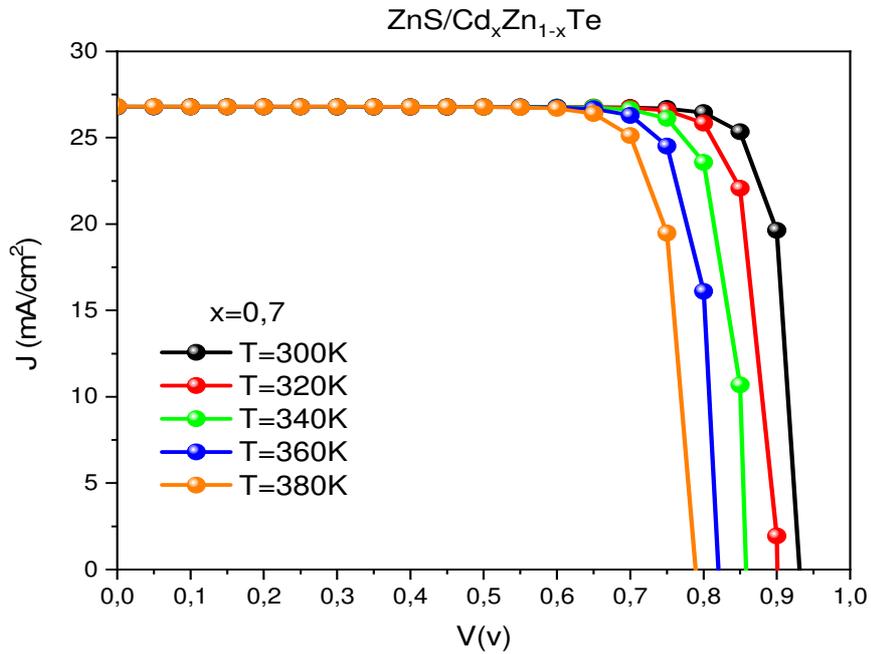


Figure (II.24): Variation de caractéristique J-V pour plusieurs températures pour $x=0.7$

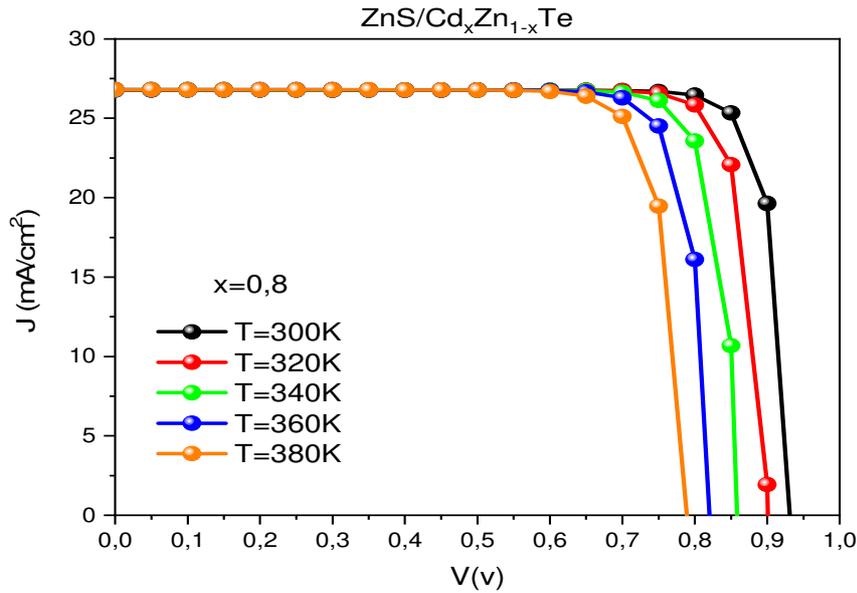


Figure (II.25): Variation de caractéristique J-V pour plusieurs températures pour $x=0.8$

II.4.5.3.2. Variation du rendement quantique externe EQE de la structure

ZnS/ Cd_xZn_{1-x}Te en fonction de la longueur d'onde pour différentes températures :

Les figures (II.26,27,28) représentent l'efficacité quantique externe en fonction de la longueur d'onde pour plusieurs températures pour les concentrations $x=0.6, 0.7$ et 0.8 . On remarque que l'efficacité quantique externe est presque la même pour toutes les valeurs de température, ce qui signifie que la température n'a pas une grande influence sur l'efficacité quantique externe.

On note que dans la plage de 300-500 nm, l'efficacité quantique externe augmente avec une valeur maximale de 95.17 %, et dans la plage de 500-800 nm, l'efficacité quantique est constante, après on observe une diminution rapide jusqu'à 0%.

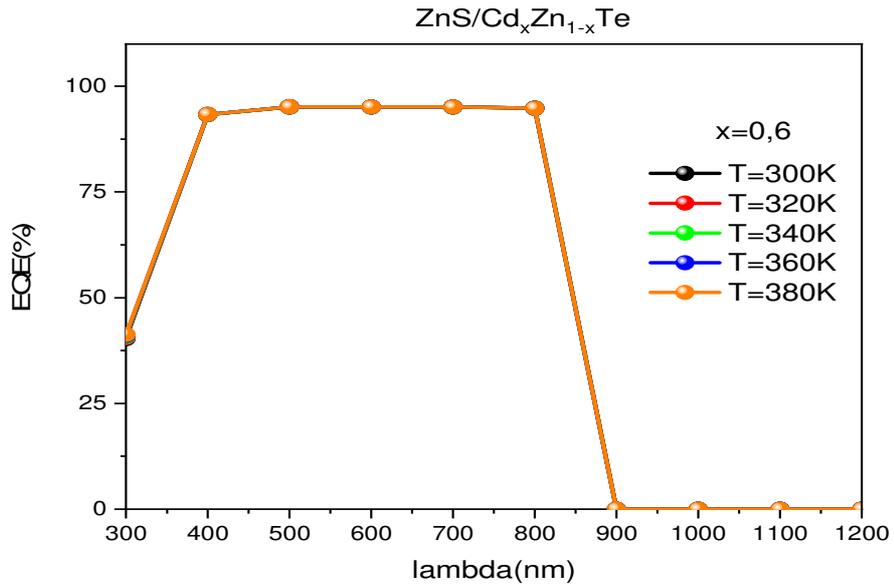


Figure (II.26): Variation du rendement quantique externe EQE en fonction de la longueur d'onde pour plusieurs températures pour $x=0.6$

