



République Algérienne Démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed El Bachir El-Ibrahimi- Bordj Bou Arreridj

برج بوعريريج (محمد البشير الإبراهيمي)

Faculté des sciences et de la technologie

كلية العلوم و التكنولوجيا

Département sciences de la matière

قسم علوم المادة

Mémoire de fin d'étude

PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION

DU DIPLOME : **MASTER**

Filière : chimie

Option : chimie des matériaux

*SIMULATION DES PROPRIETES ET PERFORMANCES
DES CELLULES PHOTOVOLTAIQUES A BASE DE
MATERIAUX SEMI-CONDUCTEURS TERNAIRES CdTeS*

Préparé par :

HOUARI Chaima

ADJOUT Sonia

Les jures :

Mr. BOUBATRA Moustapha

Mme. FERKOUS Hana

Encadreur : Pr. BOUZID Abderrazak

Année universitaire 2019/2020

Remerciements

Louange à dieu le tout puissant qui nous a donné la foi, la sante et le courage pour pouvoir réaliser ce travail.

Nous tenant à remercier :

- *Nos parents qui ont toujours été là pour nous soutenir.*
- *Notre encadreur le Professeur Abderrazak BOUZID et on lui exprime notre gratitude d'avoir accepté de dirigé cette recherche.*
- *Les membres de jury pour avoir accepté de corriger et évaluer notre travail.*
- *Mr. Mohammed HAMIDOUCHE pour son aide.*
- *Notre amie Wafa ADROUCHE.*

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Mon très cher père.

A ma très chère mère.

A mes frères et ma sœur.

*A ma défunte tante « que le paradis soit ta demeure éternelle
ma tata chérie ».*

S. ADJOUCI

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Mon très cher père.

A ma très chère mère.

A mes frères et ma sœur.

*A tous ceux et celles qui me sont
chers.*

CH. HOUARI

SOMMAIRE

Remerciement

Dédicaces

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	1
Bibliographie	3

CHAPITRE I : GENERALITES ET RAPPELS THEORIQUES.

I.1 INTRODUCTION.....	4
I.2 DEFINITION DE L'ENERGIE	4
I.2.1 Les diverses formes de l'énergie.....	5
I.2.2 Les caractéristique des diverses formes de l'énergie.....	5
I.3 LES TYPES DE L'ENERGIE.....	5
I.3.1 Les énergies non renouvelables.....	5
I.3.2 Les énergies renouvelables.....	5
I.3.2.1 L'énergie éolienne	5
A. Avantage.....	5
B. Inconvénient.....	6
I.3.2.2 La Biomasse.....	6
I.3.2.3 L'énergie géothermique.....	6
A. Avantage.....	6
B. Inconvénient.....	6
I.3.2.4 L'énergie hydraulique (ou hydrau-électricité).....	7
A. Avantage.....	7
B. Inconvénient.....	7

I.3.2.5 L'énergie solaire.....	7
I.4 L'ENERGIE SOLAIRE.....	7
I.4.1 L'origine de l'énergie solaire.....	7
I.4.2 Le rayonnement solaire.....	8
I.4.3 Les trois voix de l'énergie solaire.....	10
I.4.3.1 L'énergie solaire thermodynamique.....	10
I.4.3.2 L'énergie solaire thermique.....	10
I.4.3.3 L'énergie photovoltaïque.....	11
I.4.4 Le potentiel solaire en Algérie.....	11
I.4.5 : L'énergie photovoltaïque dans l'Algérie.....	12
I.4.6 : Limitation de l'énergie solaire.....	13
I.4.7 avantage de l'énergie solaire.....	13
I.5 LA TECHNOLOGIE PHOTOVOLTAÏQUE.....	13
I.5.1 Rappel historique de la technologie photovoltaïque.....	13
I.5.2 L'effet photovoltaïque.....	14
I.5.3 Le principe de la conversion photovoltaïque.....	14
I.5.4 Un panneau solaire.....	15
I.5.5 Cellule solaire.....	16
I.5.6 La structure d'une cellule photovoltaïque.....	16
I.5.7 Description du principe de fonctionnement d'une cellule solaire.....	17
I.5.8 Les différentes caractéristiques d'une cellule solaire.....	18
I.5.8.1 Courant de court-circuit J_{sc}	18
I.5.8.2 Tension de circuit ouvert V_{co}	18
I.5.8.3 Puissance maximale P_m	19
I.5.8.4 Facteur de forme FF.....	19
I.5.8.5. Le rendement η	19
I.5.8.6. L'efficacité quantique externe EQE.....	19
I.5.9 les différentes structures des cellules photovoltaïques.....	20

11.5.10 Les différentes générations des cellules photovoltaïques.....	21
Bibliographie	22

CHAPITRE II : LES MATERIAUX SEMI-CONDUCTEURS ET LE MATERIAUX ETUDIE.

II.1 INTRODUCTION.....	25
II.2 LES MATERIAUX SEMI-CONDUCTEURS.....	25
II.2.1 Gap direct et indirect.....	25
II.2.1.1 Gap direct.....	25
II.2.1.2 Gap indirect.....	25
II.2.2 Les différents types de semi-conducteurs.....	26
II.2.2.1 Les semi-conducteurs intrinsèques.....	26
II.2.2.2 Les semi-conducteurs extrinsèques.....	27
II.2.2.2. A Les semi-conducteurs extrinsèques dopés N.....	27
II.2.2.2.B Les semi-conducteurs extrinsèques dopés P.....	28
II.2.3 Jonction PN.....	28
II.2.4 Les différents matériaux semi-conducteurs.....	29
II.2.5 conductivités électriques des semi-conducteurs.....	29
II.2.6 Les matériaux semi-conducteurs ternaires.....	30
II. 3 LE MATERIAU ETUDIE	30
II.3.1 Composés à base de cadmiums.....	30
II.3.2 Propriétés optoélectroniques et physicochimiques du CdTe.....	31
II.3.3 Configuration électronique des composés CdS, CdTe.....	32
II.3.4 Structure cristallographique des matériaux semi-conducteurs étudiés.....	32
II.3.4.A La structure zinc blende.....	32
II.3.4.B Structure Würtzite (Hexagonal).....	33
II.4 LES CELLULES PHOTOVOLTAIQUES EN COUCHE MINCE A BASE DE CdTe.....	34
II.4.1 Structure cellules photovoltaïques en couches minces à base de CdTe.....	34

II.4.2 L'hétérojonction CdS-CdTe.....	35
II.4.3 Méthode de dépôt.....	36
Bibliographie.....	37

CHAPITRE III : METHODES ET MOYENS DE CALCULS.

III.1 INTRODUCTION.....	39
III.2 PRESENTATION DE SIMULATEUR SCAPS.....	39
III.2.1 Le processus de simulation avec SCAPS.....	40
III.2.2 Utilisation de SCAPS.....	40
III.2.2.1 Lancer SCAPS.....	42
III.2.2.2 Définir le problème.....	42
III.2.2.3 Définir le point de fonctionnement.....	42
III.2.2.4 Sélection des caractéristiques à simuler.....	43
III.2.2.5 Lancer le calcul.....	43
III.2.2.6 Afficher les courbes simulées.....	44
III.2.2.7 Les courbes I-V.....	44
III.3 DEFINITION D'UNE CELLULE SOLAIRE.....	45
III.3.1 Edition de la structure d'une cellule solaire.....	45
III.3.2 Contacts.....	46
III.3.3 Définition des couches.....	47
III.3.4 Les paramètres les plus importants dans SCAPS.....	50
III.3.5 Avantages et inconvénients du SCAPS.....	51
Bibliographie.....	52

CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSION.

IV.1 INTRODUCTION.....	53
IV.2 PARAMETRES PHYSIQUES DE BASE.....	54

IV.3 ETUDE DE L'UTILISATION DU CdTe_{1-x}S_x COMME COUCHE INTERMEDIARE.....	55
IV.3.1 Présentation des cellules simulées.....	55
IV.3.2 Rendement ($\eta\%$) en fonction de composition de la couche intermédiaire CdS _x Te _{1-x}	56
IV.3.3 Effet du changement de la couche fenêtre sur le rendement ($\eta\%$) de la cellule.....	57
IV.3.4 Effet de la composition de la couche intermédiaire sur les caractéristiques principale de la cellule {ITO/(n) CdS/(p) CdTeS /CdTe}.....	57
IV.3.5 Effet de la composition de la couche intermédiaire sur la réponse Spectrale de la cellule ITO/(n) CdS/(p) CdTeS /CdTe.....	59
IV.3.6 Effet de l'épaisseur de la couche intermédiaire sur les caractéristiques principales de la cellule {ITO/(n) CdS/(p) CdTe/CdTe}.....	59
IV.3.7 Effet de l'épaisseur de la couche intermédiaire sur la réponse spectrale de la cellule ITO/(n) CdS/(p) CdTeS /CdTe.....	62
IV-4 ETUDE DE L'UTILISATION DU CdTe COMME COUCHE ABSORBEUR.....	62
IV.4.1 Effet de la variation l'épaisseur de la couche absorbante CdTe sur le rendement de la cellule ITO/(n) CdS/(p) CdTeS /CdTe.....	63
IV.4.2 Effet de la variation de l'épaisseur de la couche absorbante CdTe sur les caractéristiques principales de la cellule ITO/(n) CdS/(p) CdTeS /CdTe.....	64
IV.4.3 Effet de la variation de l'épaisseur de la couche absorbante sur la réponse spectrale de la cellule ITO/(n) CdS/(p) CdTeS /CdTe.....	65
VI-5 ETUDE DE L'EFFET DE L'INTRODUCTION DES DEFAUTS SUR LES CARACTERISTIQUES PRINCIPALES ET LA REPONSE SPECTRALE DE LA CELLULE ITO/(n) CdS/(p) CdTeS /CdTe.....	66
VI-5-1 l'influence des défauts sur le rendement ($\eta\%$) de la cellule en fonction de l'épaisseur de la couche absorbeur CdTe.....	67
VI-5-2 l'effet de la variation de l'épaisseur de la couche absorbante sur les caractéristiques principales de la cellule en fonction de l'épaisseur de la couche absorbeur CdTe.....	68
VI-5-3 l'influence des défauts sur la réponse spectrale de la cellule en fonction de l'épaisseur de la couche absorbeur CdTe.....	71
VI-6 Effet du changement de la couche fenêtre sur le rendement de la cellule simulée.....	71
IV-7 CONCLUSION.....	72
Bibliographie.....	73

CONCLUSION GENERALE74

Symboles et abréviations

Liste des tableaux

Liste des figures

Résumé

INTRODUCTION GENERALE

Le contexte énergétique mondial actuel est marqué par l'épuisement des énergies fossiles classiques, en particulier le pétrole, et la croissance exponentielle des besoins en énergie. Face à cette conjoncture difficile et aux problèmes environnementaux liés au réchauffement climatique, une transition énergétique, qui passe par le recours aux énergies renouvelables, devient inéluctable. Parmi ces énergies dites « propres », citons l'énergie photovoltaïque [1].

Le photovoltaïque est l'une des voies qui s'est significativement développées au cours de ces dernières années [2]. Avec les diverses applications de l'énergie photovoltaïque dans les domaines terrestre et spatial, l'amélioration de l'efficacité de conversion des cellules solaires devient indispensable. Cela n'est faisable qu'à travers l'amélioration des matériaux semi-conducteurs existant et le développement de nouveaux matériaux [3].

Historiquement deux matériaux ont été particulièrement étudiés et ont fait l'objet d'une industrialisation : le silicium amorphe et le tellure de cadmium (CdTe), tous les deux déposés sur verre. Le rendement maximum de ce type de cellules pour des tailles significatives, reste malheureusement limité. Ceci tient à la difficulté d'obtenir ce type de matériaux avec une faible densité de défauts et, par-là, de bonnes propriétés électroniques. Jusqu'à une date récente, il était admis que la filière au CdS/CdTe représentait l'approche la plus prometteuse pour les cellules de nouvelle génération. CdTe paraissait être un matériau idéal pour les cellules solaires en films minces pour au moins trois raisons : le gap d'énergie est de type direct, ainsi le coefficient d'absorption est élevé ($> 10^5 \text{cm}^{-1}$ dans le visible) et la couche absorbante ne nécessite pas plus de quelques micromètres pour absorber 90 % du spectre solaire, et de nombreuses méthodes existent pour déposer CdTe avec une vitesse de dépôt très élevée tout en gardant une qualité raisonnable [4].

Malgré les succès de ces cellules, il reste cependant des problèmes en suspens pour obtenir de meilleures performances, parmi ceux-ci, la création de l'intercouche $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ formée à la jonction P-N des couches CdS/CdTe, à la suite de l'interdiffusion S et Te, causée par le processus de fabrication de haute température [5].

Le but de cette étude est de connaître l'effet de la présence de la couche intermédiaire $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ sur les performances de la cellule solaire ITO/(n) CdS/(p) CdTeS /CdTe. Ceci en utilisant un logiciel de simulation puissant appelé SCAPS (Solar cell capacitance Simulateur).

Le présent travail s'inscrit dans le cadre de la préparation du projet de fin d'étude, le mémoire est divisé en quatre chapitres.

Le premier chapitre est consacré aux généralités sur les énergies renouvelables, l'énergie photovoltaïque et les cellules solaires.

Le deuxième chapitre résume les propriétés structurales, optiques et électriques des composés CdTe, CdS et leurs alliages ternaires et aussi d'autres types des matériaux semi-conducteurs utilisés comme cellules photovoltaïques.

Le troisième chapitre est une présentation du simulateur SCAPS.

Le quatrième chapitre est réservé à la présentation et à la discussion de nos résultats de simulation concernant l'évolution de la performance de la cellule photovoltaïque en couche mince en utilisant l'alliage semi-conducteur ternaire $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ comme couches intermédiaire, et le CdTe comme matériaux absorbeurs tout en variant plusieurs paramètres des cellules étudiées.

Bibliographie

- [1]. Tchouar Ilhem, Etude ; Modélisation ; Simulation de cellule solaire organique, Thèse de doctorat, université Abou_Bekr Belkaid (Tlemcen),
- [2]. M. Hamidouche, Étude de l'effet des couches minces de SnO_2 et ITO sur les caractéristiques des cellules solaires à base de CdTe Et CIGS, Mémoire de master, université Mohamed El-Bachir Elibrahimi (Bordj Bou Arreridj), 19/06/2013.
- [3]. Abderrezek Mahfoud, Modélisation des cellules solaire tandem à couche mince et à haut rendement, Thèse de doctorat, université (Sétif-1), 2015.
- [4]. Bouzaki Mohamed Moustapha, Etudes compares et modélisation des performances des différentes technologies de cellule photovoltaïque en vue du dimensionnement des systems et installation photovoltaïque, These de doctorat, Université Abou_Bekr Belkaid (Tlemcen),
- [5]. Mannir M. Aliyu and all, Evaluation of the Effects and Impacts of the CdSTe Interlayer in CdS/CdTe Solar Cells Through Modeling and Simulations, Department of Electrical, Electronics and Systems Engineering, Faculty of Engineering, University Kebangsaan Malaysia, Bangi 43600, Selangor Malaysia.

CHAPITRE I :
GENERALITES ET RAPPELS
THEORIQUES

I.1 INTRODUCTION

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.

Actuellement, environ de 80%, d'énergie utilisé dans le monde provient des sources non renouvelables limitées et épuisables telle que l'uranium, mais beaucoup plus les gisements de combustibles fossiles comme le pétrole, le gaz et le charbon. Alors que les demandes énergétiques du monde s'élèvent continuellement.

L'inconvénient des énergies non renouvelables est qu'elles sont des sources de disponibilité limitée d'une part, et leur combustion est l'une des causes principales de la pollution de l'environnement et du réchauffement climatique d'autre part. Ainsi, et sur cette base le développement des énergies renouvelables est non polluantes devient un impératif et est donc d'actualité.

La transition vers les énergies renouvelables

L'insécurité énergétique et les enjeux environnementaux ont conduit à un croisement des recherches vers ces énergies pour une stabilité climatique, économique, environnementale et sociale.

Ce chapitre présente quelques notions sur l'énergie en général et les énergies renouvelable et en particulier l'énergie solaire photovoltaïque qui nous intéresse le plus, qui est l'objet de nos recherches de master.

I.2 DEFINITION DE L'ENERGIE

Les scientifiques définissent l'énergie comme « la capacité de produire un travail, c'est-à-dire d'arracher un objet à sa force d'inertie».

D'après le dictionnaire de l'Académie française, énergie vient du grec « energeia », «force en action ».

Pour les scientifiques et les ingénieurs, ce terme désigne la capacité qu'a un corps, un système, de produire un travail susceptible d'entraîner un mouvement, une production de chaleur ou d'ondes électromagnétiques (dont la lumière). En thermodynamique, on distingue deux principales formes d'énergie : le travail et la chaleur.

Pour les physiciens, l'énergie se mesure simplement en Joules ou en ses multiples : Méga, Giga, Téra (soit 1000 gigas) [1].

$$1 \text{ J} = 1 \text{ N.m} = 1 \text{ W.s} [2].$$

I.2.1 Les diverses formes de l'énergie

- Énergie cinétique.
- Énergie de gravitation.
- Énergie élastique.
- Travail.
- Énergie calorifique.
- Énergie électrique.
- Énergie radiative.
- Énergie chimique.
- Énergie nucléaire. [3].

I.2.2 Les caractéristiques des diverses formes de l'énergie

- Énergies diluées ou concentrées.
- La dégradation.
- Le stockage.
- Le transport de l'énergie.
- Les réserves [3].

I.3 LES TYPES DE L'ENERGIE

I.3.1 Les énergies non renouvelables

Une énergie non renouvelable est une source d'énergie qui ne se renouvelle pas assez rapidement à l'échelle humaine par opposition aux énergies renouvelables [4]

I.3.2 Les énergies renouvelables

L'énergie renouvelables est une énergie de source qui peut se renouveler rapidement à l'échelle humaine ou ne s'épuise jamais. Les énergies renouvelables n'engendrent pas de déchets ni d'émissions polluantes de manières directes [5].

I.3.2.1 L'énergie éolienne

Cette énergie est due à la force exercée par le vent sur les pales d'une hélice. Cette hélice est montée sur un arbre qui peut être relié soit à des systèmes mécaniques qui serve à moudre le grain ou à pomper l'eau, soit à un générateur qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique.

Il existe deux catégories d'éoliennes :

- Les aérogénérateurs domestiques, de faible puissance qui fournissent en électricité des sites isolés, pour l'industrie.
- Les éoliennes de grandes puissances raccordées aux réseaux nationaux [5].

A. Avantages

- Pas de pollution.

- Source d'énergie gratuite et indépendante.
- Source d'énergie pour les endroits difficiles [5].

B. Inconvénients

- - Energie difficiles à emmagasinée.
- Sites terrestres limités [5].
- Bruits des grandes éoliennes.

I.3.2.2 La Biomasse

La biomasse désigne l'ensemble des matières organiques pouvant se transformer en énergie. On entend par matière organique aussi bien les matières d'origine végétale (résidus alimentaires, bois, feuilles) que celles d'origine animale (cadavres d'animaux, êtres vivants du sol). Il existe trois formes de biomasse présentant des caractéristiques physiques très variées :

- Les solides (ex : paille, copeaux, bûches).
- Les liquides (ex : huiles végétales, bio-alcools).
- Les gaz [6].

I.3.2.3 L'énergie géothermique

La géothermie, du grec géo (la terre) et thermos (la chaleur) est un mot qui désigne à la fois la science qui étudie les phénomènes thermiques internes du globe terrestre, et la technologie qui vise à l'exploiter.

Pour capter l'énergie géothermique, on fait circuler un fluide dans les profondeurs de la Terre. Ce fluide peut être celui d'une nappe d'eau chaude captive naturelle, ou de l'eau injectée sous pression pour fracturer une roche chaude et imperméable. Dans les deux cas, le fluide se réchauffe et remonte chargé de calories (énergie thermique). Ces calories sont utilisées directement ou converties partiellement en électricité [7].

A. Avantages

- La géothermie de profondeur ne dépend pas des conditions atmosphériques (soleil, pluie, vent).
- C'est une source d'énergie quasi-connue.
- Les gisements géothermiques ont une durée de vie de plusieurs dizaines d'années (30 à 80 ans en moyenne) [7].

B. Inconvénients

- Les sites de forages sont limités en fonction du type de roche (roche chaude facile à percer).
- Risque de rejets gazeux nocifs ou toxiques.
- Risque de réchauffement du site de forage.
- Certaines pratiques de forages augmentent les risques sismiques.
- Certaines technologies utilisent des produits chimiques à fort impact environnemental [7].

I.3.2.4 L'énergie hydraulique (ou hydrau-électricité)

Cette énergie est produite par une chute d'eau à deux niveaux, l'un étant plus élevé que l'autre. Le courant d'eau fait tourner les turbines dont l'énergie alimente les générateurs électriques.

A. Avantages

- source d'énergie renouvelable.
- production d'énergie locale.
- contrôle des inondations.
- création d'une réserve d'eau pour diverses utilisations.

B. Inconvénients

- bloque les passes à poissons.
- modifie l'habitat aquatique (ex : débit, température).
- dégrade la qualité d'eau (accumulation de contaminants) [8].

I.3.2.5 L'énergie solaire

L'énergie solaire est la source d'énergie ultime pour l'humanité [9], la moins chère et la plus propre qui soit facilement disponible dans ce monde [10],

Le rayonnement solaire capable de produire de la chaleur, causant des réactions chimiques ou générant de l'électricité. Le montant total de l'énergie incidente sur terre est largement supérieur aux besoins énergétiques actuels et prévus du monde. Au XXI^e siècle l'énergie solaire est une source d'énergie intéressante en raison de son approvisionnement inépuisable et de son caractère non polluant [11].

I.4 L'ENERGIE SOLAIRE

I.4.1 L'origine de l'énergie solaire

Pour exploiter l'énergie du soleil de manière efficace, il est nécessaire de comprendre sa forme et sa nature.

Le soleil est une sphère de matière gazeuse intensément chaude avec un diamètre de $(1.39 \times 10^9 \text{ m})$ [13]. Approximativement, la masse du soleil est constituée de 74% d'hydrogène et 25% d'hélium. La température à sa surface avoisine 5500 K. L'énergie radiative du soleil provient d'une réaction de fusion nucléaire dans le soleil. A chaque seconde, environ 6×10^{11} kg d'hydrogène sont convertis en hélium avec un défaut de masse de 4×10^3 kg. La masse perdue est convertie, selon la relation d'Einstein ($E=mc^2$), en énergie d'une valeur de 4×10^{20} J. Cette énergie est émise, à l'origine, comme une radiation électromagnétique dans la région allant de l'ultraviolet à l'infrarouge [$0.2 \mu\text{m}$, $3 \mu\text{m}$]

Toutes les radiations électromagnétiques se composent d'un élément essentiel qui s'appelle le photon [12].

I.4.2 Le rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est l'ensemble des ondes électromagnétiques émises par le soleil avec une intensité de 1367W/m² à la surface supérieure de l'atmosphère (constante solaire), constitue un spectre continu allant de l'ultraviolet à l'infrarouge en passant par le visible où il renferme le maximum d'énergie [14]. Le rayonnement solaire est constitué de photons transportant chacun une énergie E_{ph} qui répond, elle-même, à la relation suivante :

$$E_{ph} = h \frac{c}{\lambda}$$

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

En traversant l'atmosphère, une partie du spectre est absorbée par les différents gaz (O₃, H₂O et CO₂ notamment) ou particules présents. Ainsi, l'énergie solaire disponible en surface de la Terre est réduite [15].

Des dispositifs photovoltaïques (les cellules solaires) destinés à convertir l'énergie du soleil en électricité. Les cellules solaires sont réalisées à base de matériaux semi-conducteurs, il est important que les semi-conducteurs choisis dans l'application solaire possèdent de bonnes propriétés électriques telles qu'une mobilité élevée et une longueur de diffusion importante [12].

Pour pouvoir comparer les performances des cellules solaires et qualifier les différents spectres solaires utilisés, la notion d'air mass (**AM**), ou « masse atmosphérique » a été créée. Le nombre de masse (**AM**) est défini par l'équation :

$$AM = \frac{1}{\cos \theta}$$

Où θ est l'angle que fait le soleil avec son zénith figure (I.1).

Afin de standardiser les méthodes de mesure, un spectre a été défini comme référence internationale, est défini par **IEC-60904** de « International Electrotechnical Commission ». Il s'agit du spectre AM1.5G (Global), Correspondant à une masse d'air de 1.5 et un angle de 48.2° Global signifie que le spectre tient compte du rayonnement direct ainsi que du rayonnement diffus. Les spectres extra-terrestres (**AM0**) et de référence avec masse d'air (**AM1.5**) sont comparés dans la figure (I.2) [16].

