



MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT
SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE UNIVERSITE Abbès
LAGHROUR»DE KHENCHELA FACULTE
DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE



Département Sciences de la matière

Mémoire de fin d'études

*Pour l'obtention du diplôme de Master
(L.M.D)*

filière: Physique

Spécialité : Physique des matériaux

**Simulation et analyse de l'influence de l'épaisseur et des
propriétés optiques d'une cellule solaire
à base de CdS/ CdTe**

Réalisé par : -MIMOUNI chahira

Dirigé par : M. BOUROUCHA Azzeddine

-BERKANE widad

Membres de jury :

-ZOUIOUECHE Mouhamed Dr : Président

-MOULLA Hafida Dr : Examineur

Année universitaire :2020/2021

REMERCIEMENTS

Nos sincères remerciements s'adressent à Allah le grand merci lui revient, pour son aide et la volonté qu'il nous a donné pour surmonter tous les obstacles et les difficultés durant nos années d'études et de nous avoir éclairé notre chemin afin de réaliser ce modeste travail.

Je veux adresser mes remerciements à mon en cadreur de mémoire ,à monsieur **Bouroucha Azzeddine** pour sa grande disponibilité et ses encouragements tout au long de la réalisation de ce mémoire et, je le remercie pour son aide ,et ses conseils.

Je remercie également les membres de **jury** d'avoir accepté de juger ce modeste travail.

Je remercie chaleureusement ma famille, pour leur soutien inconditionnel tout au long de mes longues années d'études.

Finalement, je tiens à adresser notre très sincère remerciement à tous ceux qui m'aidé à accomplir ce travail.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

A mon père.

A ma mère.

A ma famille.

A mes frères et sœurs.

*Ainsi que tous mes amis et
proches.*

SOMMAIRE

Sommaire

Introduction générale	2
Chapitre I : généralité sur cds et cdte.....	4
I.1.Introduction.....	5
I.2.Les semi-conducteurs.....	5
I.3.Les différents matériaux semi-conducteurs.....	5
I.4.Les semi-conducteurs II-VI.....	6
I.5.Le matériau le Sulfure de Cadmium CdS.....	7
I.5.1.Les propriétés fondamentales du cds.....	8
I.5.1.1..Propriétés physiques et chimiques de Sulfure de Cadmium.....	8
I.5.1.2.Propriétés cristallographiques.....	8
• I.5.1.3.Structure blende duCdS ou ZnS.....	10
• structure wurtzite du CdS ou ZnS.....	10
• Structure de bandes du CdS.....	10
• I.5.1.4.Propriétés électriques de CdS.....	11
• I.5.1.5.Propriétés optiques CdS.....	11
• I.6.les Applications du CdS.....	11
• I.6.1.Exemples d'applications CdS.....	12
I.6.1.a.Photorésistances.....	12
I.6.1.b.Photodiodes.....	12
I.6.1.c.Photomètre.....	13
I.7.Généralités et études antérieures sur CdTe.....	13
I.8.Le matériau tellurure de cadmium CdTe.....	14
I.8.1.Les propriétés deCdTe.....	14

• I.8.1.1.Structure cristalline du CdTe.....	14
• I.8.1.1.a.structures sphalérite.....	15
• I.8.1.1.b.Structure hexagonale de type würtzite.....	16
I.8.1.2.Structure des bandes d'énergie	17
I.8.1.3.Diagramme de phase.....	19
I.8.1.4.Diagramme de phase composition-température	19
I.8.1.5.Le diagramme de phase pression-température.....	19
I.8.1.6.Propriétés optiques et électriques	20
I.8.1.7.Propriétés plastiques	21
I.8.1.8.Propriétés cristallographique et énergétique	22
I.8.1.9.propriétés optiques.....	22
I.8.1.10.propriétés thermiques	24
I.9.les Applications du CdTe.....	24
I.10.Conclusion	24
Chapitre II : étude d'une cellule photovoltaïque.....	25
II.1.Introduction.....	26
II.2.Rayonnement solaire.....	26
II.3.Normalisation.....	27
II.4.Historique du photovoltaïque.....	28
II.5.Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	30
II.6.Notions de base sur les cellules solaires.....	30
II.6.1.Concepts importants sur les semi-conducteurs.....	30
II.6.2. Non-équilibre.....	32
II.7.La conversion photovoltaïque.....	33
II.8.Paramètres caractéristiques d'une cellule photovoltaïque.....	33

II.8.1.Caractéristique idéale et schéma équivalent.....	33
II.8.2.La jonction PN.....	35
II.8.3.Le générateur PV et ses performances.....	37
II.8.4.caractéristique courant / tension.....	37
II.8.4.1.Courant de court-circuit (I_{cc}).....	39
II.8.4.2.Tension à circuit ouvert (V_{co}).....	39
II.8.5.La puissance maximale P_{max}	40
II.8.6..Le facteur de forme FF.....	40
II.8.7.Le rendement de conversion η	40
II.8.8.Le rendement quantique, EQE.....	40
II.8.9.La résistance série.....	41
II.8.10.La résistance shunt.....	41
II.9.Les Différents Types de Cellules Photovoltaïques.....	42
II.10.Conclusion.....	42
Chapitre III : Logiciel SCAPS.....	43
III.I. Introduction.....	44
III.2.Notions de base.....	45
III.2.1.Lancer SCAPS.....	47
III.2.2 Définir le problème.....	47
III.2.3.Définir le point de fonctionnement.....	47
III.2.4.Sélection des caractéristiques à simuler.....	48
III.2.5.Lancer le calcul.....	49
III.2.6.Afficher les courbes simulées.....	49
III.2.7.Les courbes I-V.....	49

III.3.Définition d'une cellule solaire.....	50
III.3.1.Edition de la structure d'une cellule solaire.....	51
III.3.2.Contacts.....	51
III.3.3.Définition des couches.....	53
Chapitre VI : Résultats et Discussion	57
IV.1 .Introduction.....	58
IV.2.Structure de la cellule étudiée.....	58
IV.3.Résultats et Discussion.....	60
IV.3.1.Effet de l'épaisseur de la couche CdTe.....	60
IV.3.2.Effet de l'épaisseur de la couche CdS.....	62
Conclusion générale.....	67
Bibliographie.....	69

LISTE DU FIGURE

Figure.I.1. Matériaux a) Conducteur, b) Isolant, c) Semi-conducteur.