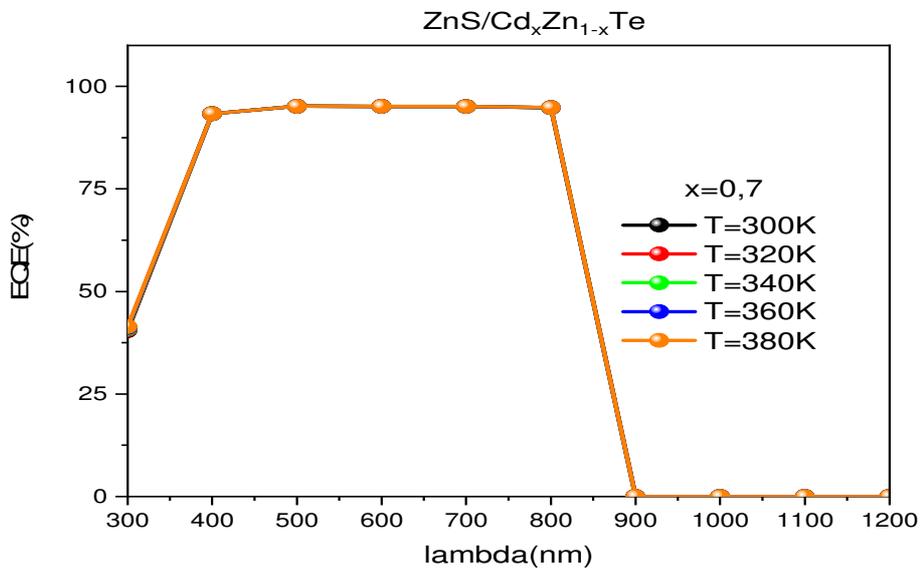


Figure (II.27): Variation du rendement quantique externe EQE en fonction de la longueur d'onde pour plusieurs températures pour $x=0.7$

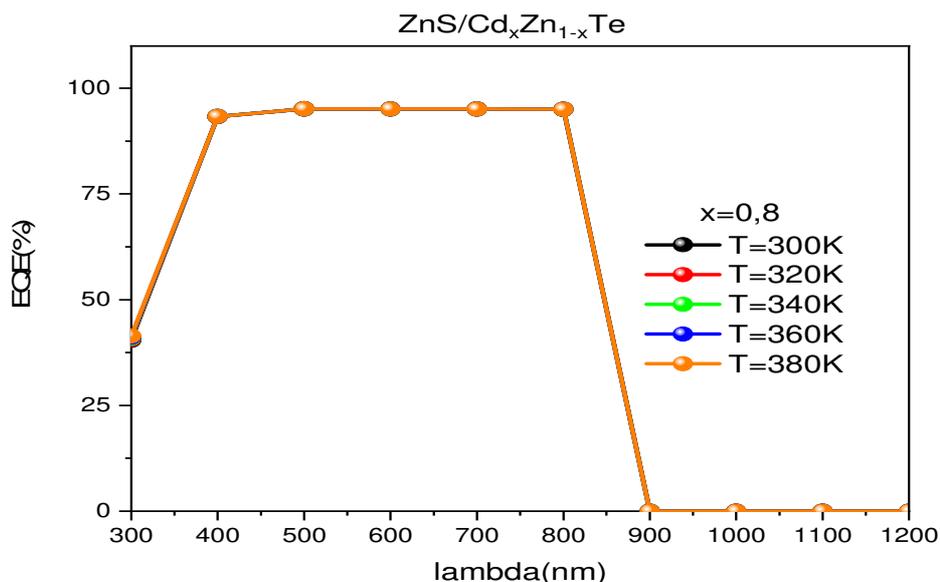


Figure (II.28): Variation du rendement quantique externe EQE en fonction de la longueur d'onde pour plusieurs températures pour $x=0.8$

II.4.5.4. Influence de l'épaisseur de la couche tampon sur la structure ZnS/ Cd_xZn_{1-x}Te pour $x=0.6$:

Tableau (II.11): Résultats finals de l'effet de l'épaisseur de la couche tampon sur la structure ZnS/ Cd_xZn_{1-x}Te pour $x=0.6$

	V _{co} (Volt)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
50(nm)	0.995341	26.756	86.4007	23.0103
70(nm)	1.1009	24.7263	87.76	23.89
90(nm)	1.1009	24.6707	87.99	23.90
100(nm)	1.1009	24.6483	88.08	23.90

La figure (II.29) représente la variation de la densité de courant de court-circuit en fonction de la tension de circuit ouvert pour plusieurs valeurs de l'épaisseur de la couche tampon ZnS. On note que lorsqu'on augmente l'épaisseur de 50 nm à 70 nm, la tension de circuit ouvert V_{co} augmente. Par exemple à l'épaisseur de 50 nm on trouve V_{co}=0.995V et pour l'épaisseur de 70 nm on obtient V_{co}=1.1009V, avec une variation de $\Delta V_{co}=0.1059V$. La tension de circuit ouvert V_{co} est constante pour l'épaisseur entre 70 nm et 100 nm. Par contre le courant de court-circuit est diminué jusqu'à 24.64 mA/cm² pour une épaisseur de 100 nm. Ces résultats sont plus clairs dans le tableau (II.11). On remarque que le facteur de forme augmente avec l'augmentation de l'épaisseur par exemple à 50 nm on a FF=86.40 % et si on change à 70 nm

on aura $FF=87.76\%$. Concernant le rendement représenté sur le tableau (II.11), il augmente de 23.01% jusqu'à 23.9% dans la variation de l'épaisseur de 50 nm à 100 nm .

