



Université SaâdDahlab, Blida-1
Faculté de Technologie
Département des Énergies Renouvelables

Par Abada Naouel

Pour l'obtention du diplôme :

MASTER en Énergies Renouvelables

Option : Conversion Photovoltaïque

Thème :

Modélisation et Optimisation d'une Cellule Photovoltaïque à Base de CdTe

Soutenu devant le jury composé par :

DrAit SahedOussamaUSDB	Président	
DrBouzakiMohammed MoustafaUSDB		Promoteur
DrMazouzHalima	USDB	Examineur
DrAmroucheBadia	USDB	Examineur

Juin 2018

Résumé

Notre sujet d'étude porte sur l'optimisation des cellules photovoltaïques à base de tellure de cadmium (CdTe). Un modèle numérique comportant trois couches (la couche absorbante (CdTe), la couche émettrice (CdS) et la couche fenêtre (SnO)) a été établie en utilisant le logiciel SCAPS pour étudier les effets des différents paramètres influents sur la cellule comme les épaisseurs, le dopage, la densité des défauts et les variations de température afin d'optimiser ces derniers et d'améliorer les performances de la cellule.

Nous avons obtenu en optimisant ces paramètres un rendement de 24,28% avec des paramètres de sortie de la cellule suivants : $V_{co} = 1,03$ V, $J_{cc} = 26,92$ mA/cm², FF = 86,79%.

Mots clé : Cellules photovoltaïques, Semi-conducteur, CdTe, Modélisation, SCAPS.

Abstract

Our subject of study concerns the optimization of the photovoltaic cells based on tellure of cadmium (CdTe). A numerical model with three layers (the absorbing layer (CdTe), the emitting layer (CdS) and the window layer (SnO)) was established using the SCAPS software to study the effects of the various parameters influencing the cell such as the thicknesses, doping, defect density and temperature variations in order to optimize them and improve the performance of the cell.

We obtained by optimizing these parameters a yield of 24,28% with the following output parameters of the cell: $V_{oc} = 1,03$ V, $J_{sc} = 26,92$ mA / cm², FF = 86,79%.

Keywords: Photovoltaic cells, Semi-Conductor, CdTe, Modeling, SCAPS.

ملخص

موضوع دراستنا يستند على تحسين الخلايا الكهروضوئية المتكونة من تيلوريد الكاديوم (CdTe). تم إنشاء نموذج رقمي بثلاث طبقات (الطبقة الماصة (CdTe)، طبقة المرسل (CdS) وطبقة الفتوح (SnO)) باستخدام برنامج SCAPS، لدراسة آثار مختلف العوامل المؤثرة على الخلية مثل السمك، التحفيز، كثافة العيوب والتغيرات في درجة الحرارة لتحسينهم وتحسين عروض الخلية. من خلال تحسين هذه العوامل، حصلنا على مردود بنسبة 24,28% مع العوامل الخلية التالية : $V_{oc} = 1,03$ V, $J_{sc} = 26,92$ mA / cm², FF = 86,79%.

الكلمات المفتاحية: الخلايا الكهروضوئية، أشباه الموصلات CdTe، النمذجة، SCAPS.

Dédicaces

C'est avec une immense joie et une grande gratitude que je dédie ce modeste travail :

A ma défunte mère Abada Fatiha qui a toujours cru en moi et qui a fait d'énormes sacrifices tout au long de sa vie pour ma réussite. Elle m'a appris à croire en mes rêves et aujourd'hui, c'est son rêve que je réalise.

A mon frère adoré Reda qui n'a jamais cessé de me soutenir et de m'encourager. Et qui a été et qui sera toujours un modèle pour moi.

A mes sœurs Sarah et Louisa et mes chers amis Nachida, Moncef, Khadidja, Sarra, .

A mes chers camarades qui ont enjolivé mon parcours universitaire et qui m'ont soutenus tout le long.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Dieu tout puissant et miséricordieux de m'avoir permis de mener à terme ce modeste travail.

En second lieu, je remercie chaleureusement mon encadreur Dr.Bouzakipour son incroyable patience, ses précieux conseils et pour le temps qu'il m'a consacré au cours de la réalisation de ce mémoire.

A mon chargé de spécialité Mr.Doumaz qui a toujours été à mon écoute et d'un précieux soutien .

Mes vifs remerciements vont également à mes chers professeurs du département des énergies renouvelables qui sans leur enseignements et leur conseils, je ne serai pas arrivée là où je suis aujourd'hui.

Je tiens également à remercier Dr.Mazouz,etDr.Amrouche ainsi que Dr.AitSahed, pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de faire partie du jury de ma thèse.

Nomenclature - Symboles-Acronymes

CdTe : Le tellure de cadmium .
K : La première Couche électronique d'un atome.
L : La seconde Couche électronique d'un atome.
M : La dernière Couche électronique d'un atome .
 e^- : un électron.
 h^- : une lacune.
Si : Silicium .
E : Etat d'énergie.
BC, E_c : Bande de conduction .
BI : Bande interdite .
 BV, E_v : Bande de valence .
 E_g : Energie de gap .
 k_B : La constante de Boltzmann.
 E_F : L'énergie du niveau de Fermi .
 N_c, N_v : Les densités effectives d'états de la bande de conduction et de valence respectivement.
 \hbar : La constante de Planck réduite .
 p, n : La densité des trous et d'électrons respectivement.
 m_v^*, m_c^* : La masse effective des électrons et des trous respectivement .
ZCE : Zone de déplétion.
 I_{nd} : Le courant de saturation en fonction des porteurs minoritaires.
 I_s : Le courant de saturation.
 I_d : Le courant de diffusion.
 D_n, D_p : Les constantes de diffusion des porteurs de charges .
 τ_p, τ_n : La durée de vie des trous et des électrons respectivement .
 N_A, N_D : Les densités de dopage des régions p et n.
 I_{obs} : Le courant d'obscurité.
V : La tension aux bornes de la jonction .
T : La température .
 I_{ph} : Le photo-courant .
G : La quantité de paires électron-trou générés.
 L_n, L_p : Les longueurs de diffusion des électrons et des trous .
 I_{cc} : Courant de court-circuit.
 V_{oc} : Tension en circuit ouvert.
 P_m : Puissance maximale .
 V_m : Tension maximums.
 I_m : Courant maximums.
FF : Le facteur de forme .
 η : Le rendement .

P_{inc} : Puissance incidente.
c-Si : Silicium cristallisé .
mc-Si : Silicium monocristallin .
pc-Si : Silicium poly-cristallin .
 λ : La longueur d'onde .
 E_e : L'éclairement énergétique .
PECVD : Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition.
CIGS : Cuivre Indium Gallium Sélénium .
 α -Si : silicium amorphe.
CdS : Sulfure de cadmium .
DSC : Dye Sensitized Cell .
 Γ : Le centre de la zone de Brillouin.
 ϵ_0 : La constante diélectrique statique .
TCO : Oxyde Transparent Conducteur .
Al : L'aluminium.
Ni : Le Nickel.
SnO : L'Oxyde d'étain .
PV : Photovoltaïque.
 N_t : La densité des défauts .
 μ_n, μ_p : Les mobilités des porteurs de charges .
 I_{PV} : Le courant délivré par la cellule PV.
AM : Masse de l'air .
SRH : Shockley-Read-Hall.
InS : Sulfure d'indium .
ZnS : Sulfure de zinc

Sommaire

Résumé.....	I
Dédicaces.....	II
Remerciements.....	III
Nomenclature - Symboles-Acronymes	IV
Liste des figures.....	VI
Liste des tableaux.....	VII
Introduction générale	1
Chapitre I.....	2
I.1 Introduction :	3
I.2 Rappels sur la structure de la matière :	3
I.2.1 Cas de l'atome :	3
I.2.2 Cas d'un cristal et introduction vers les semi-conducteurs:.....	4
I.3 Les matériaux semi-conducteurs intrinsèques :	7
I.3.1 Le Dopage des semi-conducteurs :	8
I.3.2 Le dopage type N :	8
I.3.3 Le dopage type P :	8
I.3.4 Niveau énergétique :	9
I.4 Principe de l'effet photovoltaïque :	9
I.4.1 Cellule photovoltaïque.....	9
I.4.2 Notion de la jonction PN :	9
I.4.3 Caractéristiques électriques de la jonction P-N :	11
I.4.4 La caractéristique courant-tension d'une cellule Photovoltaïque :	12
I.5 Les technologies photovoltaïques :	14
I.5.1 Silicium cristallin:.....	14
I.5.2 Les couches minces :	15
I.5.3 Les matériaux organiques :	16
I.5.4 Cellules multi-jonctions :	17
I.6 Conclusion :	17
Chapitre II.....	18
II.1 Introduction :	19
II.2 Définition d'une couche mince:	19
II.3 Le tellure de cadmium (CdTe) :	20

II.4	Structure cristalline du CdTe :	20
II.5	Les défauts structuraux du matériau	22
II.5.1	Les défauts ponctuels (zéro dimension) :	22
II.5.2	Les défauts monodimensionnels :	22
II.5.3	Les défauts bidimensionnels :	22
II.5.4	Les défauts tridimensionnels :	23
II.6	Structure de la bande électronique :	23
II.7	La constante diélectrique :	24
II.8	Structure type de la cellule photovoltaïque à base de Cdte :	24
II.8.1	Contact avant :	25
II.8.2	Couche fenêtre :	25
II.8.3	Couche tampon (émettrice) :	25
II.8.4	Absorbeur :	26
II.8.5	Contact arrière :	26
II.8.6	Substrat :	26
II.9	Rendement de la cellule CdTe :	26
II.10	Travaux effectués pour optimisation du rendement de la cellule au CdTe :	27
II.11	Toxicité du Cadmium (Cd):	28
II.12	Conclusion :	29
Chapitre III		31
III.1	Introduction :	31
III.2	Présentation du logiciel SCAPS :	31
III.3	Description de notre étude :	33
III.4	Paramètres de la modélisation :	33
III.5	Résultats et discussion :	36
III.5.1	Optimisation de l'épaisseur de l'absorbeur CdTe et de l'émetteur CdS :	37
III.5.2	Optimisation de la concentration de dopage de l'absorbeur CdTe et de l'émetteur CdS :	38
III.5.3	Optimisation de la densité des défauts:	39
III.5.4	Optimisation de la couche émettrice :	41
III.6	Conclusion :	43
Conclusion générale :		43
Bibliographie et Webographie		45

Liste des figures

Chapitre 1

Figure I.1 : Représentation des niveau d'énergies de l'atome de Si .	3
Figure I.2 : Schéma représentatif de l'atome de Si.....	3
Figure I.3 : Les bandes d'énergies d'un cristal	4
Figure I.4 :Diagrammes de bandes d'énergie en fonction du vecteur d'onde	5
Figure I.5 : Diagramme des bandes d'énergie simplifié	6
Figure I.6 : Le passage d'un électron de la bande de valence vers la bande de conduction.....	7
Figure I-7 : Position des différents niveaux d'énergie pour les 3 cas étudiés.	9
Figure I.8 : Formation de la zone de déplétion au sein d'une jonction PN	10
Figure I.9 : Caractéristique I-V d'une cellule solaire à l'obscurité et sous éclairement	12
Figure I.10 : Cellules solaires au silicium monocristallin et au silicium multicristallin.....	14
Figure I.11 : Façade en CIGS au Pays de Galles, efficacité de 8,5%.....	15
Figure I.12 : Modules verre-verre au Telluride de Cadmium, efficacité de 9 à 11%.....	16
Figure I.13 : Sac à dos incorporant un module de technologie organique DSC	16

Chapitre 2

Figure II.1 : Structure cristalline du cdte	21
Figure II.2 : La structure Würtzite du CdTe	21
Figure II.3 : Première zone de Brillouin d'un réseau blende de zinc	23
Figure II.4 : Structure de bande électronique de CdTe détaillée.....	23
Figure II.5 : La structure de bande du CdTe.....	24
Figure II.6 : Structure standard d'une cellule à base de CdTe.....	25

Chapitre 3

Figure III.1 : Fenêtre de démarrage de SCAPS.....	32
Figure III.2 : Structure de la cellule PV modélisé – CdTe	33
Figure III.3 : Caractéristique J-V de la cellule modélisée au CdTe	36
Figure III.4 : Effet de l'épaisseur des couches CdTe et CdS sur les performances de la cellule.	37
Figure III.5 : L'influence du dopage de l'absorbeur CdTe et l'émetteur CdS sur V_{oc} ; FF ; η de la cellule simulée	38
Figure III.6 : Impacte de la densité du défaut neutre et accepteur sur les performances de la cellule simulée	40
Figure III.7 : Le rendement de la cellule en fonction de la temperature pour différents émetteurs	41

Liste des tableaux

Chapitre 3

Tableau III.1 : Paramètres de différentes couches de la structure modélisée.....	34
Tableau III.2 : Défauts dans différentes couches de la structure modélisée.....	35
Tableau III.3 : Paramètres de sortie de la cellule.....	36
Tableau III.4 : Paramètres des couches émettrices ZnS et InS	42

Introduction générale

En raison des progrès technologiques, de l'accroissement démographique et de la forte consommation énergétique mondiale, l'activité humaine est désormais considérée comme une des causes de ce que l'on appelle le changement climatique. Cependant, pour ralentir la course de ce terrible fléau, un nouveau concept a vu le jour appelé «Le développement durable», ce concept englobe plusieurs facteurs afin de continuer à vivre normalement sans menacer l'avenir des générations futures. L'une des mesures prises est le déploiement des énergies renouvelables afin de diminuer l'utilisation des énergies fossiles pour éviter leurs gaspillages et la pollution qu'elles engendrent.

L'énergie photovoltaïque est la plus probante des énergies renouvelables, étant donné que ses systèmes sont simples à installer et peu encombrants.

Les principaux obstacles du photovoltaïque sont son faible rendement et son coût. Pour remédier à cela, de nombreuses recherches ont été établies sur l'optimisation des cellules photovoltaïques pour pouvoir obtenir des rendements élevés associés à des prix de réalisation relativement bas.

Notre sujet d'étude vise l'optimisation des cellules photovoltaïques à base de tellure de cadmium (CdTe). Cela sera fait grâce à la détermination des effets des épaisseurs, du dopage et la densité des défauts des différentes couches d'une cellule au CdTe ainsi que sur l'influence de la température sur les caractéristiques électriques de cette dernière.

Notre travail est réparti en quatre chapitres : au niveau du premier chapitre I, nous exposerons le principe de fonctionnement des cellules solaires ainsi que leurs différentes technologies mais aussi les propriétés électriques et optiques des matériaux utilisés.

Le chapitre II est une recherche bibliographique sur les cellules au CdTe ; leurs propriétés structurales, optiques, électrique et quelques travaux sur l'optimisation du rendement.