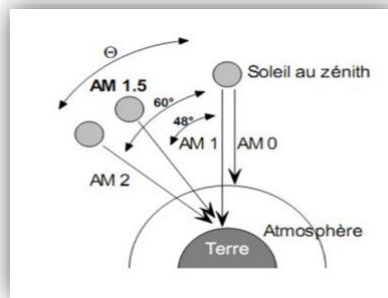


Figure I.1 : Schéma descriptif de l'incidence solaire sur la terre [16].

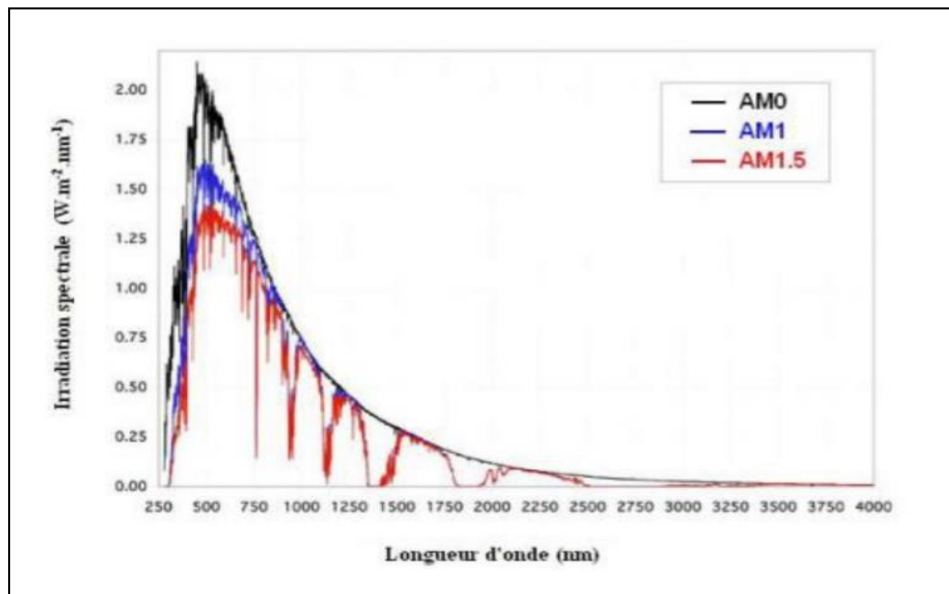


Figure I.2: Rayonnement AM0, AM1 ET AM1.5 [15].

Le rayonnement solaire qui arrive finalement au sol avec une intensité réduite ($1000W/m^2$ au niveau de la mer) avec une bande spectrale répartie de la manière suivante : UV=5%, Visible=40%, IR=55% à cause des différentes atténuations atmosphériques et il se subdivise en trois composantes : diffuse, directe et réfléchi par le sol figure (I.3) [15].

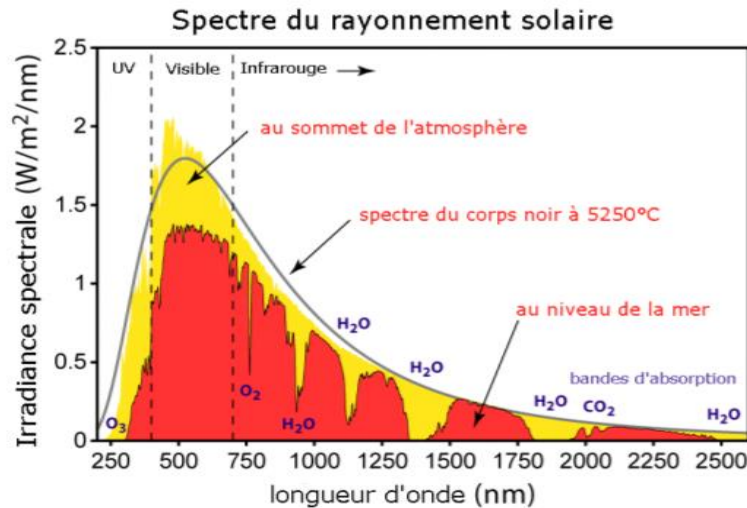


Figure I.3 : Le rayonnement solaire [15].

Normalisation

L'irradiation solaire dépend généralement de :

- L'inclination et le positionnement de la surface.
- La distance angulaire du lieu par rapport au soleil.
- Les conditions météorologiques.
- Le moment considéré dans la journée ainsi que la saison de l'année.
- La composition et la nature des couches nuageuses.

La combinaison de tous ces paramètres produit la variabilité dans l'espace et le temps de l'irradiation journalière [17].

I.4.3 Les trois voix de l'énergie solaire

Les trois façons d'utiliser "directement" l'énergie solaire :

I.4.3.1 L'énergie solaire thermodynamique

La concentration du rayonnement solaire sur un seul foyer permet d'atteindre des températures élevées. Ce principe, connu depuis l'Antiquité, utilise des capteurs paraboliques, cylindro- paraboliques, ou des centrales dites "à tour", pour lesquelles une multitude d'héliostats orientables concentrent l'énergie solaire sur une chaudière unique située sur une tour. Il permet le réchauffement du fluide caloporteur, en général de l'huile ou des sels fondus. [18].

I.4.3.2 L'énergie solaire thermique

L'énergie solaire thermique connaît une expansion rapide pour des utilisations à petite échelle et individuelles. Elle est récupérée dans des installations prévues pour concentrer l'effet thermique des radiations solaires (panneaux collecteurs thermiques). Cette chaleur issue des panneaux solaires peut être utilisée notamment pour l'eau chaude sanitaire individuelle et collective.

- Dans l'agriculture (serres, séchoirs, fourrage, etc.).
- Le chauffage des bâtiments et de l'habitat. Cette forme d'énergie gagne du terrain en raison de sa rentabilité et de sa facilité d'installation et d'entretien [19].

I.4.3.3 L'énergie photovoltaïque

La PV est la technologie qui génère une puissance électrique en courant continu (CC) mesurée en watts (W) ou en kilowatts (kW) à partir de matériaux semi-conducteurs lorsqu'ils sont éclairés par des photons. Tant que la lumière brille sur la cellule solaire (le nom de l'élément PV individuel), il génère de l'énergie électrique. Lorsque la lumière s'arrête, l'électricité s'arrête. Les cellules solaires n'ont jamais besoin d'être rechargé comme une batterie. Certains sont en fonctionnement extérieur continu sur Terre ou dans l'espace depuis plus de 30 ans [28].

I.4.4 Le potentiel solaire en Algérie

- L'Algérie est parmi les pays les mieux dotés en ressources solaires au monde [20].
- L'Algérie reçoit près de 3000 heures d'ensoleillement par an et une irradiation variant entre 4et7kWh/m²/jour [20].

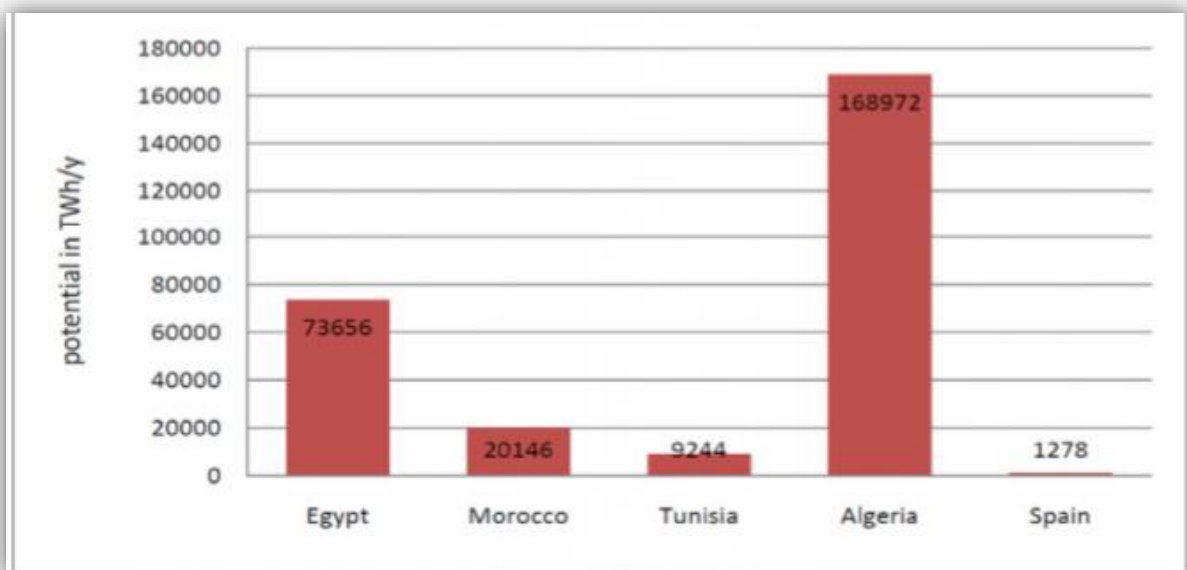


Figure I.4 : Potentiel solaire à concentration (TWh/an) [20].

I.4.5 : L'énergie photovoltaïque dans l'Algérie

L'Algérie a adoptée d'une manière volontaire un ambitieux programme de développement des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique qui vise à produire une capacité d'origine renouvelable de 12 000 Mégawatt, ce qui couvrira 40% de la consommation énergétique du pays à l'horizon 2030. Ce programme pris en charge en 2014 d'une centrale photovoltaïque de 1.1 Mégawatts à Ghardaïa utilisant les 04 technologies citées :

- Silicium monocristallin (352 kWp)
- Silicium multicristallin (352 kWp)
- Couches Minces (100 kWp)
- Amorphe (100 kWp)

En plus de central hybride gaz solaire de Hassi R'mel d'une capacité de 250 MW dont 25 MW en solaire déjà opérationnelle depuis juin 2011. Une vingtaine de centrales solaires d'une puissance globale de près de 400 MW sont installées en 2014. D'autres centrales photovoltaïques, éoliennes et solaires à concentration seront installées progressivement d'ici 2030 pour atteindre les objectifs fixés dans le programme. Près de 2000 kits solaires photovoltaïques pour l'éclairage et 200 pompes fonctionnant avec l'énergie solaire photovoltaïque pour le pompage d'eau potable et d'irrigation ont pu être installés à ce jour dans les zones les plus reculées de notre pays (Illizi, Tamanrasset, Adrar).



Figure I.5 : Les installations PV dans les cités isolés dans l'Algérie [21].

Le premier groupe privé algérien spécialisé dans l'électronique Condor dont le siège social est basé à Bordj Bou Arréridj, produira des panneaux solaires photovoltaïques de 70W et

284W pour l'éclairage public, le pompage solaire, l'usage domestique et l'électrification rurale [21].

I.4.6 : Limitation de l'énergie solaire

L'énergie solaire est disponible dans la plupart des régions du monde, mais l'énergie solaire présente certaines limites [1] :

- Le stockage d'énergie est essentiel [22].
- La direction des rayons change continuellement [22].
- Coût initial élevé [22].

I.4.7 avantage de l'énergie solaire

- Ressource disponible partout [23].
- Energie renouvelable propre [23].
- Préserve les ressources naturelles [23].
- Absence de bruit [23].

I.5 L'ENERGIE PHOTOVOLTAÏQUE

I.5.1 Rappel historique de la technologie photovoltaïque

ANNÉE	DÉVELOPPEMENT
1839	Antoine-César Becquerel, un physicien français, découvre l'effet photovoltaïque. Sur ses expériences, il a découvert qu'une tension était produite lorsqu'une électrode solide dans une solution d'électrolyte a été exposée à la lumière [24].
1877	W.G. Adams et R.E. Day ont observé l'effet photovoltaïque dans le sélénium solide. Il a construit la première cellule au sélénium et a publié "The action of light on sélénium" [24].
1883	Charles Fritz a construit ce que beaucoup considèrent comme la première véritable cellule photovoltaïque. Il a recouvert le sélénium semi-conducteur d'une couche d'or extrêmement fine. Sa cellule photovoltaïque avait un rendement inférieur à 1 % [24].
1904	Albert Einstein publie un article sur l'effet photoélectrique [24].
1927	Deux nouveaux types de cellule photovoltaïque ont été développés, utilisant le cuivre et le semi-conducteur l'oxyde de cuivre. Cet appareil avait également une efficacité inférieure à 1 %. Les deux dispositifs à base d'oxyde de sélénium et de cuivre ont été utilisés dans des applications telles que les compteurs de lumière pour photographie [24].

1941	Russell Ohl développe la cellule photovoltaïque en silicium. Le raffinement de la cellule photovoltaïque en silicium a permis aux chercheurs d'obtenir un rendement de 6 % en soleil en 1954 [24].
1954	Les laboratoires Bell de 1954 ont obtenu un rendement de 4 % dans une cellule photovoltaïque en silicium. Ils ont rapidement atteint 6 %, puis 11 % [24].
1958	Les cellules PV ont été utilisées pour la première fois dans l'espace à bord du satellite Vanguard [24].
1971	Création de la société Solarpower pour des applications terrestres du PV [25].
1990	L'Allemagne lance un programme appelé « 100 000 » toitures solaires [25].

Tableau I.1 : Bref historique de la technologie photovoltaïque [24, 25].

I.5.2 L'effet photovoltaïque

Le terme « photovoltaïque » souvent abrégé par le sigle « PV », a été formé à partir des mots « photo » qui est un mot grec signifiant lumière et « Volta » qui est le nom du physicien italien Alessandro Volta [30].

Découvert en 1839, par le physicien français Antoine Becquerel. Il correspond à l'apparition d'une tension aux bornes d'un matériau semi-conducteur exposé à la lumière [29].

L'effet photovoltaïque est la conversion directe de l'énergie lumineuse des rayons solaires (photon) en électricité. Il utilise pour se faire des modules photovoltaïques composés de cellules. Ces cellules photovoltaïques sont constituées de semi-conducteurs à base de silicium (Si), de germanium (Ge), de sélénium (Se), etc. Le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques, car il est très abondant dans la nature [30].

I.5.3 Le principe de la conversion photovoltaïque

La conversion de l'énergie photovoltaïque est la production directe d'énergie électrique sous forme de courant et de tension provenant de l'énergie électromagnétique (c.-à-d. la lumière, y compris l'infrarouge, le visible et l'ultraviolet), les quatre étapes de base nécessaires à la conversion d'énergie photovoltaïque sont:

- 1) un processus d'absorption de lumière qui provoque une transition dans un matériau (l'absorbeur) d'un état fondamental à un état excité.
- 2) la conversion de l'état excité en (au moins) un négatif libre et une paire de porteurs de charge positive libres.
- 3) un mécanisme de transport discriminant, qui fait bouger les porteurs de charge négative libres résultant dans une direction (vers un contact que nous appellerons la

cathode) et le résultat libres porteurs de charge positive pour se déplacer dans une autre direction (vers un contact que nous appellerons l'anode).

- 4) Les porteurs de charges négatives photos générées énergétiques qui arrivent à la cathode donnent des électrons qui se déplacent à travers un chemin externe (un circuit électrique). En parcourant ce chemin, ils perdent leur énergie en faisant quelque chose d'utile à une charge électrique et enfin ils retournent à l'anode de cellule. A l'anode, chacun des électrons de retour achève la quatrième étape de conversion d'énergie photovoltaïque, qui ferme le cercle en

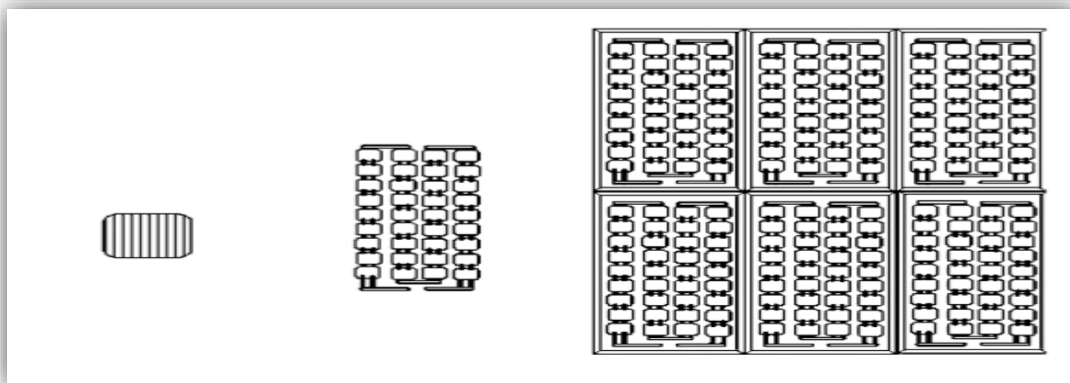
se combinant avec un porteur de charge positive arrivant, ramenant ainsi l'absorbeur à l'état fondamental [26].

I.5.4 Un panneau solaire

Un panneau ou module solaire photovoltaïque est constitué de cellules similaires assemblées en série ou en parallèle afin d'obtenir une tension ou un courant de sore donné. Les cellules solaires connectées sont ensuite stratifiées généralement avec de l'EVA (Éthylène Vinyle Acétate) entre le verre à l'avant, pour laisser entrer la lumière, et généralement une feuille de tedlar à l'arrière avant d'être encadrées d'aluminium.

Les cellules solaires sont associées ensemble pour fabriquer un panneau solaire, et les panneaux solaires sont associés ensemble pour former un module solaire figure (I.6).

Les panneaux solaires peuvent être associés en série ou en parallèle selon les besoins. Dans le cas où ils sont associés en parallèle, chacun d'eux doit être équipé d'une diode pour éviter le courant inverse dans l'un des panneaux solaires figure (I.7) [27].



1)

2)

3)

Figure I.6 : 1) Cellule solaire, 2) panneau solaire, 3) module solaire [27].

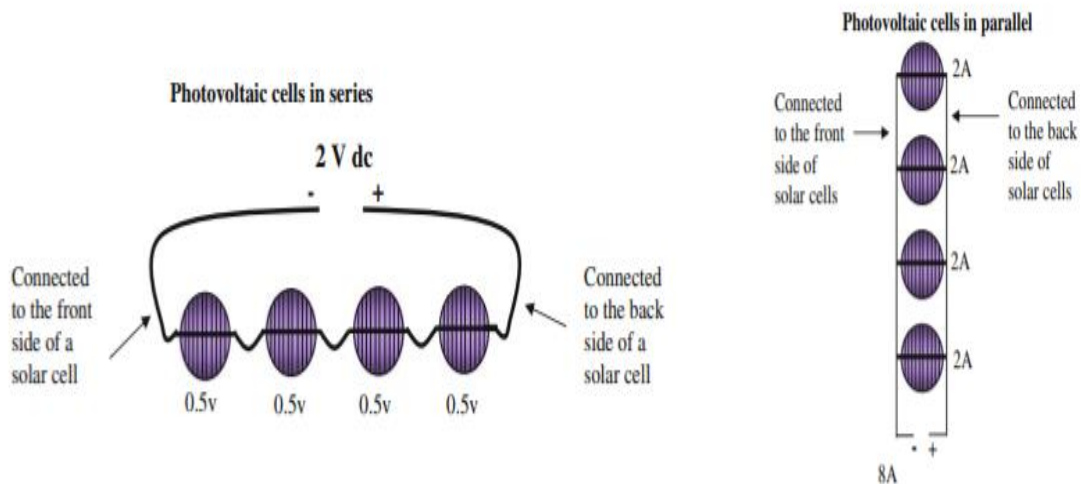


Figure I.7 : cellule photovoltaïque : 1) en série, 2) en parallèle [27].

I.5.5 Cellule solaire

La cellule photovoltaïque est un composant semi-conducteur capable de transformer directement l'énergie solaire en énergie électrique, cette transformation d'énergie se fait via la création et le déplacement de charges électriques positives et négatives dans le matériau semi-conducteur sous l'effet de la lumière [17].

I.5.6 La structure d'une cellule photovoltaïque

La structure la plus simple d'une cellule solaire, représentée sur la figure (I.3), comporte une jonction entre deux zones dopées différemment (p-n) d'un même matériau (homo jonction) ou entre deux matériaux différents (hétérojonction), la moins épaisse étant soumise au flux lumineux. Chacune des régions est reliée à une électrode métallique au moyen d'un contact ohmique de faible résistance [16].

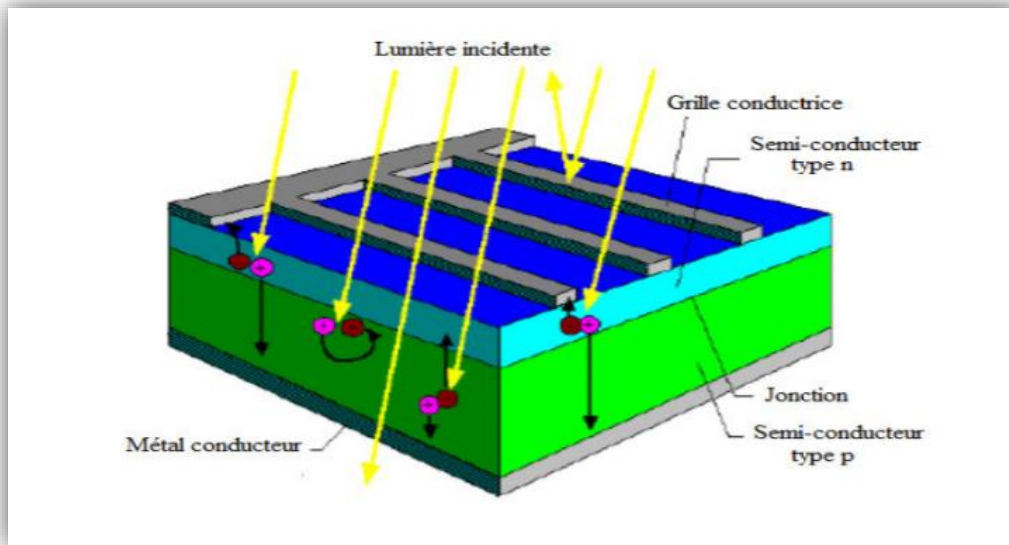


Figure I.8 : Structure la plus simple d'une cellule solaire [16].

I.5.7 Description du principe de fonctionnement d'une cellule solaire

Lorsque les photons incidents heurtent la surface du matériau photovoltaïque, il y aura une création de porteurs dans les différentes zones n, p et la zone de charge d'espace. Le comportement des photo-porteurs dépendra de la région:

- Au niveau de la zone n ou p, les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge seront renvoyés par un champ électrique soit dans la zone p pour les trous ou bien dans la zone n pour les électrons. Leur accumulation permettra de créer un photo-courant de diffusion.
- Au niveau de la zone de charge, les paires électron/trou résultantes des photons incidents seront séparées par le champ électrique, d'où les électrons vont se diriger vers la région n et les trous vers la région p. Ceci permettra de créer un photo-courant de génération [17].

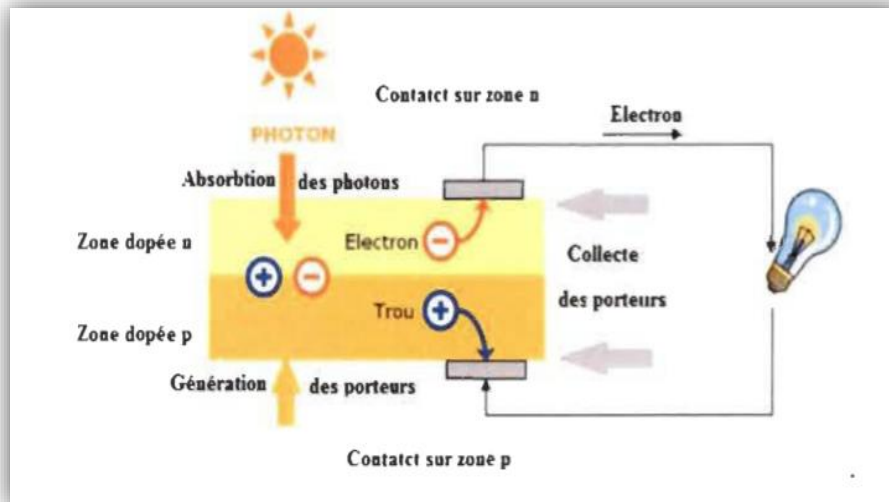


Figure I.9 : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [17].

I.5.8 Les différentes caractéristiques d'une cellule solaire

I.5.8.1 Courant de court-circuit J_{cc}

Le courant de court-circuit est le courant débité par la cellule sous éclairnement en court circuitant le sore. C'est-à-dire que :

$$J_{cc} = J(V = 0)$$

Pour une cellule solaire idéale le courant de court-circuit est égal au courant photovoltaïque I_{ph} .

I.5.8.2 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'éclairnement de la cellule. Pour une cellule solaire idéale la tension de circuit ouvert est donnée (obtenue pour $I=0$):

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

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

T : température absolue.

q : constante de charge d'électron.

K: constante de Boltzmann.

I_{ph} : courant photonique.

I_s : courant de saturation [21].