Figure.I.2. Structure blende du CdS ou ZnS.

Figure.I.3. structure wurtzite du CdS ou ZnS.

Figure.I.4. Photorésistance à base de CdS

Figure. I.6. Photomètre à base de CdS.

Figure.I.5. Photodiode à base de CdS.

Figure. I.7. a) structures sphalérite b) structure würtzite de CdTe observées dans les directions normales à [011] et [110].

Figure.I.8 . Structure de la blende de zinc de CdTe.

Figure. I.9. Structure de bande électronique de CdTe déterminée par la méthode du pseudo-potentiel empirique incluant le couplage spin-orbite.

Figure I.10. diagramme de phase composition-température de CdTe.

Figure. I.11. Diagramme de phase pression-température de CdTe.

Figure. I.12. Transitions électroniques entre les extremas des bandes de valence et de conduction: a) semi-conducteurs à gap direct, (les transitions sont verticales radiatives). b) semi-conducteurs à gap indirect, les transitions sont obliques (non radiatives).

Figure.II.1 . Spectre électromagnétique

Figure. II.2. Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par Le soleil, notion de la convention AM.

Figure. II.3 . Spectres Solaires relèves dans plusieurs conditions selon la Convention AM. Source NREL solarspectrum.

Fig. II.4 . Le photovoltaïque dans le monde.

Figure. II. 6. Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque ig. II.5 : production de PV mondiale.

Figure. II.7. Jonction P-N en Polarisation directe.

Figure. II.8. Jonction P-N en polarisation inverse.

Figure. II.9. Caractéristique d'une jonction PN sous éclairement.

Figure. II.10. La caractéristique d'une cellule photovoltaïque non éclairée est celle en présence d'un éclairage.

Figure. II.11. les différentes zones de caractéristique $I=f(V)$ d'une cellule photovoltaïque.

Figure.II.12. Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque en court-circuit.

Figure.II.13. Schéma électrique d'une cellule Photovoltaïque en circuit ouvert.

Figure. II.14. détermination graphique de résistance shunt et série.

Figure. II. 15.Les différentes technologies des cellules photovoltaïques.

Figure.III.1.Panneau de démarrage de SCAPS, le panneau d'action ou Principal.

Figure.III.2. Définir le problème.

Figure.III.3.Le point de fonctionnement.

Figure.III.4.Panneau des bandes d'énergie.

Figure.III.5.Panneau d'affichage des courbes I-V à l'obscurité et en Eclairage.

Figure.III.6.Définition de la structure d'une cellule solaire.

Figure .III.7.Panneau des propriétés des contacts.

Figure .III.8.Propriétés de la couche ajoutée.

Figure.III.9.Propriétés des dopages définis.

Figure.III.10.Modèle de l'absorption.

Figure.III.11.Définition des types de recombinaison présents.

Introduction générale

Introduction générale

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir, en effet, Les besoins énergétiques des pays industrialisés ne cessent d'augmenter, par ailleurs les pays en

Voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur Développement.

De nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir des énergies fossiles, la consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de Serre et donc une augmentation de la pollution. Le danger supplémentaire est qu'une Consommation excessive du stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce typed'énergie de façon dangereuse pour les générations futures, et aussi face aux multiples crises économiques et pétrolières la science s'est intéressée aux ressources dites renouvelables qui constituent un secteur stratégique et occupent une place privilégiée dans les domaines derecherche et développement.

Les énergies renouvelables se définissent selon l'agence de l'environnement et dela maîtrise de l'énergie (ADEME) comme des énergies produites par un processus naturel (rayonnement solaire, vent, marée...), et qui contrairement aux énergies fossiles sont inépuisables et n'émettent pas de gaz à effet de serre. La palette des énergiesrenouvelables est variée. On peut citer l'énergie éolienne, géothermique, hydraulique, marémotrice ou encore l'énergie photovoltaïque (PV).

L'énergie photovoltaïque, reposant sur la transformation directe des rayonslumineux provenant du soleil en électricité, est la plus jeune des énergies renouvelables et elle possède un potentiel important. La production de l'énergie photovoltaïque a subi un taux de croissance soutenable, et a connu un intérêt maximum pendant les trois crisespétrolières, quand le besoin à des énergies de types alternatifs semble dominant. Elle a marqué une augmentation moyenne annuelle de 60% entre 2004 et 2009 [1].

La première cellule solaire a été fabriquée aux Etats Unis par les chercheurs des laboratoires Bells vers la fin des années 50, et a été destinée à des applications spatiales. Cette cellule était à base de Silicium qui est le matériau le plus couramment utilisé, malgré la concurrence plus rude d'autres matériaux

L'objectif de ce travail est l'étude par simulation numérique de l'effet de l'éclairement et de la température et les deux résistances série et shunt (R_s , R_{sh}) sur les Caractéristiques électriques d'une cellule solaire (p/n) en CdTe et CdS.

Introduction générale

Nous avons utilisé le logiciel de simulation SCAPS pour simuler les Caractéristiques courant tension (J-V) dans les conditions standards d'une cellule solaire (pCdTe/nCdS).

Ce travail comporte quatre chapitres ainsi qu'une introduction et une conclusion :

- Le premier chapitre est consacré à l'étude des propriétés physiques du

Tellurure de Cadmium et de sulfure de cadmium, où on rappelle sa structure de bande et ses applications

- Dans le deuxième chapitre concerne une étude générale sur l'énergie Photovoltaïque .Il comprend le fonctionnement de la cellule photovoltaïque et ses caractéristiques principales
- Dans le troisième chapitre nous présentons le logiciel de simulation SCAPS

Et comment l'utiliser pour calculer par simulation numérique les Caractéristiques électriques courant-tension de la cellule solaire p/n en CdT et CdS.