Nous aborderons ensuite dans le chapitre III la structure et les paramètres de la cellule à étudier ainsi qu'une présentation du logiciel utilisé pour simuler les performances de cette dernière.

Pour finir, dans le dernier chapitre nous présenterons et analyserons les résultats obtenus des simulations effectuées.

Chapitre I

Généralités Sur L'énergie
Photovoltaïque :
Matériaux Et Cellules

I.1 Introduction :

Dans le contexte global d'améliorations des performances d'une cellule photovoltaïque, il nous a semblé intéressant de commencer ce travail par des principaux axes de développement photovoltaïques. Ainsi, en comprenant mieux les fondamentaux, cela nous permet de comprendre les propriétés de conversion des technologies photovoltaïques mais aussi leur limites. Pour cela on va consacrer ce premier chapitre au fonctionnement et aux avancées des différentes technologies mais surtout exposer d'une façon détaillée leurs diverses propriétés structurales, morphologiques, optiques et électriques afin d'avoir une vision globale sur le développement photovoltaïque.

I.2 Rappels sur la structure de la matière :

I.2.1 Cas de l'atome :

L'atome est constitué d'un noyau autour duquel gravitent des électrons de charge électrique $-q$ soit $-1.6 \cdot 10^{-19}$ Coulomb. Le noyau contient deux types de particules : les neutrons qui ne sont pas chargés et les protons qui portent une charge électrique $+q$. L'atome étant électriquement neutre, le nombre de protons est égal au nombre d'électrons. On distingue :

- Les électrons internes qui occupent les couches internes et qui sont très fortement liés au noyau.

- Les électrons périphériques (ou de valence) qui occupent la couche la plus externe et qui sont peu liés au noyau. Les électrons d'un atome gravitent autour du noyau sont assujettis à occuper des niveaux discrets E_1, E_2, \dots . En qui définissent chacun une couche électronique. Plus le niveau est élevé, plus la couche qui lui correspond est éloignée du noyau. Si l'on choisit comme origine des énergies ($E = 0$ eV, 1eV représentant $1.6 \cdot 10^{-19}$ Joule) celle d'un électron soustrait à l'influence du noyau (c'est-à-dire porté à une distance infinie), toutes les valeurs de E_n sont négatives. Cela se traduit par le fait qu'il faut produire un travail pour éloigner un électron

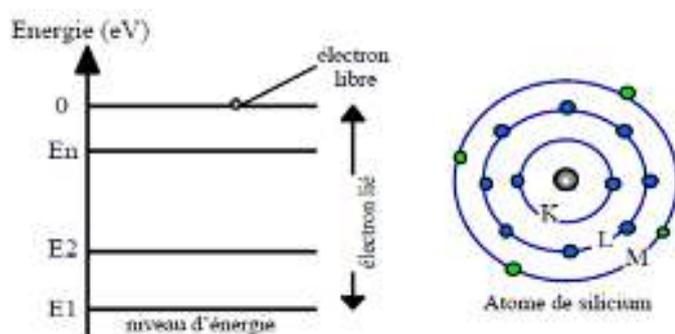


Figure I.1 : Représentation des niveaux d'énergies de l'atome de Si [1].

A titre d'exemple (Fig I.2), l'atome de silicium possède 14 électrons qui sont répartis sur trois couches : K avec 2 électrons, L avec 8 électrons et M qui possède 4 électrons. Contrairement aux deux premières, la couche M est incomplète, en effet elle peut accueillir 4 électrons supplémentaires. De façon générale, tous les atomes tendent à avoir huit électrons sur leur couche externe.

I.2.2 Cas d'un cristal et introduction vers les semi-conducteurs:

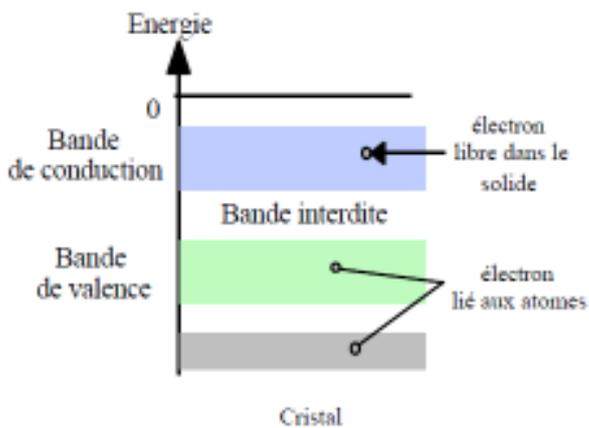


Figure I.3 : Les bandes d'énergies d'un cristal [1].

Un cristal est constitué d'un ensemble d'atomes dont les noyaux sont répartis dans l'espace de façon régulière. La cohésion des atomes est assurée par la mise en commun des électrons de valence pour former des liaisons dites de covalence.

Les états énergétiques possibles des électrons du cristal sont représentés par un diagramme analogue à celui de l'atome (Figure I.3). Mais du fait de l'interaction des atomes, les niveaux d'énergie se transforment en bandes d'énergie séparées par des bandes interdites (où il n'y a pas d'états permis) [1]. Ainsi, les bandes d'énergies formées permettent de distinguer deux types de zones : les zones énergétiquement permises, appelées bandes permises, et les zones énergétiquement non-permises, appelées bandes interdites.

En raisonnant uniquement à partir des électrons de valence, on se rend compte que ces derniers auront tendance à occuper la bande permise d'énergie la plus basse, c'est pourquoi on la dénomme couramment par le terme bande de valence. Si le nombre d'électrons de valence est trop important pour la bande de valence, alors les électrons de valence en excès occuperont légitimement la bande permise suivante. Cette seconde bande permise est couramment dénommée par le terme bande de conduction.

La bande interdite séparant la bande de valence de la bande de conduction est appelée gap énergétique, ce nom provenant du mot anglophone gap qui peut être traduit comme vide interstitiel. Ainsi, les diagrammes de bandes énergétiques de chaque élément et de chaque matériau permettront leur classification en deux catégories au niveau électronique : les isolants et les conducteurs.

Les matériaux isolants ont leurs électrons de valence contenus intégralement dans la bande de valence, ce qui est représenté (en rouge) par le cas (a) sur la Figure I.4. Quant aux matériaux conducteurs, ils ont leurs électrons de valence contenus à la fois dans la bande de valence et la bande de conduction, ce qui correspond au cas (b) de la Figure I.4.

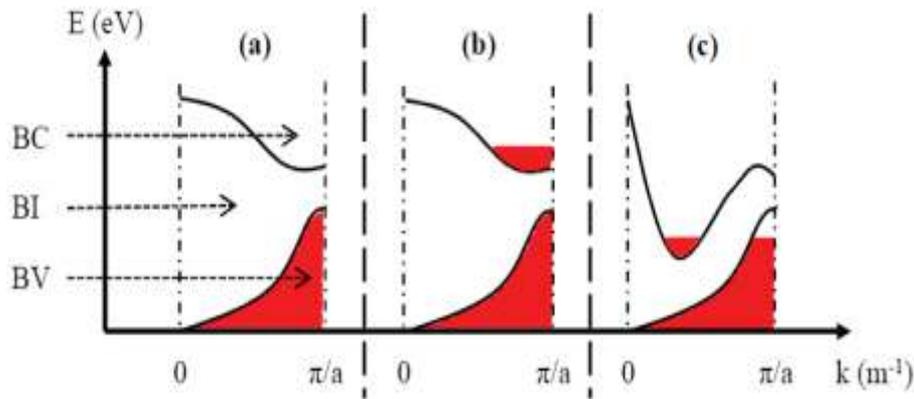


Figure I.4 : Diagrammes de bandes d'énergie en fonction du vecteur d'onde[2].

Sur la Figure I.4, Les acronymes BC, BI et BV désignent respectivement les bandes de conduction, interdite et de valence. On peut également constater la présence d'un troisième cas qui correspond au chevauchement des bandes de valence et de conduction (cas (c)). Cette troisième catégorie de matériaux constitue la famille dite des semi-métaux, car les électrons de valence présents dans la bande de conduction leur confèrent les mêmes propriétés que les métaux.

D'ailleurs, lorsque ce chevauchement est important et qu'il met en jeu un nombre suffisant d'états énergétiques, ces matériaux sont directement classés avec les matériaux conducteurs purs.

Les définitions des matériaux isolant et conducteur étant posées, nous allons ainsi pouvoir définir la famille des matériaux semi-conducteurs, qui sont ceux qui interviennent dans les technologies photovoltaïques. On a vu précédemment que les bandes de valence et de conduction sont séparées par un gap énergétique. Dans le cas où la valeur de ce gap énergétique, notée E_g , est suffisamment faible, alors il est possible que des électrons, situés dans la bande de valence d'un matériau a priori isolant, puissent acquérir suffisamment d'énergie pour franchir ce gap et passer dans

la bande de conduction. Des matériaux possédant une telle propriété sont dénommés semi-conducteurs.

Afin de pouvoir raisonner plus facilement avec les diagrammes de bandes d'énergie, on utilisera désormais des diagrammes simplifiés, ce qui facilitera la compréhension de certains phénomènes physiques. La Figure I.5 est un exemple de diagramme des bandes d'énergie simplifié, qui permet de comparer les trois principales familles de matériaux d'un point de vue électronique.

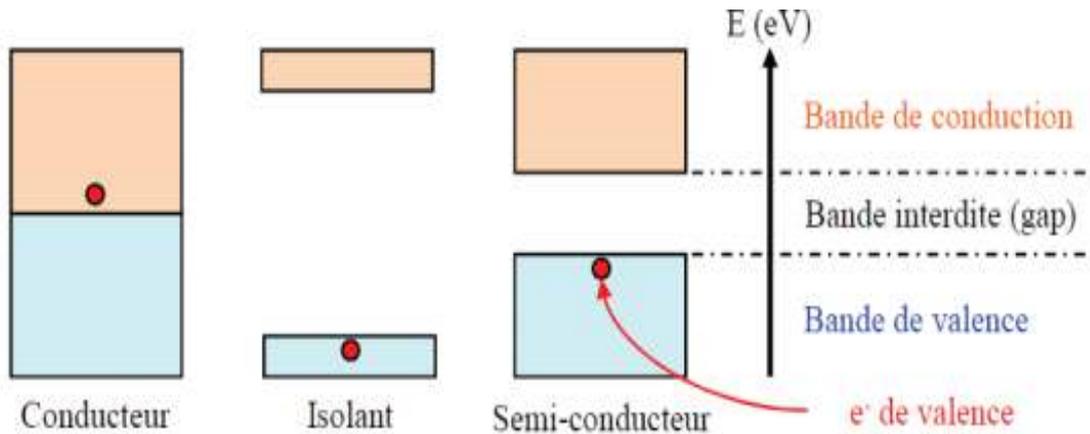


Figure I.5: Diagramme des bandes d'énergie simplifié [2].

Pour un semi-conducteur, le passage d'un électron de la bande de valence vers la bande de conduction est dû à l'acquisition de suffisamment d'énergie pour franchir le gap énergétique et se traduit physiquement par la rupture d'une liaison chimique au sein du matériau considéré.

L'électron libéré pourra ensuite se déplacer à travers le réseau cristallin via l'application d'un champ électrique, ou bien se recombiner pour reformer la liaison brisée. Un électron de charge négative e^- libéré va forcément laisser derrière lui une lacune électronique au sein du matériau, de charge positive h^+ , ce qui se traduira énergétiquement par l'apparition d'un trou dans la bande de valence. Ce duo de particules chargées s'appelle une paire électron/trou, et sous application d'un champ électrique, le courant résultant de la création de ces paires électrons/trous sera la somme des électrons présents dans la BC et des trous présents dans la BV par unité de temps. Ce phénomène est décrit dans la figure I.6 pour le cas d'une absorption de l'énergie d'un photon du rayonnement solaire:

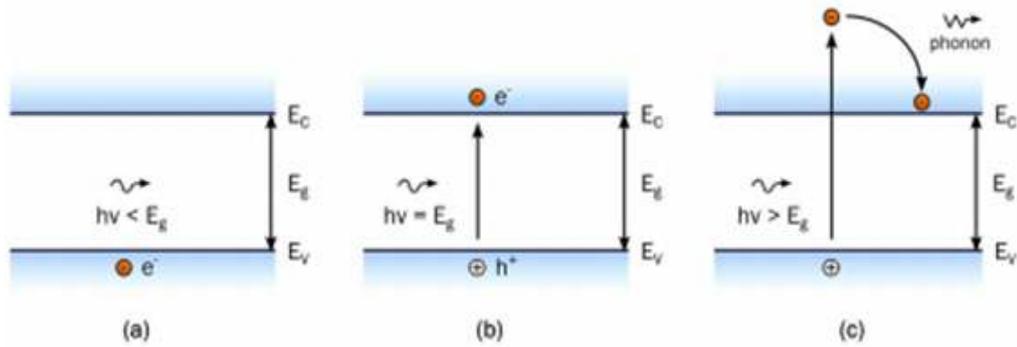


Figure I.6 :Le passage d'un électron de la bande de valence vers la bande de conduction[3].

a)-Transmission d'un photon d'énergie $E_{\text{photon}} < E_g$ dans un matériau semi-conducteur. b)- Absorption d'un photon d'énergie $E_{\text{photon}} = E_g$ et formation d'une paire électron-trou. c)- Absorption d'un photon d'énergie $E_{\text{photon}} > E_g$, formation d'une paire électron-trou et thermalisation de l'électron par émission de chaleur (phonon).

I.3 Les matériaux semi-conducteurs intrinsèques :

Les matériaux semi-conducteurs intrinsèques, qui sont sans impuretés cristallines, ont pour caractéristique au niveau de leur structure électronique, de posséder quatre électrons de valence par site. La statistique de remplissage des niveaux d'énergie suit la statistique de Fermi-Dirac, puisque les électrons et les trous sont des fermions (des particules à spin demi-entier). La probabilité pour qu'un état d'énergie E soit occupé par un électron à la température T est donc de la forme suivante :

$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{k_B T}\right)} \quad (1.1)$$

k_B désigne la constante de Boltzmann égale à $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$ et E_F , l'énergie du niveau de Fermi, le niveau statistique moyen occupé par l'ensemble des porteurs de charge. Quel que soit la température, la probabilité d'occupation pour un état à cette énergie E_F est toujours égale à $\frac{1}{2}$.