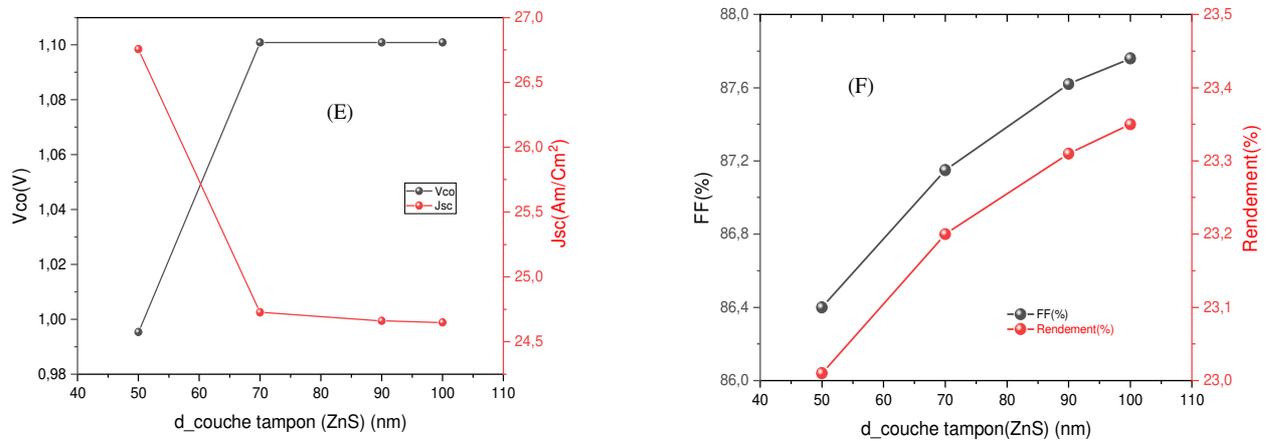


Figure (II.29): (E) variation de la densité de courant de court-circuit et la tension de circuit-ouvert en fonction de l'épaisseur de la couche tampon (ZnS). (F) variation de facteur de forme et le rendement en fonction de l'épaisseur de la couche tampon (ZnS).

II.4.5.5. Influence de dopage de la couche absorbante sur la structure $ZnS/ Cd_xZn_{1-x}Te$ pour $x=0.6$:

Tableau (II.12): Résultats finals de l'effet du dopage de la couche absorbante ($CdZnTe$) sur la structure $ZnS/ Cd_xZn_{1-x}Te$ pour $x=0.6$

	Vco (Volt)	Jsc(mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
10^{14}	0.995341	26.75672	86.4007	23.01
10^{15}	0.9978	26.771	85.97	22.96
10^{16}	1.0056	26.6777	84.43	22.65
10^{17}	1.0435	25.6601	84.95	22.75
10^{18}	1.1009	24.802	87.44	23.88

La figure (II.30) représente la variation de la densité de courant de court-circuit en fonction de la tension de circuit ouvert pour plusieurs concentrations de dopage de la couche absorbante. On note que lorsque le dopage au tour de 10^{14} cm^{-3} à 10^{18} cm^{-3} , la tension de circuit ouvert V_{co} augmente, Par exemple pour un dopage de 10^{14} cm^{-3} on trouve $V_{co}=0.995\text{V}$ et pour un dopage de 10^{16} cm^{-3} on obtient $V_{co}=1.0056\text{V}$, on a une variation de $\Delta V_{co}=0.0106\text{V}$. Par contre la densité de courant de court-circuit est diminué, par exemple pour un dopage de 10^{14} cm^{-3} on trouve $J_{sc} = 26.75\text{ mA/cm}^2$ et pour un dopage de 10^{18} cm^{-3} , le J_{sc} est de 24.802 mA/cm^2 , avec

une variation de $\Delta J_{sc} = 1.948 \text{ mA/cm}^2$. Ces résultats sont plus clairs dans le tableau (II.12). On remarque que le facteur de forme diminue avec l'augmentation de dopage entre 10^{14} cm^{-3} et 10^{16} cm^{-3} , et augmente pour le dopage entre 10^{16} cm^{-3} et 10^{18} cm^{-3} . Concernant le rendement représenté sur la figure (II.30, H), il diminue de 23.01 % jusqu'à 22.65 % dans la variation de dopage de 10^{14} cm^{-3} à 10^{16} cm^{-3} et augmente de 22.65% jusqu'à 23.88% dans la variation de dopage de 10^{16} cm^{-3} à 10^{18} cm^{-3} .