- Dans Le quatrième et dernier chapitre le nous présenterons les résultats

obtenus par la simulation numérique.

CHAPITRE I

I.1. Introduction

Nous présentons dans ce chapitre les propriétés générales des semi-conducteurs II-VI en mettant l'accent particulièrement sur les matériaux CdS et CdTe : le sulfure de cadmium et tellure de cadmium (structure cristallographique, structure électronique des bandes,...) et enfin nous résumerons les principales applications technologiques des CdS et CdTe.

I.2. Les semi-conducteurs

On appelle semi-conducteur un matériau électronique intermédiaire entre conducteur et isolant (figure I.1.) On sait qu'au sein des structures cristallines de la matière, les électrons ont des énergies distinctes qui appartiennent à certains ensembles de valeurs appelées bande d'énergie.

On distingue isolants et conducteurs par la différence d'énergie qui existe entre ces bandes, appelée le gap " E_g ". Pour les conducteurs, la bande de conduction et la bande de valence se chevauchent : les électrons transitent instantanément entre les deux bandes "bonne conduction" (a). Dans les isolants, la bande de conduction est habituellement vide à cause de la largeur de la bande interdite très élevée, ainsi les électrons restent emprisonnés dans la bande de valence (b). Pour les semi-conducteurs, le gap assez faible permet à des porteurs de passer dans la bande de conduction grâce à leur agitation thermique (c).

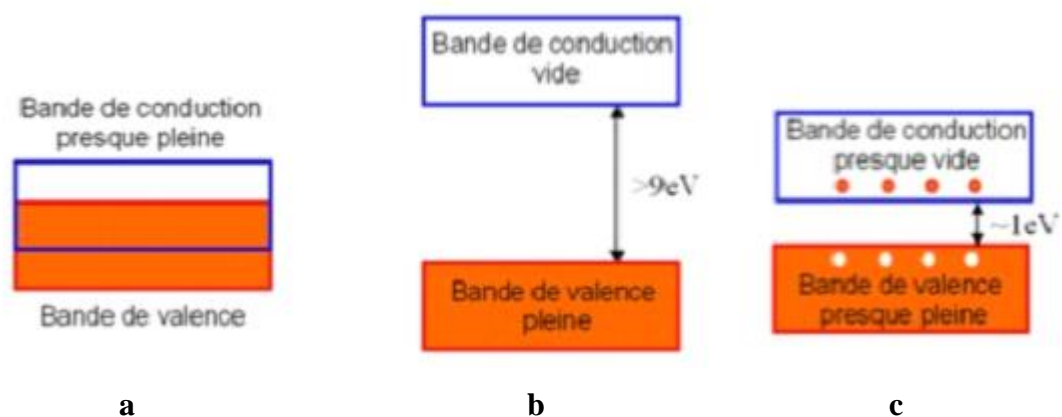


Fig.I.1. Matériaux **a)** Conducteur, **b)** Isolant, **c)** Semi-conducteur

I.3. Les différents matériaux semi-conducteurs

Il y'a des semi-conducteurs de composés binaires qui sont constitués de deux éléments inorganiques distincts. Ils peuvent être composés de différents éléments comme suit :

- ❖ deux éléments de la même colonne IV (SiC et SiGe),

- ❖ éléments des colonnes III et V notés composés III-V tels que GaAs, GaN, GaP
- ❖ éléments des colonnes II et VI notés composés II-VI tels que ZnS et CdS
- ❖ éléments des colonnes IV et VI notés composé IV-VI comme PbS

D'autres composés de trois et quatre éléments, employés dans la fabrication de diodes lasers, constituent aussi des semi-conducteurs. Ce sont des semi-conducteurs ternaires et quaternaires (AlGaAs, GaInAsP).

Il y'a aussi des semi-conducteurs organiques comme l'anthracène (C₁₄H₁₀), le naphthalène (C₁₀H₈) et le coronene (C₂₄H₁₂). Certains hauts polymères peuvent aussi être dotés de propriétés semi-conductrices. On trouve aussi des semi-conducteurs à l'état non cristallin, les plus répandus sont les matériaux amorphes tels que les verres (type GeAs₂Se_{4x}Tex, avec x [0,1]). L'existence de tels matériaux confirme que les propriétés semi-conductrices ne dépendent pas strictement du caractère périodique. Il semble bien, que les liaisons entre atomes proches voisins et les degrés d'organisation locale (ordre à courte distance) soient déterminants pour le caractère semi-conducteur du matériau [1].

I.4. Les semi-conducteurs II-VI

Les semi-conducteurs II-VI sont constitués par l'association d'un élément de la colonne II avec un élément de la colonne VI de la classification périodique de Mendeleïev (Tableau I.1). . Tous ces éléments des groupes II et VI peuvent former entre eux des composés : Oxydes (ZnO, CdO), Sulfures (ZnS, CdS), Séléniures (ZnSe, CdSe), Tellurures (ZnTe, CdTe), ainsi que les composés HgS, HgSe et HgTe .Les films formés des semi-conducteurs II-VI à large gap optique sont d'intérêt technologique considérable [2].