On peut démontrer, à partir des densités d'états énergétiques, que la concentration des porteurs (en cm^{-3}), en électrons n ou en trous p , est égale à :

$$n = N_c \times \exp\left(\frac{-(E_c - E_F)}{k_B T}\right) \quad (1.2) \quad N_c = 2 \times \left(\frac{k_B T \times m_c^*}{2\pi \times \hbar^2}\right)^{3/2} \quad (1.4)$$

Avec :

$$p = N_v \times \exp\left(\frac{-(E_F - E_v)}{k_B T}\right) \quad (1.3) \quad N_v = 2 \times \left(\frac{k_B T \times m_v^*}{2\pi \times \hbar^2}\right)^{3/2} \quad (1.5)$$

N_c et N_v densités effectives d'états de la bande de conduction et de valence, dont les grandeurs m_v^* et m_c^* : représentent la masse effective des électrons et des trous respectivement et \hbar est la constante de Planck réduite. E_c désigne le niveau d'énergie le plus bas de la bande de conduction, et E_v le niveau d'énergie le plus haut de la bande de valence. Ainsi, on peut définir l'énergie de gap E_g comme la différence de ces deux énergies :

$$E_g = E_c - E_v = -k_B T \ln\left(\frac{n \cdot p}{N_c N_v}\right) \quad (1.6)$$

I.3.1 Le Dopage des semi-conducteurs :

En microélectronique, tout comme dans le domaine photovoltaïque, le principal dispositif utilisant les semi-conducteurs est la jonction PN, qui fait appel aux semi-conducteurs extrinsèques, qui possèdent des impuretés cristallines, le plus souvent obtenus par dopage des semi-conducteurs intrinsèques. Il existe deux types de dopage :

I.3.2 Le dopage type N :

Le dopage type n consiste à substituer un site du réseau cristallin, possédant donc quatre électrons de valence, par un site pentavalent, possédant donc cinq électrons de valence. La nouvelle organisation cristalline génère donc un électron en excès qui demeure libre et, par conséquent, un site cationique chargé positivement.

I.3.3 Le dopage type P :

Le dopage type p consiste à substituer un site tétravalent du réseau cristallin par un site trivalent : ce qui aura pour conséquence d'inclure une lacune électronique dans le réseau cristallin et a fortiori, un site anionique chargé négativement.

I.3.4 Niveau énergétique :

La présence de ces dopants au sein du matériau semi-conducteur considéré va induire l'existence de niveau énergétique dans le gap : des niveaux de type donneurs (D) (cas n), qui seront pleins et situés sous la bande de conduction ; et des niveaux de type accepteurs (A) (cas p), qui seront vides et situés au-dessus de la bande de valence.

Ce décalage des niveaux de Fermi, ainsi que l'apparition des niveaux donneurs et accepteurs dans le gap sont schématisés sur la Figure I-7 suivante dans les cas : (1) intrinsèque, (2) dopé N, et (3) dopé P[2].

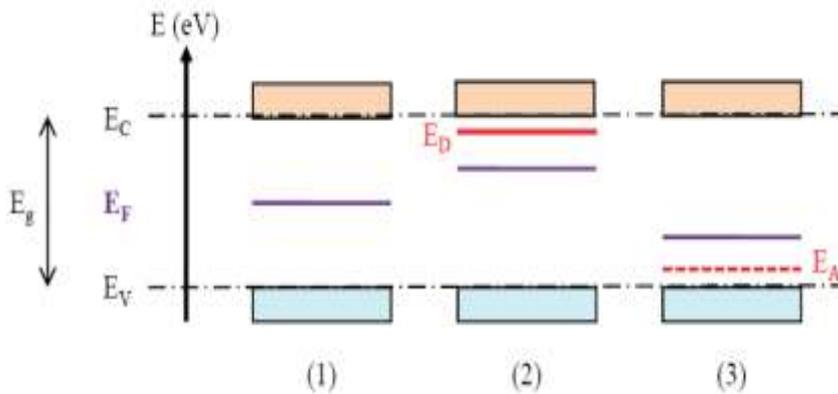


Figure I-7 : Position des différents niveaux d'énergie pour les 3 cas étudiés [2]

I.4 Principe de l'effet photovoltaïque :

Le mot "photovoltaïque" vient du grec "photos" qui signifie lumière et de "Volta" du nom du physicien italien qui, en 1800, découvrit la pile électrique.

L'effet photovoltaïque repose sur la transformation de l'énergie solaire, ou plus précisément l'énergie des photons en énergie électrique, grâce au processus d'absorption de la lumière des semi-conducteur.

I.4.1 Cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque ou photopile photovoltaïque est un composant opto-électrique, composé d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en énergie électrique. Elle est formée d'une jonction p-n qui permet de séparer spatialement l'électron et le trou photo-générés grâce à la variation du potentiel électrochimique au sein de la structure.

I.4.2 Notion de la jonction PN :

La mise en contact de deux semi-conducteurs, l'un dopé N et l'autre dopé P, forme ce que l'on appelle une jonction PN. L'association de ces semi-conducteurs va

conduire à la succession de deux phénomènes. Une diffusion initiale des porteurs libres de chaque zone a lieu et laisse apparaître des sites ioniques non-neutralisés, cela engendrera la formation d'une zone de déplétion, dite aussi zone de charge d'espace (ZCE), aux bornes de laquelle apparaîtra un champ électrique, dû à la différence de potentiels, i.e. une tension dénommée V_0 , induite par ces sites ioniques délaissés. Ce champ électrique va par la suite s'opposer à la diffusion des porteurs libres majoritaires de chaque zone, des électrons pour la zone type N et des trous pour la zone type P. Cette situation est schématisée sur la Figure I-8 ci –dessous :

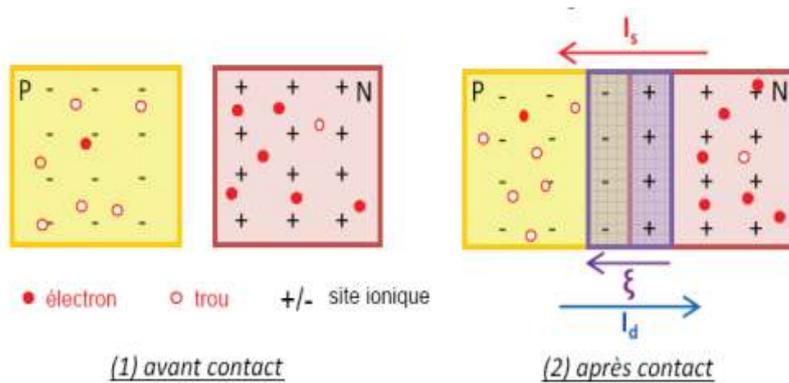


Figure I.8: Formation de la zone de déplétion au sein d'une jonction PN [2].

L'apparition du champ électrique \mathcal{E} aux bornes de la zone de déplétion, qui est schématisée en violet sur la Figure I-8, s'accompagne de l'apparition de deux courants: I_d et I_s . En effet, on a vu précédemment que les électrons sont les porteurs de charge majoritaires dans la zone N, mais ils sont également minoritaires dans la zone P, et vice-versa pour les trous. L'origine des porteurs de charge majoritaires est bien évidemment due aux différents dopages réalisés, mais cela n'empêche pas certains porteurs de charge minoritaires d'exister et qui statistiquement échappe aux phénomènes de recombinaison. Leur origine provient généralement de la présence de défauts dans la structure cristalline du semi-conducteur ou de la diffusion initiale lors de la formation de la jonction. Le champ électrique s'oppose à la diffusion des porteurs majoritaires, il va par conséquent favoriser le passage des porteurs minoritaires d'une zone à l'autre. Le franchissement de la ZCE par les porteurs de charge minoritaires engendrera le courant I_s , dit de saturation dont l'équation est en fonction des porteurs minoritaires comme suit :

$$J_s = qN_cN_v \left(\frac{1}{N_a} \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}} + \frac{1}{N_d} \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} \right) \exp \left(\frac{-E_g}{K_B T} \right) \quad (1.7)$$

D_n et D_p sont les constantes de diffusion des deux types de porteurs.

De même, il est possible que certains porteurs libres majoritaires parviennent tout de même à vaincre la force coulombienne exercée par le champ électrique. Ainsi, le franchissement de la ZCE par des porteurs de charge majoritaires créera le courant I_d , dit de diffusion [2].

Dont l'équation est la suivante :

$$J_{nd} = -q \cdot D_n \cdot \frac{\partial n}{\partial x} \quad (1.8)$$

$$J_{pd} = -q \cdot D_p \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \quad (1.9)$$

Avec τ_p et τ_n : la durée de vie des trous et des électrons, N_A et N_D sont les dopages des régions p et n.

I.4.3 Caractéristiques électriques de la jonction P-N :

- Sous obscurité, le courant dans une jonction pn est appelé courant d'obscurité ou courant de diode et est donné par l'équation de Shockley :

$$I_{obs} = I_S \left(\exp \frac{qV}{k_B T} - 1 \right) \quad (1.10)$$

Avec V : la tension aux bornes de la jonction (en V), T : la température (en K), I_S est le courant de saturation inverse de la jonction pn.

- Sous éclaircissement, comme nous l'avons vu dans le chapitre 1, les photons incidents transmettent leur énergie aux électrons qui vont se séparer des atomes dans lesquelles ils laissent des trous. Les électrons libérés et les trous vont alors chercher à se recombiner et par conséquent générer des paires électron-trou de chaque côté de la jonction pn. Les porteurs minoritaires ainsi générés, que ce soit les électrons de la base ou les trous de l'émetteur, diffusent vers la ZCE et sont entraînés par le champ électrique vers la zone n pour les électrons et vers la zone p pour les trous, ce qui provoque la génération d'un courant électrique entre les bandes appelé photo-courant (I.11). En considérant que chaque photon contribue à l'apparition d'un électron pour la génération d'un courant, nous pouvons écrire que le courant électrique est égale à :

$$I_{ph} = qG(L_n + L_p) \quad (1.11)$$

G est la quantité de paires électron-trou générée, et L_n, L_p sont les longueurs de diffusion des électrons et des trous .

- Le courant de sortie de la cellule (I) est alors égal à la différence entre le Courant générer sous éclairement et le courant d'obscurité. Les équations (I.10) et (I.11) donnent alors :

$$I = I_{ph} - I_S \left(\exp \frac{qv}{k_B T} - 1 \right) \quad (I.12)$$

I.4.4 La caractéristique courant-tension d'une cellule Photovoltaïque :

Les caractéristiques d'une cellule solaire photovoltaïque sont caractérisées par un certain nombre de paramètres extrait de la caractéristique courant-tension représentée dans la Figure.I.9 , ces paramètres sont cités dans ce qui suit :

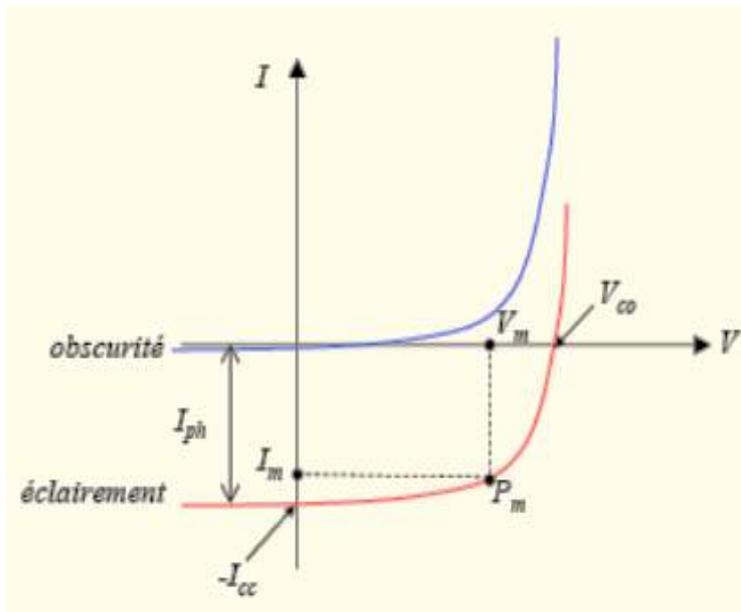


Figure I.9 : Caractéristique I-V d'une cellule solaire à l'obscurité et sous éclairement [5] .

I.4.4.1 Courant de court-circuit I_{cc} :

Lorsque le système est en court-circuit, c'est à dire lorsque $V = 0$, tout le courant généré par éclairement passe à travers la jonction, on le note I_{cc} , qui comme nous l'avons noté est simplement le photo-courant I_{ph} . Ce photo-courant croit linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule, de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température [4].

$$I_{cc}=I_{ph} = qG(L_n+L_p) \quad (I.13)$$

I.4.4.2 Tension en circuit ouvert V_{co} :

En circuit ouvert ($I = 0$) tout le courant passe par le circuit de charge [5]. L'expression de la tension est donnée par :

$$V_{co} = \frac{k_B T}{q} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_S} + 1 \right) \quad (I.14)$$

I.4.4.3 La puissance maximale P_m :

Le maximum de puissance P_m produit par le dispositif est obtenu à un point qui est représentée sur la caractéristique I-V par le point $P_m (V_m, I_m)$ qui est situé au coude de la caractéristique I-V et dit point de puissance maximale où les valeurs de tension V_m et du courant I_m appelées également tension et courant maximums respectivement [5]. la relation de P_m est la suivante :

$$P_m = I_m \cdot V_m \quad (I.15)$$

I.4.4.4 Facteur de forme FF :

A l'aide de la caractéristique courant-tension d'une cellule solaire dans l'obscurité et sous éclairage, il est possible d'évaluer les performances et le comportement électrique de la cellule photovoltaïque, donc le facteur de forme (FF) « en anglais : Fill Factor » est défini comme le rapport entre la puissance maximale et le produit ($I_{cc} V_{oc}$) [5], d'où il est donné par la relation :

$$FF = \frac{P_m}{I_{cc} \cdot V_{oc}} \quad (I.16)$$

I.4.4.5 Le rendement η :

Le rendement d'une cellule solaire est défini comme le rapport entre la puissance maximale produite par la cellule et la puissance du rayonnement solaire qui arrive sur la cellule, [5] on obtient ainsi la relation suivante :

$$\eta = \frac{P_m}{P_{inc}} \quad (I.17)$$

Avec : P_{inc} : Puissance incidente.

Ou bien étant donné que : $P_{inc} = E_e \cdot S$ (I.18)

Avec : E_e : l'éclairement énergétique .

Nous avons : $\eta = \frac{P_m}{E_e \cdot S}$ (I.19)

Le rendement d'une cellule photovoltaïque serait d'environ 85% si chaque photon pouvait transférer toute son énergie à un électron. Cependant, ce n'est pas le cas vu que le transfert d'énergie peut se faire uniquement selon la bande d'énergie propre à chaque semi-conducteur.