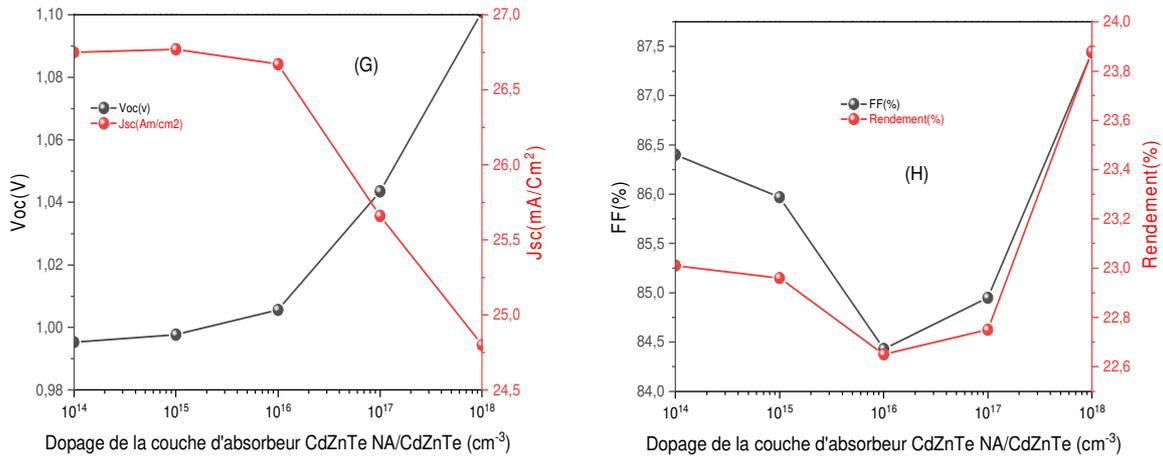


Figure (II.30): (G) variation de la densité de courant de court-circuit et la tension de circuit-ouvert en fonction de dopage de la couche absorbante. (H) variation de facteur de forme et le rendement en fonction de dopage de la couche absorbante.

II.5.Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons fait une simulation d'une cellule solaire à base de CdZnTe en utilisant deux différentes couches tampon CdS, ZnS. L'étude a consisté à faire les calculs des caractéristiques de chaque cellule et de procéder à des comparaisons afin d'obtenir la valeur optimale de rendement.

En ce sens, le CdS est à éviter principalement pour sa toxicité pour la nature ainsi que pour son faible rendement qui est de l'ordre de 22.07 % par rapport à la cellule à base de ZnS qui donne 23.9 %.

Enfin, d'après les résultats de notre étude, et pour une concentration du Cd, $x=0.6$, $T=300\text{k}$ et pour l'épaisseur du 100 nm de couche tampon. On constate que la meilleure structure est ZnS/ $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Te}$, pour les raisons Suivantes :

Un rendement de 23.9%.

Une densité de courant de court-circuit $J_{sc}=26.756 \text{ mA/cm}^2$.

Conclusion générale :

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque, basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire un courant lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière.

Dans le domaine de l'énergie photovoltaïque, de grands espoirs reposent sur l'utilisation de cellules en couches minces pour atteindre des coûts compétitifs pour la production d'électricité.

Dans ce travail de mémoire, nous avons fait une optimisation par simulation de quelques paramètres physiques et géométriques des deux couches formant l'hétérojonction : Tampon (CdS ou ZnS) / Absorbeur CdZnTe, d'une cellule solaire photovoltaïque en couches minces. La simulation est effectuée à l'aide du logiciel SCAPS.

À travers la caractéristiques (J-V) de la cellule nous avons obtenu les différentes caractéristiques photovoltaïques de la cellule à savoir : le courant de court-circuit J_{sc} , la tension de circuit ouvert V_{oc} , le facteur de forme FF et le rendement de conversion η .

Les paramètres qui ont subi à l'opération d'optimisation de la concentration et l'épaisseur de la couche tampon en CdS ou ZnS ainsi que le dopage de la couche absorbante CdZnTe.

Le programme de calcul que nous avons élaboré, nous permet d'étudier l'influence divers paramètres qui caractérisant une cellule solaire par exemple l'épaisseur, dopage et la température. Et comme conclusion de ce travail on peut dire que la valeur optimale de l'énergie de gap du CdZnTe est proche de 1.4eV et une épaisseur de l'ordre de 1µm est largement suffisante pour avoir un rendement optimal de 23.9% . .

Les références :

- [1] B. Flèche - D. Delagnes, Energie solaire photovoltaïque.doc, juin 07.
- [2] Hassina Derbal-Habak, Cellules solaires photovoltaïques plastique nanostructures, UNIVERSITE D'ANGERS 2009 N° 929.
- [3] B.Equer, Energie solaire photovoltaïque, physique et technologie de la conversion photovoltaïque, volume1, 2007.
- [4] S. M. Sze, Physics of Semiconductor Devices, second edition, Copyright. C.1981 by John, Wiley and Son, Inc.
- [5] A. Ricaud, Module photovoltaïques, filières technologiques, Techniques de l'ingénieur D3940, 2005.
- [6] A. BOURAIOU, Elaboration et Caractérisation des Couches Minces CuInSe₂ par électrodéposition, thèse de doctorat, 2009 université mentouri – constantine, PP 15-26 ; 43-44.
- [7] L. Ribeaucourt, Electrodepôt et sélénisation d'alliages Cu-In-Ga en vue de la synthèse de couches minces de Cu (In, Ga) Se₂ pour cellules solaires, thèse de doctorat, université Pierre et Marie Curie, 2011 ; PP 17-20.
- [8] Anne Labouret, Pascal Cumuenel, Jean-Paul Braun and Benjamin Faraggi, Cellules solaires les bases de l'énergie photovoltaïque, Dunod 5eme édition, 2005.
- [9] Dib Wassila, MODELISATION DES STRUCTURES PHOTOVOLTAIQUES : ASPECTS FONDAMENTAUX ET APPLIQUES, Thèse de Doctorat, 2010, Université Abou Bekr Belkïdde -Tlemcen.
- [10] G. Gourdin, Solar cell technology (current state of the art), 2007.
- [11] M. A. Green, 3rd generation PV solar cells for 2020 and beyond, vol 14, 2010.
- [12] T. Key, Solar photovoltaics: Expanding electric generation options, 2008.
- [13] Solar Energy Perspectives, International Energy Agency, 2011.
- [14] A. Ricaud, Photopiles Solaires : De la physique de la conversion Photovoltaïque aux Filières, Matériaux et Procédés, Presses polytechniques et universitaires romandes, 1ère édition 1997.