Colonne	Colonne	Colonne	Colonne	Colonne	Colonne	Colonne
I A-B	II A-B	III B	IV B	V B	VI B	VII B
Li ³	Be ⁴	B ⁵	C ⁶	N ⁷	O ⁸	F ⁹
Na ¹¹	Mg ¹²	Al ¹³	Si ¹⁴	P ¹⁵	S ¹⁶	Cl ¹⁷
Cu ²⁹	Zn ³⁰	Ga ³¹	Ge ³²	As ³³	Se ³⁴	Br ³⁵
Ag ⁴⁷	Cd ⁴⁸	In ⁴⁹	Sn ⁵⁰	Sb ⁵¹	Te ⁵²	I ⁵³
Au ⁷⁹	Hg ⁸⁰	Tl ⁸¹	Pb ⁸²	Bi ⁸³	Po ⁸⁴	At ⁸⁵

Tableau I.1. Eléments chimiques du tableau Mendeleïev des colonnes II et VI

La cristallographie des composés II-VI pose quelques problèmes du fait du polymorphisme de ces composés. Ils peuvent avoir des structures cristallines de deux types principaux : structure cubique de type sphalérite et structure hexagonale de type wurtzite, toutes les deux se caractérisent par une disposition tétraédrique des atomes. Aussi ils peuvent former différents polytypes de structure analogues, qui maintiennent la disposition tétraédrique des atomes et qui ne sont en fait que des structures dérivées de la sphalérite et de la wurtzite.

Sous l'action de fortes pressions extérieures certains de ces composés peuvent acquérir une structure de sel gemme (NaCl), caractérisée par une disposition octaédrique des atomes, ces phases sont instables dans les conditions usuelles.

I.5.le Sulfure de Cadmium CdS

Le sulfure de cadmium(CdS) est un composé semi-conducteur important des groupes II-VI, dont la bande interdite est de 2.5 eV à la température ambiante .CdS présente un ensemble de propriétés qui permettent son utilisation dans un certain nombre d'applications : dans le domaine optique, À partir de sa résistivité électrique assez élevée le CdS peut être employé comme une couche tampon très mince dans les cellules solaires photovoltaïques poly cristallines bien connues tels que, CdTe et CIGS et dans les cellules solaires [3]

I.5.1. Les propriétés de CdS

I.5.1.1. Propriétés physiques et chimiques de Sulfure de Cadmium

Le tableau 2. montre quelques propriétés physiques et chimiques de sulfure de cadmium.

<i>Les propriétés physiques et chimiques de Sulfure de Cadmium [13]</i>	
Nom IUPAC :	Monosulfure de cadmium, Cadmium sulfide, Cadmium monosulfide, Cadmium golden, Aurora yellow, Cadmium yellow, greenockite(CdS- α).
Apparence :	Cristaux légèrement jaunes ou oranges ou poudre jaune à brune.
Formule moléculaire :	CdS
État physique :	Solide cristallisé
Masse moléculaire :	144,46 g.mole ⁻¹
Densité relative (eau = 1) :	4,82 g. cm ⁻³
Point de sublimation :	CdS sublime sous atmosphère d'azote à 980 °C
Point de fusion :	1750 °C
Solubilité dans l'eau :	nulle
L'évaporation à 20°C :	est négligeable
Stabilité du produit et réactivité :	Ce produit est stable

Tableau I.2. Fiche technique de quelques propriétés physiques et chimiques de Sulfure de Cadmium

I.5.1.2. Propriétés cristallographiques

Le sulfure de cadmium est un semi-conducteur qui cristallise dans deux types de structures : La structure cubique zinc blende de la sphalérite et la structure hexagonale de la wurtzite. Toutes les deux, se caractérisent par une disposition tétraédrique des atomes. La structure du type blende est une structure cubique à faces centrées (CFC) dont la maille primitive contient 4 cations (Cd²⁺) et quatre anions (S²⁻) (Figure.I.2) [4]. Chaque espèce d'un constituant est entourée à égale distance par quatre atomes de l'autre constituant. L'ensemble définit un tétraèdre régulier dont les atomes occupent les sommets [5]. Le réseau de la wurtzite de CdS (structure hexagonale) est constitué de l'alternance de plans de Cd et S, chacun présentant un arrangement hexagonale des atomes correspondants comme on peut le voir sur la figure I.3.

Parmi les deux structures, l'hexagonal est la plus thermodynamiquement stable et ainsi la plus commune observée. En raison du caractère métastable de la phase cubique, cette dernière peut se transformer en hexagonale sous l'effet de la température du recuit [6].