I.5 Les technologies photovoltaïques :

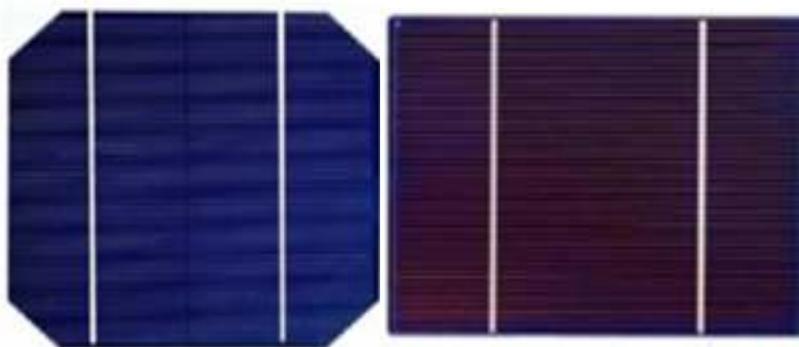
Il existe actuellement trois types de technologies photovoltaïques. Les différentes filières présentées sont inégalement utilisées et sont réparties de la façon suivante :

I.5.1 Silicium cristallin:

Le silicium (Si) est l'un des éléments les plus abondants sur la planète. Il est présent sous différentes formes. Parmi elles, le quartz (Si oxydé ou silice) constitue le minerai le plus exploité pour la production de Si.

Le silicium cristallin qui se présente en monocristallin , poly-cristallin, mais aussi en multi-cristallin .Le silicium cristallin domine depuis toujours le marché avec plus de 90% des ventes. Les cellules à partir de plaquettes de silicium cristallisé (c-Si) se divisent en deux catégories distinctes, celles à partir de silicium monocristallin (mc-Si) et celles à partir de silicium poly-cristallin (pc-Si). Le silicium monocristallin est plus cher que le silicium multi-cristallin mais permet d'obtenir un rendement plus élevé, avec près de 25,6% contre 21,9% de rendement record sur petite cellule en laboratoire[6].

Ces deux cellules sont représentées dans la figure I.10 ci-dessous :



Si-monocristallin

Si-multicristallin

Figure I.10 : Cellules solaires au silicium monocristallin et au silicium multicristallin[8].

I.5.1.1 Les limites du silicium cristallin :

Les cellules à base silicium nécessitent des épaisseurs bien plus importantes que les épaisseurs des substrats actuels ($\approx 150 \mu\text{m}$) pour absorber les longueurs d'onde $\lambda > 900 \text{ nm}$ lors du premier passage du rayonnement dans le silicium. Cette faible absorption impose un ingénieux piégeage optique très étudié dans la littérature afin d'augmenter la densité de courant disponible. Ce qui fait qu'on utilise une grande quantité de matière. On notera aussi qu'au-dessus des longueurs d'onde correspondant à des énergies inférieures à l'énergie du gap du silicium E_g ($E_g \approx 1.12 \text{ eV}$ à 300 K , donc $\lambda > 1100 \text{ nm}$) il y a très peu d'absorption inter-bande.

En plus de tout cela le coût de fabrication des cellules du silicium est élevé car c'est un processus complexe et si on prend en compte, ce qu'on a cité précédemment sur la quantité de matière cela fait du silicium un choix onéreux [7].

I.5.2 Les couches minces :

Cette génération de cellule repose sur la déposition de matériaux semi-conducteurs en couches minces (thin film). Ces matériaux sont déposés par des procédés tels que PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition) sur un substrat. L'épaisseur de la couche varie entre quelques nanomètres à des dizaines de micromètres. Ces technologies qui étaient initialement chères étaient réservées aux applications spatiales (en raison de leur poids par watt crête plus faible) et aux technologies de concentration. Avec l'augmentation des volumes de production, le prix de revient de ces technologies a baissé pour devenir compétitif avec les technologies cristallines de la première génération. Parmi les technologies en couches minces qui sont exploitées industriellement (production de masse), on distingue : - CdTe : Cadmium Telluride (Telluride de cadmium) , CIS / CIGS : Copper Indium Gallium Selenide , Silicium en couche mince : silicium amorphe $\alpha\text{-Si}$ et microcristallin [8].

Les figures suivantes (figure I. 11, figure I.11) représentent des applications des cellules à couches minces :



Figure I.11: Façade en CIGS au Pays de Galles, efficacité de 8,5% [8].



Figure I. 12 : Modules verre-verre au Telluride de Cadmium, efficacité de 9 à 11%

I.5.3 Les matériaux organiques :

Les cellules photovoltaïques organiques sont des cellules photovoltaïques dont au moins la couche active est constituée de molécules organiques. Il en existe principalement deux types:

- Les cellules photovoltaïques organiques moléculaires.
- Les cellules photovoltaïques organiques en polymères

Les cellules photovoltaïques organiques bénéficient du faible coût et des simplifications potentielles dans le processus de fabrication et elles offrent la perspective d'une production en continu (roll-to-roll) qui pourrait réduire drastiquement le prix de revient des panneaux solaires[8].



Figure I.13: Sac à dos incorporant un module de technologie organique DSC[8].

Pratiquement, ces technologies ne sont utilisées commercialement aujourd'hui que dans le secteur de l'électronique de consommation (chargeur de GSM/ baladeur MP3) où la durée de la cellule et du produit associé sont approximativement égales (2 ans). En améliorant la durée de vie ou en réduisant les coûts de production, d'autres applications devront voir le jour dans les années à venir.

Encore au stade de recherche expérimentale, le record de rendement est compris entre 4%et 5%.en laboratoire. Avant une possible commercialisation, des avancées concernant l'efficacité et l'encapsulation doivent encore être réalisés.

I.5.4 Cellules multi-jonctions :

Pour améliorer les performances des cellules photovoltaïques, des structures à double et triple jonctions ont été mise en œuvre. Elles permettent de bénéficier du spectre solaire d'une façon plus optimale.

La réponse photovoltaïque d'une cellule à simple jonction est limitée. Seule la proportion du spectre solaire dont l'énergie des photons est supérieure au gap d'absorption du matériau est utile, l'énergie des photons plus faible n'est donc pas utilisable. D'autre part, même si l'énergie des photons est suffisante, la probabilité de rencontrer un électron est faible. Ainsi, la plupart des photons traversent le matériau sans avoir transférer leur énergie. Quant aux cellules multi-jonctions , elles utilisent des systèmes à plusieurs niveaux, en empilant des jonctions possédant des gaps décroissants . Ainsi il est possible d'exploiter le spectre solaire dans sa quasi-totalité avec des rendements de conversion très importants[5].

I.6 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'évolution des cellules solaires, leur principe de de fonctionnement et la caractéristique courant-tension avec ses différents paramètres physiques, dansla mesure où tout ceci est utile pour une bonne compréhension de notre sujet d'étude.

Chapitre II

Etat De L'art

Des Cellules Au CdTe

Et Leurs Propriétés

II.1 Introduction :

Comme on a pu le voir dans le chapitre précédent, il existe trois générations de cellules photovoltaïques à ce jour, chacune de ces technologies a ses points forts et ses faiblesses. Dans ce chapitre, on va s'intéresser à la seconde génération qui est les cellules photovoltaïques en couches minces et tout particulièrement aux cellules à base de tellure de cadmium qui est le sujet de notre étude. L'existence chimique du tellure de cadmium est connue depuis le siècle dernier. Kobayashi a déterminé un premier diagramme de phase « température-composition » du système cadmium-tellure, mais ce n'est qu'en 1954 qu'il a été prouvé que ce matériau présentait des propriétés semi-conductrices. La contribution expérimentale la plus importante à ces premières recherches est due à De Nobel. Depuis lors, de nombreuses équipes de recherches se sont intéressées à l'étude de ce matériau mais il a fallu attendre 1972 pour que les premières cellules au CdTe voient le jour à Betelle institut

II.2 Définition d'une couche mince:

Une couche mince d'un matériau donné est un élément de ce matériau dont l'une des dimensions, qu'on appelle l'épaisseur, a été fortement réduite de telle sorte qu'elle s'exprimera habituellement en nanomètres ou en angströms. Cette très faible distance entre les deux surfaces limites (ce quasi-bidimensionnalité) entraîne une perturbation de la majorité des propriétés physiques. La différence essentielle entre le matériau à l'état massif et à l'état de couches minces est en effet liée au fait que, dans l'état massif, on néglige, généralement, le rôle des limites dans les propriétés, tandis que, dans une couche mince, ce sont au contraire les effets liés aux surfaces limites qui sont prépondérants. Il est assez évident que plus l'épaisseur sera faible et plus cet effet de bidimensionnalité sera exacerbé, et qu'inversement lorsque l'épaisseur d'une couche mince dépassera un certain seuil l'effet des limites deviendra minime et le matériau retrouvera les propriétés bien connues du matériau massif. Une caractéristique essentielle d'une couche mince est que, quelle que soit la procédure employée pour sa fabrication, elle est toujours solidaire d'un support sur lequel elle est construite. En conséquence, il sera impératif de tenir compte de ce fait majeur dans la conception, à savoir que le support influence très fortement les propriétés structurales de la couche qui y est déposée. Ainsi une couche mince d'un même matériau, de même épaisseur pourra avoir des propriétés physiques sensiblement différentes selon qu'elle sera déposée sur un substrat isolant amorphe tel le verre, ou sur un substrat monocristallin de silicium par exemple[9].

L'intérêt des couches minces provient essentiellement de l'utilisation économique des matériaux en rapport avec les propriétés physiques et de la simplicité des technologies mise en œuvre pour leur réalisation. Une grande variété de matériaux est utilisée pour produire ces couches minces. Citons les

métaux, alliages, composés réfractaires (oxydes, nitrures, carbures), les composés intermétalliques et les polymères[8].

II.3 Le tellure de cadmium (CdTe) :

Le tellure de cadmium est employé en tant que semi-conducteur dopé p. Un autre matériau est donc requis pour réaliser la jonction p-n, à savoir du sulfure de cadmium dopé n (CdS). Une telle union entre deux semi-conducteurs différents est ce qu'on appelle hétérojonction.

L'emploi du tellure de cadmium procure plusieurs avantages aux cellules : Seuls 1 à 8 μm de CdTe suffisent pour absorber une grande quantité de lumière, y compris lorsqu'elle vient à manquer, comme à l'aube, au crépuscule ou par temps couvert. Les panneaux solaires rigides se comportent également mieux que les autres lorsque leur température monte, ce qui survient aux plus chaudes heures de la journée. Ils ne perdent que 3 % de leur puissance par tranche de 10 °C supplémentaires, contre 5 % pour les cellules cristallines (chiffres de First Solar).

Le coût de fabrication d'une cellule au tellure de cadmium serait deux à trois fois moins important que celui d'une structure cristalline, notamment grâce à l'optimisation du procédé de fabrication, à la faible main-d'œuvre requise et aux économies d'échelle (baisse du coût à la suite de l'augmentation de la productivité)[10].

II.4 Structure cristalline du CdTe :

Le CdTe est un semi-conducteur appartenant à la famille II-VI formé à partir d'atomes du groupe II (cadmium) et d'atomes du groupe VI (tellure) de la classification périodique des éléments chimiques. Les atomes s'agencent usuellement sous la structure dite zinc-blende (aussi appelée sphalérite) comme présenté sur la Figure (a). Ce type de maille cristalline est formé de deux réseaux cubiques faces centrées, l'un aux nœuds duquel ne se trouvent que des atomes de cadmium, l'autre que des atomes de tellure, décalés l'un de l'autre d'un quart de diagonale du cube, les atomes de la surface sont liés par trois liaisons au reste du cristal. L'environnement de chacun de ces atomes étant tétraédrique, l'ajout d'un atome supplémentaire à la maille se fera par la création d'une liaison simple, il sera donc moins stable que ceux liés par trois liaisons. Finalement chaque surface reste constituée par un seul type d'atome : la face (111) ou A est la face cadmium, la face (-1-1-1) ou B est la face tellure.

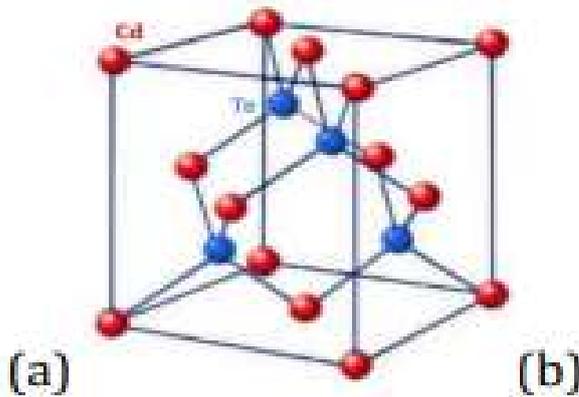


Figure II.1: Structure cristalline du CdTe[11].

(a) Modèle de la maille cristalline du CdTe, type cubique face centrée. (b) Modèle de la face {111} de la structure Zinc Blende du CdTe

La maille élémentaire comporte quatre molécules du composé II-VI : les atomes du groupe II: $(0,0,0)$; $(0,1/2,1/2)$; $(1/2,0,1/2)$; $(1/2,1/2,0)$, et les atomes du groupe VI: $(1/4,1/4,1/4)$; $(1/4,3/4,1/4)$; $(3/4,1/4,1/4)$; $(1/4,3/4,3/4)$. Chaque atome est entouré de quatre atomes de l'autre type, placés aux sommets d'un tétraèdre. Le paramètre de maille (a_0) du CdTe est $6,48 \text{ \AA}$.

Le semi-conducteur CdTe peut aussi se cristalliser dans une structure différente qui est la structure Würtzite, sa maille élémentaire est composée de deux molécules du composé II-VI, les atomes du groupe II occupent les positions $(0,0,5/8)$ et $(2/3,1/3,1/8)$ et les atomes du groupe VI occupent les sites $(0,0,0)$ et $(2/3,1/3,1/2)$, un atome du groupe II est entouré de quatre atomes du groupe VI disposés aux sommets d'un tétraèdre[11].

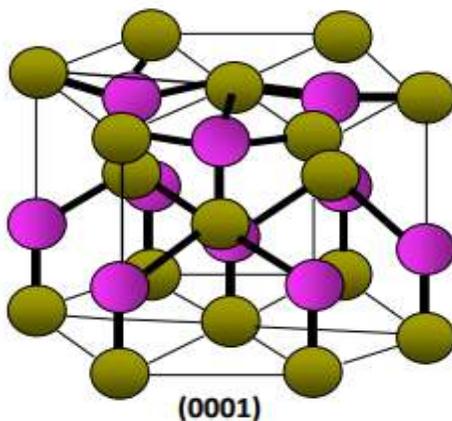


Figure II.2 La structure Würtzite du CdTe[12].