- [15] R.BETTIGNIES, Cellules photovoltaïques organiques dérivées de nouveaux systèmes conjugués, thèse de doctorat, à l'école doctorale d'Angers, France, 2003.
- [16] Selma MOSTEFA KARA, « étude et simulation de cellules photovoltaïques a couches minces a base de CIS et CIGS » Mémoire de Magister, 2012.
- [17] Sarah MENAKH, « Contribution à l'étude des propriétés de films ZnO » Mémoire de Magister, 2010.
- [18] S. Daniel, Modeling radiation effect on a triple junction solar cell using silvaco atlas, thesis naval postgraduate school Monterey California. 2012.
- [19] M. AMARA, Propriétés Electroniques des Conducteurs et des Semi-Conducteurs, rappels théoriques Plate-forme Matière Condensée et Cristallographie (MCC) C.E.S.I.R.E, université J.Fourier Grenoble.
- [20] J. Lavery, Quantum tunneling model of a P-N junction in silvaco, thesis naval postgraduate school Monterey California. 2008.
- [21] Luc LASNE, Physique et technologie des composants de puissance, université de Bordeaux 1, 2003.
- [22] H. Mathieu. Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques, Dunod, Paris, 2009.
- [23] L.Mohamed, Etude de caractérisation d'un MESFET-GaAs hyperfréquence et application en circuit amplificateur linéaire à faible bruit (LNA) en bande étroite autour de 10 GHZ en technologie MMIC pour les systèmes à communications rapides, Mémoire magistère, Ecole normale supérieure d'enseignement technologique d'Oran. 2009.
- [24] G. Adam, modeling heterogeneous carbon nanotube networks for photovoltaic application using silvaco atlas software, Thesis Naval postgraduate school Monterey California. 2012.
- [25] A. Aouina, Mémoire de Magister en physique, Univ Mentouri Constantine.
- [26] S. Ghefir, Mémoire de magister, Univ Abou Bakr Belkaid Tlemcen (2013).
- [27] K. Zanion, Semiconductors and Semimetals, R. K. Willardson and C. Beer, Academic Press.
- [28] HAICHOOR Amel, Etude de Nanostructures laser à Base de ZnS / ZnSe/ ZnTe / CdZnSe/CdTe, mémoire de magister université d'Oran 2012.

- [29] S. Dehimi , , L. Dehimi, T. Asar , B. Mebarki, S. ÖzçelikOptik - International Journal for Light and Electron OpticsVolume 135, April 2017, Pages 153–159
- [30] L. Börnstein, Semiconductors, volume III/17. B. Springer, Berlin, (1999).
- [31] Y. Zhang,W.K. Ge,M.D. Sturge, J.S. Zheng and B.X.Wu, Phys. Rev. B 47,6330 (1993).
- [32] D. J. Chadi, J. P. Walter, M. L. Cohen, Y. Petroff, and M. Balkanski, Reflectivities and Electronic Band Structures of CdTe and HgTe". Phys. Rev. B, 5 :3058, (1972).
- [33] M. Labidi, Thèse Doctorat, Univ Badji Mokhtar Annaba (2011).
- [34] H. Mathieu, Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques, 6 Ed. DUNOD (2009).
- [35] S. Adachi, Optical Constants of Crystalline and Amorphous Semiconductors: Numerical Data and Graphical Information, Kluwer Academic Publishers, Boston (1999).
- [36] B. AZEZA : « Hétéro-épitaxie par jets moléculaires de couches GaAs sur substrat Si pour photopiles solaires : adaptation par couche nanostructurée », Thèse de doctorat, Université de MONASTIR, Faculté des Sciences MONASTIR, 2008.
- [37] H. Mathieu, Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques, Dunod, Paris, 2009.
- [38] S. Adachi, Properties of Group-IV, III–V and II–VI Semiconductors, John Wiley & Sons Ltd, Wiley series in materials for electronic and optoelectronic applications, 2005.
- [39] F.Kerkar, Calcul du gain optique d'un puits quantique à base de GaInNAs/GaAs pour son utilisation dans les télécommunications optiques émettant à une longueur d'onde de 1.3 μm , université Saad Dahleb de Blida, 2006.
- [40] Renard, C., "Hétérostructures Antimoniures/Arséniures pour les Applications Optoélectroniques dans le Moyen Infrarouge ", universite paris VII, (30 septembre 2005).
- [41] K. Köksal et al, Critical layer thickness of GaIn(N)As(Sb) QWs on GaAs and InP substrates for (001) and (111) orientations, Eur. Phys. J. B69, pp. 211–218 ,2009.
- [42] R. Beneyton, l'incorporation du thallium dans une matrice III-V : preparation de GaTlAs et InTlAs par EJM, Thèse de doctorat, école centrale de Lyon, Novembre, 2004.
- [43] Bethoux, J.-M., "Relaxation des Contraintes dans les Hétérostructures Epaissees (Al,Ga)n :

une Piste Originale pour la Réalisation de Diodes Electroluminescentes à Cavité Résonante",
Université de Nice Sophia-Antipolis, (24 septembre 2004).

[44] C.P. Kuo, S.K. Vong, R.M. Cohen, G.B. Stringfellow, J. Appl. Phys. 57 (12), 5428 (1985).