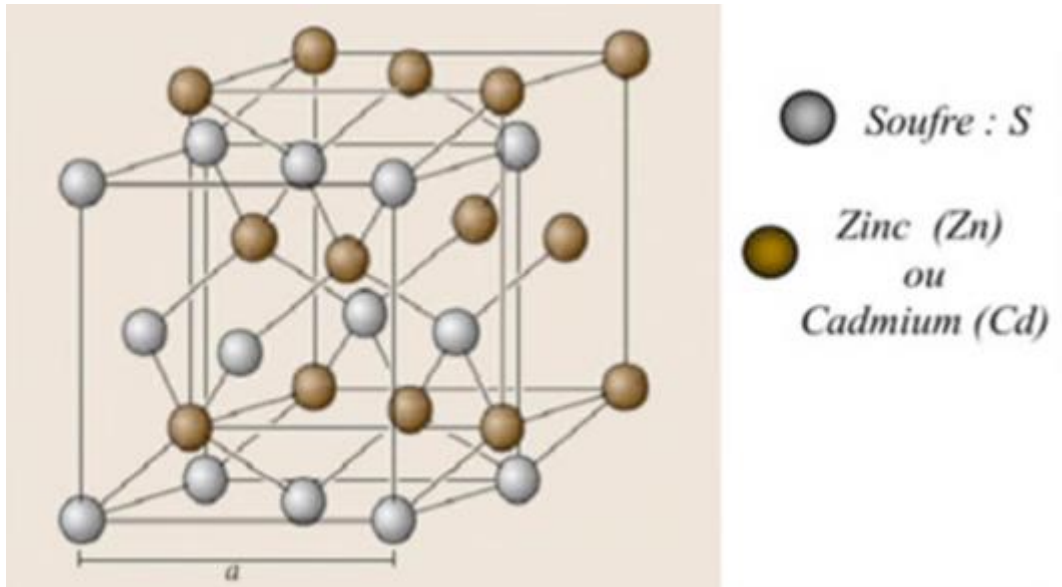


Fig.I.2.Structure blende du CdS ou ZnS

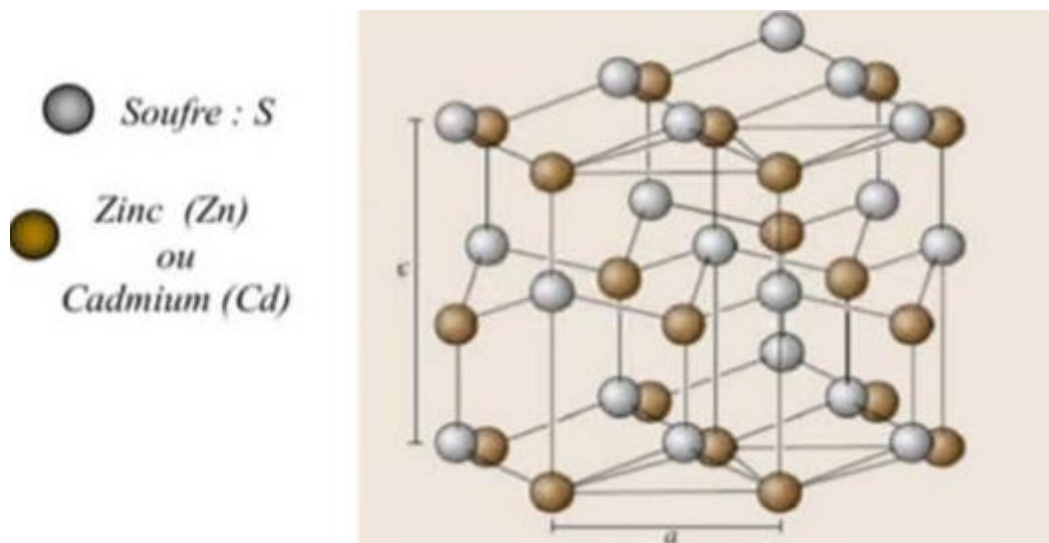


Fig.I.3.structure wurtzite du CdS ou ZnS

Les propriétés structurales de la blende et de la wurtzite sont portées dans le tableau 3 et 4 respectivement :

Motif formulaire	CdS
Maille et mode de réseau (Stoechiométrie de la maille)	Cubique $a = 5,811 \text{ \AA}$ $Z = 4$ $\rho = 4,89 \text{ g.cm}^{-3}$
	Translation du réseau $+(0,0,0)$ $+(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0)$ $+(\frac{1}{2}, 0, \frac{1}{2})$ $+(0, \frac{1}{2}, \frac{1}{2})$
	CdS
Positions atomiques	$\text{Cd}^{2+} (0,0,0)$ $\text{S}^{2-} (\frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4})$

Tableau.3. : Caractéristiques structurales de structure CdS blende

Motif formulaire	CdS
Maille et mode de réseau (Stoechiométrie de la maille)	Hexagonale $a = 4,1369 \text{ \AA}$ $c = 6,7157 \text{ \AA}$
	Translations du réseau $+(0,0,0)$
	Cd_2S_2
Positions atomiques	$\text{Cd}^{2+} (0,0,0)$ $(\frac{2}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{2})$ $\text{S}^{2-} (0,0, \frac{5}{8})$ $(\frac{2}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{8})$

Tableau I.4 : Caractéristiques structurales de structure CdS wurtzite

I.5.1.3. Structure de bandes du CdS

Le sulfure de cadmium CdS est un semi-conducteur à gap direct dont l'énergie est $E_g = 2.5 \text{ eV}$ ($\lambda = 496 \text{ nm}$) [7]. La bande de valence de CdS est essentiellement constituée de la couche p du sulfure (de configuration [Ne]. 3s2.3p6) que complète les deux électrons de la couche s du cadmium (de configuration [Kr].4d10.5s2). La bande de conduction provient de l'orbitale s du cadmium vidée de ses électrons. La bande de conduction est donc unique (de masse effective m_e^*), et peut être considérée comme parfaitement parabolique pour calculer les niveaux d'énergie électronique [8]

I.5.1.4. Propriétés électriques de CdS

Le CdS est généralement un semi-conducteurs de type n, Beaucoup de travaux l'expliquent soit par un excès de cations métalliques (Cd^{2+}) en position interstitielle, soit par une vacance d'anions (S^{+2}).

Les propriétés électriques du Le sulfure de cadmium peuvent être améliorées par un dopage approprié. Ainsi, les cristaux de CdS peuvent être dopés soit avec un excès de Cd ou par des atomes comme : O, Se

I.5.1.5. Propriétés optiques

Les propriétés optiques les plus généralement rapportées sont : la transmission optique, avec quelques études également sur la photoluminescence. Tous les films CdS ont une transparence optique très élevée (en général entre 60 et 90%), dans les régions visibles du spectre solaire (520-850) nm, qui permet de les utilisés comme des couches fenêtres dans les cellules solaires (cellules photovoltaïques) [9]. Cependant, ces films sont uniformes, ont une forte adhérence et une excellente transmission dans le spectre visible [10].

La transmission est une fonction de l'épaisseur, du gap, et de la structure de film [11]. Il a été noté une forte limite d'absorption à environ 450 nm qui correspond à un gap de 2,47 eV, approximativement [12]. Si la température du bain augmente, la limite d'absorption des films devient difficile à connaître [10].

I.6. les Applications du CdS

Le sulfure de cadmium (CdS) dû à sa bonne transmittance et son large gap optique (2,43 eV) est le matériau le plus généralement utilisé en optoélectronique. Il est employé en couche mince dans divers dispositifs. Le CdS est utilisé principalement dans les pigments, notamment les pigments fluorescents (couleur de projection TVs, les matériaux d'écran laser), comme colorant pour les textiles, le papier, le caoutchouc, les plastiques, les verres et les émaux (décorations). Il est également utilisé dans l'industrie électronique (transistors à effet de champ), dans le domaine de l'optoélectronique (diodes luminescentes, diodes luminescentes multicouches, détecteurs optiques, filtres optiques, la fabrication des cellules photoélectriques), comme des détecteurs nucléaires de rayonnement et sondes de gaz [13]

I.6. 1.Exemples d'applications

I.6.1.a. Photorésistances

Les photorésistances sont des semi-conducteurs, dont la résistance électrique varie fortement en fonction de l'éclairement auxquels ils sont soumis. Lorsque l'éclairement augmente, la résistance diminue. Beaucoup de photorésistances sont fabriquées par le CdS et l'ensemble est enrobé dans un matériau transparent et étanche, afin d'éviter que l'humidité ambiante n'en perturbe la résistance. Le temps de réponse d'une photo résistance est assez grand, de sorte qu'elle n'est guère utilisable en commutation pour des fréquences supérieures à 1 KHz (Fig. I.4) [14].