I.5.8.3 Puissance maximale P_m

La puissance débitée par une cellule solaire est maximale quand le produit $V.I$ 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 [21].

$$P_m = I_m \cdot V_m$$

I.5.8.4 Facteur de forme FF

On appelle facteur de forme, le rapport de la puissance maximale au produit $J_{cc} \cdot V_{co}$.

Le facteur de forme indique la qualité de cellule [21].

$$FF = \frac{P_m}{V_{co} \cdot J_{cc}}$$

I.5.8.5. 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.

$$\eta = \frac{P_m}{P_i} = \frac{FF \cdot J_{cc} \cdot V_{co}}{E \cdot S}$$

Où : P_i est la puissance incidente du rayonnement solaire au sol [21].

I.5.8.6. L'efficacité quantique externe EQE

Le rendement quantique, noté 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:

$$EQE = \frac{J_{sc}(\lambda)}{\phi(\lambda)} \cdot \frac{E_{ph}(\lambda)}{e} = \frac{hc}{e} \cdot \frac{J_{sc}}{\phi(\lambda)}$$

Où :

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

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

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 [21].

I.5.9 les différentes structures des cellules photovoltaïques

Les Structures des Cellules	
Structure homojonction	<p>Un seul matériau à modifier de sorte qu'un côté est de type p et l'autre côté est de type n.</p> <p>Une jonction PN est située de telle sorte que la quantité maximale de la lumière soit absorbée près de lui</p>
Structure hétérojonction	<p>La jonction est formée avec le contact entre deux semi-conducteurs différents.</p> <p>Couche supérieure - avec une bande interdite élevée (haute), sélectionnée pour sa transparence à la lumière.</p> <p>Couche inférieure - avec une faible largeur de bande interdite qui absorbe facilement la lumière.</p>
Structure p-i-n et n-i-p	<p>Un sandwich à trois couches est créé.</p> <p>Il contient une couche intrinsèque dans le milieu entre la couche de type n et la couche de type p.</p> <p>La lumière génère des électrons et des trous libres dans la région intrinsèque.</p>

Tableau I.2 : les différentes structures des cellules photovoltaïques disponibles dans la littérature [31].

I.5.10 Les différentes générations des cellules photovoltaïques

Matériaux utilisés	
La première génération	Les wafers de silicium monocristal (c -Si) ou bien multicristallin (mc-Si).
La deuxième génération Couches minces	Le silicium amorphe (a-Si). Le silicium microcristallin ($\mu\text{c-Si}$). Le tellure de cadmium (CdTe). Le Cuivre-gallium-indium-diséléniure (CIGS) et leurs alliages.
La troisième génération	Cellules solaires à base des nano-cristaux. Cellules solaires à base des concentrateurs (CPV). Cellules photo-électrochimiques (PEC) Cellules solaires organiques. Cellules solaires à base de colorant sensibilisé (Dye-sensitized) DSSC.
La quatrième génération	Hybride - cristaux inorganiques dans une matrice de polymère.

Tableau I.3 : Les différentes générations des cellules photovoltaïques [31].

Bibliographie

- [1]. Boubou-Bouziani.N, Le Défi énergétique : l'autre aspect de la problématique de l'eau, Ecole national polytechnique d'Oran, Larhyss journal, ISSN 1112-3680, n°22, juin 2015, 111/112p.
- [2].Fondation Alcen, l'énergie sous toutes ses formes, disponible sur « www.connaissancedesenergies.org », page consultée le 18/05/2020 à 18.30.
- [3].L'énergie, qu'est-ce que l'énergie? Les diverses formes d'énergie, caractéristique des diverses énergies, Cea jeunes, ISSN 1637-5408, 2002.
- [4].Les énergies non renouvelables utilisés pour produire de l'électricité, disponible sur « www.ac-nancy.metz.fr », page consultée le 19/07/2020 à 16.45.
- [5].Lefkir.Z, Zerroug.M, Etude simulée des couches minces de deux cellules solaires en utilisant le logiciel Scaps, Mémoire de Master, Université de Mohamed el Bachir el-Ibrahimi, Bordj Bou Arreridj, 2012, 6/7p.
- [6]. « www.connaissancedesenergies.org », Page consultée le 04/07/2020 à 13 :20.
- [7].Bachiri.A, Meloudj.M, Etude d'une installation de chauffage géothermique, Mémoire Master, Université de Mohamed Boudiaf, 2017-2018, 13p .
- [8].Khelfat.L, Maataoui.L, Etude et Simulation d'une éolienne à base d'une Machine Asynchrone Doublement Alimentée, Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master, Université de Badji Mokhtar (Annaba) 2017, 3p.
- [9].Michael E Mackay, Solar energy an introduction, Oxford University Press, United Kingdom 2015, ISBN 978-0-19-965211-2.
- [10].Mohd Yusof HJ Othman, Faridah Husain, Kamaruzzman Sopian, Baharuddin Yatim et Hafidz Ruslan, Performance study of Air-based photovoltaic-thermal (PV/T) collector with different designs of heat exchanger, Sains Malaysiana 42(9) (2013): 1319–1325
- [11].Hai Abdelhakim, Hammadou Souhail, Etude de corrélation entre l'irradiation solaire et factures météorologiques, Mémoire de master, Université Abderrahmane Mira (Bejaïa), (2012/2013), 3p.
- [12].Abderrezek Mahfoud, Modélisation des cellules solaire tandem à couche mince et à haut rendement, Thèse de doctorat, université (Sétif-1), 2015, 10p.
- [13].A. Mc. Evoy, T, Markvart and L, Castanen, practical handbook of photovoltaics fundamentals and applications, Second Edition, Elsevier Ltd, 2012, ISBN: 978-0-12-3859334-1.

- [14].Chadel Asma, Optimisation et simulation numérique du profil de la couche absorbante et des différentes couches des cellules photovoltaïques à base de CIGS, Université Abou_Bekr Belkaid (Tlemcen), 15/16p.
- [15].Hafsia Haloui, Contribution à la conception et modélisation d'un capteur solaire hybride photovoltaïque thermique à base de cellules solaires en couches mince, Thèse de doctorat, Université d'Oum El Bouagui, 4/5p.
- [16].Naïma Touafek, Contribution à l'étude d'une cellule solaire en couches minces à base de $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$, Université Des Frères Mentouri (Constantin), 2015, 8p.
- [17].Mohamed Mimoune, Etude des captures photovoltaïques basés sur les nanotechnologies, Mémoire de master, Université de Québec à Trois-Rivières, Mars 2016, 7/9/15p.
- [18].La Filière Photovoltaïque, Les trois voies de l'énergie solaire, CLEFS CEA-N°50/51-HIVER 2004-2005, 112p.
- [19].Mekki Mounira, Récupération des déperditions d'énergie dans les complexes industriels et leur conversion en énergie électrique exploitable, thèse de doctorat, université Badji Mokhtar (Annaba), 2014,17p.
- [20].El Amin Kouadri Boudjelthia, Energies Renouvelables: un moteur principale du développement durable en Algérie, Direction Générale de la Recherche Scientifique et du Développement Technologique, Centre de Développement des Energies Renouvelables.
- [21].Aili Amine, Benhabireche Abdelhak, Etude numérique des cellules photovoltaïques à hétérojonction, Mémoire de Master, université des sciences et de la technologie houari Boumediene, 2016,7p.
- [22].Sai Manoj Rompicherla, Solar Energy: The Future, International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT) - Volume4 Issue6- June 2013, (Department Of Electrical And Electronics Engineering, K.L.University Vaddeswaram, Vijayawada, Pin: 520001, Andhra Pradesh), 2517p.
- [23].La fabuleuse énergie du soleil, l'énergie solaire disponible sur « www.LePanneauSolaire.net », page Consultée le 28 juin à 19 :45h.
- [24].Tom Penick, Bille Louk, photovoltaic power generation, Le 4 Décembre 1998,2p, EE333T.
- [25].Filière Photovoltaïque Française: Bilan, Perspectives et Stratégie, Étude réalisée pour le compte de l'ADEME par : le groupement I Care / ECube / In Numeri, Septembre 2015, 126p.
- [26].Stephen Fonash, Solar cell device physics, Second edition, Elsevier, 2010, 1/2p, ISBN: 978-0-12-374774-7.
- [27].Ramchandra Pode, Boucar Diouf, Solar lighting, Editions springer, 37/38p, London (2011), ISBN 978-1-4471-2133-6.

[28].Antonio Luque, Steven Hegedus, Handbook of Photovoltaic science and engineering, Second edition, John Wiley and Sons Ltd, United Kingdom, 2011, 4p.

[29].Bendenia Chahrazed, Etude et Simulation des propriétés électriques et optiques des cellules photovoltaïques organiques multicouches, université Abdelhamid Ibn Badis(Mostaganem), 2019, 9p.

[30].Benotman Sara, Moualek Farida, Etude et simulation des systèmes photovoltaïques connectés à un microgrid, Mémoire de Master, université Abou_Bekr Belkaid (Tlemcen), 2015/2016, 7p.

[31].Bensmain Asmaa, Investigation de l'ingénierie de bandes des cellules solaire à hétérojonction a_Si : H/cSi : modélisation et simulation numérique, thèse de doctorat, Université Djilali Liabes (Sidi Bel Abbas), 2017/2018, 57p

CHAPITRE II :
MATERIAU SEMI-CONDUCTEUR
ETUDIE

II.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre on va voir deux parties :

La première est consacrée pour les généralités sur les semi-conducteurs, et la deuxième pour les matériaux semi-conducteurs objet de notre étude à savoir les matériaux à base de cadmium.

II.2 LES MATERIAUX SEMI-CONDUCTEURS

Ce sont des corps dont la résistivité est intermédiaire entre celle des conducteurs et celle des isolants, ils sont caractérisés par une bande interdite entre la bande de valence (BV) et la bande de conduction (BC) et une conductivité électrique moyenne :

- Ils se comportent comme des métaux conducteurs à haute température, comme des isolants à basse température.
- A $T=0$ K la bande de valence est complètement pleine et la bande de conduction est complètement vide.
- Quand la température augmente, certains électrons de la bande de valence sautent dans la bande de conduction et laisse des trous dans la bande de valence alors les électrons et les trous établissent une conductivité électrique $\neq 0$ [1].
- Voir figure (II .1).

II.2.1 Gap direct et indirect

II.2.1.1 Gap direct

Un semi-conducteur est 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 [2].

II.2.1.2 Gap indirect

Un semi conducteur est 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 [2].

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 [2].

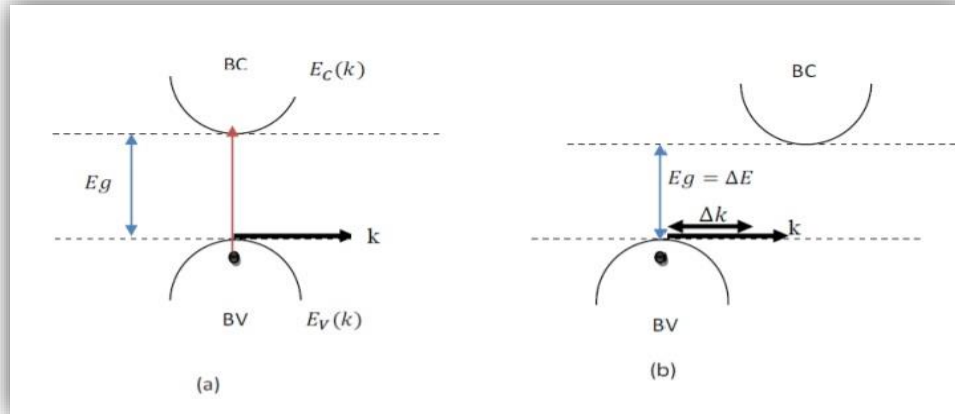


Figure II.1 : (a) semi-conducteur à gap direct, (b) semi-conducteur à gap indirect [2].

II.2.3 Les différents types de semi-conducteurs

Il existe deux types de semi-conducteurs :

- Semi-conducteur intrinsèque (pur).
- Semi-conducteur extrinsèque (dopé par une impureté) [1].

II.2.3.1 Les semi-conducteurs intrinsèques

Ce sont des semi-conducteurs très purs et très bien cristallisés présentant un réseau cristallin parfaitement périodique tout en 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 augmente avec la température. La figure ci-dessous donne un résumé global des semi-conducteurs intrinsèques du point de vue structure de bandes et distributions des charges [3].

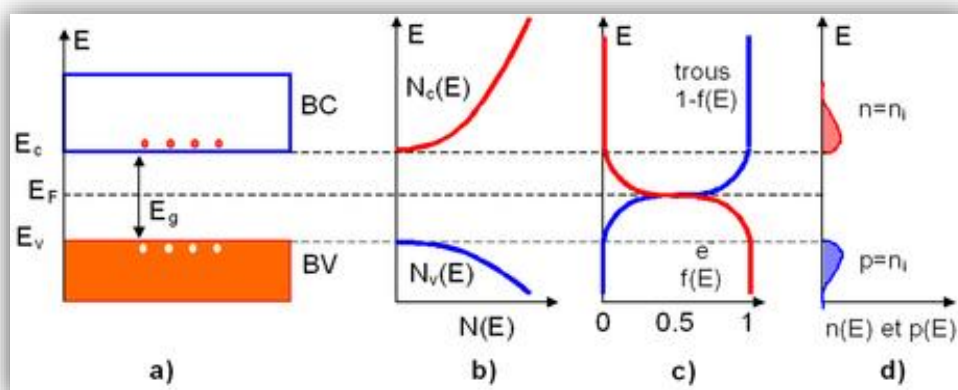


Figure II.2 : Représentation schématique d'un semi-conducteur intrinsèque [3].

II.2.3.2 Les semi-conducteurs extrinsèques

Un semi-conducteur extrinsèque est un semi-conducteur intrinsèque dopé par des impuretés spécifiques, tout en gardant le degré de pureté initial nettement supérieur au taux du dopage, lui conférant des propriétés électriques adaptées aux applications électroniques (diodes, transistors, etc...) et optoélectroniques (émetteurs et récepteurs de lumière, etc...) [3].

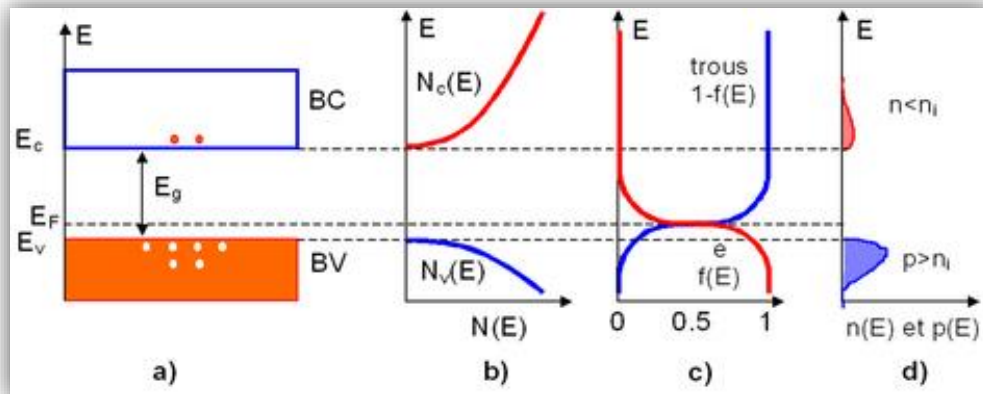


Figure II.3: Représentation schématique d'un semi-conducteur extrinsèque [3].

II.2.3.2. A Les semi-conducteurs extrinsèques dopés N

En introduisant des atomes pentavalents tels que le phosphore P, l'arsenic As (dopage N) dans un cristal, certaines liaisons se casent laissant place à ces extra atomes qui ont cinq électrons de valence, ce qui comble les liaisons en laissant un électron libre dans le cristal peu lié au noyau ($E \approx 0.01\text{eV}$) et passe aisément dans la bande de conduction. Les atomes pentavalents ou donneurs deviennent des ions positifs après le passage des électrons excédentaires dans la bande de conduction [3].

Ceci qui augmente considérablement la conductivité du matériau dopé. Les charges négatives (électrons) sont dits majoritaire [3].

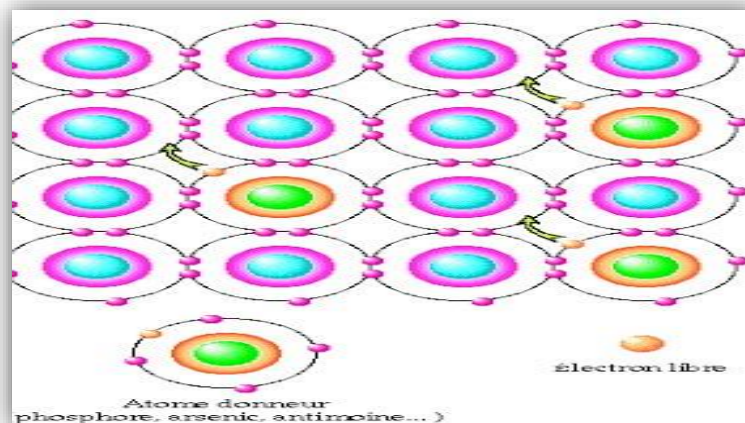


Figure II.4 : Représentation schématique d'un semi-conducteur extrinsèque dopé N [3].

II.2.3.2.B Les semi-conducteurs extrinsèques dopés P

Dans ce cas on introduit des atomes trivalents tels que gallium Ga, l'indium In, le bore B, l'aluminium Al. Il manque, alors, à l'impureté un électron de valence pour assurer les 4 liaisons avec les atomes de silicium voisins. Un faible apport d'énergie (0.05eV) suffit pour qu'un électron d'un silicium voisin soit capté par l'impureté : il y a formation d'un trou peu lié et donc mobile. Les atomes trivalents (accepteurs) deviennent des ions négatifs par capture d'un électron. Compte tenu des taux de dopage, ces trous sont beaucoup plus nombreux que les porteurs intrinsèques du cristal pur.

La conduction extrinsèque de type P (positive) augmente et est assurée par des trous, les trous deviennent majoritaires [3].

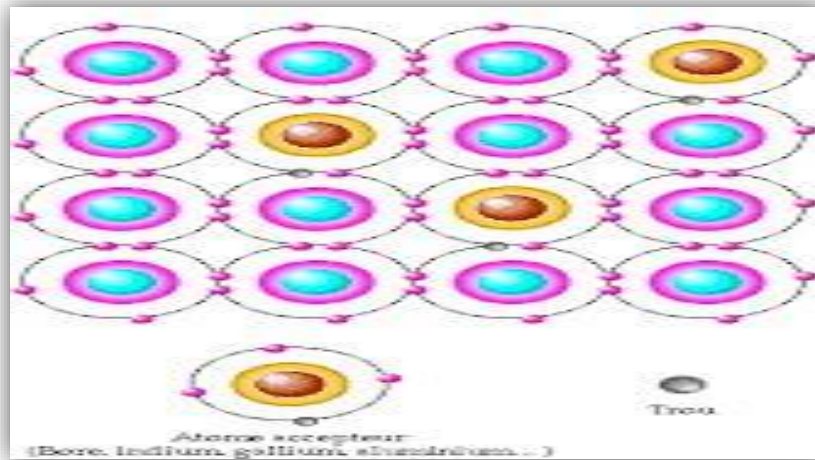


Figure II.5: Représentation schématique d'un semi-conducteur extrinsèque dopé P [3].

II.2.4 Jonction PN

Une jonction PN est constituée de deux zones respectivement dopées P et N et juxtaposées d'une façon que nous supposons abrupte figure (II.8), c.-à-d. que la transition de la zone P à la zone N se fait brusquement. Lorsque l'on assemble les deux régions, la différence de concentration entre les porteurs des régions P et N va provoquer la circulation d'un courant de diffusion tendant à égaliser la concentration en porteurs d'une région à l'autre [4]. Il y aura donc :

- ❖ Diffusion des électrons vers la région P et des trous vers la région N.
- ❖ Recombinaison avec les porteurs majoritaires dans ces régions [5].

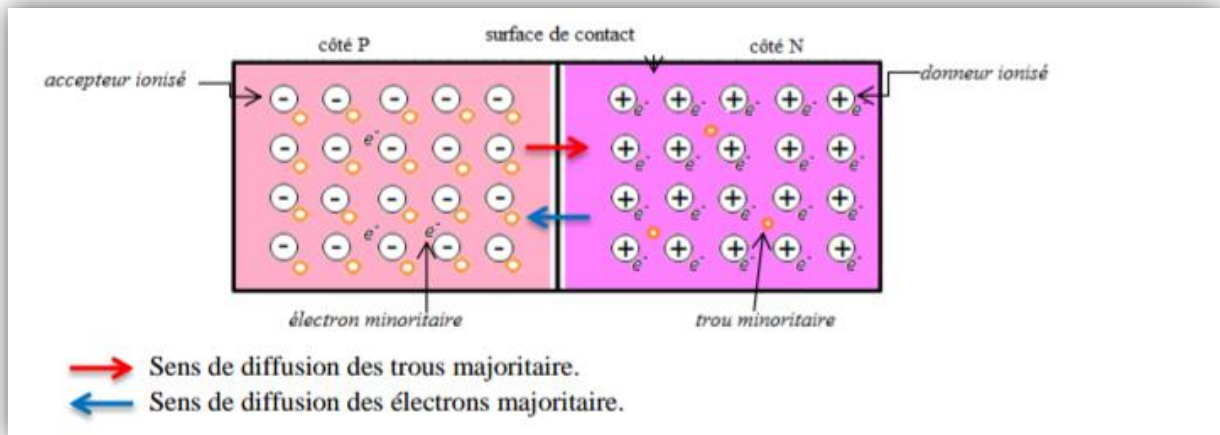


Figure II.6 : Jonction PN [5].

II.2.5 Les différents matériaux semi-conducteurs

La famille des semi-conducteurs est très vaste. Les semi-conducteurs sont classés selon leur composition chimique. Il existe des semi-conducteurs élémentaires tels que le silicium (Si), le germanium (Ge) et l'étain gris (α -Sn), qui appartiennent tous au groupe IV du tableau périodique. Il existe également des semi-conducteurs composites, binaires, ternaires, quaternaires, voire quinaires, constitués de deux, trois, quatre ou cinq espèces chimiques différents respectivement [6].

II.2.6 conductivités électriques des semi-conducteurs

Soit un cristal présentant une densité de n électrons libres de mobilité μ_n et de p trous de mobilité μ_p soumis à champ électrique E . Un élément de surface dS normal au champ électrique est traversé pendant chaque unité de temps par $n v_{dn} dS$ charges négatives et par $p v_{dp} dS$ charges positives. Il en résulte une densité J_c (par unité de surface) de **courant de conduction, (courant de dérive)** [7] :

$$J_c = q p v_{dp} + (-q) n v_{dn} \quad (\text{A/cm}^2)$$

On définit la **conductivité** du matériau σ ($\Omega \cdot \text{cm}$)⁻¹ par la relation :

$$J_c = \sigma E$$

En exprimant les vitesses de dérive v_{dp} et v_{dn} en fonction du champ électrique on trouve :

$$\sigma = q (n\mu_n + p\mu_p)$$

La conductivité σ ($\Omega \cdot \text{cm}$)⁻¹ est l'inverse de la résistivité ρ ($\Omega \cdot \text{cm}$).

Le courant de conduction dans un semi-conducteur est la somme de 2 composantes :

- L'une créée par le déplacement des électrons libres de la BC
- L'autre créée par le déplacement des trous de la BV [7].

II.2.7 Les matériaux semi-conducteurs ternaires

Les alliages ternaires semi-conducteurs des composés II-VI de la forme $AB_{1-x}C_x$ où (1-x) représente la concentration du composé AB et (x) celle du composé AC, ont attiré une attention considérable pour différentes applications optoélectroniques grâce à l'ajustement de plusieurs de leurs paramètres physiques en fonction de la fraction molaire x [8].

II. 3 Le matériau étudié

II.3.1 Composés à base de cadmiums

Les composés semi-conducteurs à base de cadmium comme CdS, CdSe et CdTe permettent d'obtenir des cellules photovoltaïques présentant une efficacité de conversion assez élevée. Le CdTe, l'une des premières filières étudiées, possède une bande interdite optimale de 1,5 eV et un coefficient d'absorption élevé. Il présente une bonne stabilité et le rendement de ses cellules peut atteindre les 16 %. Cette filière a rencontré des difficultés qui ont ralenti son utilisation à grande échelle, à savoir :

- La sensibilité à l'humidité.
- la présence de Cd qui est un matériau toxique le rend relativement inapproprié à une application grand public.
- La difficulté de réaliser des contacts ohmiques stables [9].