[45] Mohammed Ouled Ali, propriétés optoélectroniques du semi-conducteur Cu(In,Ga)Se₂
appliquée aux cellules photovoltaïques , mémoire de magister à l'école normale supérieure de
l'enseignement technologique d'Oran, 2010.

Annexe :

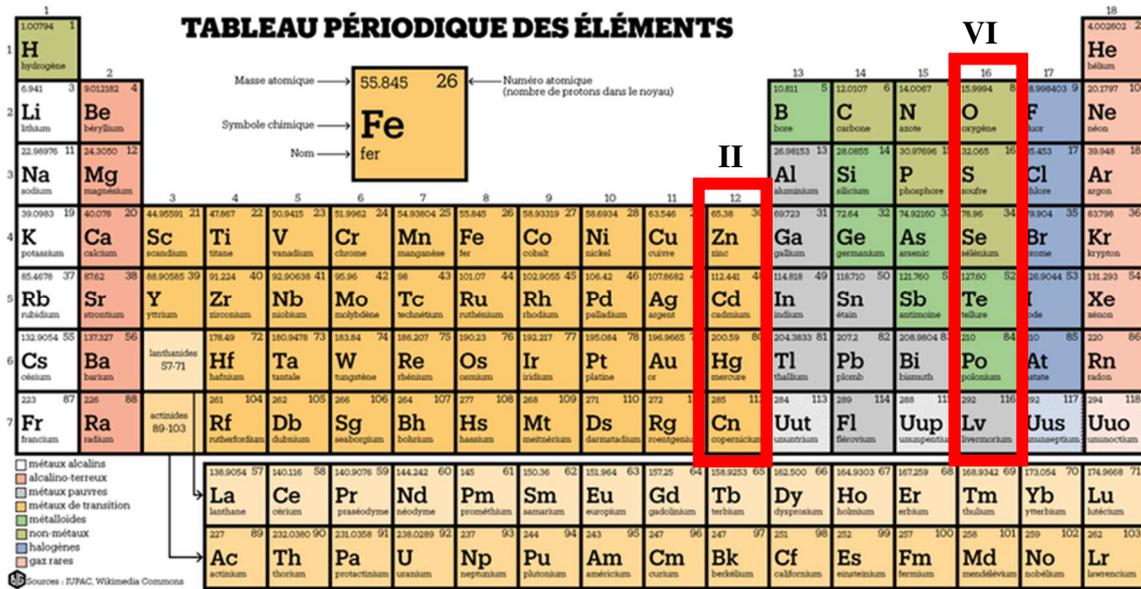


Figure (A.1) : classement des matériaux II-VI dans le tableau périodique.

Tableau (A) : différentes paramètres en fonction de concentration du cadmium x.

X Paramètre	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
Bandgap, E_g (eV)	2,038	1,894	1,769	1,662	1,573	1,502	1,499	1,414	1,398
Electron affinity, χ (eV)	3,578	3,656	3,734	3,812	3,89	3,968	4,046	4,124	4,202
Dielectric permittivity, ϵ/ϵ_0	9,643	9,616	9,589	9,562	9,535	9,508	9,481	9,454	9,427
Effective Density of states NC (cm^{-3})	$1,43 \cdot 10^{17}$	$2,16 \cdot 10^{17}$	$2,89 \cdot 10^{17}$	$3,62 \cdot 10^{17}$	$4,35 \cdot 10^{17}$	$5,08 \cdot 10^{17}$	$5,81 \cdot 10^{17}$	$6,54 \cdot 10^{17}$	$7,27 \cdot 10^{17}$
Effective Density of states NV (cm^{-3})	$1,98 \cdot 10^{19}$	$1,96 \cdot 10^{19}$	$1,94 \cdot 10^{19}$	$1,92 \cdot 10^{19}$	$1,9 \cdot 10^{19}$	$1,88 \cdot 10^{19}$	$1,86 \cdot 10^{19}$	$1,84 \cdot 10^{19}$	$1,82 \cdot 10^{19}$
Electron thermal velocity (cm/s) V_{the}	$3,016 \cdot 10^7$	$2,792 \cdot 10^7$	$2,568 \cdot 10^7$	$2,344 \cdot 10^7$	$2,120 \cdot 10^7$	$1,896 \cdot 10^7$	$1,672 \cdot 10^7$	$1,448 \cdot 10^7$	$1,224 \cdot 10^7$
Hole thermal velocity (cm/s) V_{thh}	$1,459 \cdot 10^7$	$1,408 \cdot 10^7$	$1,357 \cdot 10^7$	$1,306 \cdot 10^7$	$1,255 \cdot 10^7$	$1,204 \cdot 10^7$	$1,153 \cdot 10^7$	$1,102 \cdot 10^7$	$1,051 \cdot 10^7$
Electron mobility, U_n (cm^2/Vs)	329	328	327	326	325	324	323	322	321
Hole mobility, U_p (cm^2/Vs)	78	76	74	72	70	68	66	64	62