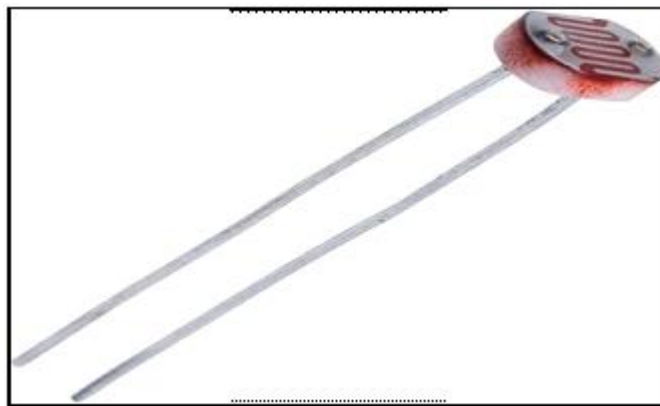


Fig.I.4:Photorésistance à base de CdS.

I.6.1.b. Photodiodes

Une photodiode est constituée par une jonction P-N qui peut être éclairée extérieurement. Elle travaille en polarisation inverse, le courant inverse étant fonction de l'éclairement (lorsque l'éclairement augmente, le courant inverse augmente). Les photodiodes (Fig. I.5) ont une réponse plus rapide et plus linéaire que les photorésistances, mais leur courant photoélectrique est plus faible [14].



Fig.I.5: photodiode à base de CdS

I.6.1.c. Photomètre

En photomètres (fig. I.6), on utilise un matériau à partir duquel, sous l'influence de la lumière incidente, des électrons sont libérés ou bien un matériau dont la résistance se modifie. Le CdS, le CdSe et le CdTe sont appropriés à cet effet sous forme de matériau semi-conducteur [14]



Fig.I.6: Photomètre à base de CdS

I.7.Généralités et études antérieures sur CdTe

Beaucoup d'hétéro-structures et de composants électroniques et optoélectroniques présents dans le marché sont fabriqués à base de semi-conducteurs de la famille II-VI dont le tellure de cadmium CdTe.

Dans ce qui suit nous présentons un certain nombre d'informations concernant ces matériaux sous forme massive. Pour plus de clarté, la plupart des paramètres et grandeurs physiques sont présentés sous forme de tableaux.

I.8.Le matériau tellurure de cadmium CdTe

Le tellurure de cadmium est un composé binaire, appartenant au groupe II B-VI A, avec un gap direct et un numéro atomique moyen élevé ($Z=50$). Ce semi-conducteur est connu pour ses propriétés très importantes, on s'intéressera pour notre part, spécialement aux propriétés de luminescence, qui ne peuvent être comprises que dans un contexte global d'une compréhension de propriétés telles que : la structure cristalline du CdTe massif, ses caractéristiques électriques, optiques et thermiques.

I.8.1.Les propriétés de CdTe

I.8.1.1.Structure cristalline du CdTe

C'est un des matériaux binaires qui cristallisent dans la structure cubique blende de zinc: les atomes de cadmium et les atomes de tellure forment deux sous- réseaux cubiques à faces centrées décalés l'un par rapport à l'autre d'un quart de la grande diagonale du cube. La différence du paramètre de maille entre CdTe ($a_0 = 6,48 \text{ \AA}$) et ZnTe ($a_0 = 6,10 \text{ \AA}$) est très importante ($\approx 5,8\%$). Ce désaccord de maille joue un rôle primordial dans la réalisation d'hétéro structures et permet la réalisation de boîtes quantiques par épitaxie, comme nous le verrons plus loin.

Le semi-conducteurs CdTe peut cristalliser dans deux structures différentes: la structure cubique «sphalérite» (Fig. I.7.a) et la structure hexagonale «Würtzite» (Fig. I.7.b). La structure cubique est la plus stable dans les conditions normales de température et de pression [15].

On peut assister, sous certaines conditions, à des transitions de l'une à l'autre ou à l'existence des deux structures en même temps [15].