II.3.2 Propriétés optoélectroniques et physicochimiques du CdTe

Propriétés	Valeurs
Bande interdite optique CdTe E, (300 K)	1.50 eV ± 0.01 eV
Bande interdite optique en alliage CdTe _{0.95} S _{0.05}	1.47 eV ± 0.01 eV
Dépendance à la température dE / dT	-0.4 meV/K
Affinité électronique X _e	4.28 eV
Coefficient d'absorption (600 nm)	>5 × 10 ⁵ /cm
Indice de réfraction (600 nm)	3
Constante diélectrique statique ε (θ)	9.4, 10.0
constante diélectrique haute fréquence ε (∞)	7.1
μ _e	500–1000 cm ² /V.s [44]
μ _t	50–80 cm ² /V.s
Groupe d'espace	F-43 m
Paramètre de réseau a ₀ (300 K)	6.481 Å°
Longueur de la liaison Cd-Te	2.806 Å°
Densité	6.2 g/cm ³
Chaleur de fusion ΔH ° (300 K)	-24 kcal/mol
Entropie S (300 K)	23 cal/deg-mol
Réaction de sublimation	CdTe → Cd + 1/2Te ₂
Pression de sublimation psat	log (Ps/bar) = -10 650/T (K) 2.56 log (T) + 15.80
Point de fusion	1365 K
Coefficient de dilatation thermique (300 K)	5.9 × 10 ⁻⁶ /K

Tableau II.1 : propriétés optoélectroniques et physicochimiques du CdTe [10].

II.3.3 Configuration électronique des composés CdS, CdTe

Le composant binaire ($A^{II}B^{VI}$) sulfure de cadmium CdS est un matériau constitué de cadmium qui se trouve dans la colonne II et d'un chalcogène de la colonne VI qui pourrait être le soufre (S) [11].

La même chose pour le tellure de cadmium CdTe.

Pour les configurations électroniques des atomes sont résumé dans ce tableau :

	Nombre d'électrons Z	Configuration électronique
Cd	48	[Kr].4d ¹⁰ .5s ²
S	16	[Ne].3s ² .3p ⁴
Te	52	[Kr].4d ¹⁰ .5s ² .5p ⁴

Tableau II.2: La configuration électronique de Cd, S et Te [11].

II.3.4 Structure cristallographique des matériaux semi-conducteurs étudiés

Les semi-conducteurs II-VI cristallisent dans la structure zinc blende et/ou würtzite. Ces deux types de structure sont formés de l'empilement de plans d'anions et de cations successifs de maille hexagonale.

Cette structure permet des liaisons sp^3 de symétrie tétraédrique caractéristiques des liaisons covalentes des semi-conducteurs [8].

II.3.4.A La structure zinc blende

La structure cubique se compose des deux réseaux cubiques faces centrées, formées respectivement des atomes de la colonne II et VI décalés l'un de l'autre du quart d'une diagonale égale $a\sqrt{3}/4$ et le taux de remplissage de cette structure égale 0.34[8].

Cette structure est décrite par un réseau cubique à face centrée et d'un empilement de type ABCABC dans la direction [111] et la base est formée de deux atomes en (000) et (1/4 1/4 1/4) [8].

La maille de bravais contient :

4 atomes du groupe II (Zn, Cd, Hg) dans les coordonnées (0, 0, 0); (0, 1/2, 1/2);(1/2, 0, 1/2); (1/2, 1/2, 0)

et quatre atomes de groupe VI (O, S, Se, Te) 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) [8].

et chaque atome se trouve ainsi au centre d'un tétraèdre régulier dont les sommets sont occupés par un atome de l'autre espèce et chaque atome de (Cd) est entouré de quatre atomes de (Te, Se, S) [12].

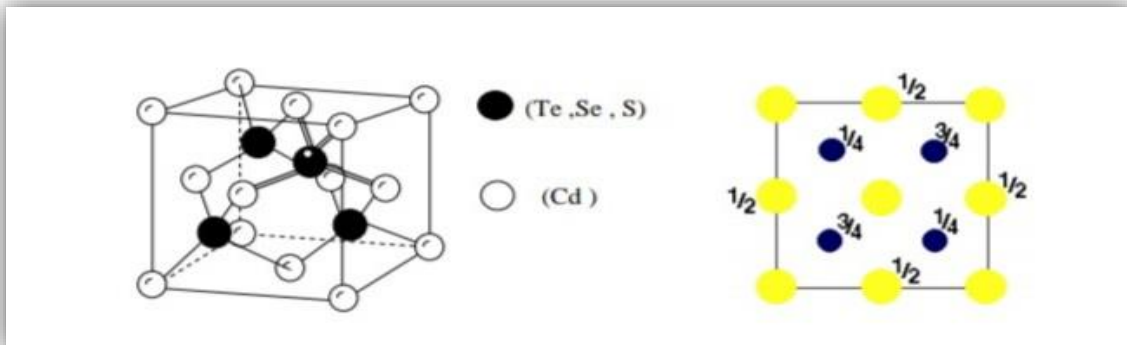


Figure II.7 : la structure cristalline zinc-blende et la projection de la structure sur le plan (001) [12].

II.3.4.B Structure Würtzite (Hexagonal)

La structure hexagonale est constituée de deux réseaux hexagonaux décalés l'un par rapport à l'autre de $3/8$ du paramètre C.

La maille élémentaire est constituée de deux atomes du groupe II occupant les sites (0, 0, 0) et ($2/3$, $1/3$, $1/2$). Par conséquent un atome du type II est entouré de quatre atomes du type VI disposés aux sommets d'un tétraèdre régulier [12].

La structure Würtzite possède un empilement de type ABABAB dans la direction [0001],[12].

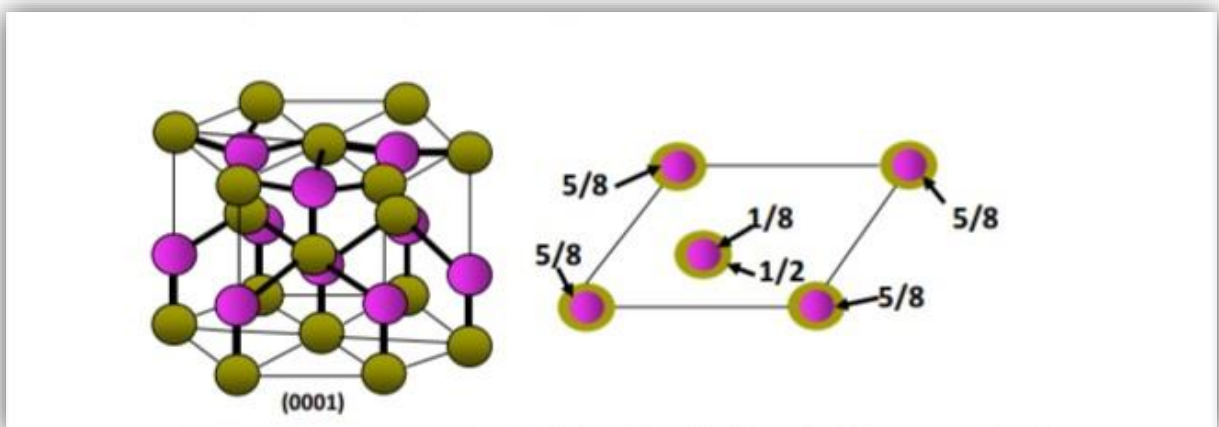


Figure II.8 : la structure cristalline zinc-blende et la projection de la structure sur le plan (0001) [12].

Les valeurs des paramètres du réseau des différents composés sont regroupées dans le tableau :

Composé II-VI	Zinc blende	Würtzite
ZnS	a=5.410Å	a=3.823Å c=6.253Å
CdS	a=5.832Å	a=4.583Å c=7.484Å
CdTe	a=6.479Å	a=4.583Å c=7.484Å

Tableau II.3 : les paramètres des mailles des composés dans la phase zinc blende et Würtzite [12].

II.4 Les cellules photovoltaïques en couches minces à base de CdTe

Du fait de ses propriétés optiques optimales, c'est-à-dire une bande interdite de l'ordre de 1,5eV et une grande absorption dans tout le spectre solaire, cette filière a été l'une des premières étudiées en 1960. Et le premier module CdS/CdTe fabriqué en 1972. Jusqu'à une date récente, il était admis que la filière au CdS/CdTe représentait l'approche la plus prometteuse pour les cellules de nouvelle génération. CdTe paraissait être un matériau idéal pour les cellules solaires en films minces pour au moins trois raisons :

- le gap d'énergie est de type direct
- le coefficient d'absorption est élevé ($> 10^5 \text{ cm}^{-1}$ dans le visible) et la couche absorbante ne nécessite pas plus de quelques micromètres pour absorber 90% du spectre solaire, autorisant par conséquent l'utilisation de matériaux relativement impurs dont la longueur de diffusion des porteurs minoritaires ne dépasse pas quelques micromètres.
- La valeur du gap $E_g=1,45\text{eV}$ est idéale pour la conversion photovoltaïque du spectre solaire.
- De nombreuses méthodes existent pour déposer CdTe avec une vitesse de dépôt très élevée tout en gardant une qualité raisonnable [13].

II.4.1 Structure cellules photovoltaïques en couches minces à base de CdTe

La figure (II.9) montre la structure de la cellule solaire la plus courante. Elle est constituée d'une hétérojonction n-CdS/p-CdTe. Le CdS du type N est déposé sur le verre couvert d'une couche d'OTC (oxyde transparent conducteur) tel qu' In_2O_3 ou SnO_2 [14].

Concrètement, une cellule au CdTe se compose, de haut en bas :

- d'une vitre protectrice.
- d'une couche conductrice transparente (d'oxyde d'indium-étain (ITO) ou d'oxyde de

Zinc (ZnO)). Elle récolte les charges négatives sur une épaisseur de 0,2 à 0,5 μm .

- de sulfure de cadmium CdS de type n (épaisseur de 0,06 à 0,2 μm).
- de tellure de cadmium de type p (épaisseurs de 2 à 8 μm).
- de la couche conductrice inférieure métallique. Elle est parfois fabriquée à partir d'une pâte de carbone enrichie en cuivre.

- du substrat, dont la nature peut varier selon les propriétés désirées (souple ou rigide) [5].

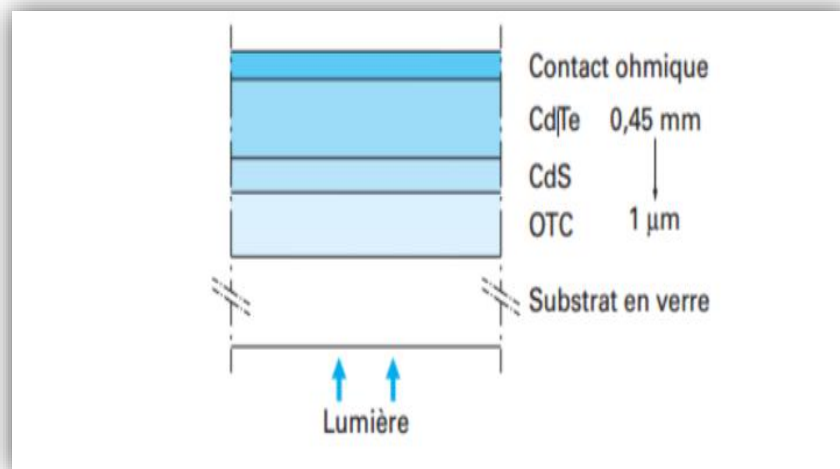


Figure II.9: Structure d'une cellule solaire à base de CdS/CdTe [8].

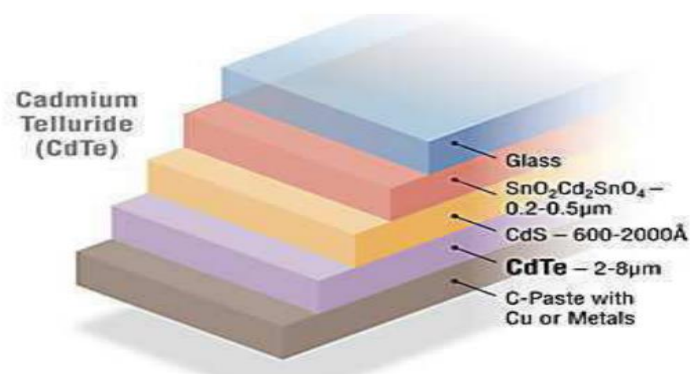


Figure II.10 : Structure d'une cellule photovoltaïque au CdTe [5].

II.4.2 L 'hétérojonction CdS-CdTe

L'hétérojonction se fait grâce à la couche de CdS de type n qui a une bande interdite de 2.4 eV, cette dernière joue le rôle d'une fenêtre d'entrée de la lumière et donne l'hétérojonction CdS-CdTe à la fois grâce à son gap très élevé.

L'épaisseur de la couche fenêtre est généralement de l'ordre du dixième de micromètres. Le procédé de fabrication se fait sous une haute température qui dépasse les 400 °C, une fois au-dessus de 450 °C le composé condense et devient un solide stable, dans ce genre de procédé les films sont de type P dû à un manque de Cd. Les mêmes techniques sont utilisées dans le dépôt de CdS et CdTe [15].

La phase finale consiste à la formation de l'électrode arrière. Une fois exposée à la lumière, les porteurs commencent à se générer dans la zone de charge d'espace du CdTe de type P et ainsi la collecte des porteurs se fera par le champ non par la diffusion. La couche

CdS est considérée comme une couche morte vu que le CdS dopé n'a presque pas de zone de charge d'espace ainsi que la durée de vie des porteurs est très limitée. D'ailleurs c'est pourquoi il est préférable de réduire l'épaisseur de la couche CdS au maximum afin de minimiser les pertes d'absorption optique [15].

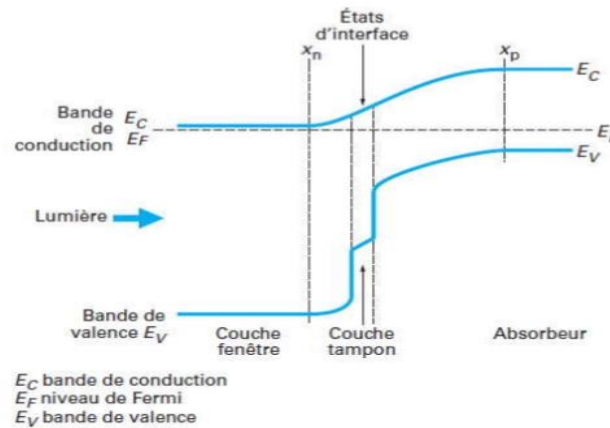


Figure II.11 : Schéma des bandes dans l'hétérojonction CdS-CdTe [16].

II.4.3 Méthode de dépôt

L'étape la plus importante est la formation de la couche absorbante de CdTe avec une épaisseur de 1.5-6 μm . Il existe plusieurs méthodes permettant de préparer les couches de type P de bonne cristallinité et de grande mobilité des charges, on cite :

- Sublimation et condensation en phase clos (CSS).
- Vaporisation chimique (CSV).
- Electrodeposition (ED).
- Sérigraphie (SP).
- Dépôt en phase vapeur (CVD).
- Dépôt physique en phase vapeur (PVD) [17].

Bibliographie

- [1] : Boudehedj Mohammed Abdelwahid, Etude des propriétés structurales et électriques des cellules Tandem III-V (multicouches : InGaP/GaAs) par simulation TCAD_SILVACO, Mémoire de Master, Université Abdelhamid Ibn Badis (Mostaganem), 03 Juin 2015, 4p.
- [2] : Mechai.F, Etude et simulation des structures photovoltaïques à base de halogénures de métaux de transition MX₂ (M = W, Mo; X = S, Se), Mémoire de Magister, Université de Mouloud Mammeri (Tizi-Ouzou), 2016, 19/20p.
- [3] : Kara Mohamed.W, Les Structures de bandes électroniques et les propriétés relatives aux semi-conducteurs quasi binaires (GaP)_{1-x}(ZnSe)_x, thèse de doctorat, Université de Mohamed Khider, (Biskra), 2012, 7/8/9p.
- [4] : Lasladj Meriem, Simulation numérique des cellules solaire de troisième génération pour des applications spatiales, Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas (Sétif), 2014/2015,8p.
- [5] : Zouhair El Jouade, Réalisation et caractérisation des cellules photovoltaïques organiques, thèse de doctorat, Université d'Angers, 18/10/2016,39p.
- [6] : Refice Fatima Zohra, Etude théorique des propriétés électroniques optiques et diélectriques des alliages semi-conducteurs, Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf (M'sila), 2016/2017, 11p.
- [7] : Berrezzoug.H, Principe de fonctionnement et mesure des caractéristiques d'une cellule photovoltaïque, Mémoire de Master, Université de Dr Moulay Tahar (Saida), 2016, 22p.
- [8] : Adjadj.A, Contribution à l'étude des propriétés physiques des alliages CaxZn1-xO et CaxZn1-xS par la méthode ab-initio FP-LMTO, thèse de doctorat, Université Djilali Liabes (Sidi Bel-Abbés) 2015, 11/109p.
- [9] : Ouahida Aissaoui, Etude des propriétés physiques des couches minces de structure chalcoprite, thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar (Annaba), 2011, 10p.
- [10] : Antonio Luque, Steven Hegedus, Handbook of Photovoltaic science and engineering, Second edition, John Wiley and Sons Ltd, United Kingdom, 2011, 604p.
- [11] : Salhi.B, Etude des propriétés physiques de la phase zinc blende de CdS, Mémoire de Master, Université de Labri Tébessi (Tébessa), 2016, 36/37p.
- [12] : Dahman.S, Etude ab-initio des propriétés électroniques CdTe/ZnTe/ZnSe/ZnS : effet de polarisation, Mémoire de Magister, Université d'Oran, 2014, 5/6p.
- [13] : Hafsia Haloui, Contribution à la conception et modélisation d'un capteur solaire hybride photovoltaïque thermique à base de cellules solaires en couches mince, Thèse de doctorat, Université d'Oum El Bouagui, 4/5p.

[14] : propriétés et structure des semi-conducteurs, disponible sur www.iutenligne.net, page consultée le 08/08/2020 à 23.55.

[15] : Mohamed Mimoune, Etude des captures photovoltaïques basés sur les nanotechnologies, Mémoire de master, Université de Québec à Trois-Rivières, Mars 2016, 60p.

[16] : Mostefa Kara Selma, Etude et simulation de cellules photovoltaïques a couches minces à base de CIS et CIGS. Mémoire de magister, Université Abou-BakrBlekaid(Tlemcen), 2011/2012, 39p.

[17] : Hichem Mammar, effet des structures nanométriques sur le développement des cellules photovoltaïques de troisième génération, thèse de doctorat, 19p.

CHAPITRE III :
METHODES ET MOYENS DE
CALCULS

III.1 INTRODUCTION

Parmi les logiciels utilisés pour les calculs des paramètres des matériaux semi-conducteurs, le simulateur **SCAPS**.

Dans ce chapitre nous allons voir une présentation et la méthode de fonctionnement de ce logiciel.

III.2 PRESENTATION DE SIMULATEUR SCAPS

SCAPS est un logiciel libre qui a été introduit en 1996, et depuis lors, il a subi des améliorations et des fonctionnalités supplémentaires, il est spécialement créé pour être capable de modéliser des systèmes PV à couche mince [1].

Le SCAPS 1D acronyme de « **Solar Cell Capacitance Simulator one Dimension** » est un logiciel de simulation des cellules solaires unidimensionnelles développé à l'Université de Gent en Belgique par Marc Burgelman et al. Pour simuler les caractéristiques électriques des dispositifs photoniques tels que les cellules solaires à couches minces. Le SCAPS a été développé à l'origine pour des structures des cellules de CuInSe_2 et de CdTe . Cependant, Plusieurs version ont amélioré ses capacités de façon à devenir applicable pour des cellules solaires cristallines (Si et GaAs) et des cellules amorphes (a-Si et de Si micro-morphe). Avec le SCAPS, il est possible de simuler des structures constituées d'un nombre définis de couches (jusqu'à 7 couches intermédiaires ainsi que les contacts avant et arrière), avec des profils de dopage différents, et avec des distributions énergétiques des niveaux donneurs ou accepteurs donnés, dans le volume et aux interfaces pour un spectre de lumière arbitraire. La majorité des paramètres peuvent être introduits avec variations graduées (en dépendance de la composition et de la profondeur de la cellule) [2].

III.2.1 Le processus de simulation avec SCAPS

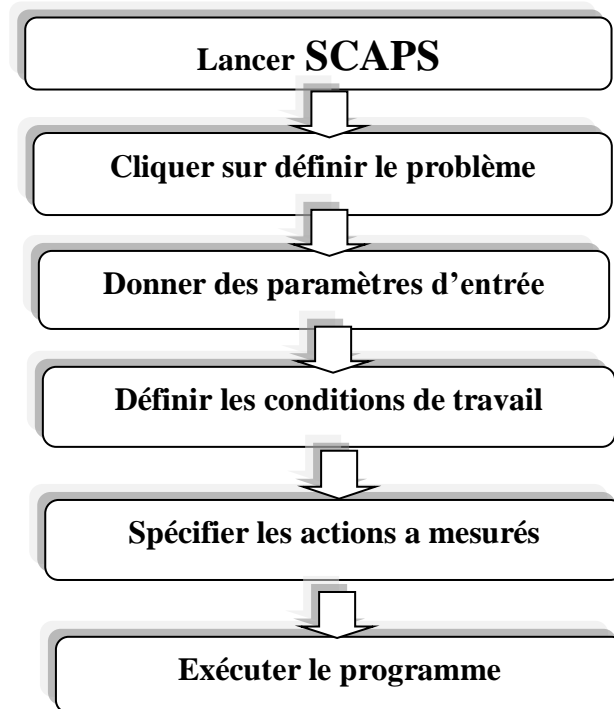


Figure III.1 : La procédure de fonctionnement SCAPS [3].

III.2.2 Utilisation de SCAPS

Le programme SCAPS se compose de plusieurs panneaux (ou fenêtres, ou pages). En général, les éléments suivants (tels que décrits dans le manuel Scaps) sont disponibles sur le panneau d'action Figure (III.2):

- + la définition du point de fonctionnement (**working point**).
- + La définition de la liste d'actions.
- + Réglage du mode de calcul: "**pause**" entre les calculs ou non.
- + Définition du problème: bouton "**calculate new**"
- + Effectuer des calculs en fonction d'une nouvelle liste d'actions: bouton "**calculate next**" "**continue**" pour calculer l'élément suivant de la liste d'actions, quand "**pause**" est activé.
- + "**stop**" pour arrêter un calcul en cours.
- + "**clear previous**" pour effacer précédemment calculés graphes.
- + "**graphs**" pour activer le panneau des bandes d'énergie, à partir duquel à son tour on peut naviguer vers tous les autres panneaux graphiques (IV, CV, Cf et QE).

- ✚ "save all" pour sauvegarder les résultats de tous les calculs déjà préformés dans un fichier texte; les données du fichier texte sont séparées par des tabulations et peuvent être coupées et collées dans une feuille de calcul ou un programme graphique.
- ✚ "quitter" pour quitter SCAPS. C'est la seule manière correcte de quitter SCAPS [4].

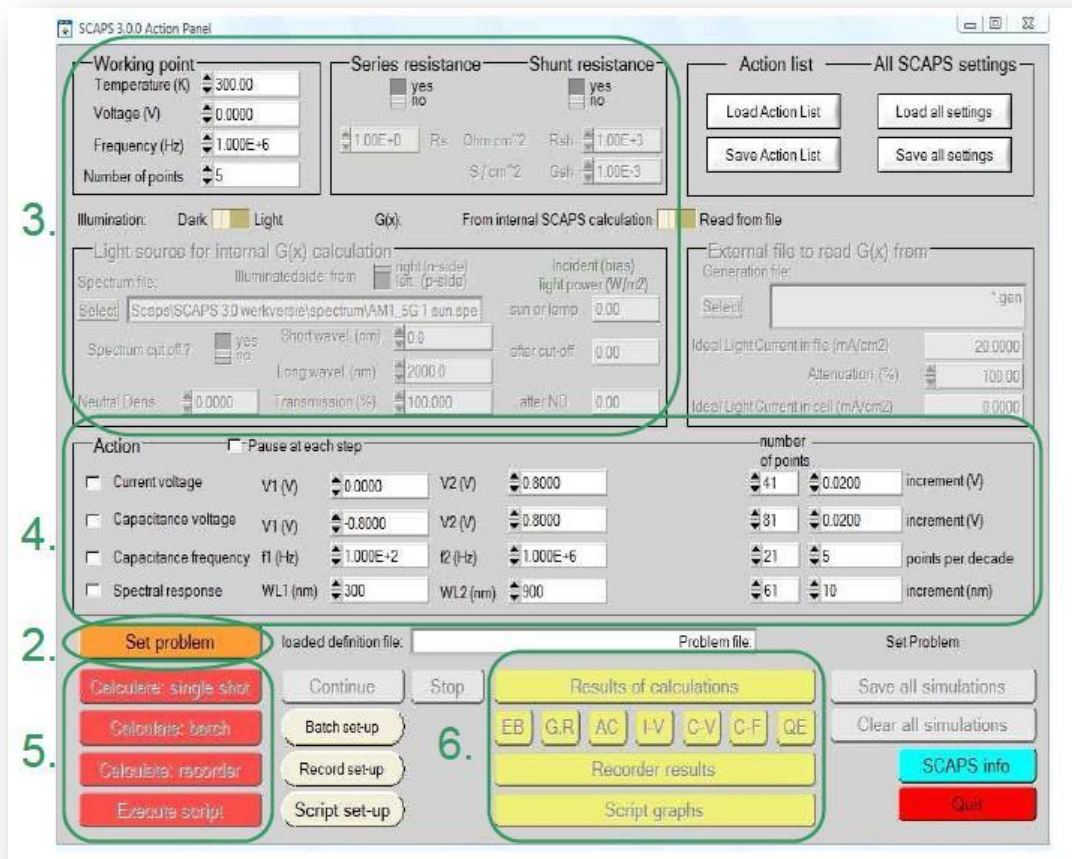


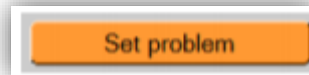
Figure III.2 : Panneau de démarrage de SCAPS, le panneau d'action du logiciel SCAPS [4].