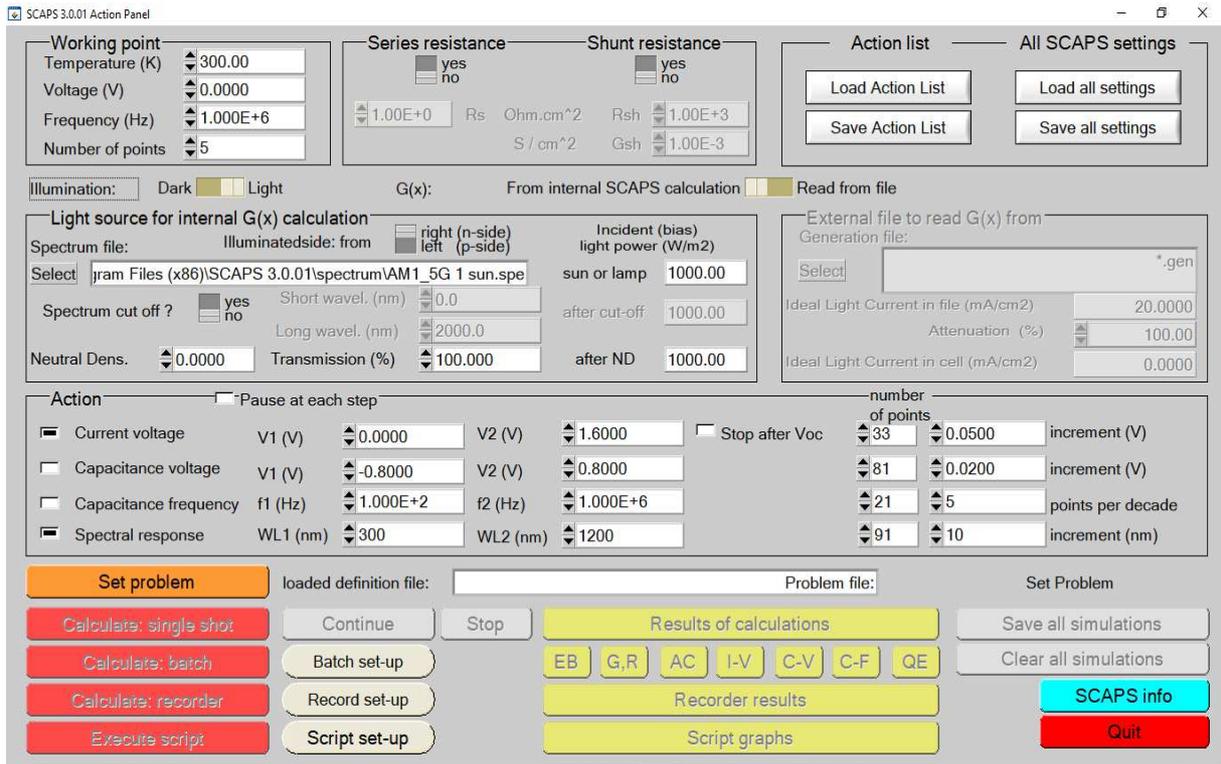


Figure (A.2) : Panneau de démarrage de SCAPS, le panneau d'action ou principal.

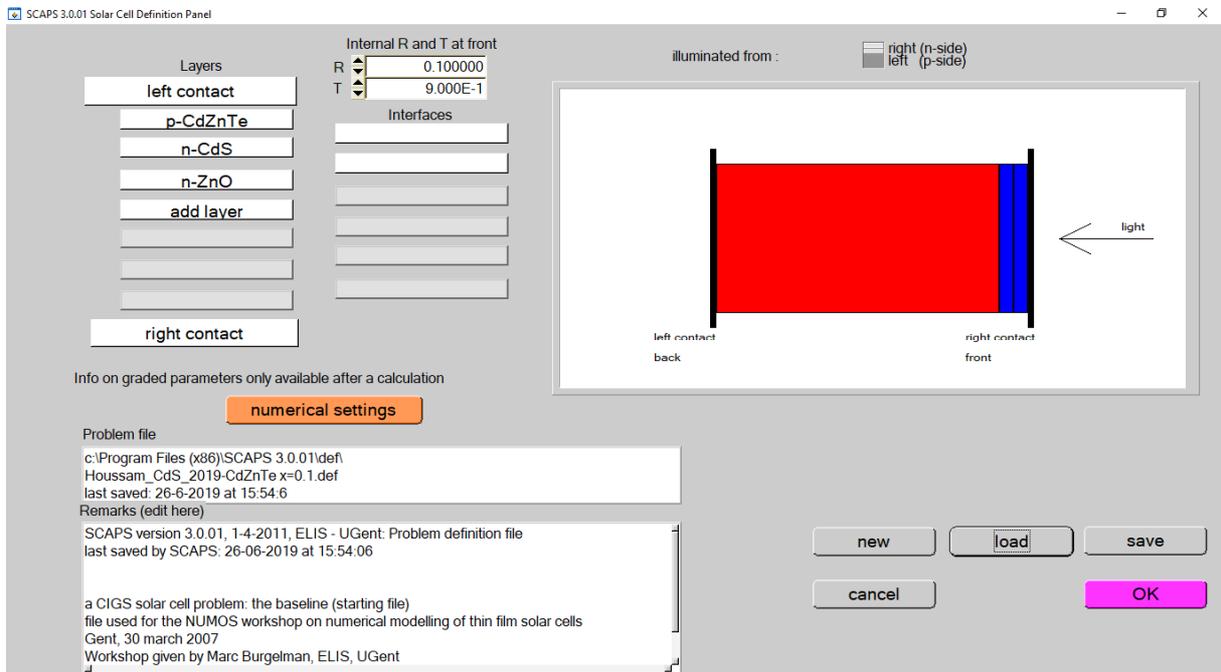


Figure (A.3) : Définition de notre structure de cellule solaire.