II.5 Les défauts structuraux du matériau

Quelle que soit la technique de croissance utilisée, il subsiste toujours un certain nombre de défauts dans le cristal de tellure de cadmium, en voici une liste non exhaustive :

II.5.1 Les défauts ponctuels (zéro dimension) :

Ces défauts sans dimension peuvent être des lacunes, des interstitiels (par exemple un atome de tellure en site interstitiel) ou des anti-sites (par exemple un atome de tellure en site cadmium). Le défaut intrinsèque majoritaire présent dans le cristal de CdTe, formé en milieu riche tellure, est la lacune de cadmium, notée VCd [Berding, 2009].

II.5.2 Les défauts monodimensionnels :

Ce sont des défauts linéaires qui apparaissent sous l'effet de contraintes appliquées au matériau. Ces contraintes sont de l'ordre de la limite d'élasticité théorique du cristal et ont souvent pour origine : la différence de contraction thermique entre le réseau du cristal et les défauts qu'il contient (atomes d'impuretés, lacunes, atomes interstitiels), ou la présence de gradients de température dans des cristaux peu conducteurs de chaleur, ou le mode de croissance.

II.5.3 Les défauts bidimensionnels :

II.5.3.1 Les joints de grains :

Les joints de grains sont visibles à l'œil nu dans le CdTe poly-cristallin et marquent la jonction entre deux grains de même nature cristalline mais d'orientation différente. La désorientation autour du joint de grain peut valoir de 10 à 15° dans le CdTe.

II.5.3.2 Les sous-joints de grains :

Les sous-joints de grains ou murs de dislocations sont dus à la juxtaposition de dislocations qui forment ainsi un plan dans lequel le cristal est déformé. Ce sont des cas particuliers des joints de grains. Ils entraînent une désorientation plus faible (entre quelques arc sec et quelques arc min), telle que, à une distance suffisamment grande du défaut (plusieurs dizaines de mailles élémentaires), l'orientation du cristal reste la même.

II.5.3.3 Les macles:

Les macles sont des défauts d'empilement des atomes associées à une irrégularité de la séquence. Par exemple, la séquence normale d'empilement de la maille cristalline CFC est ABCABCABCABC ; mais elle peut devenir ABCABCACBA ce qui traduit l'apparition d'une macle (cette macle correspond à une rotation de 180° dans le plan {111}, ce qui est équivalent à une symétrie par le miroir plan {111}. Ces défauts se manifestent par l'apparition d'une ligne droite à la surface du matériau.

II.5.4 Les défauts tridimensionnels :

Ils se divisent en deux types, les inclusions et les précipités, qui sont des défauts créés par l'accumulation de tellure ou de cadmium dans le cristal. La dimension d'une inclusion varie de quelques micromètres à quelques centaines de micromètres et celle d'un précipité est de quelques nanomètres[11].

II.6 Structure de la bande électronique :

Le matériau binaire CdTe est un semi-conducteur à bande interdite directe, le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence se situent au centre de la zone de Brillouin (point Γ sur la fig. II.3). L'absorption et l'émission de lumière peuvent alors se faire avec conservation du vecteur d'onde c'est-à-dire sans impliquer d'interaction avec d'autres quasi-particules comme les phonons.

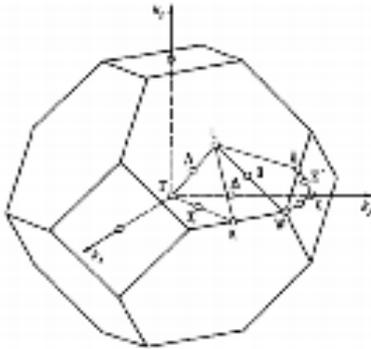


Figure. II.3 : Première zone de Brillouin d'un réseau blende de zinc[13].

La bande de conduction est deux fois dégénérée au point Γ et possède la symétrie Γ_6 . La structure de bande, calculée avec le formalisme du pseudo-potentiel est représentée sur la (fig. II.4).

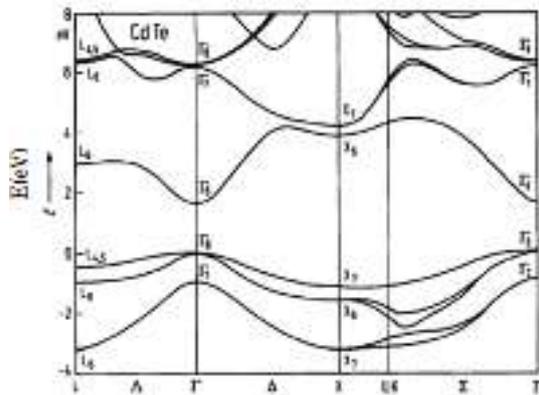


Figure II.4 : Structure de bande électronique de CdTe détaillée[13].

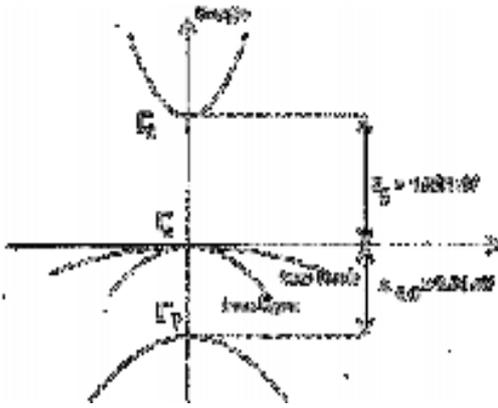


Figure II.5 : La structure de bande du CdTe

Le CdTe est un semi-conducteur à gap direct, sa structure de bande (lui permet des transitions verticales radiatives entre la bande de valence et la bande de conduction

Le gap est direct, avec une largeur de bande interdite E_g qui varie avec la température selon la relation : $E_g: 1.60603 - 1.64 \cdot 10^{-6} \cdot T^2$ (II.1)

Et à : 2K; $E_g = 1,606$ eV , 300 K; $E_g = 1.52$ eV

Dans l'intervalle de température de nos mesures ($4,2K < T < 40$ K), la variation de E_g avec la température restera négligeable [13].

II.7 La constante diélectrique :

La Constante diélectrique d'un matériau est liée à la polarisabilité électrique des molécules ou atomes constituant le matériau.

La valeur de la constante diélectrique optique des cristaux de CdTe est :

$$\epsilon_{\infty} = 9.4$$

L'application de la relation de Lyddane-Sachs-Teller compte tenu des fréquences longitudinale ω_{LO} et transverse optique ω_{TO} , fournit la constante diélectrique statique ϵ_0 [14] :

$$\epsilon_0 = \epsilon_{\infty} \frac{\omega_{LO}^2}{\omega_{TO}^2} \quad (II.2)$$

II.8 Structure type de la cellule photovoltaïque à base de CdTe :

Concrètement, une cellule au CdTe se compose, de haut en bas (Fig II.6) :

- une grille qui collectera les charges générées (contact avant)
- de la couche fenêtre (conductrice et transparente)
- de la couche tampon dopé n
- de tellure de cadmium dopé p
- contact arrière

- du substrat.



Figure II.6-Structure standard d'une cellule à base de CdTe

II.8.1 Contact avant :

Le contact avant constitue le pôle négatif du générateur photovoltaïque, il est généralement sous la forme d'une grille. Son rôle est de collecter les charges et de les livrer au circuit externe.

II.8.2 Couche fenêtre :

La couche fenêtre est transparente, afin de laisser suffisamment de lumière à la région de jonction et la couche absorbante du dispositif, et conductrice pour permettre le transport du photo-courant généré au circuit extérieur sans trop de pertes. Cette couche fenêtre est constituée d'oxyde transparent conducteur (TCO), sur lequel une fine grille métallique doublée (Ni-Al) est déposée de façon à réduire la résistance série de la couche fenêtre et de collecter les charges générées par le dispositif. Le Ni sert de couche d'accroche et permet d'éviter l'oxydation de l'Al liée à la présence sous-jacente du TCO. Le TCO, généralement utilisé pour les cellules CdTe, est l'oxyde de Zinc (ZnO) déposé par pulvérisation cathodique, mais l'oxyde de Zinc (ZnO) peut également être rencontré

II.8.3 Couche tampon (émettrice) :

La couche tampon est un semi-conducteur ayant une conductivité de type n dont le gap doit être supérieur à celui de l'absorbeur. Deux rôles lui sont

majoritairement attribués : un rôle électrique, et un rôle de couche protectrice. Du point de vue électrique, cette couche adapte la largeur de la bande interdite entre l'absorbeur et la couche fenêtre et limite les recombinaisons des porteurs à l'interface de ces deux couches. Elle permet également de protéger la surface de l'absorbeur lors du dépôt par pulvérisation cathodique de la couche fenêtre, qui peut engendrer des défauts à la surface du CdTe.

II.8.4 Absorbeur :

L'absorbeur est la partie de la cellule dans laquelle les photons vont être convertis en paires électrons-trous. Dans le cas présent, il s'agit d'un semi-conducteur de type P de la famille II-VI ; le tellure de cadmium (CdTe), qui avec la couche tampon vont constituer la jonction P-N de la cellule.

II.8.5 Contact arrière :

Le contact arrière, qui constitue le pôle positif du générateur photovoltaïque, est un métal déposé sur la partie inférieure de l'absorbeur dont le rôle est de collecter les porteurs à partir de l'absorbeur et de les livrer à la charge externe. Il doit donc, répondre à certains critères chimiques, mécaniques et économiques. De nombreux métaux ont été étudiés comme le Tungstène, le Molybdène, le Chrome, le Tantale, le Manganèse, l'Or, l'Aluminium, l'Argent et le cuivre.

II.8.6 Substrat :

C'est un matériau utilisé comme support des cellules photovoltaïque, dont la nature peut varier selon les propriétés désirées pour ces dernières (souple ou rigide)[15].

II.9 Rendement de la cellule CdTe :

La simplicité chimique du matériau à base de tellure de cadmium (CdTe) et sa stabilité en font un matériau attractif. Ses propriétés thermo-physiques et ses caractéristiques chimiques permettent de fabriquer des cellules simplement et à faible coût[16]. Le rendement des cellules en CdTe dépend fortement de la manière dont les couches actives sont déposées (température de dépôt, vitesse et nature du substrat). Comparé aux autres technologies couche mince, le CdTe est plus facile à déposer et donc plus approprié à la production de module PV de surface importante. D'un point de vue rendement énergétique, la filière CdTe, présente des rendements de cellules record de 22,1 %, en laboratoire et des modules commerciaux à près de 16,9 % et les coûts de fabrication semblent être compétitifs avec la filière c-Si [15].

II.10 Travaux effectués pour optimisation du rendement de la cellule au CdTe :

FEROUANI,A.MERADBOUDIA,M.RAHMOUN,K, Simulation numérique et optimisation des performances d'une cellule solaire basée sur le CdTe. Revue des Sciences Fondamentales Appliquées ,2011, Volume 3, Numéro 1, Pages 58-67.

Dans cet article une étude sur les cellules photovoltaïques au CdTe a été faite en mettant l'accent sur les caractéristiques de conception essentielles d'un module photovoltaïque, les résultats ont été simulés avec SCAPS en une dimension. L'optimisation a été faite en fonction de la température et de la longueur d'onde, Les résultats obtenus après optimisation sont: $V_{oc} = 0,632$ V, $J_{cc} = 39,1$ mA / cm², FF = 82,98% et un rendement de 18,26%.

MISSOUM,I.LABBANI,R, simulation of thin film cdte solar cells, first international conference on renewable energies and nanotechnology impact on medicine and ecology .Constantine ,2013.

Dans ce travail, les cellules solaires constituées d'une homo-jonction en CdTe ont été étudiées au moyen d'une simulation avec PC1D. Ainsi, plusieurs paramètres comme l'épaisseur de p-CdTe et de son dopage N_a ont été minutieusement étudiés , et il fut constaté que la cellule solaire CdTe présentait les meilleures performances pour $4\mu\text{m}$ et $N_a = 1 \times 10^{16}$ cm⁻³ avec une efficacité de conversion $\eta = 18,20\%$.

LOPATKA,R, la modélisation des caractéristiques courant-tension des cellules solaires à base de hétérojonction n-ZnS/p-CdTe et n-CdS/p-CdTe. University d'Etat de Sumy,2013.

L'objectif principale de cette étude était de comparer une cellule de couches minces à base de n-ZnS/p-CdTe avec des dispositifs basés sur n-CdS/p-CdTe, la détermination des paramètres de conception optimale de ces cellules solaires adonné: $J_{cc} = 28,91$ mA/m², $U_{oc} = 1,04$ V, FF = 87,61 et $\eta = 26,46$ % .

BOUZAKI **.Mohammed** **.BENYOUCEF**
.Boumediene.BENOUAZ,Tayeb.SOUFI,Aicha.BENHAMOU,Amina, modeling of the junction CdS (N)/CdTe (P), International Journal of Applied Engineering Research .Volume 10, Number 6 ,2015 ,p.16097-16104 .

cette étude vise l'optimisation de la cellule solaire CdTe / CdS, la structure des couches suivantes: SnO / CdS / CdTe ont été modélisées afin d'étudier l'effet des épaisseurs, la concentration du dopage et la densité des défauts du CdTe sur la performance de la cellule solaire. les résultats ont donné : $\eta = 22.3\%$, $V_{OC} = 960$ mV, $J_{cc} = 28,7$ mA/cm² et FF de 81,5%.

LAKSHMISHREE,B.SELVA

PRIYA,S.THERASARANJANI,P.Karthick,P .JEYADHEEPAN, K .SRIDHARAN,M.Influence of CdTe Thickness on the Properties of Vacuum Evaporated CdSe/CdTe Bilayer. Volume 3, Issue 6, 2016, Pages 1494-1501 .

Cette étude s'est porté sur l'influence de l'épaisseur de la couche inférieure (CdTe) sur diverses propriétés telles que structurelles, morphologiques, optiques et électriques a été étudiées. Le résultat montre que la nature poly-cristalline et la cristallinité du CdTe sont améliorées avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche de CdTe. La bande interdite optique des couches de CdTe a diminué.

TaowenWang,Sheng Du Wei Li,Cai Liu .JingquanZhang,LiliWu,BingLi,GuanggenZeng, Control of Cu doping and CdTe/Te interface modification for CdTe solar cells. Materials Science in Semiconductor Processing, Volume 72, 2017, Pages 46-51.

Un traitement en solution CuCl₂ a été utilisé dans ce travail pour améliorer le dopage p du CdTe. La densité de porteurs de CdTe a été augmentée de $4,72 \times 10^{13}$ à $1,11 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ et la tension en circuit ouvert du dispositif a été améliorée de plus de $\sim 50 \text{ mV}$ de 728 à 783 mV et un facteur de remplissage supérieure à 72% pour les cellules solaires d'une surface de $0,24 \text{ cm}^2$ ont été atteints.