La signification des blocs numérotés de 1 à 7 est expliquée dans le texte. Il y a des panneaux dédiés pour les actions de base [5] :



III.2.2.1 Lancer SCAPS

On clique sur l'icône ci-dessus sur le bureau, ou bien double-clique sur le fichier SCAPS EXE dans le gestionnaire de fichiers (ou dans n'importe quelle autre version de SCAPS) SCAPS s'ouvre avec le panneau d'action [5].



III.2.2.2 Définir le problème

On clique sur le bouton SET PROBLEM dans le panneau d'action, et on choisit LOAD dans le coin droit en bas du panneau qui s'ouvre par la suite. On sélectionne et on ouvre (par exemple NUMOS CIGS Baseline.def. Ceci est un fichier exemple d'une cellule solaire à base de CIGS. Par la suite, il est possible de modifier toutes les propriétés de la cellule en cliquant sur 'SETPROBLEM' dans le panneau d'action [5].

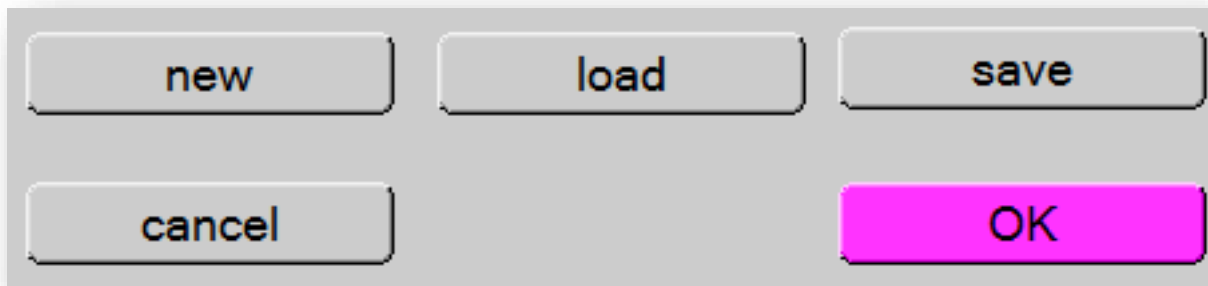


Figure III.3 : Définir le problème [6].

III.2.2.3 Définir le point de fonctionnement

Le point de fonctionnement spécifie les paramètres qui ne sont pas variables dans les mesures de la simulation, et qui sont relatifs à l'opération de mesure. Ceci implique :

- **La température T** : Importante pour toutes les mesures.

Note : dans SCAPS : $N_c(T)$, $N_v(T)$, les vitesses thermiques, le voltage thermique kT et tous leurs dérivés sont les seuls variables qui ont une dépendance thermique explicite ; on doit saisir manuellement, pour chaque valeur T , les paramètres du matériau correspondant [5].

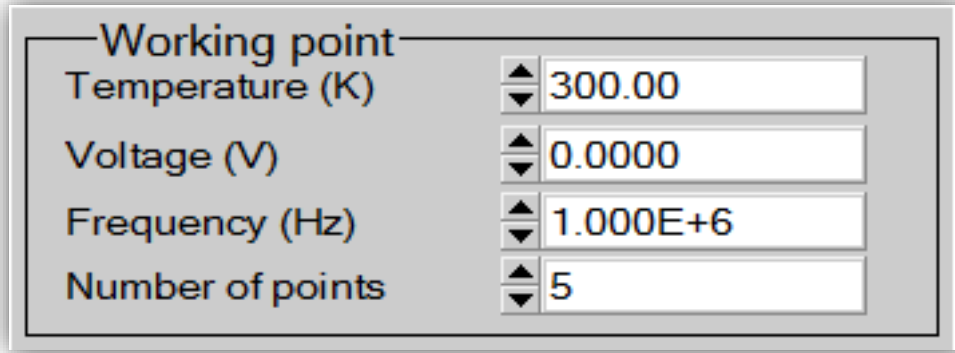


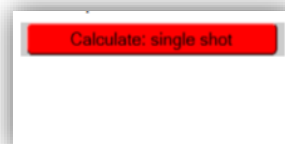
Figure III.4 .Le point de fonctionnement [5].

- **Le voltage V** : il ne concerne pas les simulations I-V et C-V C'est le voltage de la polarisation DC dans une simulation C-f et $QE(\lambda)$ SCAPS commence toujours à 0 V, et s'exécute au voltage du point de fonctionnement par un nombre d'étapes qu'on doit aussi spécifier [5].
- **La fréquence f** : elle ne concerne pas les simulations I-V, $QE(\lambda)$ et C-f C'est la fréquence dans laquelle la caractéristique C-V est simulée [5].
- **L'illumination** : elle est utilisée dans toutes les mesures Pour $QE(\lambda)$, elle détermine les conditions de polarisation de la lumière. Les paramètres de base sont : l'obscurité ou la lumière, le choix du côté illuminé, le choix du spectre. Le spectre d'illumination on Sun ($= 1000W/m^2$) avec la masse d'air global est le spectre par défaut, mais il existe aussi une large gamme de lumières monochromatiques et de spectres pour plus de simulations personnalisées S'il y a un simulateur optique, on peut immédiatement charger un profil de génération au lieu d'utiliser un spectre [5].
- **Nombre de point** : le nombre de point utilisé pour tracer les courbes [5].

III.2.2.4 Sélection des caractéristiques à simuler

Dans la partie Action du panneau action, on peut choisir une ou plusieurs mesures à simuler: IV, C-V, C-f et $QE(\lambda)$, ajuster si nécessaire les valeurs initiales et finales de l'argument, ainsi que le nombre des étapes [6]

III.2.2.5 Lancer le calcul



Click sur le bouton calculer : « **calculate : single shot** » le panneau des bandes d'énergie s'ouvre et les calculs commencent [6].

III.2.2.6 Afficher les courbes simulées

Après les calculs, SCAPS passe au panneau de bande d'énergie, présenté dans la figure (III.5). Dans ce panneau, on peut voir les diagrammes de bandes, les densités des porteurs libres, la densité du courant, au dernier point de polarisation. Si on veut afficher les résultats pour des tensions intermédiaires, on utilise le bouton pause dans le panneau d'action. On peut faire apparaître les résultats par les commandes PRINT, SAVE GRAPHS, SHOW, et les valeurs s'affichent par la suite à l'écran. Il est possible de faire du Couper & Coller vers, par ex., Excel, ou sauvegarder les valeurs dans un fichier de données. Vous pouvez basculer vers un de vos panneaux personnalisés (si vous avez toutefois simulé au moins une seule opération de mesure) [5].

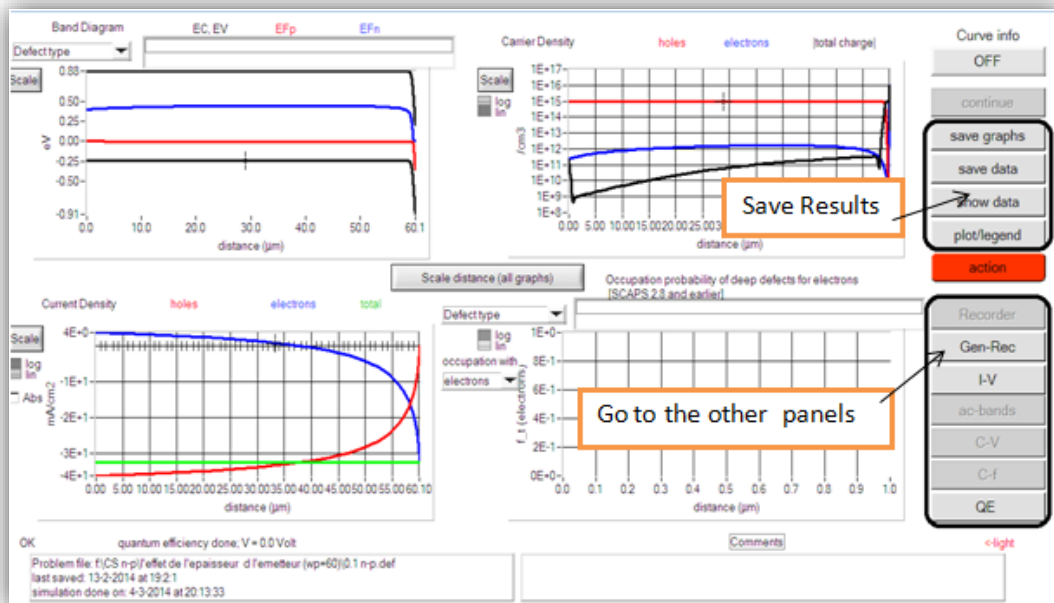


Figure III.5 : Panneau des bandes d'énergie [6].

III.2.2.7 Les courbes I-V

La figure (III.6) montre le panneau d'affichage des courbes I-V à l'obscurité et sous éclairage. La couleur de la dernière courbe calculée est indiquée (lorsque le graphe est trop encombré, on clique « CLEAR ALL GRAPHS » dans le panneau d'action).

Les courbes des taux de recombinaison sont affichées seulement pour la dernière simulation. La couleur de la légende correspond à la couleur de la courbe [5].

- Si CURVE INFO est sur ON et si on clique sur une courbe du graphe, un panneau pop-up apparaîtra, avec des informations concernant le graphe, la courbe ainsi que le point cliqué.

Le bouton SCALE aide à changer la gamme et l'échelle des axes. Si on appuie sur le bouton CTRL et on sélectionne une aire rectangulaire dans un graphe, celui-ci fera un zoom

intérieur (agrandissant) dans la zone sélectionnée. L'appui sur le bouton CTRL accompagné d'un clic droit donnera un zoom extérieur (Zoom out) [5].

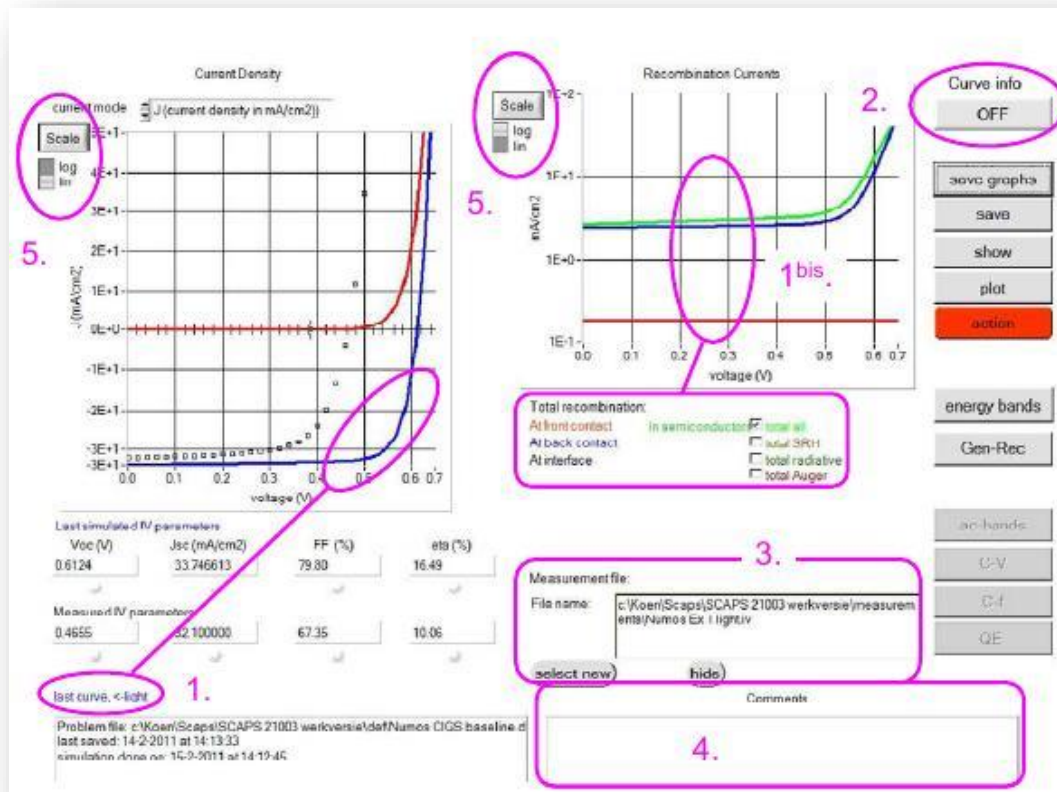


Figure III.6 : Panneau d'affichage des courbes I-V à l'obscurité et en éclaircissement [6].

III.3 DEFINITION D'UNE CELLULE SOLAIRE

La méthode recommandée pour introduire une cellule solaire est d'utiliser l'interface graphique du programme. De cette façon on peut introduire interactivement tous les paramètres qui seront contrôlés par SCAPS de manière à ne pas obtenir des valeurs impossibles ou incohérentes.

III.3.1 Edition de la structure d'une cellule solaire

Quand on clique sur le bouton 'SET PROBLEM' sur le panneau d'action, le panneau 'SOLAR CELL DEFINITION' s'affichera. Ce dernier permettra de créer ou de modifier les structures des cellules solaires et de les enregistrer, ou bien de les charger à partir d'autres fichiers. Ces fichiers de définition sont des fichiers standards ASCII (American Standard Code for Information Inter change) d'extension **def** qui peuvent s'ouvrir avec Notepad.exe ou Wordbad.exe. Il est déconseillé de les modifier au risque de les rendre inutilisables par la suite [5].

Les propriétés des couches, des contacts et d'interfaces peuvent être modifiées en cliquant sur le bouton approprié comme le montre la figure (III.7). De la même manière, des couches peuvent être rajoutées en cliquant 'ADD LAYER' [5].

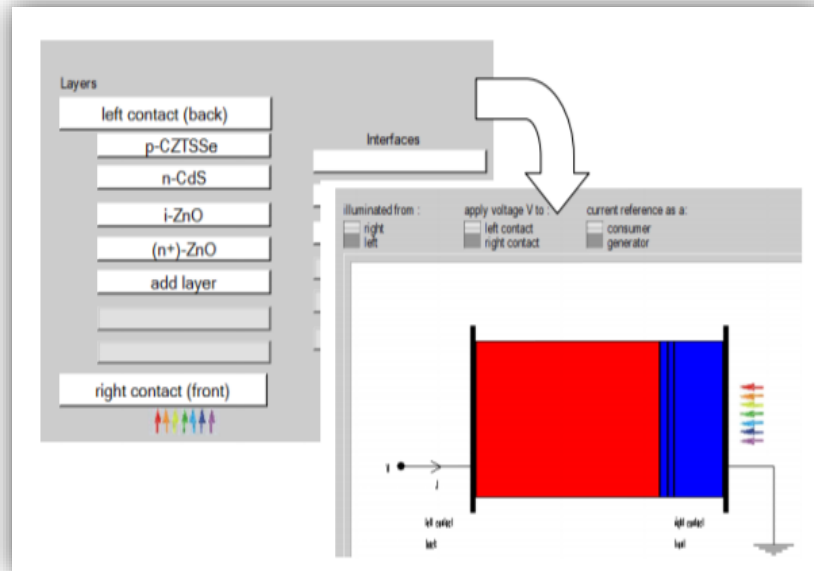


Figure III.7: Définition de la structure d'une cellule solaire [7].

III.3.2 Contacts

Les propriétés des contacts peuvent être introduits soit en cliquant sur le bouton du contact avant ou celui du contact arrière sur le panneau de définition de la cellule. Un panneau des propriétés de contact 'CONTACT PROPERTIES PANEL' s'ouvre, comme le montre dans la figure (III.8).

Electrical properties

Thermionic emission / surface recombination velocity (cm/s) :

electrons

holes

Metal work function (eV) or flat bands

Majority carrier barrier height (eV) :

relative to EF

relative to EV or EC

Allow tunneling

Effective mass of electrons

Effective mass of holes

Optical properties

optical filter

Filter Mode transmission reflection

From Value From File

Filter Value

Complement of Filter

Select Filter File

Figure III.8 : Panneau des propriétés des contacts [5].

Les propriétés des contacts, se divisent en propriétés électriques et optiques. Dans les propriétés électriques, on définit : -Les vitesses de recombinaison surfaciques des électrons et des trous libres. -Si le contact a un travail de sortie, ou il est idéal (régime de bande plates). - La barrière des porteurs majoritaires. - L'effet tunnel (si on veut en tenir compte).

Pour les propriétés optiques, on peut définir la transmission ou la réflexion, par une valeur ou un fichier de données.

III.3.3 Définition des couches

En cliquant sur le bouton « **add layer** », une fenêtre Figure (III.9) s'ouvre qui contient les différents paramètres du matériau à introduire. Ces paramètres peuvent avoir des distributions uniformes ou non uniformes, selon la physique du matériau. Dans la première case, on introduit le nom de la couche (qui correspond au type du dopage) Dans la deuxième case, l'épaisseur de la couche est introduite. Le troisième block, concerne la pureté du matériau et son profile. Dans le quatrième block, on introduit : le gap d'énergie, l'affinité électronique, la permittivité diélectrique, les densités effectives des bandes de conduction et de valence, vitesse thermiques des électrons et des trous libres, les mobilités des électrons et des trous.

Finalement, une case, qui permet d'ajouter les masses effectives des électrons et des trous si on tient compte du transport des porteurs par effet tunnel.

Si le matériau est un composé d'éléments avec des concentrations non uniforme, on peut introduire des variations graduelles des précédents paramètres.

Dans le cinquième block, figure (III.10), on introduit le dopage, type et densité. Le dopage aussi peut être introduit comme étant uniforme, comme il peut avoir des variations graduelles (linéaire, paraboliques,...).

Dans le sixième block, on définit l'absorption de la couche, comme le montre la figure (III.11).

L'absorption peut être définie par le modèle analytique fourni par SCAPS, comme elle peut introduite sous forme de données. SCAPS fourni un nombre de données de l'absorption pour plusieurs types de semi-conducteurs On peut également utiliser d'autres données de l'absorption pour des semi-conducteurs non disponibles dans SCAPS, à condition que le fichier ait la même extension des fichiers de l'absorption fournis par SCAPS.

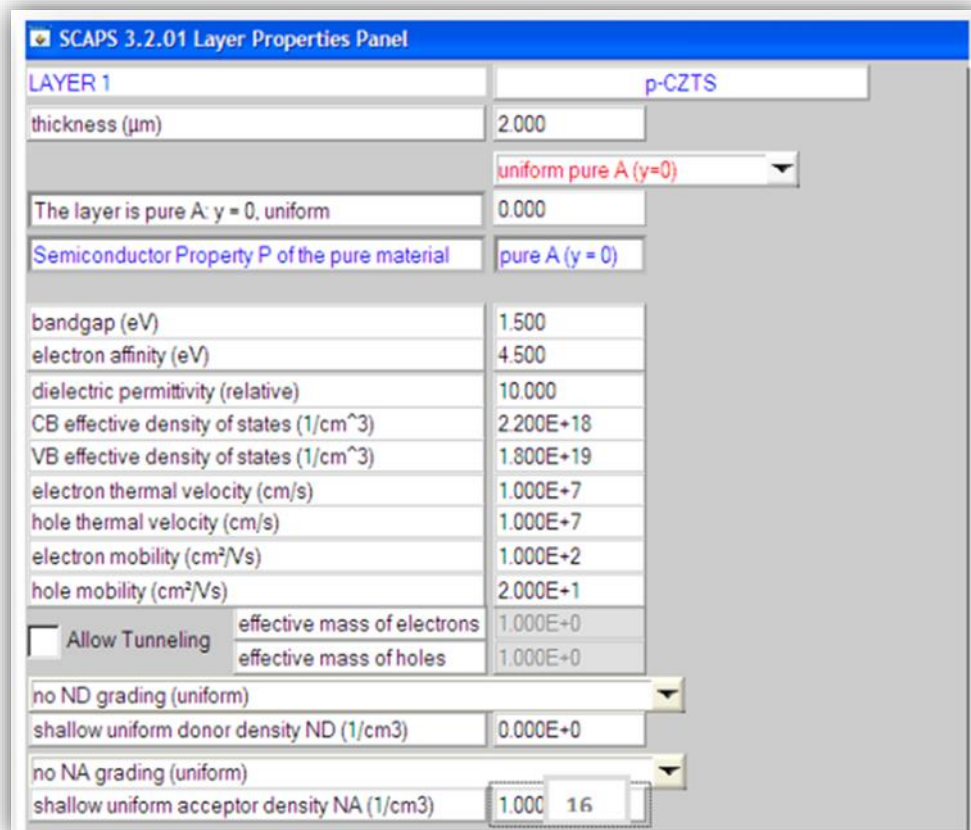


Figure III.9 : Propriétés de la couche ajoutée [5].

no ND grading (uniform)		
shallow uniform donor density ND (1/cm ³)		1.000E+16
no NA grading (uniform)		
shallow uniform acceptor density NA (1/cm ³)		0.000E+0

Figure III.10 : Propriétés des dopages définis [5].

Absorption model Show / Set alpha(composition; lambda)

	alpha (y=0)	alpha (y=1)
	<input type="checkbox"/> from model <input type="checkbox"/> from file	<input type="checkbox"/> from model <input type="checkbox"/> from file
absorption constant A (1/cm eV ^{1/2})	1.000E+5	1.000E+4
absorption constant B (eV ^{1/2} /cm)	0.000E+0	0.000E+0
	sorption\CuInSe2.abs	
	absorption file for y = 0	absorption file for y = 1

show save

Figure III.11: Modèle de l'absorption [5].

Le type des recombinaisons en volume présent est indiqué dans le côté droite du panneau des propriétés de la couche Figure (III.12). Tous les types des recombinaisons sont présents; directs ou à travers les pièges.

Band to band recombination			
Radiative recombination coefficient (cm ³ /s)	1.000E-5	1.000E-5	uniform
Auger electron capture coefficient (cm ⁶ /s)	1.000E-25	1.000E-25	uniform
Auger hole capture coefficient (cm ⁶ /s)	1.000E-25	1.000E-25	uniform

Figure III.12 : Définition des types de recombinaison présents [5].

Si on introduit les défauts (pièges) ; ils peuvent être uniformes ou non uniformes, discrets, avec des distributions gaussiennes, donneurs, accepteurs, neutres, monovalents ou divalents. On peut même définir des transitions de porteurs entre les différents niveaux d'énergie des pièges [5].

III.3.4 Les paramètres les plus importants dans SCAPS

paramètre	Propriété	unité
D	Epaisseur de couche	μm
Y(x)	Composition	a.u.
$E_g(y)$	Energie de gap	eV
$\alpha(x, y)$	Coefficient d'absorption	cm^{-1}
R(y)	Réflexion (avant, arrière)	%
N(x, y)	Concentration de dopage	cm^{-3}
$\epsilon_r(y)$	Constante diélectrique	$\epsilon_0 (\text{F m}^{-1})$
$R_{s, sh}$	Résistance série/shut	

$\chi(y)$	Affinité électronique	eV
$\mu(y)$	Mobilité	$\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$
$m^{*(y)}$	Masse effective	$m_0 \text{kg}$
v_{th}	Vitesse thermique	cm s^{-1}

Tableau III.1 : Les paramètres les plus importants dans scaps [1].

III.3.5 Avantages et inconvénients du SCAPS

Les avantages du SCAPS sont multiples à savoir :

- ✓ la grande vitesse d'exécution,
- ✓ les fichiers d'entrée sont accessibles à l'utilisateur en format texte tel que les données spectrales et les paramètres décrivant le dispositif,
- ✓ la possibilité d'introduire des interfaces et prise en compte du phénomène de recombinaison en celle-ci, l'introduction de résistances en série, et l'obtention des caractéristiques capacité-tension et capacité-fréquence.