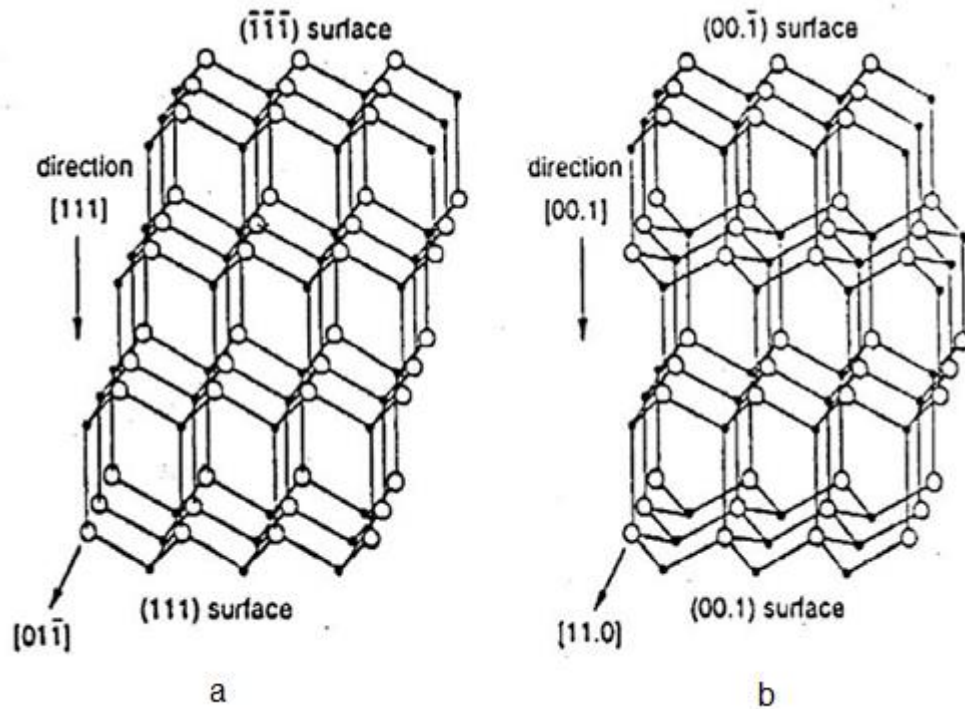


Fig. I.7. a) structures sphalérite

b) structure wurtzite de CdTe observées dans les directions normales à $[011]$ et $[110]$

I.8.1.1.a.structures sphalérite

La structure sphalérite (du type blende de zinc), la plus répandue, est la plus stable à la pression atmosphérique normale [17], est constituée par deux mailles cubiques à faces centrées, décalées l'une par rapport à l'autre du quart de la diagonale principale du cube. La maille élémentaire est constituée de quatre molécules de CdTe, les positions des atomes sont définies par les coordonnées suivantes (Fig.I.8)

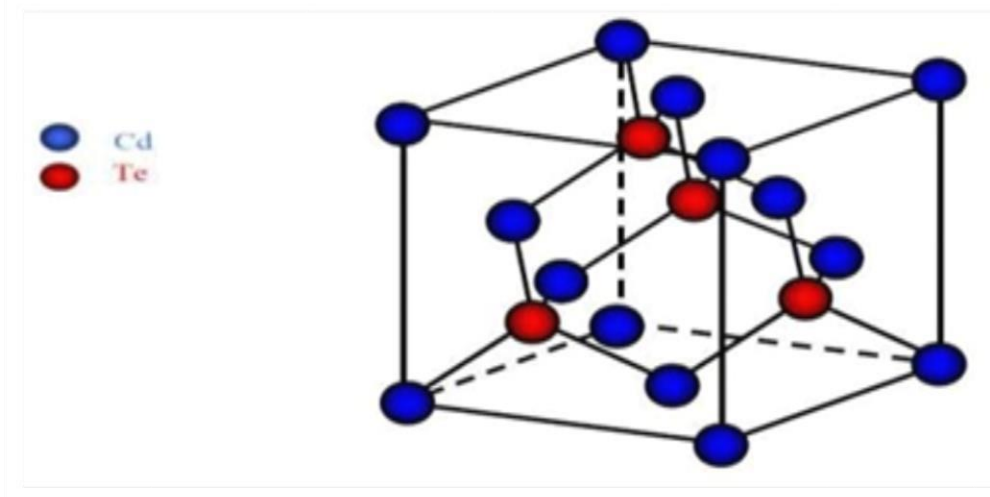


Fig.I.8 :Structure de la blende de zinc de CdTe

Fig.I.8 :Structure de la blende de zinc de CdTe :

Chaque atome possède un entourage de quatre atomes de l'autre constituant (espèce), placés aux sommets d'un tétraèdre régulier à une distance de $3/4.a$, (a est le paramètre de la maille cubique, égale à 6.481\AA à la température ambiante [18]).

Chaque atome de Te (respectivement Cd) disposé au centre d'un tétraèdre, a pour premiers voisins à 2.81\AA les atomes de Cd (respectivement Te) situés aux sommets du tétraèdre.

La structure sphalérite n'a pas de centre de symétrie, ce qui confère au matériau une polarité cristallographique le long de l'axe et entraîne, de ce fait, une variation des propriétés physiques et chimiques des faces (111) et (1 1 1) [17].

- Les plans (110) sont les plans de clivage privilégiés.
- Le groupe spatial de ce composé est $F4 3m$.
- Le caractère ionique des liaisons de CdTe, et le plus élevé des composés II-VI, de l'ordre de 0.717 sur l'échelle de Phillips [19].

I.8.1.1.b. Structure hexagonale de type würtzite

Le CdTe peut former des cristaux ayant la structure hexagonale de type würtzite, dans laquelle les deux sous-réseaux de Cd et Te composant le cristal sont hexagonaux compacts.

En effet cette structure a été observée dans des films minces de CdTe obtenus par plusieurs techniques [20].

La structure de la maille WZ n'est pas centrosymétrique et appartient au groupe d'espace P63mc. Dans cette structure les paramètres de maille du CdTe sont [21] $a = 4.56 \text{ \AA}$ $c = 7.46 \text{ \AA}$.

Une des caractéristiques principales de la structure WZ est qu'elle ne possède pas de centre d'inversion. Les directions $[0001]$ et $[\bar{0}001]$ ne sont donc pas équivalentes.

I.8.1.2. Structure des bandes d'énergie :

Plusieurs méthodes, qui sont à la base de nombreux calculs, ont été réalisées pour la détermination de la structure de bandes d'énergie des semi-conducteurs. Trois méthodes sont utilisées fréquemment : la méthode d'ondes planes orthogonalisées [22], la méthode du pseudo-potential [23] et la méthode k.p [24]. La figure I.9 montre la structure des bandes d'énergie, la plus connue, du CdTe. Les états 5p du tellure forment la bande de valence, les états 5s de cadmium constituent la bande de conduction. 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 figure I.9). L'absorption et l'émission de lumière peuvent alors se faire avec conservation du vecteur d'onde sans impliquer des interactions avec d'autres quasi particules comme les phonons.