Bosio .A.Rosa.G,Romeo.N .Past, present and future of the thin film CdTe/CdS solar cells. Solar Energy,2018.

Cette étude a mis en évidence Les caractéristiques de base exceptionnelles des cellules solaires en couches minces poly-cristalline CdTe et Les propriétés des matériaux mais aussi les étapes du processus de fabrication, ce qui a mener vers un nouveau défis de 25% d'efficacité Cellules solaires à base de CdTe .

II.11 Toxicité du Cadmium (Cd):

Les problèmes d'environnement associés à l'utilisation du Cadmium empêchent les tentatives de développement stratégique de la filière du CdTe .L'élément Cd présente une toxicité certaine quand on s'y trouve exposé de façon chronique (dans le long terme, il peut provoquer des dysfonctionnements rénaux ou des cancers du poumon); les composés du Cd tels que CdO, CdCl₂, CdSO₄, sont très solubles dans l'organisme humain. Ils sont donc dangereux, surtout au cours du processus de fabrication. Les fumées de CdO en particulier peuvent être très nocives. Certaines protections sont donc à prendre par les opérateurs dans le procédé de fabrication mais leCdTe est un composé extrêmement stable qui ne présente pas de toxicité sous cette forme. Le produit fini sous forme de module encapsulé ne présente donc aucun danger, même en cas d'incendie.un simple recyclage en fin de vie suffit pour empêcher un éventuel risque sur l'environnement[18].

II.12 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons exposé les avantages et inconvénients de la cellule à base de CdTe , en citant ses paramètres structurelles, électriques, optiques mais aussi sa structure type et l'avancé de son rendement au niveau expérimental et industriel ,tout cela afin d'en apprendre plus sur cette cellule et sur le composé CdTe. On a appris que le CdTe était un composé promoteur pour les cellules solaire étant donné sa simplicité chimique et ses méthodes d'élaborations peu coûteuses et sans coefficient d'absorption élevé mais reste que son éventuelle toxicité, l'empêche d'avoir un réel marché et retard ses avancées technologiques.

Chapitre III

ModélisationEtOptimisation

III.1 Introduction :

La modélisation est largement utilisée dans le domaine photovoltaïque, elle permet de déterminer les paramètres les plus influents sur le fonctionnement des cellules solaires afin d'améliorer les performances du produit, tout en évitant le gaspillage de la matière, mais c'est surtout c'est un gain de temps et d'argent par rapport aux méthodes expérimentales.

Elle permet en fait, de mieux comprendre le fonctionnement de ces dispositifs et donne des idées aux fabricants pour varier et adapter leurs méthodes de production.

III.2 Présentation du logiciel SCAPS :

SCAPS (SolarCell Capacitance Simulator) est un logiciel de simulation numérique des cellules solaires unidimensionnelles développé par le département des systèmes électroniques et informatiques (ELIS), à l'université de Gent en Belgique. Plusieurs chercheurs ont contribué au développement de ce logiciel : Alex Niemegeers, Marc Burgelman, Koen Decock, Johan Verschraegen, Stefaan Degraeve [Ref Manuel]. Ce logiciel est disponible gratuitement pour la communauté des recherches photovoltaïques (PV) (Instituts et établissements de recherche). Il fonctionne sur PC sous les systèmes d'exploitation Windows 95, 98, NT, 2000, XP, Vista, Windows 7, Windows 8 et occupe à peu près 50 MB d'espace sur le disque.

SCAPS est originellement développé pour les structures de cellules de famille CuInSe_2 et CdTe . Cependant, plusieurs extensions ont amélioré ses capacités de façon à devenir applicable pour les cellules solaires cristallines (de la famille Si et GaAs), ainsi que les cellules solaires amorphes (a-Si et les micro-morphes Si) [17]. Un aperçu de ses principales caractéristiques est donné ci-dessous :

- Jusqu'à 7 couches semi-conductrices
- Presque tous les paramètres peuvent être introduits avec des variations graduées (en dépendance de la composition et la profondeur de la cellule, ex : χ , ϵ , N_c , N_v , V_{th} , μ_n , μ_p , N_A , N_D , tous les pièges (défauts N_t).
- Mécanismes de recombinaison : bande-à-bande (directe), Auger, SRH.
- Les niveaux des défauts : en volume ou à l'interface, en considérant leurs états de charge et la recombinaison à leurs niveaux.
- Les niveaux des défauts, type de charge : pas de charge (neutre), monovalent (un seul donneur, accepteur), divalent (double donneur, double accepteur, amphotère), multivalent (défini par l'utilisateur).
- Les niveaux des défauts, distribution énergétique : niveau discret, uniforme, Gauss, sous forme de queue ou bien une combinaison.
- Les niveaux des défauts, propriété optique : Excitation directe par la lumière est possible (connu par effet de l'impureté photovoltaïque, I_{PV}).
- Les niveaux des défauts, transitions métastables entre les niveaux.

- Contacts : Travail de sortie du métal ou régime de bande plate ; Propriété optique (Réflexion ou transmission) du filtre.
- Tunneling, inter-bandes (dans la bande de conduction ou dans la bande de valence), tunneling à/ou à partir des états de l'interface.
- Génération : à partir d'un calcul interne ou bien d'un fichier $g(x)$ fourni par l'utilisateur.
- Illumination : plusieurs types de spectre sont disponibles (AM_0 , $AM_{1.5D}$, $AM_{1.5G}$, $AM_{1.5G}$ édition 2, Monochromatique, Blanc, etc.).
- Illumination: du côté p ou n.

Au démarrage de SCAPS, la fenêtre qui s'ouvre est présentée dans la figure III.2 :

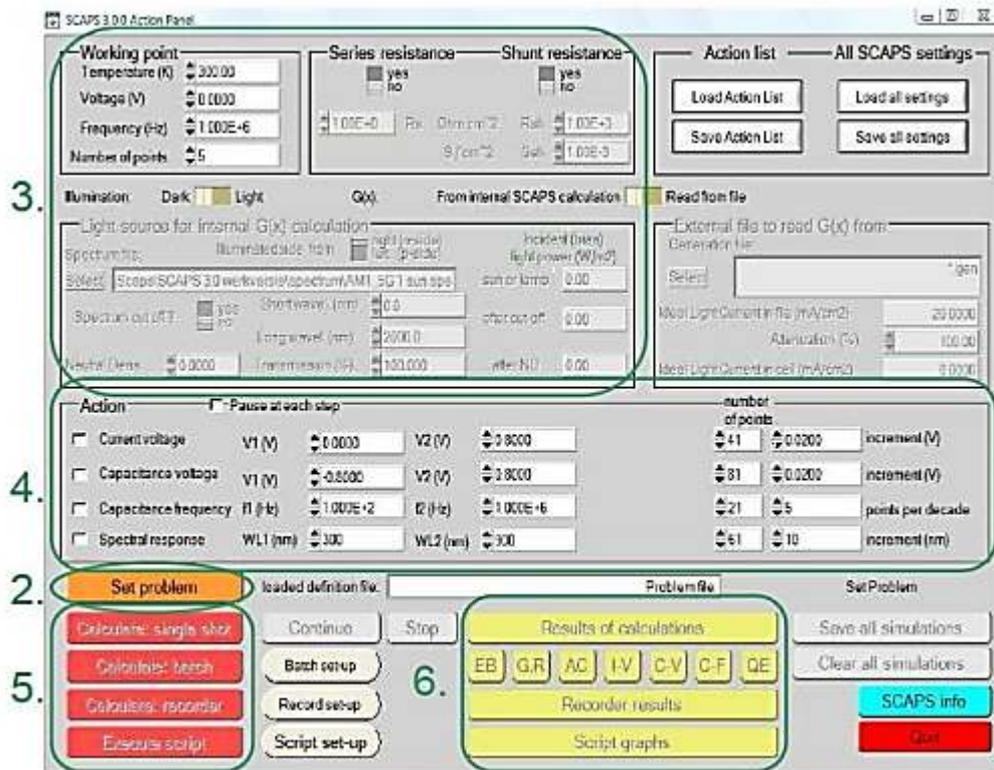


Figure III.1 : Fenêtre de démarrage de SCAPS[17].

La signification des blocs nommés de 1 à 6 est expliquée comme suivant:

1. Lancer SCAPS.
2. Définir le problème, ainsi que la géométrie, les matériaux et toutes les propriétés de la cellule solaire étudiée.
3. Indiquer les circonstances dans lesquelles la simulation est effectuée (spécifier le point de fonctionnement).
4. Indiquer la mesure (la caractéristique) à simuler.
5. Commencer le calcul.
6. Afficher les courbes de simulation .

III.3 Description de notre étude :

Pour notre étude qui consiste à optimiser les performances d'une cellule de CdTe de jonction p-n, on va cibler les trois couches : couche fenêtre, couche émettrice et la couche absorbante qui seront étudiées à l'aide une simulation numérique, qui sera faite par le logiciel SCAPS (SolarCell Capacitance Simulator). Notre choix des matériaux, s'est posé sur l'Oxyde d'étain (SnO) comme couche fenêtre et sur le sulfure de Cadmium CdS comme couche émettrice (Figure III.1) . Nous allons intégrer les différents paramètres d'entrée de notre cellule qui ont été établie à partir des résultats de la littérature, dans le logiciel SCAPS et faire des changements dans les valeurs de V_{co} , J_{cc} , FF et η , en manœuvrant plusieurs paramètres tel que : l'épaisseur, la concentration de dopage, la densité des différents défauts de chaque couche ainsi que la variation de la température sur la couche CdS et sur divers matériaux utilisés comme couche émettrice afin d'optimiser cette dernière.

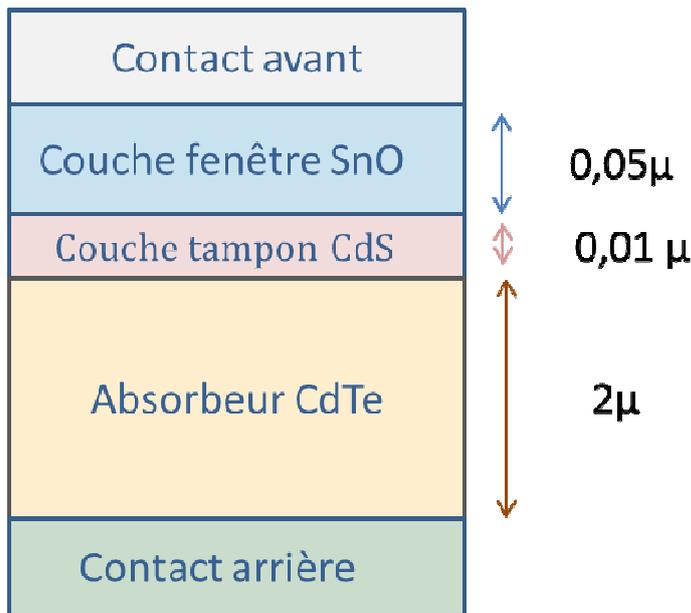


Figure III. 2 : Structure de la cellule PV modélisée – CdTe.

III.4 Paramètres de la modélisation :

Pour une simulation réussie, les paramètres d'entrée comprennent : l'épaisseur du matériau, la constante diélectrique, la bande interdite, l'affinité électronique, la mobilité et la densité des états effective, la concentration des porteurs, le coefficient d'absorption, les états de défauts, la densité des défauts, la distribution de défauts, la section de capture efficace et enfin, les états de queues de bande.

Pour notre structure de base , on a utilisé les paramètres présentés dans le tableau Tableau III. 1 et le Tableau III. 2.

Tableau III. 1 : Paramètres des différentes couches de la structure modélisée[18].

Paramètres	SnO	CdS	CdTe
Épaisseur (μm)	0,05	0,01	2
Energie de gap (eV)	3,6	2,4	1,5
Affinité électronique	4,5	4,5	4,3
Permittivité diélectrique	9	10	9,4
Densité efficace des états CB (cm^{-3})	$2,2 \cdot 10^{18}$	$2 \cdot 10^{18}$	$8 \cdot 10^{17}$
Densité efficace des états VB (cm^{-3})	$1,8 \cdot 10^{19}$	$1,8 \cdot 10^{19}$	$1,8 \cdot 10^{19}$
Vitesse Electronique (cm/s)	$1 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^7$
Vitesse des trous (cm/s)	$1 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^7$
Mobilité électronique (cm^2/Vs)	$1 \cdot 10^2$	$1 \cdot 10^2$	$3,2 \cdot 10^2$
Mobilité des trous (cm^2/Vs)	25	25	40
Densité-donateurs ND (cm^{-3})	$1 \cdot 10^{19}$	$1 \cdot 10^{19}$	-
Densité-accepteur NA (cm^{-3})	-	-	$2 \cdot 10^{15}$

Les défauts sont présentés dans le tableau III.2 :

Tableau III. 2 : Défauts dans différentes couches de la structure modélisée [18].

Paramètres	SnO	CdS	CdTe
Défaut 1			
Type de défaut	Neutre	Neutre	Neutre
Distribution énergétique	simple	simple	simple
Concentration de défauts	1.10^{14}	1.10^{16}	1.10^{13}
Energie de pièges (eV)	0,60	1.2	0.65
Sigma n (cm ²)	1.10^{-15}	1.10^{-15}	1.10^{-15}
Sigma p (cm ²)	1.10^{-15}	1.10^{-15}	1.10^{-15}
Défaut 2			
Type de défaut	Accepteur		
Distribution énergétique	Gaussienne		
Concentration de défauts	1.10^{16}		
Energie de pièges (eV)	0.5		
Sigma n (cm ²)	1.10^{-16}		
Sigma p (cm ²)	1.10^{-15}		

III.5 Résultats et discussion :

La caractéristique J-V, sous éclairage de la cellule simulée est représentée dans la figure III.3 :

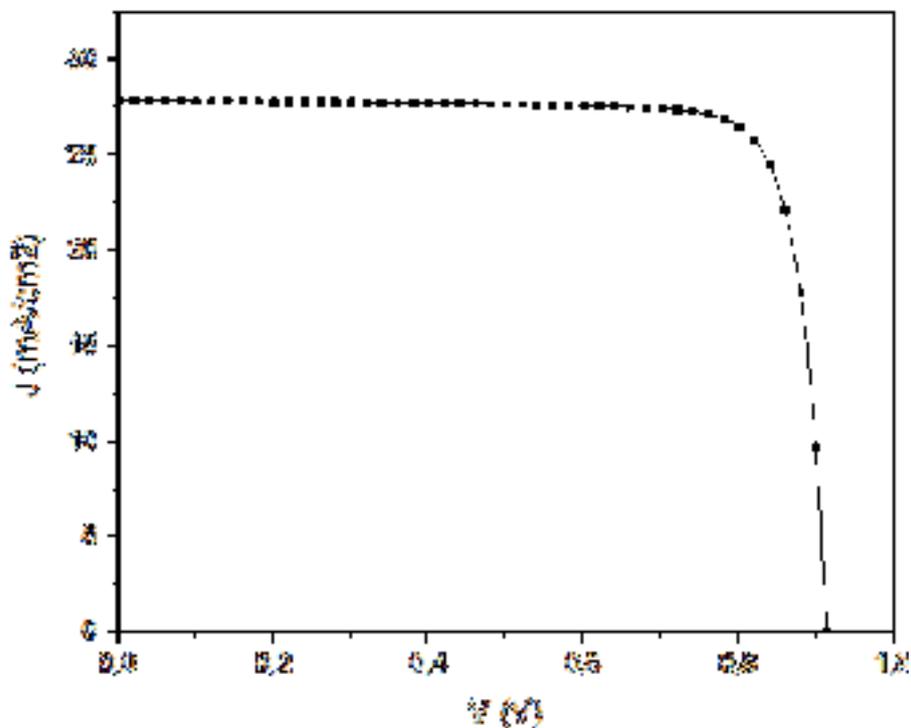


Figure III.3 : Caractéristique J-V de la cellule modélisée en CdTe

Les paramètres de sortie de la cellule sont résumés dans le tableau III.3 :

Tableau III.3 : Paramètres de sortie de la cellule simulée

$J_{cc}(\text{mA}/\text{cm}^2)$	$V_{co}(\text{V})$	FF(%)	$\eta(\%)$
27.90	0.91	83.28	21.25

III.5.1 Optimisation de l'épaisseur de l'absorbeur CdTe et de l'émetteur CdS :

Dans cette première partie, nous allons étudier l'impact de la variation de l'épaisseur de la couche de l'absorbeur CdTe et de la couche de l'émetteur CdS sur la cellule PV simulée. En prenant 300K comme température.