Cependant, ses inconvénients concernent :

- ✓ l'absence de la réflexion aux interfaces de différentes couches constituant la cellule qui n'est pas gérée par le SCAPS et son programme de traçage inflexible. D'autant plus, qu'il peut être instable lorsque le dispositif est loin d'être idéal et comprend des barrières secondaires [9].

Bibliographie

- [1]. Christopher Frisk, « modeling and electrical characterization of Cu (In, Ga) Se₂ and Cu₂ZnSnS₄ solar cells », Digital comprehensive summaries of Uppsala dissertation from the faculty of science and technology 1514, 2017, 45/47p, ISSN 1651-6214.
- [2]. Naïma Touafek, « Contribution à l'étude d'une cellule solaire en couches minces à base de CuIn_{1-x}Ga_xSe₂ », Université Des Frères Mentouri (Constantin), 2015, 51p.
- [3]. Usha Mandadapu, S. Victor and k. thyagarajan, « Simulation and analysis of lead based Perovskite solar cell using SCAPS-1D », Indian journal of science and technology, vol 10(11), DOI : 10.17485/ijst/2017/v11i10/110721, March 2017, 3p, ISSN : 0974-5645.
- [4]. Azzouzi Ghania, « Study of silicon solar cells performances using the impurity photovoltaic effect », Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas (Sétif), 03/03/2012. 79/80p.
- [5]. Le Khouimes Ahmed Khalil. Rezzoug Abdallah. Ben Yahkem Mouslem, Simulation d'une cellule photovoltaïque, Mémoire de Master, Université Echahid Hamma Lakhdar (El-Oued), 2018/2019, 18/19/21/22p.
- [6]. Marc Burgelman, Koen Decock and all, SCAPS Manual, version: 17 February 2016.
- [7]. Messei Nadia, Study of the effect of grading in composition of the performace of thin film solar celle based on AlGaAs and CZTSSe, a numerical simulation approach
- [9]. Naïma Touafek, Contribution à l'étude d'une cellule solaire en couches minces à base de CuIn_{1-x}Ga_xSe₂, Université Des Frères Mentouri (Constantin), 2015, 8p.

CHAPITRE IV :
RESULTATS ET DISCUSSION

IV.1 INTRODUCTION

Ce chapitre repartis en deux parties qui résume nos résultats obtenus à l'aide d'un code de calcul SCAPS sur une cellule photovoltaïque ITO/(n) CdS/(p) CdTeS /CdTe.

Dans la première partie nous allons étudier l'influence de la présence de la couche intermédiaire (variation de sa composition et de son épaisseur), l'épaisseur de la couche absorbante CdTe, sur la réponse spectrale et les caractéristiques principales de la cellule simulée ITO/(n) CdS/(p) CdTeS /CdTe.

Les caractéristiques principales de la cellule photovoltaïque : le rendement ($\eta\%$), le facteur de forme (FF), la tension de circuit ouvert (V_{co}), le courant de court-circuit (J_{cc}) et la réponse spectrale (rendement quantique), seront calculer sous la lumière et représenter en fonction de :

- La composition et l'épaisseur de la couche intermédiaire CdS_xTe_{1-x} .
- L'épaisseur de la couche absorbeur CdTe.

Dans la deuxième partie on va refaire le même travail que la première partie sur la configuration optimal avec l'introduction des défauts. Apres on va comparer entre nos résultats et les résultats des travaux précédents de KEBAILI et GHAZALI [4] qu'ont utilisés le matériau SnOx comme couche fenêtre pour la même cellule.

IV.2 PARAMETRES PHYSIQUES DE BASE

Le tableau suivant tableau (IV-1), regroupe les paramètres physiques utilisés dans la simulation. Le choix de ces valeurs est guidé par le modèle dans le logiciel SCAPS et quelques structures de laboratoires [1].

A. Propriétés générales de dispositif [1]		
	Devant	Arrière
Φ_b (eV)	$\Phi_{bn}=0.1$	$\Phi_{bp}=0.$
S_e (cm/s)	10^7	10^7
S_t (cm/s)	10^7	10^7
Réfectivité	0.1	0.8

B. Propriétés des couches [2]				
	ITO [3]	CdTeS	CdS	CdTe
W (μm)	5	0.01-0.10	0.025	0.1
ϵ/ϵ_0	8.9	9.4-10	10	9.4
μ_e (cm^2/Vs)	100	100-320	100	320
μ_h (cm^2/Vs)	100	25-40	25	40
$N_{D/A}$ (cm^{-3})	ND : 10^{20}	$N_{A,D}:5\times 10^{15} -10^{17}$	$N_D: 10\times 10^{17}$	$N_A: 5\times 10^{15}$
E_g (eV)	3.65	1.4-2.4	2.4	1.45
N_c (cm^{-3})	5.2×10^{18}	8×10^{17}	8×10^{17}	8×10^{17}
N_v (cm^{-3})	10^{18}	1.8×10^{19}	1.8×10^{19}	1.8×10^{19}
$\chi_{(eV)}$	4.7	4.28-4.5	4.5	4.28

C. paramètres des défauts				
	ITO	CdTeS	CdS	CdTe
type de défaut	Neutre	/	Neutre	Neutre
distribution énergétique	Single	/	Single	Single
concentration de défauts (1/cm ³)	10 ¹⁹	/	10 ¹⁶	10 ¹³
énergie de piège (eV)	1.8	/	1.2	0.65
Sigma n (cm ²)	10 ⁻¹²	/	10 ⁻¹⁴	10 ¹¹
Sigma p (cm ²)	10 ⁻¹²	/	10 ⁻¹²	10 ¹¹

Tableau VI-1: les paramètres physiques de simulation [1,2].

IV.3 Etude de l'utilisation du CdTe_{1-x}S_x comme couche intermédiaire

IV.3.1 Présentation des cellules simulées

Pour l'étude de l'effet de la couche intermédiaire et la couche absorbeur sur les principales caractéristiques des cellules photovoltaïques, nous avons simulées une cellule à base d'un alliage ternaire de semi-conducteurs CdTe_{1-x}S_x utilisée comme couche intermédiaire :

ITO/ (n) CdS/ (p) CdTeS /CdTe

Cette cellule {ITO/(n) CdS/(p) CdTeS /CdTe} contient respectivement les couches suivantes :

- La couche fenêtre ITO
- La couche tampon CdS de type n dont la largeur de la bande interdite et de 2.4 eV joue le rôle d'une barrière de potentiel de CdTe et permet de transmettre la lumière pour atteindre l'absorbeur CdTe [3].
- La couche CdTe_{1-x}S_x est la couche intermédiaire.
- L'absorbeur CdTe avec une bande interdite de 1.45 eV [3].

La structure suivante montre la cellule choisie :

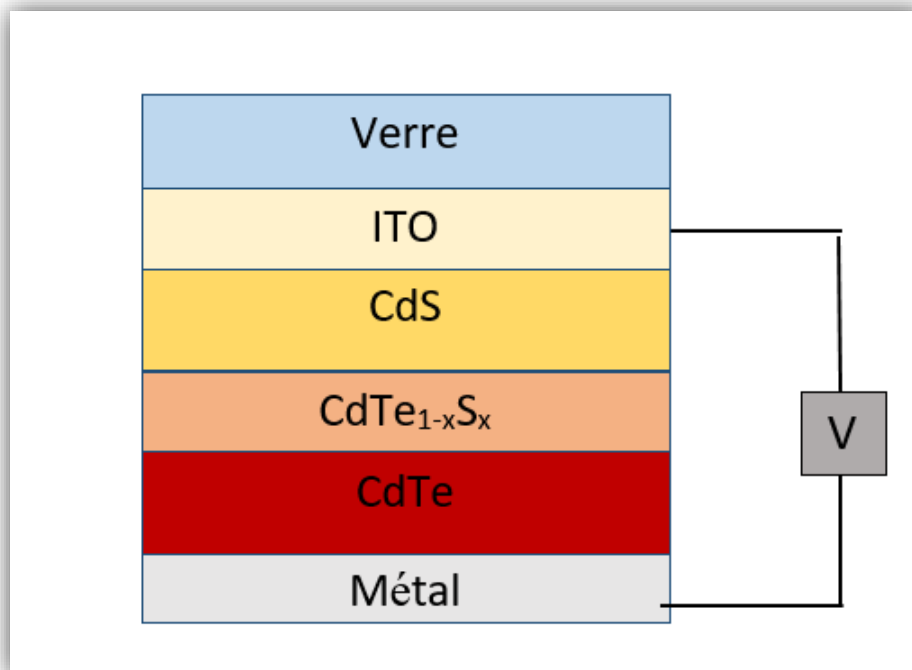


Figure IV-1 : Structure de la cellule solaire à base de CdTeS simulée.

Dans ce cas on va étudier l'influence de la variation de la composition de la couche intermédiaire représentée par un semi-conducteur ternaire CdTe_{1-x}S_x sur les propriétés finales de la cellule. Le choix d'introduire et d'étudier par simulation ses éventuels effets, revient à notre volonté de se rapprocher le plus possible du cas réel, car au fait que cette dernière se forme potentiellement, par inter diffusion entre le CdS et le CdTe

IV.3.2 Rendement ($\eta\%$) en fonction de composition de la couche intermédiaire CdS_xTe_{1-x}

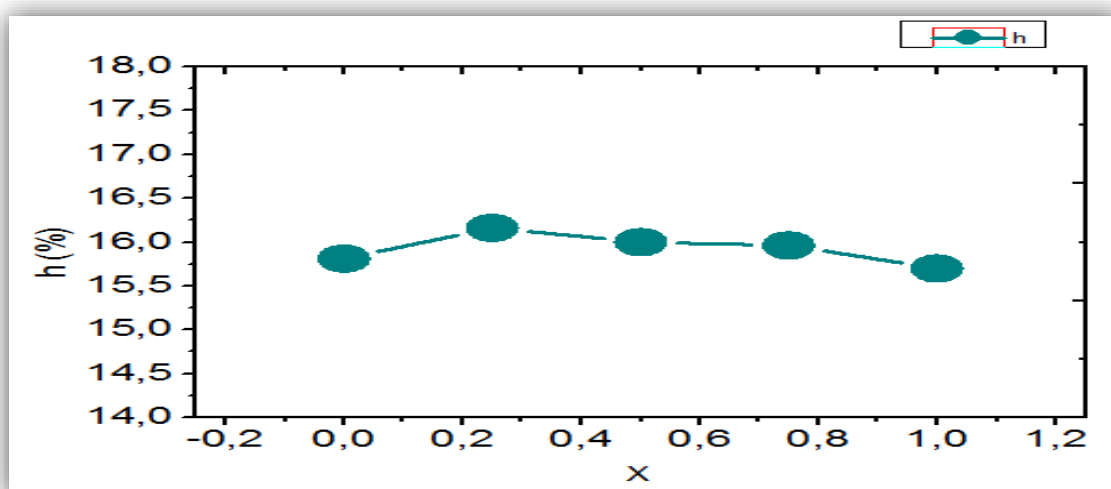


Figure IV-2 : Le rendement ($\eta\%$) en fonction de la composition de la couche CdS_xTe_{1-x}.

La figure (IV-3) montre l'évolution du rendement ($\eta\%$) en fonction de la composition de la couche intermédiaire $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$.

La variation du rendement ($\eta\%$) en fonction de la composition (X) montre une valeur optimale de rendement ($\eta\%$) (16.16 %) correspond à la composition $\text{CdS}_{0.25}\text{Te}_{0.75}$.

IV.3.3 Effet du changement de la couche fenêtre sur le rendement ($\eta\%$) de la cellule

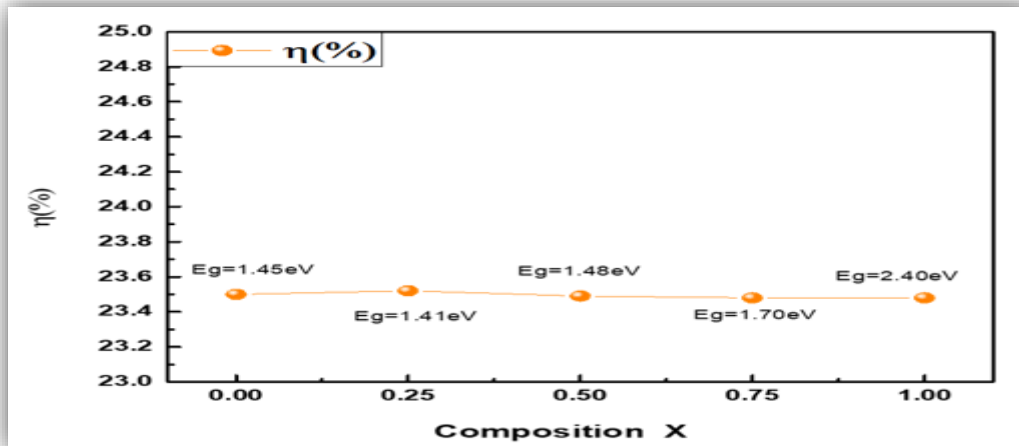


Figure IV-3 : Le rendement ($\eta\%$) en fonction de la composition de la couche $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$. réalisé par KEBAILI Soria et GHAZALI Nawel [5].

En faisons une comparaison entre les valeurs du rendement ($\eta\%$) obtenues par les calculs réalisés par KEBAILI et GHAZALI figure (IV-3) [4]. qui ont utilisé le matériau SnO_x comme couche fenêtre et nos calculs sur la même cellule en changeant la couche fenêtre par l'ITO figure (IV-2).

On remarque que la valeur du meilleur rendement ($\eta\%$) diminue d'une façon remarquable de 22.3 % (couche fenêtre SnO_x) jusqu'à 16.16 % (couche fenêtre ITO) dans la même composition $\text{CdS}_{0.25}\text{Te}_{0.75}$.

Ceci nous laisse penser à première vue que la couche ITO est probablement moins adaptée à ce genre de cellule.

IV.3.4 Effet de la composition de la couche intermédiaire sur les caractéristiques principale de la cellule {ITO/(n) CdS/(p) CdTeS /CdTe}

Les caractéristiques essentielles de la cellule photovoltaïque sont [6]:

- V_{co} : tension de circuit ouvert mesurée aux bornes de la cellule sous éclairement et sans circuit de charge.
- J_{cc} : courant de court-circuit.
- V_m et I_m : courant et tension correspondante à la puissance maximale P_m fournie par la cellule.

➤ FF : facteur de forme qui détermine la qualité électrique de la cellule.

$$FF = \frac{I_m V_m}{J_{sc} V_{co}}$$

η : rendement de la cellule qui correspond au rapport entre la puissance électrique.

$$\eta = \frac{P_{mp}}{P_{in}}$$

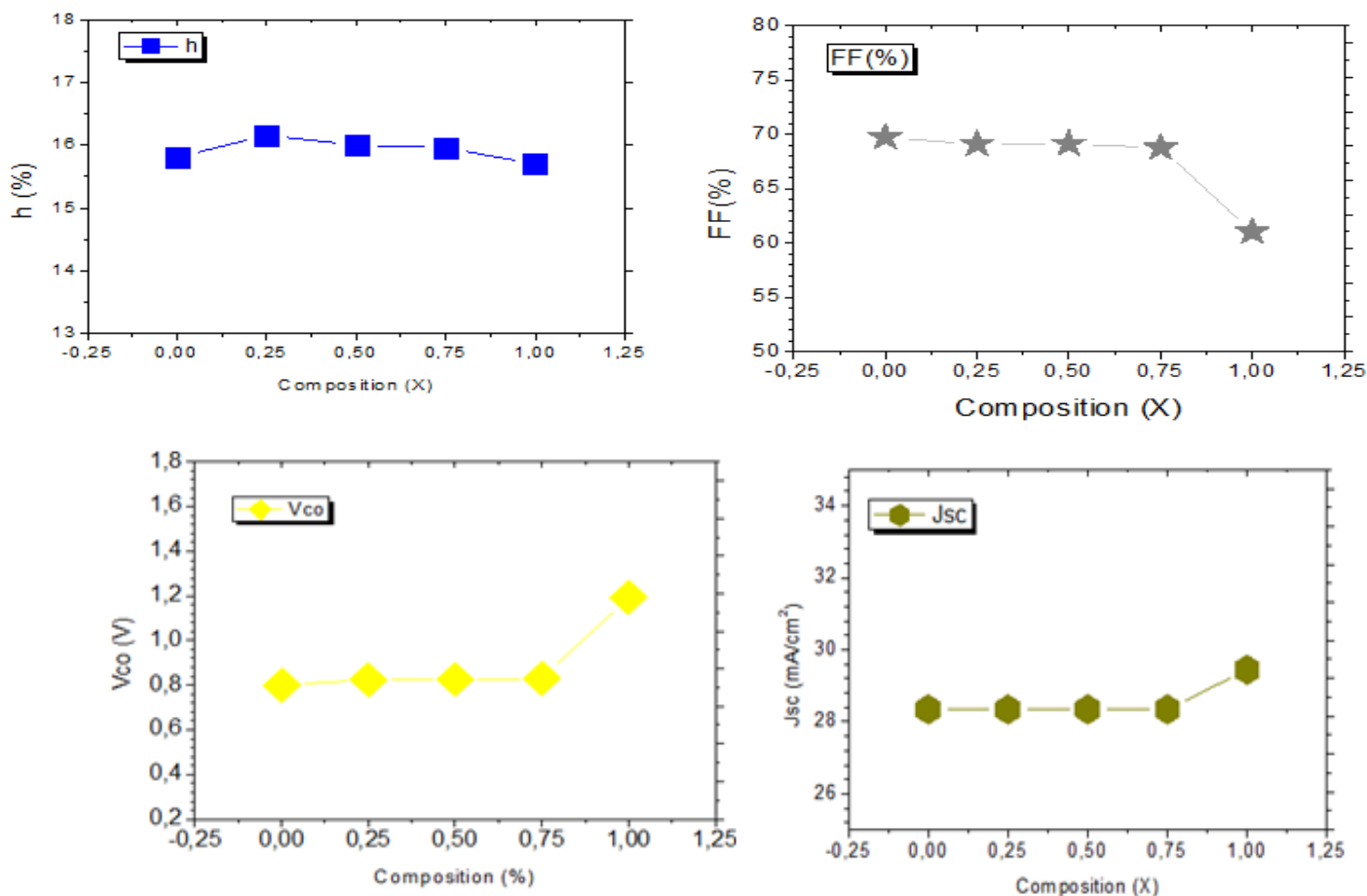


Figure IV-4 : La variation des caractéristiques essentielles de la cellule solaire simulée en fonction de composition de la couche intermédiaire CdS_xTe_{1-x} .

Avec la variation de composition, on observe une variation de rendement ($\eta\%$) entre la valeur 15.70 et la valeur maximale 16.16 qui correspond à ($X=0.25$), le facteur de forme reste quasiment stable après il diminue lorsque ($X=1$), le courant de court-circuit J_{cc} et la tension de circuit ouvert V_{co} restent stable après ils augmentent lorsque ($X=1$).

Dans l'ensemble on peut constater que la variation des caractéristiques principales de la cellule sont faiblement affectés par le changement de composition de la couche intermédiaire

notamment le rendement qui reste presque stable autour d'une valeur moyenne de l'ordre de 16%.

IV.3.5 Effet de la composition de la couche intermédiaire sur la réponse Spectrale de la cellule ITO/(n) CdS/(p) CdTeS /CdTe

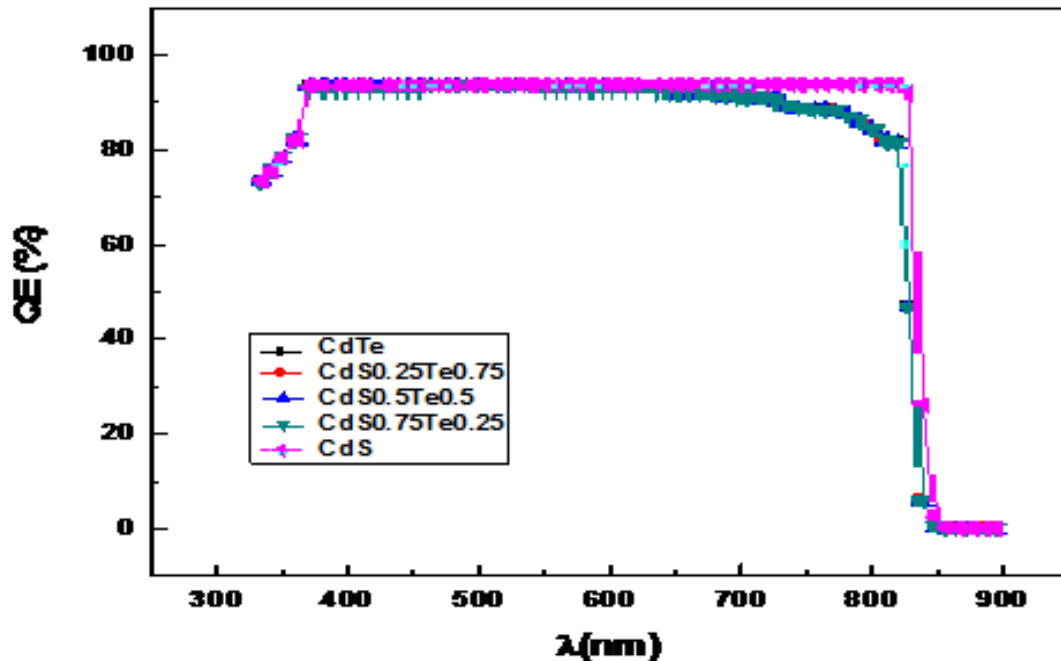


Figure VI-5: Effet de la composition de la couche intermédiaire sur la réponse Spectrale de la cellule.

Ce graphe représente la variation du rendement quantique en fonction de la composition dans l'intervalle de longueur d'onde (300nm-900nm). D'après le graphe, on remarque que la réponse spectrale est maximale dans un large intervalle de longueur du rayonnement incident. Elle est maximale de 350 à 850 nm. De 600 à 900 nm le rendement correspond au spectre solaire adapté à la couche absorbeur CdTe. La deuxième partie de 300 à 600 nm correspond en principe au rendement de la fenêtre ITO est ne devrait pas être maximale, donc cette augmentation de la réponse à son maximum ne peut être attribué qu'à la présence de la couche intermédiaire.

IV.3.6 Effet de l'épaisseur de la couche intermédiaire sur les caractéristiques principales de la cellule ITO/(n) CdS/(p) CdTeS /CdTe

D'après l'étude réalisée sur l'effet de la composition de la couche intermédiaire CdS_xTe_{1-x} sur les caractéristiques principales de la cellule Figure (IV-4), on a constaté que le meilleur rendement ($\eta\%$) correspond d'après la figure (I-6) (qui présente la variation d'énergie de gap en fonction de la composition de CdS_xTe_{1-x}), à la composition $CdS_{0.25}Te_{0.75}$.

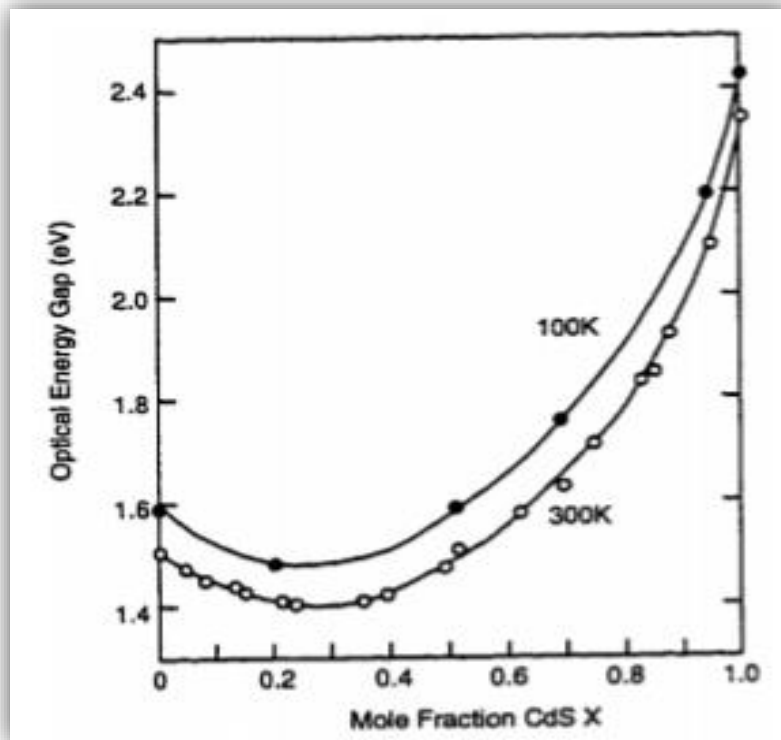


Figure VI-1 : Changement d'énergie de gap en fonction de la composition de $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ [2].

Dans cette partie on va voir l'effet du changement de l'épaisseur de la couche intermédiaire $\text{CdS}_{0.25}\text{Te}_{0.75}$ sur les caractéristiques principales de la cellule.