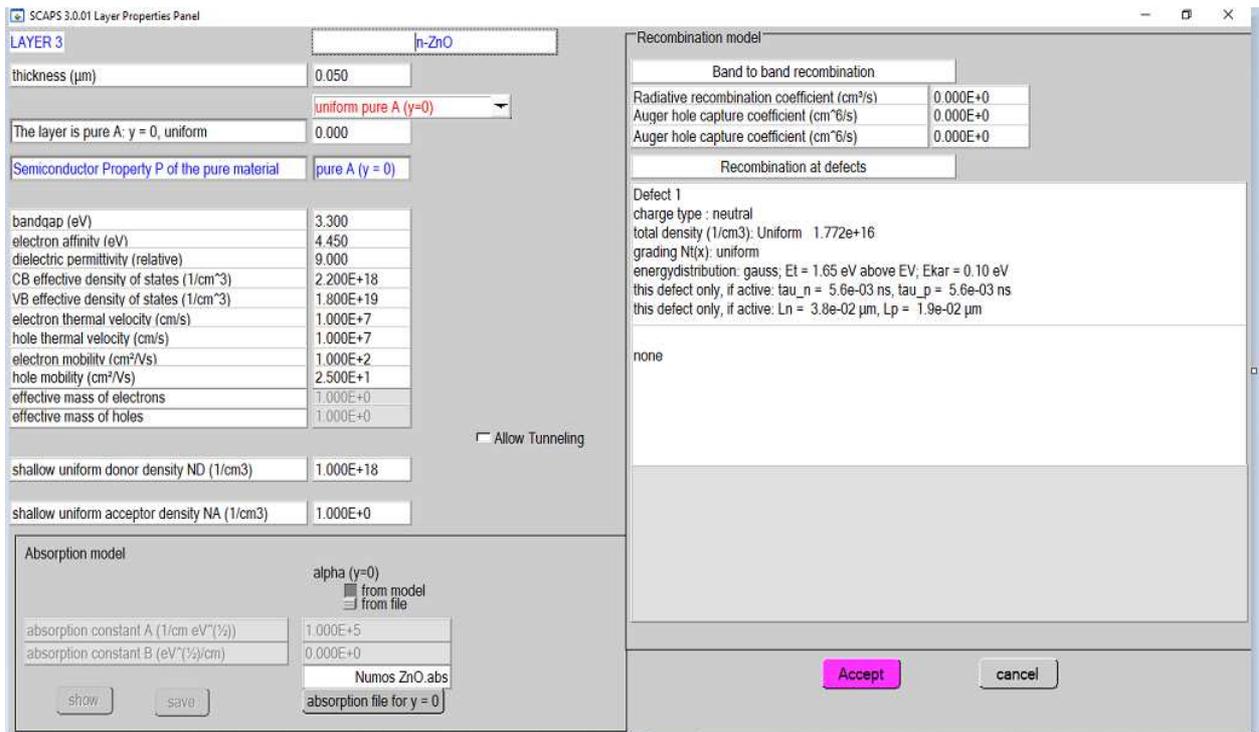


Figure (A.4) : Paramètres d'une couche antireflet ZnO de notre cellule.

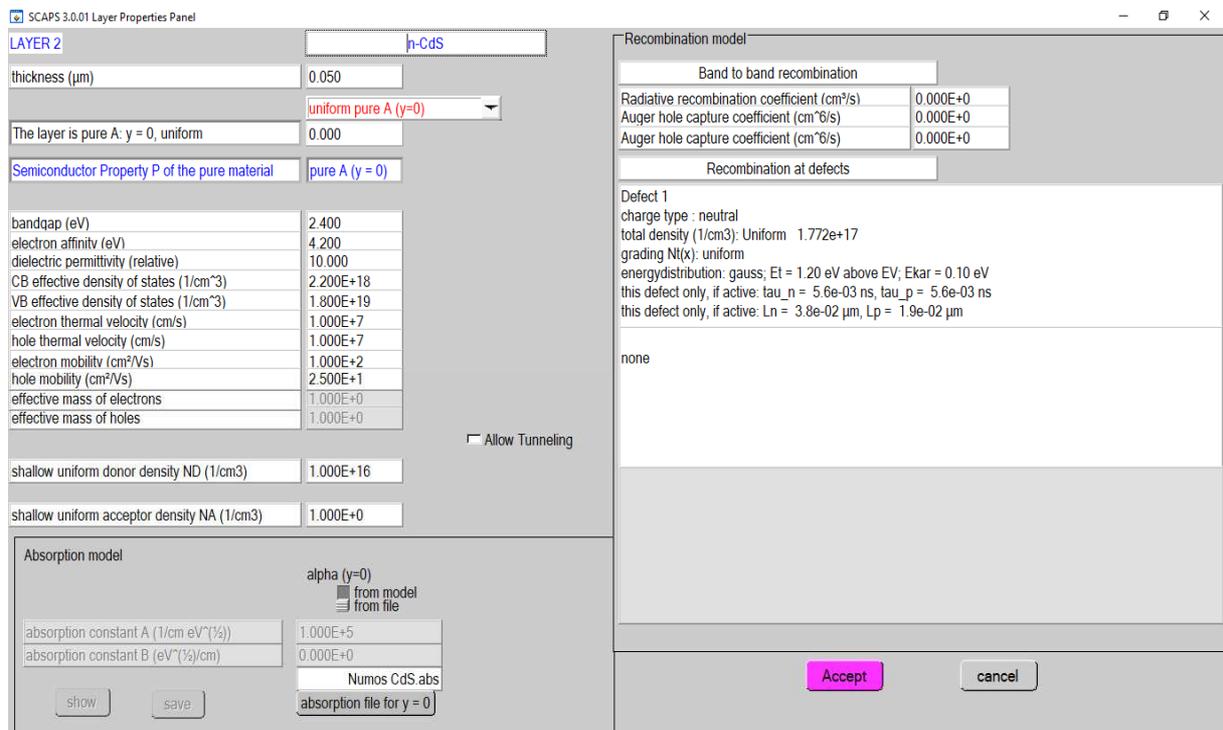


Figure (A.5): Paramètres d'une couche tampon CdS de notre cellule.