L'épaisseur de l'absorbeur est variée entre 0.5 et 6 μm tandis que la couche de l'émetteur est variée de 1 à 100 nm, les résultats de ces changements sont présentés dans les graphes A et B de la Figure III.4.

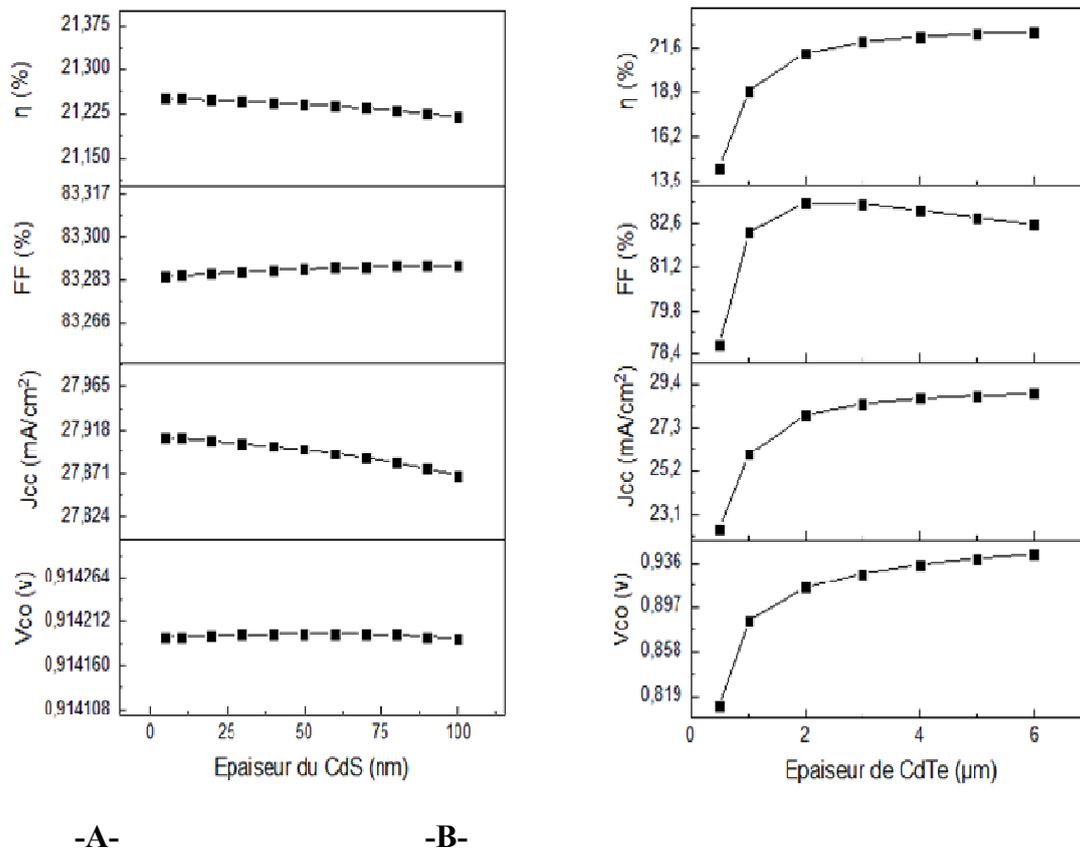


Figure III. 4 : Effet de l'épaisseur des couches CdTe et CdS sur les performances de la cellule.

En scrutant la Fig.III.4-A, qui est représentative de l'influence de l'épaisseur de la couche CdS, on remarque que les paramètres (V_{co} , J_{cc} , FF et η) ne subissent qu'un infime changement. Le rendement subit une diminution de 0.03%. C'est l'épaisseur de 5 nm qui a été choisie comme épaisseur optimale afin d'économiser de la matière, elle est donc prise pour la suite.

Comme on peut l'observer de la Fig. III.4-B, pour la couche absorbante, les paramètres électriques de la cellule PV augmentent d'une façon significative, le rendement varie de 14.30 à 21.25 % lorsque l'épaisseur de la couche augmente de 0.5 μm à 2 μm , cela est due à l'absorption supplémentaire des photons incidents

correspondant à l'augmentation de l'épaisseur, après cette valeur on voit que V_{co} , J_{cc} et η augmente très peu et FF diminue légèrement étant donné que les longueurs de diffusion commencent à devenir plus courtes relativement à l'épaisseur et les phénomènes de recombinaison deviennent plus considérables.

L'épaisseur 2 μm est donc choisie comme épaisseur optimale de la couche absorbante de la cellule simulée afin d'éviter les effets d'une couche trop épaisse cité plus haut. Cela nous donne un rendement de 21.25%, que nous allons l'utiliser pour ce qui suit.

III.5.2 Optimisation de la concentration de dopage de l'absorbeur CdTe et de l'émetteur CdS :

Pour cette partie, on va explorer l'influence du dopage sur l'absorbeur CdTe et l'émetteur CdS à 300 K, pour ce fait ; on fait varier les concentrations de dopage de ces deux couches. Cette variation s'étend pour l'absorbeur de 1.10^{13} jusqu'à 1.10^{17}cm^{-3} et concernant l'émetteur, elle se situe entre 1.10^{14} et 1.10^{19}cm^{-3} . Les résultats constatés sur les paramètres J_{cc} ; V_{co} ; FF ; η de la cellule simulée sont présentés sous forme de graphes dans la Fig.III.5 :

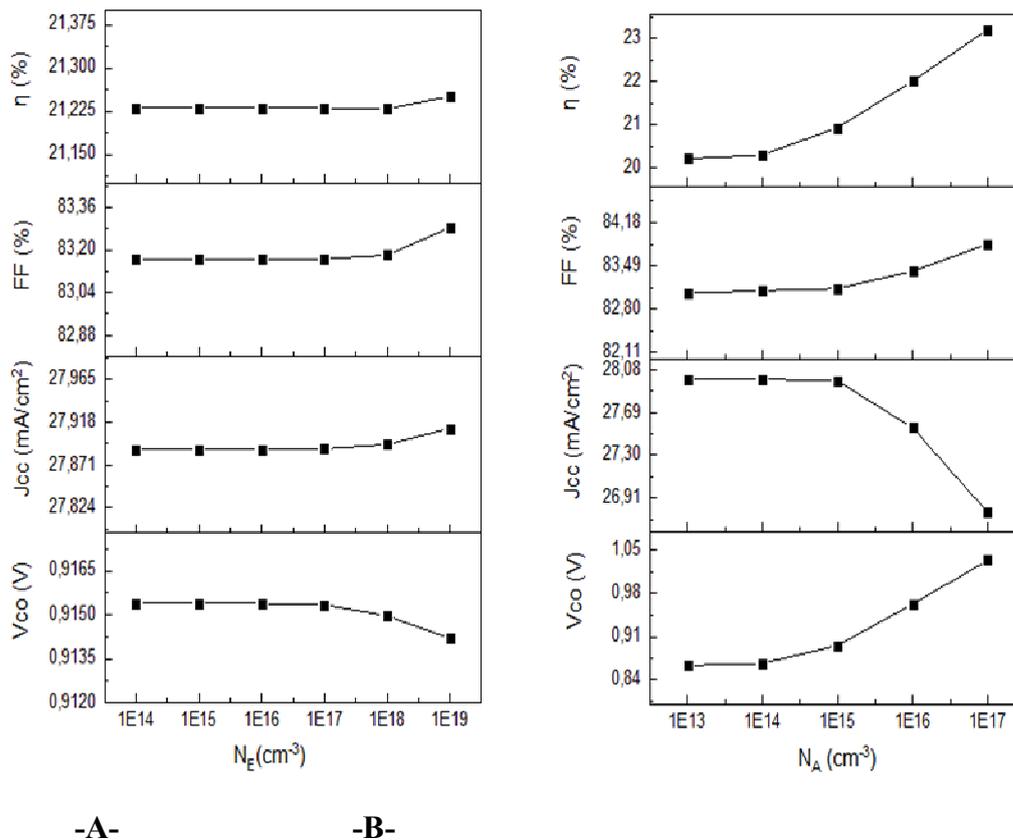


Figure III.5 : L'influence du dopage de l'absorbeur CdTe et l'émetteur CdS sur J_{cc} ; V_{co} ; FF ; η de la cellule simulée.

En analysant la figIII.5-A qui est quant à elle représentative de l'effet du dopage de la couche émettrice CdS, on peut voir que V_{co} , J_{cc} , sont quasi-constants lors de la variation du dopage de 1.10^{14} jusqu'à $1.10^{17} \text{ cm}^{-3}$, mais on peut remarquer que la tension V_{co} subit une diminution insignifiante de 0,915 à 0,914V en dépassant cet intervalle et que la densité de courant J_{cc} augmente très légèrement de 27,88 à 27,91mA/cm². Pour le rendement η et le facteur de forme, on remarque qu'ils restent presque constants jusqu'à 1.10^{17} avec une infime augmentation de 21,23 à 21,25% pour le rendement et de 83,16 à 83,28% pour le facteur de forme en dépassant cette valeur qui est due aux changements de V_{co} et J_{cc} . La valeur $1.10^{17} \text{ cm}^{-3}$ est prise comme concentration de dopage optimale et sera choisie dans la suite de notre étude.

En ce qui concerne la fig.III.5-B, qui est représentative de l'influence du dopage de la couche absorbante sur la cellule simulée, on distingue l'augmentation de la tension V_{co} de 0,86 à 1,03V et du facteur de forme de 83,05 à 83,83%. On remarque aussi une diminution de la densité de courant J_{cc} de 27,9 à 26,7mA/cm². Quant au rendement η , on peut voir nettement une forte augmentation entre 20,20 et 23,21%. En tenant compte des résultats obtenus on peut dire que $1.10^{17} \text{ cm}^{-3}$ est la concentration de dopage optimale pour la couche absorbante de la cellule simulée, elle sera donc utilisée pour la suite de notre étude.

Les caractéristiques électriques de la cellule ont été fortement influencées par la concentration de dopage. Cette concentration accentue la barrière de potentiel entre la face arrière et avant de la cellule et par conséquent améliore la collecte des porteurs photo-générés et réduit la recombinaison des porteurs, ce qui favorise l'augmentation du rendement.

Le fait que la couche CdTe soit plus épaisse (3 μm) et son absorption plus significative que celle de la couche CdS (0,05 μm), donc les modifications apportées à la concentration du dopage de la couche absorbante ont des effets plus remarquables sur les caractéristiques électriques de la cellule.

III.5.3 Optimisation de la densité des défauts:

Dans cette section, nous allons nous intéresser à l'incidence des défauts sur les performances de la cellule simulée. Afin d'y arriver, on va effectuer une variation sur la densité des défauts (le neutre et l'accepteur) de la couche absorbante (CdTe). Cette variation va s'étendre de 1.10^{10} à $1.10^{17} \text{ cm}^{-3}$.

Les résultats établis à 300 K sont relatés dans la figure suivante (fig III.6) :

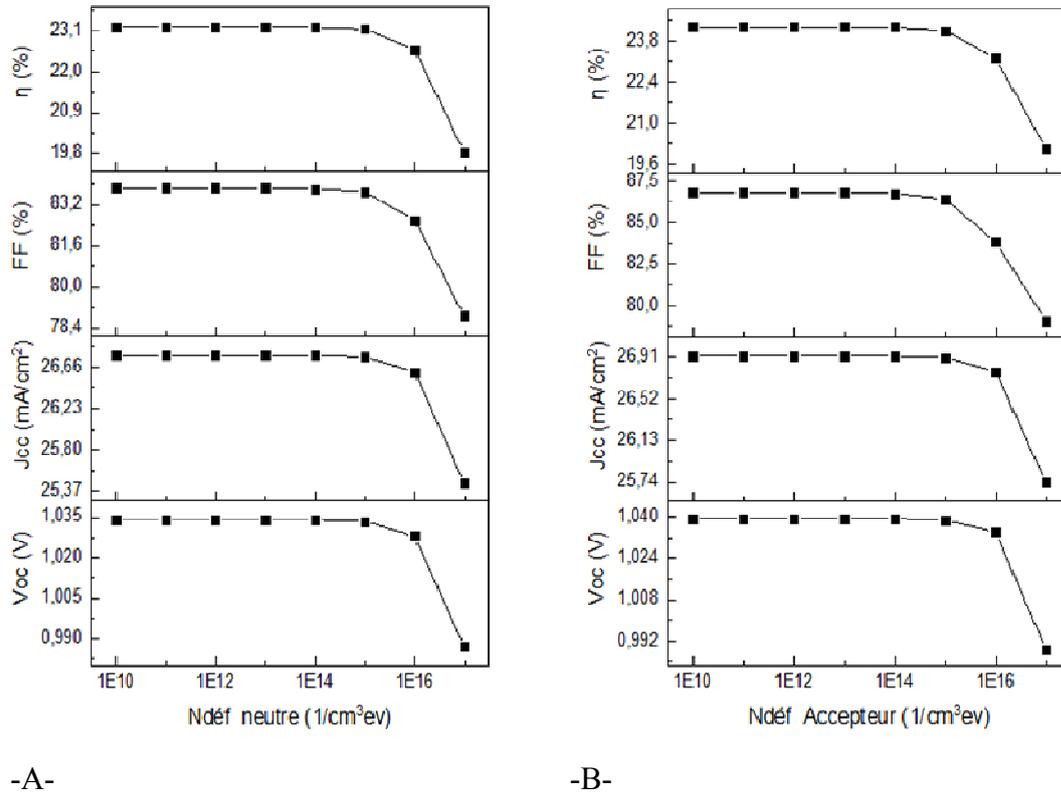


Figure III.6 : Impact de la densité du défaut neutre et accepteur sur les performances de la cellule simulée.