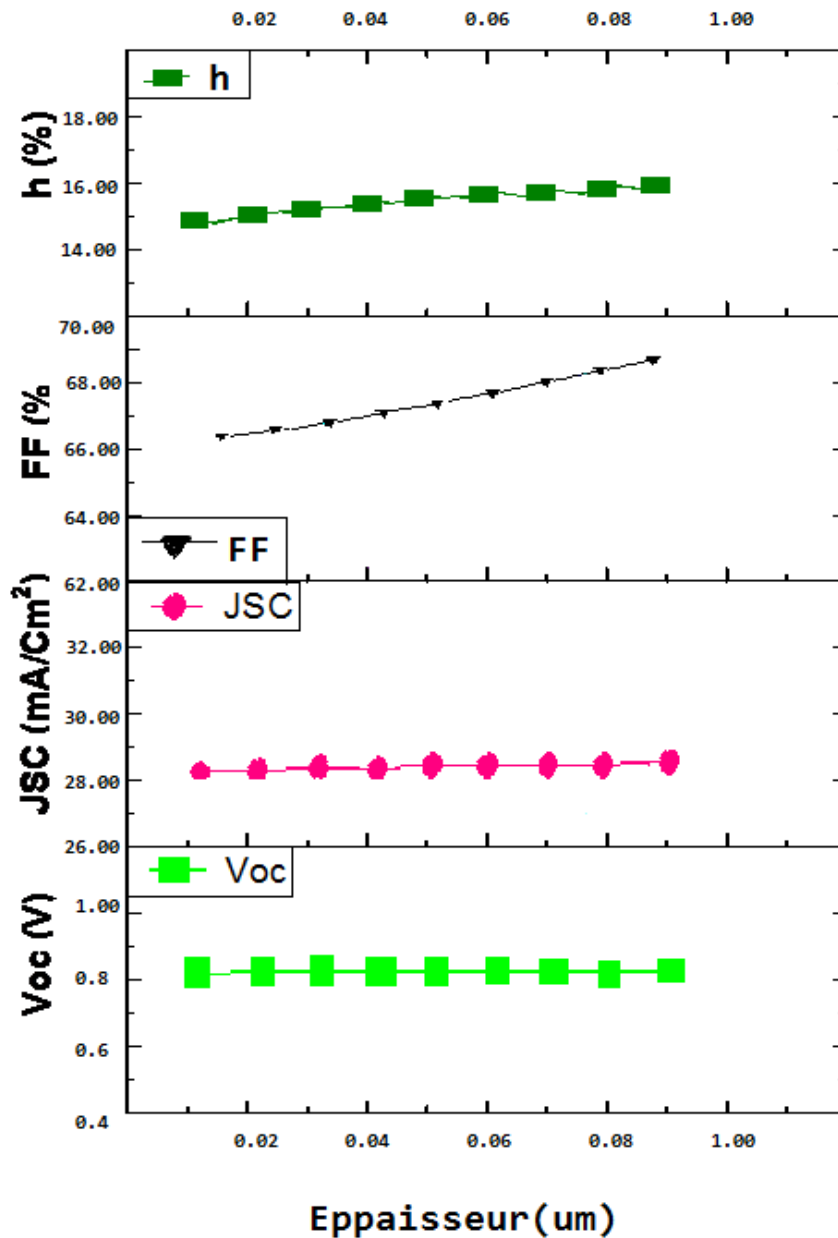


Figure IV-7: Les caractéristiques essentielles de la cellule en fonction de l'épaisseur de la couche $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$.

D'après la figure (IV-7) on remarque qu'avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche intermédiaire de $0.01\mu\text{m}$ jusqu'à $0.09\mu\text{m}$ il y'a une légère augmentation du rendement ($\eta\%$) et du facteur de forme (FF) ; la tension court-circuit (V_{oc}) et le courant du circuit ouvert (J_{cc}) restent presque constants.

L'augmentation du rendement de la cellule légèrement peut être attribuée à :

- ✓ L'élévation de l'absorption de la couche intermédiaire due à l'augmentation de son épaisseur. (Elle joue le rôle de matériaux absorbeur supplémentaire).

- ✓ augmentation du volume de la couche absorbeur (couche intermédiaire + couche absorbeur).

IV.3.7 Effet de l'épaisseur de la couche intermédiaire sur la réponse spectrale de la cellule ITO/(n) CdS/(p) CdTeS /CdTe

La réponse spectrale, est plus particulièrement le rendement quantique permet de déterminer la réponse de la cellule en fonction de la longueur d'onde et permet de localiser dans la cellule les sources qui limitent ses performances [5].

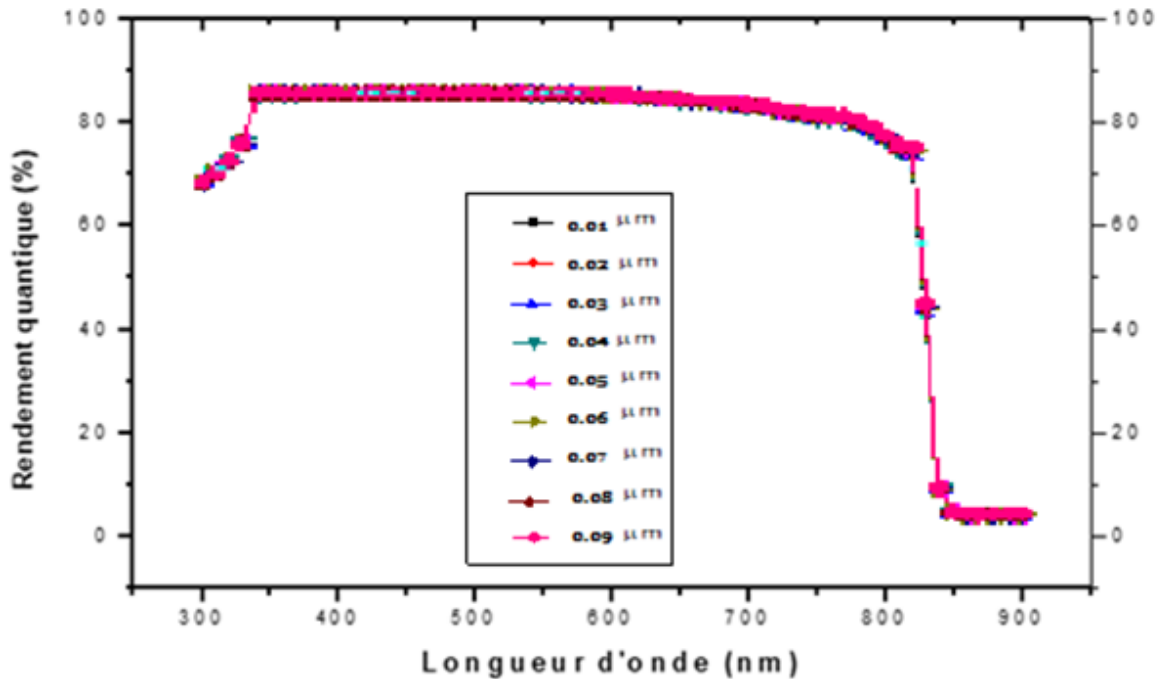


Figure IV-8 : L'Effet de l'épaisseur de la couche Cd Te_{1-x}S_x sur la réponse spectrale.

La figure (IV-8) montre l'évolution de la variation du rendement quantique en fonction de l'épaisseur de la couche intermédiaire CdS_{0.25}Te_{0.75}. Les courbes sont presque parfaitement superposées et ainsi, on peut noter qu'aucun effet notable n'est observé lors de cette dernière variation et le même comportement est enregistré quelque soit l'épaisseur de la couche dans la gamme choisie. Donc la réponse spectrale ne dépend pas de l'épaisseur de la couche intermédiaire.

IV.4 Etude de l'utilisation du CdTe comme couche absorbeur

Afin d'étudier l'effet de la couche absorbeur sur les caractéristiques principales des cellules photovoltaïques, nous avons simulé une cellule de type ITO/(n) CdS/(p)/CdS_{0.25}Te_{0.75}/CdTe contient respectivement les couches suivantes :

- La fenêtre ITO
- La couche tampon CdS de type n.

- La couche $\text{CdS}_{0.25}\text{Te}_{0.75}$ comme couche intermédiaire.
- La couche CdTe est la couche absorbeur

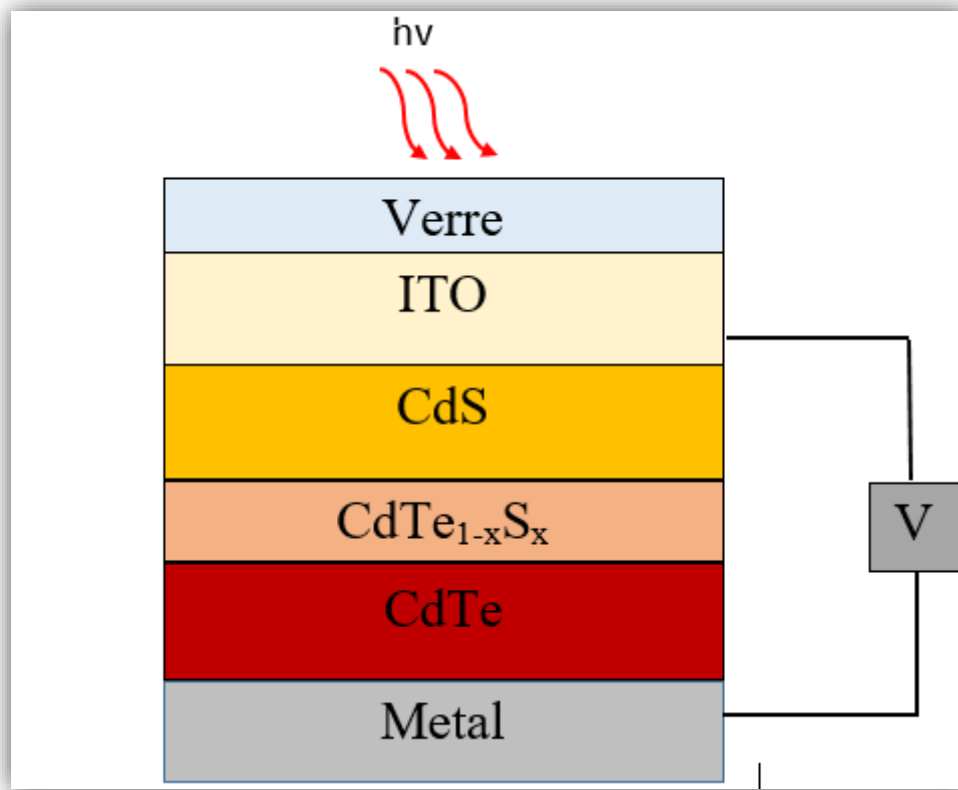


Figure VI-9 : Structure de la cellule solaire à base de CdTe simulée.

IV.4.1 Effet de la variation l'épaisseur de la couche absorbeur CdTe sur le rendement de la cellule ITO/(n) CdS/(p) CdTeS /CdTe

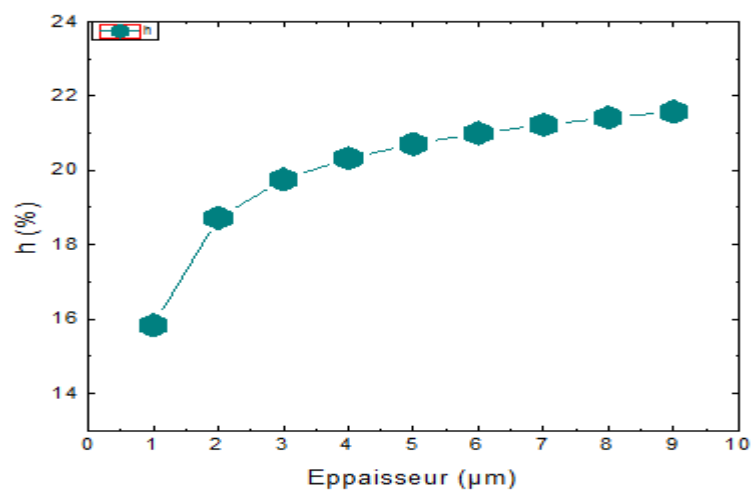


Figure IV-10 : Le rendement ($\eta\%$) en fonction de l'épaisseur de la couche absorbeur CdTe.

On remarque d'après la figure (IV-10) qu'il y'a une amélioration du rendement de la cellule avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche absorbeur CdTe.

Ce comportement est évident, car c'est dans cette dernière que se fait la conversion photovoltaïque et l'absorption des photons, et par conséquent plus le volume est important plus le rendement l'est aussi.

IV.4.2 Effet de la variation de l'épaisseur de la couche absorbeur CdTe sur les caractéristiques principales de la cellule ITO/(n) CdS/(p) CdTeS /CdTe

Après avoir identifié la composition de la couche intermédiaire donnant le meilleur rendement ($\eta\%$), à savoir la composition Cd Te_{0.75} S_{0.25}.

Dans cette partie nous allons voir l'influence de la variation de l'épaisseur de la couche absorbeur CdTe sur les caractéristiques principales de la cellule (FF, Vco, Jcc, $\eta\%$).

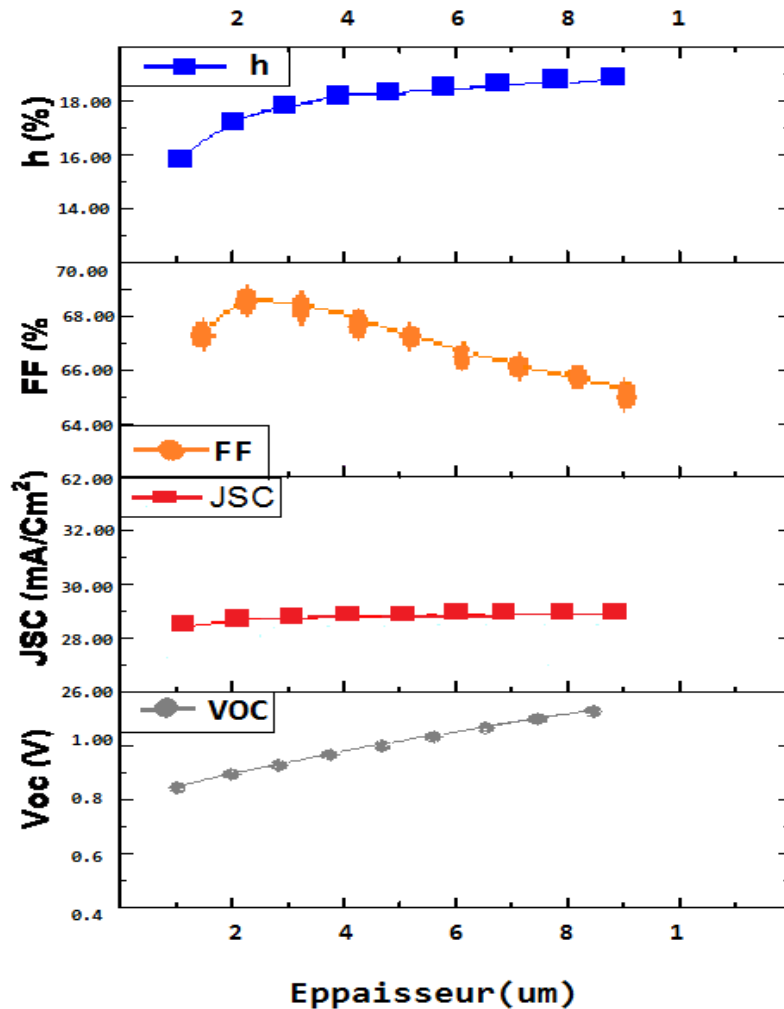


Figure IV-11: Les caractéristiques essentielles de la cellule en fonctions de l'épaisseur de la couche CdTe

D'après la figure (IV-11) on remarque une amélioration du rendement ($\eta\%$) avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche absorbeur, une augmentation de la tension de circuit ouvert (V_{co}) et le courant de court-circuit J_{cc} reste presque stable. Par contre le facteur de forme (FF) diminue d'une façon remarquable. L'augmentation du rendement de conversion est prévisible car il est lié aux nombre d'électrons excités dans la couche absorbeur et on sait que plus cette dernière est épaisse, plus on a la chance d'en exciter davantage de ces derniers.

D'autre part, la diminution du facteur de forme (FF) avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche intermédiaire est due principalement à l'augmentation de V_{CO} car le facteur de forme est relié avec V_{co} par la relation :

$$FF = \frac{I_m V_m}{J_{sc} V_{CO}}$$

J_{cc} resté presque stable.

IV.4.3 Effet de la variation de l'épaisseur de la couche absorbeur sur la réponse spectrale de la cellule ITO/(n) CdS/(p) CdTeS /CdTe

On va voir l'influence de la variation de l'épaisseur de la couche absorbeur dans la gamme $0.1\mu\text{m}$ - $0.9\mu\text{m}$ sur la réponse spectrale (le rendement quantique) de la cellule en maintenant la composition de la couche intermédiaire $\text{CdTe}_{1-x}\text{S}_x$ qui a donné le meilleur rendement ($\eta\%$).

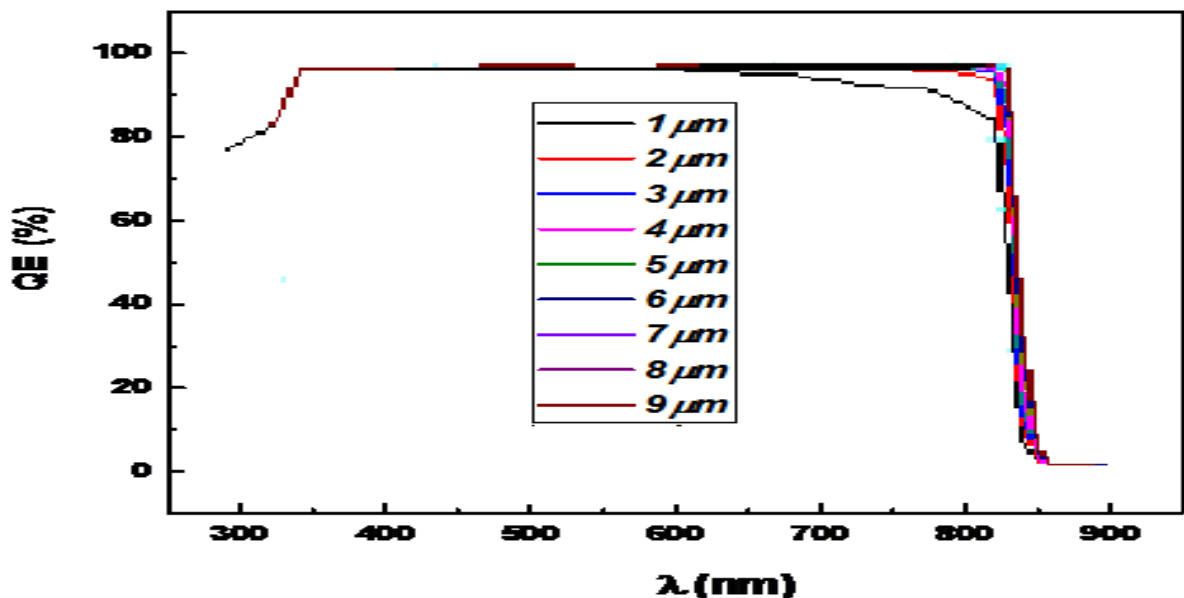


Figure IV-12: Effet de la variation de l'épaisseur de la couche absorbeur CdTe sur la réponse spectrale.

D'après la figure (IV-12) ci-dessus, on peut observer l'amélioration du rendement quantique avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche absorbeur, plus l'épaisseur est importante, plus la réponse est maximale dans le domaine de longueur d'onde le plus large possible. Pour une épaisseur de la couche absorbeur de $1\mu\text{m}$ le domaine de la réponse maximale s'étend entre 350 et 650 nm, alors que pour une épaisseur de $9\mu\text{m}$ ce dernier est compris entre 350 et 850 nm.

VI.5 Etude de l'effet de l'introduction des défauts sur les caractéristiques principales et la réponse spectrale de la cellule ITO/(n) CdS/(p) CdTeS /CdTe

Dans cette partie nous étudions l'effet de l'introduction des défauts sur la configuration optimale de la cellule simulée ITO/(n) CdS/(p) CdTe_{0.75}S_{0.25} /CdTe.

Les caractéristiques des matériaux semi-conducteurs sont fortement influencées par les impuretés ou les défauts. Ces derniers sont ajoutés pour augmenter la conductivité électrique ou contrôler la durée de vie, mais souvent ces impuretés ou ces imperfections dans le réseau, à partir d'un certain seuil, agissent comme facteur de perte, par conséquent une concentration élevée de défauts défavorise le transport des porteurs, réduisant ainsi le rendement de conversion [6].

Pour les défauts intégrés, sont des défauts structurels considérés neutre avec des différentes concentrations pour chaque une des couches de la cellule simulée, en utilisant les paramètres enregistrés dans le tableau VI-1. (Le choix des valeurs est guidé par le modèle dans le logiciel).

Nous avons introduit les défauts sur les couches suivantes :

- ✓ La couche fenêtre ITO
- ✓ La couche tampon CdS
- ✓ La couche absorbeur CdTe

Nous étudions l'effet de la variation l'épaisseur de la couche absorbeur CdTe entre 1 et $9\mu\text{m}$ sur les caractéristiques principales de la cellule et la réponse spectrale.

VI.5.1 l'influence des défauts sur le rendement ($\eta\%$) de la cellule en fonction de l'épaisseur de la couche absorbeur CdTe

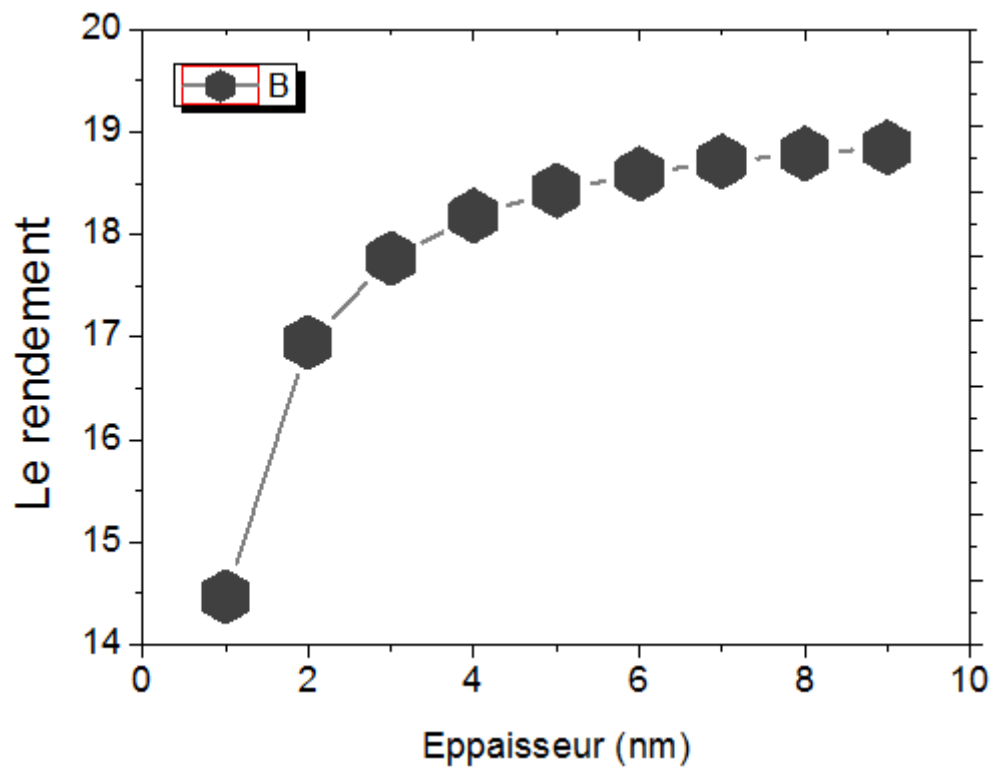


Figure VI-13 : variation du rendement ($\eta\%$) en fonction de la variation de l'épaisseur de la couche absorbeur CdTe

La figure (VI-13) montre qu'avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche CdTe le rendement ($\eta\%$) augmente de 14.41 % jusqu'à 18.85 %.

Pour savoir l'influence des défauts sur le rendement ($\eta\%$) on compare entre les résultats obtenus lors de la variation de l'épaisseur la couche absorbeur sans défauts et avec défauts :

	Sans défauts	Avec défauts
Le meilleur rendement ($\eta\%$)	21.58 %	18.85%

Tableau IV-2 : comparaison entre la valeur de meilleur rendement ($\eta\%$) entre les deux cas : sans et avec défauts.

D'après ce tableau, on n'observe que le rendement ($\eta\%$) obtenu par la simulation de la cellule sans défauts et nettement meilleur que celui obtenu après l'introduction des défauts.