La figure III.6-A représente l'effet de la densité du défaut neutre de la couche absorbante sur les performances de la cellule simulée, les paramètres de la cellule y sont représentés. On peut observer que J_{cc} ; V_{co} ; FF; η sont quasi-constants de la valeur de 1.10^{10} jusqu'à $1.10^{14} \text{ cm}^{-3}$ dépassé ce seuil, on remarque une diminution de la tension V_{co} de 1,03 à 0,98 V et de la densité de courant J_{cc} , de 26,77 à 25,45 mA/cm², ainsi que celle du facteur de forme qui varie de 83,82 à 78,87 %. Pour le rendement η , on voit une diminution qui atteint une valeur de 19,81% alors qu'il avait débuté avec 23,21%, cela est dû à la recombinaison des porteurs (Shockley-Read-Hall). De tout cela, on peut dire que la densité du défaut neutre optimale de la couche absorbante de la cellule simulée est de $1.10^{14} \text{ cm}^{-3}$ avec un rendement de 23,21%, elle sera utilisée pour la suite de l'étude.

Les défauts de type neutre du CdTe ont une distribution dans le gap d'énergie avec une largeur de 0.65 eV, le gap d'énergie E_g étant égale à 1.5 eV, ces défauts se localisent presque au milieu du gap et agissent de ce fait comme des centres de recombinaisons.

La figure III.6-B décrit la réaction de la cellule simulée avec le changement de densité du défaut accepteur de la couche CdTe. D'après notre analyse de la figure, on

constate que η , V_{co} , J_{cc} et FF sont presque constants de 1.10^{10} à $1.10^{13} \text{ cm}^{-3}$ et on peut percevoir une légère diminution à partir de $1.10^{13} \text{ cm}^{-3}$; de 1,03 à 0,98V pour V_{co} , de 26,9 à 25,7 mA/cm² pour J_{cc} , de 86,7 à 79,1 % pour le FF et η diminue de 24,28 à 20,12%. On en déduit que la densité du défaut accepteur optimale pour la couche absorbante de la cellule simulée est de l'ordre de $1.10^{13} \text{ cm}^{-3}$ avec un rendement de 24,28%, elle sera choisie pour la suite

L'augmentation de la densité des défauts rend les phénomènes de recombinaisons plus considérables (durées de vie plus courtes) et entraîne la diminution du nombre des porteurs collectés et par la suite la diminution du rendement de conversion.

III.5.4 Optimisation de la couche émettrice :

Dans cette partie de notre étude, on a voulu savoir si le CdS convenait à toutes les gammes de températures, on a donc fait varier la température de la simulation de 0 °C à 54 °C et on a refait le même travail avec le sulfure d'indium (InS) et le sulfure de zinc (ZnS) pour avoir d'autres alternatives au CdS.

Les résultats de cette étude sont présentés dans la figure suivante :

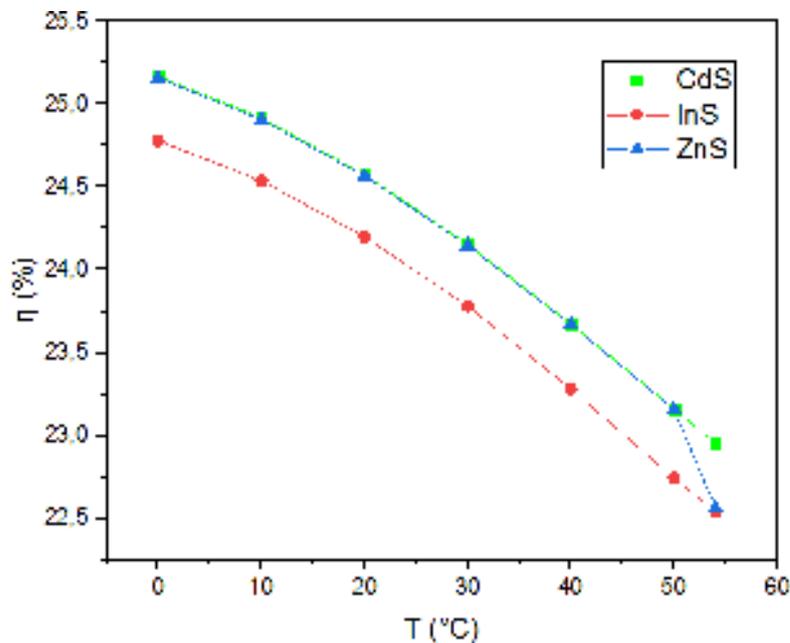


Figure.III.7 : Le rendement de la cellule en fonction de la température pour différents émetteurs

La figure.III.7 décrit la modulation du rendement en fonction de la température pour les trois couches de sulfure de cadmium (CdS), sulfure d'indium (InS) et sulfure de zinc (ZnS).

Concernant le CdS, on constate que son rendement varie entre 25,17% et 22,94%, ce qui fait en moyenne une diminution de 0.19 % pour chaque tranche de 5°C.

Pour le InS, on voit qu'il a un rendement plus faible que le CdS à 0°C d'une valeur de 24,78%, cette valeur diminue de 0.17% pour chaque 5 °C, il termine avec un rendement de 22,54 % à 54°C qui presque équivalent de celui du CdS, On en conclue que même si le rendement du InS est moins important que celui du CdS, reste qu'il a un bon coefficient thermique, il est donc idéal pour les régions chaudes .

Quant à la cellule au ZnS, son rendement diminue de 0.20% pour chaque 5 °C. Elle a un rendement très proche du rendement du CdS pour l'intervalle allant de 0 à 50°C, dans lequel, il varie de 25,15 à 23.15%. Mais à 54 °C, il subit une diminution plus importante que celle du CdS qui atteint 22,56°C. On en conclue que le ZnS n'est donc pas très adapté au régions où la température dépasse 50°C mais son rendement est assez satisfaisant en comparaison avec le InS, et quasi-équivalent au CdS.

Les paramètres utilisés pour les structures de InS et ZnS sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau III. 4 : Paramètres des couches émettrices ZnS et InS[18].

Paramètres	ZnS	InS
Épaisseur (µm)	0.005	0,005
Energie de gap (eV)	3,7	2,8
Affinité électronique	4,45	4,7
Permittivité diélectrique	9	13,5
Densité efficace des états CB (cm ⁻³)	3.10 ¹⁸	1,8.10 ¹⁹
Densité efficace des états VB (cm ⁻³)	1,7.10 ¹⁹	4.10 ¹³
Vitesse Electronique (cm/s)	1.10 ⁷	1.10 ⁷
Vitesse des trous (cm/s)	1.10 ⁷	1.10 ⁷
Mobilité électronique (cm ² /Vs)	1.10 ²	4.10 ²
Mobilité des trous (cm ² /Vs)	2,5.10 ¹	2,1.10 ²
Densité-donateurs ND (cm ⁻³)	1.10 ¹⁶	1.10 ¹⁶
Densité-accepteur NA (cm ⁻³)	-	-

III.6 Conclusion :

De la première partie de notre étude concernant l'influence des épaisseurs des différentes couches de la cellule simulée sur les performances de cette dernière, il a été établi que l'épaisseur optimale pour la couche absorbante est de l'ordre de $2\mu\text{m}$ et que celle de la couche émettrice est de 5 nm afin d'assurer une bonne collecte des porteurs de charges et par conséquent un bon rendement.

Dans la seconde partie qui a traité de l'influence du dopage sur la cellule simulée, il en est ressorti que la cellule avait de meilleures performances avec le dopage 1.10^{17}cm^{-3} pour la couche CdTe et 1.10^{17}cm^{-3} pour la couche CdS.

Concernant l'étude de l'incidence de la densité de défauts sur la cellule simulée, les meilleurs résultats ont été établis avec une densité de 1.10^{14}cm^{-3} pour les défauts neutres et de 1.10^{13}cm^{-3} pour les défauts accepteurs.

Pour finir l'étude sur l'optimisation de la couche émettrice a démontré que le CdS est le mieux adapté aux variations de température et que le ZnS reste la meilleure alternative côté performance mais que l'InS a un meilleur coefficient thermique et donc est mieux adapté aux régions chaudes.

Nous avons obtenu à la fin de notre étude un rendement de $24,28\%$ avec des paramètres de sortie de la cellule suivants : $V_{co} = 1,03\text{V}$, $J_{cc} = 26,92\text{mA/cm}^2$, $FF = 86,79\%$ pour 27°C . Nos résultats montrent une augmentation du rendement et une optimisation des paramètres électriques de la cellule simulée et par conséquent ses performances.

Conclusion générale :

Notre sujet d'étude vise l'optimisation des performances d'une cellule photovoltaïque à base de tellure de cadmium (CdTe).

Dans la première partie, nous avons cité les différents types de cellules photovoltaïques et des généralités sur leur fonctionnement ainsi que leurs matériaux.

Dans le second chapitre, on a présenté le semi-conducteur CdTe qui est l'objet de notre étude et ses différentes propriétés structurales, optique mais aussi différentes études sur l'optimisation du rendement de ses cellules.

Dans le dernier chapitre, pour commencer un modèle numérique d'une cellule au CdTe comportant trois couches (la couche absorbante (CdTe), la couche émettrice (CdS) et la couche fenêtre (SnO)) a été réalisé en utilisant le logiciel SCAPS.

Plusieurs simulations numériques ont été faites pour étudier l'influence de différents paramètres des couches sur les performances de la cellule afin d'optimiser cette dernière.

Les résultats obtenus ont démontré que la variation de l'épaisseur, la concentration du dopage et la densité des défauts sont des facteurs influents sur les performances de la cellule au CdTe,

Nous avons obtenue en optimisant ces paramètres un rendement de 24,28% avec des paramètres de sortie de la cellule suivants : $V_{co} = 1,03V$, $J_{cc} = 26,92mA/cm^2$, $FF = 86,79\%$ pour $27^\circ C$.

Par la suite, deux autres modèles avec InS et ZnS comme couches émettrices ont été établies dans le but de l'optimisation de la couche émettrice, il a été démontré que la cellule avec le CdS comme couche émettrice est la mieux adaptée aux variations de température. Cependant la cellule au ZnS reste la meilleure alternative au CdS pour ses performances mais la cellule au InS est la mieux adaptée aux régions chaudes étant donné que le InS a un bon coefficient thermique.

Bibliographie et Webographie

- [1] BENBRAHIM,R. « Théorie générale simplifiée des semi-conducteurs » ,ESTF.
- [2] FROGER, Vincent. « Couches minces de chalcogénures de zinc déposées par spray-CVD assisté par rayonnement infrarouge pour des applications photovoltaïques », Doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers,2012.
- [3] ROGER,Charles . « Developpement de cellules photovoltaïques à base de CIGS sur substrats métalliques ».Université de Grenoble, France ,2013.
- [4] Bendjellouli, Zakaria. « Contribution à la modélisation d'une cellule solaire », Magistère, Université de Bechar, 2009.
- [5] BENSALÉM,Salaheddine.« Effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires».Magister,Universite Ferhat Abba,Setif, 2011
- [6] FEROUANI, Abdelmadjid. « Etude par simulation de modélisation électriques des cellules photovoltaïques en couche mince à base de Cu(In,Ga)Se₂(CIGS) », Thèse de Doctorat, Université Abou Bakr, Algérie, Belkaid-Tlemcen, 2016.
- [7] COUDERC,Romain.« Etude du comportement thermique et électrique des cellules photovoltaïques en silicium cristallin sous concentration».Doctorat, INSA de Lyon, 2015.
- [8]BEN ABDERRAZAK, Ghania.« Etude par simulation numérique de la cellule solaire à base de CZTS par SCAPS».Université Med Khider Biskra, Algérie, 2014.
- [9]MENNI, Nasser. « Contribution à l'étude de l'interface métal/silicium et métal/Al₂O₃ pour des couches minces formées par PVD », Doctorat, Université Ferhat Abbas-Sétif, Algérie.
- [10] MAUGUIT, Quentin.« Les cellules au CdTe:minces,rentables..mais toxiques ?». Disponible sur : <www.futura-sciences.com/planete/dossiers/developpement-durable-cellules-photovoltaïques-coeur-panneaux-solaires-1688/page/10/>.
- [11] BUIS,Camille. « Etude des corrélations entre les défauts structuraux et les inhomogénéités spatiales des détecteurs de rayons X à base de CdTe pour l'imagerie médicale ».Doctorat,Université Jean Monnet - Saint-Etienne, 2013
- [12] DAHMANE, Samir. « Etude AB-INITIO des propriétés électroniques de CdTe/ZnTe/ZnS : Effets de polarisation », Thèse de Magistère, Université d'Oran, 2014.
- [13] HAROUNI, Sofiane. « Etude optique de la déformation dans quelques semi-conducteurs II-VI », Doctorat, Université Mentouri ,Constantine,2007.
- [14] Soltani, Mohammed. « Contribution à l'étude des états d'impuretés CdTe par spectroscopie de photoluminescence », Doctorat, Université de Metz, 1994.
- [15] TOUAFEK, Naima. « Contribution à l'étude d'une cellule solaire en couche minces à base de CuIn_{1-x}Ga_xSe₂ », Doctorat, Université Des Frères Mentouri-Constantine,2015.

- [16] GHERDINE, Hadjer. YAHY, Bahidja. « Etude d'un système autonome d'énergie photovoltaïque : Application au pompage hydraulique », Thèse de Master, Université de Tlemcen, Algérie, 2017.
- [17] LAKHDARI, Rahma. « Etude par simulation numérique de l'effet des défauts dans une cellule solaire N/P en silicium cristallin », Thèse de Master, Université Med Khider Biskra, Algérie, 2014.
- [18] BOUZAKI, Mohammed .BENYOUCEF, Boumediene. BENOUAZ, Tayeb. SOUFI , Aïcha. BENHAMOU, Amina. « Modeling of the junction CdS (N)/CdTe(P) ». International Journal of Applied Engineering Research , Volume 10, Number 6, 2015, p.16097-16104 .