Ce résultat est tout à fait normal compte tenu du fait que la présence de défauts peut être considérée comme des obstacles au mouvement des porteurs et ainsi diminue leur rendement de conversion.

VI.5.2 l'effet de la variation de l'épaisseur de la couche absorbeur sur les caractéristiques principales de la cellule en fonction de l'épaisseur de la couche absorbeur CdTe

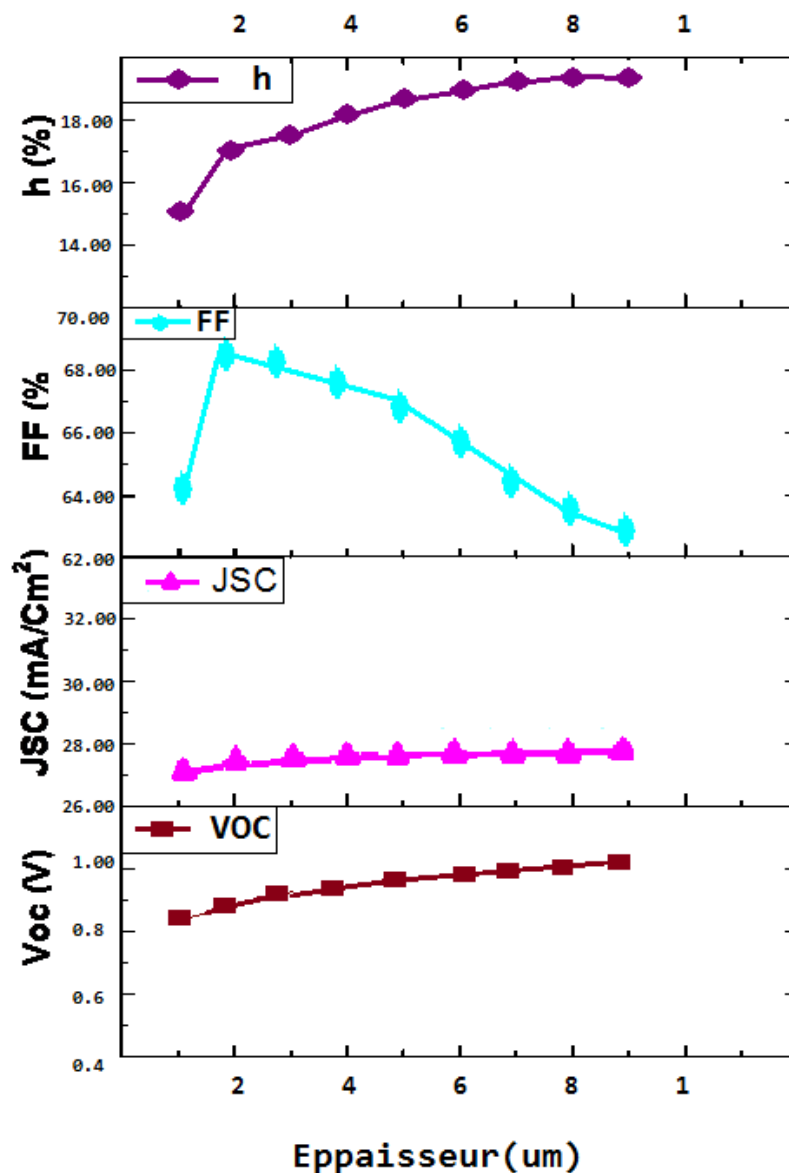


Figure VI-14 : Les caractéristiques essentielles de la cellule en fonction de l'épaisseur de la couche CdTe

D'après la figure (VI-14), on remarque une amélioration de rendement ($\eta\%$) avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche absorbeur, une augmentation de la tension de

circuit ouvert (V_{co}), le courant de court-circuit J_{cc} reste quasiment stable. Par contre le facteur de forme diminue d'une façon remarquable.

Plus l'épaisseur de la couche absorbeur augmente, plus les photons qui transportent l'énergie seront absorbés par cette couche. Par conséquent, le rendement de conversion augmenté.

D'autre part, la diminution du facteur de forme avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche est due principalement à l'augmentation V_{co} car le facteur de forme est relié avec ces deux derniers par la relation :

$$FF = \frac{V_m I_{SC}}{V_{co} J_{SC}}$$

Donc, quand V_{co} ou J_{cc} augmentent le facteur de forme diminue automatiquement.

Pour savoir l'influence des défauts sur les caractéristiques principales on compare entre les résultats obtenus lors de la variation de la couche absorbeur sans défauts et avec les défauts :

Epaisseur μm	V_{co} (V)	J_{cc} (mA/cm^2)	FF (%)	Rendement ($\eta\%$)
1	0.8281	28.347909	67.45	15.83
2	0.8874	29.031690	72.65	18.72
3	0.9409	29.165529	72.01	19.76
4	0.9910	29.263379	70.11	20.33
5	1.0380	29.335668	68.03	20.71
6	1.0820	29.396822	66.02	21
7	1.1234	29.450348	64.17	21.23
8	1.1622	29.498411	62.47	21.42
9	1.1988	29.542303	60.93	21.58

Tableau VI-3 : les résultats des caractéristique principale de la cellule obtenus lors de la variation da l'épaisseur de la couche absorbeur sans défauts.

Epaisseur (μm)	V _{co} (V)	J _{cc} (mA/cm ²)	FF (%)	Rendement ($\eta\%$)
1	0.8200	27.332558	64.55	14.47
2	0.8740	27.964321	69.35	16.95
3	0.9159	28.116706	69.02	17.77
4	0.9497	28.214028	67.85	18.18
5	0.9767	28.286244	66.70	18.43
6	0.9979	28.346184	65.73	18.59
7	1.0145	28.398439	64.93	18.71
8	1.0271	28.445163	64.31	18.79
9	1.0364	28.487624	63.84	18.85

Tableau VI-4 : les résultats des caractéristique principale de la cellule obtenus lors de la variation da l'épaisseur de la couche absorbeur après l'introduction des défauts.

D'après les tableaux (VI-3, VI-4) on remarque que les valeurs des caractéristiques principales de la cellule avant l'intégration des défauts sont nettement meilleures que celles de la cellule après l'intégration des défauts.

En général, l'introduction des défauts altère le comportement de la cellule et affecte ses performances ce qui se traduit par une diminution de ses caractéristiques principales comme listé dans le tableau ci-dessus.

VI.5.3 l'influence des défauts sur la réponse spectrale de la cellule en fonction de l'épaisseur de la couche absorbeur CdTe

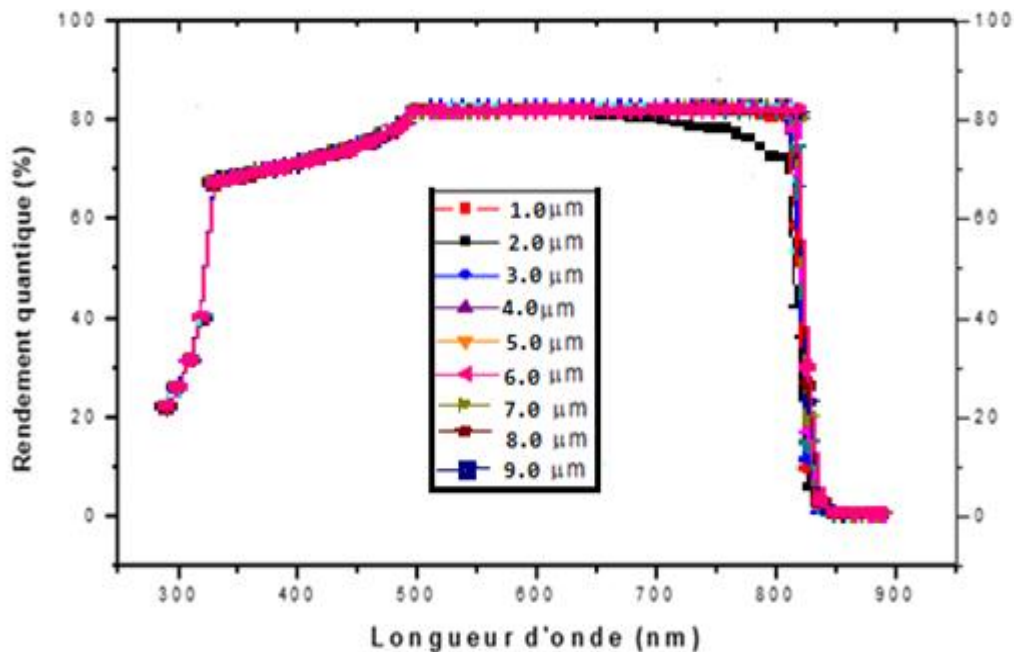


Figure IV-15: Effet de la variation de l'épaisseur de la couche absorbeur CdTe sur la réponse spectrale.

La courbe ci-dessus est divisée en deux zones, la première zone (320 nm_500 nm) correspond au rendement quantique de la couche fenêtre ITO, car les photons de faibles longueurs d'onde absorbés près de la surface alors que ceux de longueur d'onde plus élevée sont majoritairement absorbés au cœur de la cellule (dans la base), c'est ce qui fait que la deuxième zone de la courbe allant de (500 nm- 850 nm) est le rendement qui correspond au spectre solaire adapter à l'absorbeur CdTe. La diminution de la valeur maximale de la réponse spectrale pour les deux couches (fenêtre et absorbeur) par rapport à celle qui est montrée dans la figure (IV-12) peut être attribuée à la présence de défauts qui diminue la possibilité de transport des porteurs, réduisant ainsi le rendement de conversion.

VI.6 effet du changement de la couche fenêtre sur le rendement de la cellule simulée

En faisons une comparaison entre les valeurs optimal du rendement obtenues par les calculs de simulation réalisés par KEBAILI et GHAZALI [5], qui ont utilisé le matériau SnOx comme couche fenêtre (SnOx / (n) CdS / (p) CdTeS / CdTe) et nos calculs sur la même cellule en changeant le SnOx par l'ITO (ITO / (n) CdS / (p) CdTeS / CdTe),

Les calculs en fonction de	Nos résultats	Résultats précédent
Composition	16.16	23.5
Couche Intermédiaire	16.14	23.52
Couche Absorbteur sans défauts	21.58	24.25
Couche Absorbteur avec défauts	18.85	/

Tableau IV-5 : Comparaison des valeurs de rendement.

Avec l'utilisation du matériau SnOx on observe une augmentation remarquable du rendement, on peut expliquer cette augmentation par le rapprochement des propriétés de SnOx et CdTe par rapport aux propriétés de l'ITO qui sont relativement éloignées. Les interfaces SnOx/CdTe doivent présenter peu de défauts correspondant à des vitesses de recombinaison plus faible que celles des interfaces ITO/SnOx.

Ces résultats nous laissent conclure que le SnOx est bien meilleur comme couche fenêtre que l'ITO dans ce type de cellule.

IV.7 conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes appuyés sur le logiciel le plus adapté à la conversion photovoltaïque des dispositifs à semi-conducteurs, qui est le SCAPS-1D.

En premier lieu, on a calculé les paramètres déterminants la performance et le rendement quantique d'une cellule solaire à base de matériaux semi-conducteurs ternaires ITO/(n) CdS/(p) CdTeS /CdTe en fonction de la composition et l'épaisseur des différentes couches constituant cette dernière, et on a comparé nos résultats, avec les résultats obtenus par l'étude d'une cellule à base de SnOx/(n) CdS/(p) CdTeS /CdTe.

Le changement de la couche fenêtre a une influence sur la performance de la cellule solaire.

Le rendement obtenu par une cellule à base de SnOx (couche fenêtre), est meilleur que celui obtenu par une cellule à base de (ITO) (couche fenêtre).

En second lieu, on a introduit des défauts de structure dans la cellule ITO/(n) CdS/(p) CdTeS /CdTe et on a refait les mêmes calculs.

L'introduction des défauts de structure a une influence négative sur les performances de la cellule, notamment sur le rendement.

Bibliographie

- [1]. N. KHELOUFI, Contribution à l'étude théorique des propriétés des semi-conducteurs pour des applications en photovoltaïque, Thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme de doctorat sous la direction de Pr A. Bouzid, Soutenue le : 21/09/2016.
- [2]. Mannir M. Aliyu and all, Evaluation of the Effects and Impacts of the CdSTe Interlayer in CdS/CdTe Solar Cells Through Modeling and Simulations, 1Department of Electrical, Electronics and Systems Engineering, Faculty of Engineering, University Kebangsaan Malaysia, Bangi 43600, Selangor Malaysia.
- [3]. M. Hamidouche, Étude de l'effet des couches minces de SnO_2 et ITO sur les caractéristiques des cellules solaires à base de CdTe Et CIGS, Mémoire de master, université Mohamed El-Bachir Elibrahimi (Bordj Bou Arreridj), 19/06/2013.
- 19/06/2013.
- [4]. Kebaili Soraya, Ghazali Nawel, étude des propriétés physico-chimique des matériaux semi-conducteurs ternaires, mémoire de master, université Mohamed El-Bachir Elibrahimi (Bordj Bou Arreridj), 2019.
- [5]. A.M. Ferouani, M.R Merad boudia, K.Rahmoun, numerical simulation and optimization of performances of a solar cell based on CdTe, University Abou_Bekr Belkaid (Tlemcen), journal of fundamental and applied sciences, ISSN 1112-9867, published : 30/6/2011.
- [6]. Bouzaki Mohamed Moustapha, Etudes comparées et modélisation des performances des différentes technologies de cellule photovoltaïque en vue du dimensionnement des systèmes et installation photovoltaïque, Thèse de doctorat, University Abou_Bekr Belkaid (Tlemcen), 53p.

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

L'objectif assigné à ce travail était d'étudier les propriétés et les performances d'une cellule photovoltaïque à base de semi-conducteurs ternaires CdSTe par simulation.

Pour atteindre ce but on a étudié en premier lieu, l'influence générale de la présence de la couche intermédiaire $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ en changeant à chaque fois sa composition et son épaisseur sur les caractéristiques principales et le rendement quantiques de la cellule. Et aussi l'influence de l'épaisseur de la couche absorbeur sur ces derniers avant et après l'intégration des défauts de structures.

Et on a fait une petite comparaison entre les résultats obtenus par la simulation de la cellule $\text{SnO}_x/\text{(n)} \text{CdS}/\text{(p)} \text{CdTeS} / \text{CdTe}$ et ceux des performances et propriétés de la cellule photovoltaïque $\text{ITO}/\text{(n)} \text{CdS}/\text{(p)} \text{CdTeS} / \text{CdTe}$.

Le rendement de cette cellule est meilleur dans le cas où le SnO_x est utilisé comme couche fenêtre (22.3%) par rapport à la cellule où l'ITO est la couche fenêtre (16.16%).

On a constaté aussi que la composition optimale est la suivante : $\text{CdS}_{0.25}\text{Te}_{0.75}$.

Enfin, l'étude de l'intégration des défauts nous laisse conclure que cette dernière influe négativement sur le rendement de la cellule car ils sont considérés comme des obstacles pour les porteurs de charge. Dont sa valeur était 21.58% sans défauts alors qu'après l'intégration de ces derniers est devenue 18.85%.

Liste des symboles et abréviations

Symboles

PV : Photovoltaïque.

UV : Ultraviolet

IR : Infrarouge.

Cd : Cadmium.

Te : Tellure.

S : Sulfur.

ITO : oxyde d'indium dopé à l'étain.

SnOx : oxyde d'étain.

Si : Silicium.

Ge : Germanium.

Se : sélénium.

CIGS : Cuivre-gallium-indium-diséléniure.

BC : bande de conduction.

BV : bande de valence.

E_f : niveau de fermi.

AM 0 : masse d'air nulle ($\text{W.m}^{-2}.\text{mm}^{-1}$).

AM1 : masse d'air arrivant à la surface terrestre ($\text{W.m}^{-2}.\text{mm}^{-1}$).

AM 1.5 : masse d'air pour la lumière arrivant à 48.2° sur la surface de la terre.

K : constante de BOLTZMAN ($\text{W.m}^{-2}.\text{k}^{-4}$).

T : température (**K**).

XXIe : le 20^{ème} siècle.

E : énergie.

m : la masse.

C : la vitesse de la lumière .

O₃ : Ozone.

H₂O : Eau.

CO₂ : dioxyde de Carbone.

J_{cc} : courant de court-circuit.

V_{co} : tension de circuit ouvert.

η% : le rendement.

K : vecteur d'onde.

λ : longueur d'onde.

P : positive.

N : négative.

N_c : densité d'électrons dans la bande de conductivité.

N_v : densité d'électrons dans la bande de valence.

χ : affinité électronique.

μ_e : mobilité d'électrons (**cm²/V.s**).

μ_t : mobilité de trous (**cm²/V.s**).

W : l'épaisseur.

E_g : énergie de gap.

ε/ε₀ : permittivité diélectrique.

Abréviations

IEC-60904 : International Electrotechnical Commission.

EVA : Éthylène Vinyle Acétate.

EQE : efficacité quantique externe.

FF : le facteur de forme.

EQE : efficacité quantique externe.

SCAPS 1D : Solar Cell Capacitance Simulator One Dimension.

ASCII : American Standard Code for Information Inter change.

CC : courant continu.

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1 : Bref historique de la technologie photovoltaïque.....	13
Tableau I.2 : les différentes structures des cellules photovoltaïques disponibles dans la littérature.....	20
Tableau I.3 : Les différentes générations des cellules photovoltaïques.....	21

Chapitre II

Tableau II.1 : propriétés optoélectroniques et physicochimiques du CdTe.....	31
Tableau II.2 : La configuration électronique de Cd, S et Te.....	32
Tableau II.3 : les paramètres des mailles des composés dans la phase zinc blende et Würtzite.....	34

Chapitre III

Tableau III.1 : Les paramètres les plus importants dans scaps.....	50
---	----

Chapitre IV

Tableau VI-1 : les paramètres physiques de simulation.....	54
Tableau IV-2 : comparaison entre la valeur de meilleur rendement ($\eta\%$) entre les deux cas : sans et avec défauts.....	67
Tableau VI-3 : les résultats des caractéristique principale de la cellule obtenus lors de la variation de l'épaisseur de la couche absorbante sans défauts.....	69
Tableau VI-4 : les résultats des caractéristique principale de la cellule obtenus lors de la variation de l'épaisseur de la couche absorbante après l'introduction des défauts.....	70
Tableau IV-5 : Comparaison des valeurs de rendement.....	72

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 : Schéma descriptif de l'incidence solaire sur la terre.....	9
Figure I.2 : Rayonnements AM0, AM1 et AM1.5.....	12
Figure I.3 : Le rayonnement solaire.....	10
Figure I.4 : Potentiel solaire à concentration (TWh/an).....	11
Figure I.5 : Les installations PV dans les cités isolées dans l'Algérie.....	12
Figure I.6 : 1) Cellule solaire, 2) panneau solaire, 3) module solaire.....	15
Figure I.7 : cellule photovoltaïque : 1) en série, 2) en parallèle.....	16
Figure I.8 : Structure la plus simple d'une cellule solaire.....	17
Figure I.9 : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	18

Chapitre II

Figure II.1 : (a) semi-conducteur à gap direct, (b) semi-conducteur à gap indirect.....	26
Figure II.2 : Représentation schématique d'un semi-conducteur intrinsèque.....	26
Figure II.3 : Représentation schématique d'un semi-conducteur extrinsèque.....	27
Figure II.4 : Représentation schématique d'un semi-conducteur extrinsèque dopé N.....	27
Figure II.5 : Représentation schématique d'un semi-conducteur extrinsèque dopé P.....	28
Figure II.6 : Jonction PN	29
Figure II.7 : la structure cristalline zinc-blende et la projection de la structure sur le plan (001).....	33
Figure II.8 : la structure cristalline zinc-blende et la projection de la structure sur le plan (0001).....	33
Figure II.9 : Structure d'une cellule solaire à base de CdS/CdTe.....	35
Figure II.10 : Structure d'une cellule photovoltaïque au CdTe.....	36
Figure II.11 : Schéma des bandes dans l'hétérojonction CdS-CdTe.....	36

Chapitre III

Figure III.1 : La procédure de fonctionnement SCAPS.....	40
Figure III.2 : Panneau de démarrage de SCAPS, le panneau d'action du logiciel SCAPS....	41
Figure III.3 : Définir le problème.....	42

Figure III.4 .Le point de fonctionnement.....	43
Figure III.5 : Panneau des bandes d'énergie.....	44
Figure III.6 : Panneau d'affichage des courbes I-V à l'obscurité et en éclairage.....	45
Figure III.7 : Définition de la structure d'une cellule solaire.....	46
Figure III.8 : Panneau des propriétés des contacts.....	47
Figure III.9 : Propriétés de la couche ajoutée.....	48
Figure III.10 : Propriétés des dopages définis.....	49
Figure III.11 : Modèle de l'absorption.....	49
Figure III.12 : Définition des types de recombinaison présents.....	50

Chapitre IV

Figure IV-1 : Structure de la cellule solaire à base de CdTeS simulée.....	56
Figure IV-2 : Le rendement ($\eta\%$) en fonction de la composition de la couche CdS_xTe_{1-x}	56
Figure IV-3 : Le rendement ($\eta\%$) en fonction de la composition de la couche CdS_xTe_{1-x} réalisé par KEBAILI Soria et GHAZALI Nawel.....	57
Figure IV-4 : La variation des caractéristiques essentielles de la cellule solaire simulée en fonction de composition de la couche intermédiaire CdS_xTe_{1-x}	58
Figure VI-5 : Effet de la composition de la couche intermédiaire sur la réponse spectrale de la cellule.....	59
Figure VI-6 : Changement d'énergie de gap en fonction de la composition de CdS_xTe_{1-x} ...	60
Figure IV-7 : Les caractéristiques essentielles de la cellule en fonction de l'épaisseur de la couche CdS_xTe_{1-x}	61
Figure IV-8 : L'Effet de l'épaisseur de la couche $Cd Te_{1-x}S_x$ sur la réponse spectrale.....	62
Figure VI-9 : Structure de la cellule solaire à base de CdTe simulée.....	63
Figure IV-10 : Le rendement ($\eta\%$) en fonction de l'épaisseur de la couche absorbante CdTe.....	63
Figure IV-11 : Les caractéristiques essentielles de la cellule en fonctions de l'épaisseur de la couche CdTe.....	64
Figure IV-12 : Effet de la variation de l'épaisseur de la couche absorbante CdTe sur la réponse spectrale.....	65
Figure VI-13 : variation du rendement ($\eta\%$) en fonction de la variation de l'épaisseur de la couche absorbante CdTe.....	67

Figure VI-14 : Les caractéristiques essentielles de la cellule en fonction de l'épaisseur de la couche CdTe.....	68
Figure IV-15 : Effet de la variation de l'épaisseur de la couche absorbeur CdTe sur la réponse spectrale.....	71

RESUME

Ce travail a pour l'objectif d'étudier, par simulation utilisant le code de calculs Scaps, des performances et les propriétés d'une cellule photovoltaïque à base de matériaux semi-conducteurs ternaires CdSTe, et l'effet de la présence d'une couche intermédiaire (CdS_xTe_{1-x}) sur le rendement quantique et les caractéristiques essentielles de la cellule : le rendement ($\eta\%$), le facteur de forme (FF), la tension de circuit ouvert (V_{co}), la densité de courant de court-circuit (J_{sc}). L'influence de la nature de la couche fenêtre et aussi l'introduction des défauts sur les performances des cellules ont été abordé avec succès

MOTS CLES : cellule photovoltaïque, couche intermédiaire, couche fenêtre, CdS_xTe_{1-x} , ITO, SnO_x , SCAPS.

ABSTRACT

This work is carried out for the purpose of studying the performance simulation and properties of a photovoltaic cell based on CdSTe ternary semiconductor materials, and the effect of the presence of an intermediate layer (CdS_xTe_{1-x}) on the quantum efficiency and the essential characteristics of the cell: the efficiency ($\eta\%$), the form factor (FF), the open circuit voltage (V_{co}), the short-circuit current density (J_{sc}). The influence of the nature of the window layer and also the introduction of faults on cells performance has been successfully approached.

KEYWORDS: photovoltaic cell, intermediate layer, window layer, CdS_xTe_{1-x} , ITO, SnO_x , SCAPS.

ملخص

هذا العمل أنجز بهدف دراسة محاكاة أداء و خصائص الخلية الكهروضوئية القائمة على اساس مواد شبه موصلة ثلاثية التركيب CdSTe و تأثير وجود طبقة وسطية CdS_xTe_{1-x} ، على المرودية الكمية و الخصائص الأساسية للخلية: المرودية، معامل الجودة، (FF) كمون الدارة المفتوحة، (V_{co}) تيار الدارة القصيرة.

الكلمات المفتاحية: خلية كهر وضوئية، طبقة وسطية، نافذة، CdS_xTe_{1-x} , ITO, SnO_x , SCAPS.