La structure électronique de bande montre que CdTe est un semi-conducteur à gap direct, avec une largeur de la bande interdite E_g qui dépend de la température. Selon les auteurs, elle peut être exprimée par :

- soit par la formule [25] : $E_g = 1.6063 - 1.64 \times 10^{-6} T^2$
- soit par la formule empirique [26] : $dE_g/dT = -3.0, -3.5$ ou $-5.6 \times 10^{-4} \text{ eV/K}$
- A température ambiante et sous pression atmosphérique normale, la valeur du gap est de 1.52 eV
- à 2 K, $E_g = 1.606 \text{ eV}$ [27,28]. à 300 K, $E_g = 1.520 \text{ eV}$ [29]

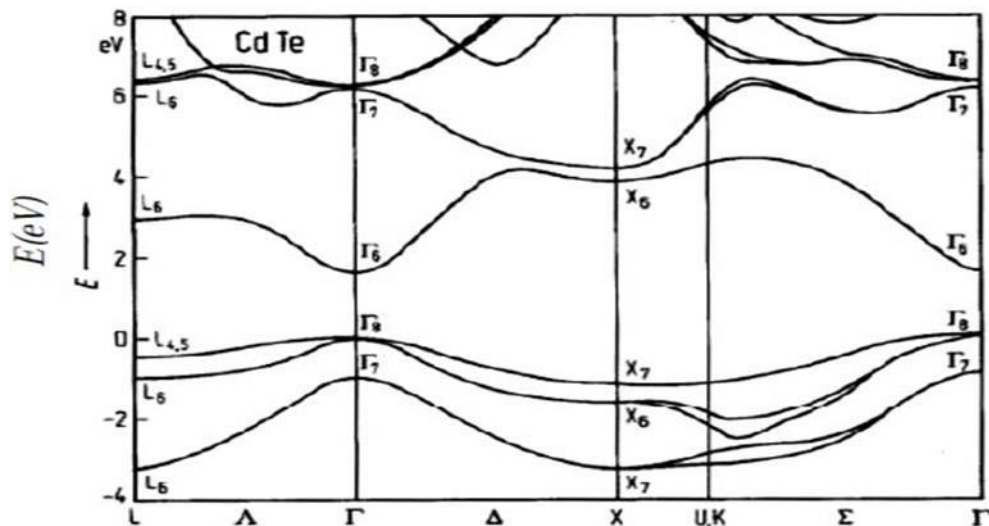


Fig I.9. Structure de bande électronique de CdTe déterminée par la méthode du pseudo-potential empirique incluant le couplage spin-orbite [30].

La largeur de bande interdite E_g , les constants diélectriques statiques ϵ_0 et ϵ_∞ et les masses effectives des porteurs sont présentés dans le tableau I.5, qui indique les valeurs de ces paramètres près du point Γ .

Grandeur	Valeur
E_g	1606 meV
ϵ_∞	7,4
ϵ_0	10,6
Δ_{SO}	0,90 eV
$m_{hh,z}$	0,4
m_e	0,096

Tab. I.5. Valeurs de quelques paramètres physiques de CdTe [16]

I.8.1.3. Diagramme de phase

I.8.1.4. Diagramme de phase composition-température

Le diagramme de phase de CdTe est assez simple (fig. I.10), il a un point de fusion à $1092 \pm 1 \text{ C}^\circ$ pour une concentration approximative de tellure de 50 at %.

Deux paliers eutectiques à $324^\circ \pm 2\text{C}^\circ$ pour la région riche en Cd et à $449 \pm 2^\circ\text{C}$ pour la région riche en Te [31].

Le composé stoéchiométrique représenté par une ligne se trouve en réalité répartie sur un domaine étroit tel qu'on aura un point de fusion à 897C° et 1092C° pour une concentration de tellure de 49,99985% et de 50,00085% respectivement [32].

I.8.1.5. Le diagramme de phase pression-température

Le diagramme de phase pression-température de CdTe présenté sur la Figure I.11 permet de savoir avec précision les conditions d'élaboration des cristaux [31].

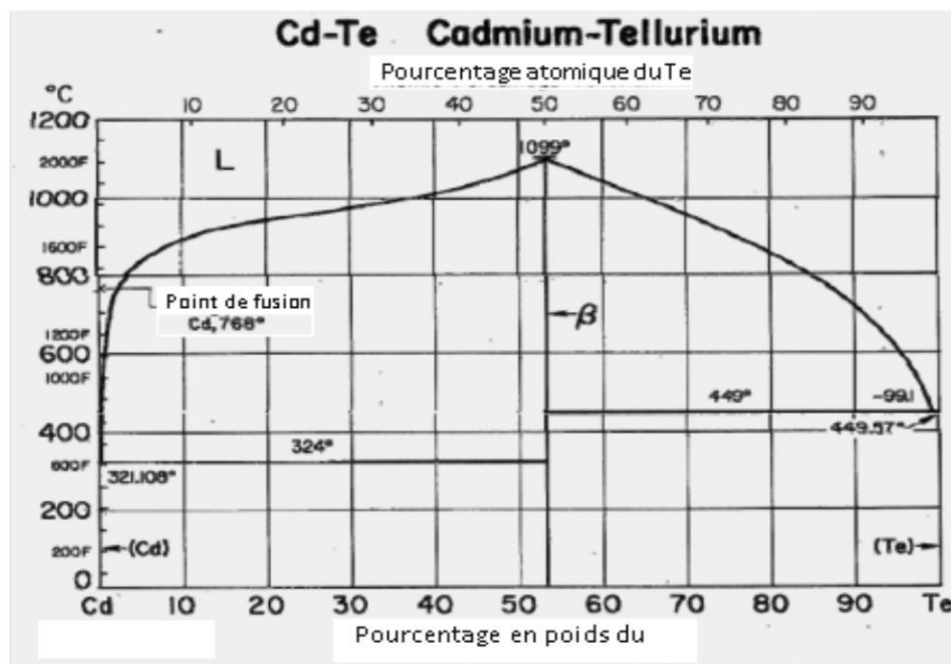


Fig.I.10. diagramme de phase composition-température de CdTe .

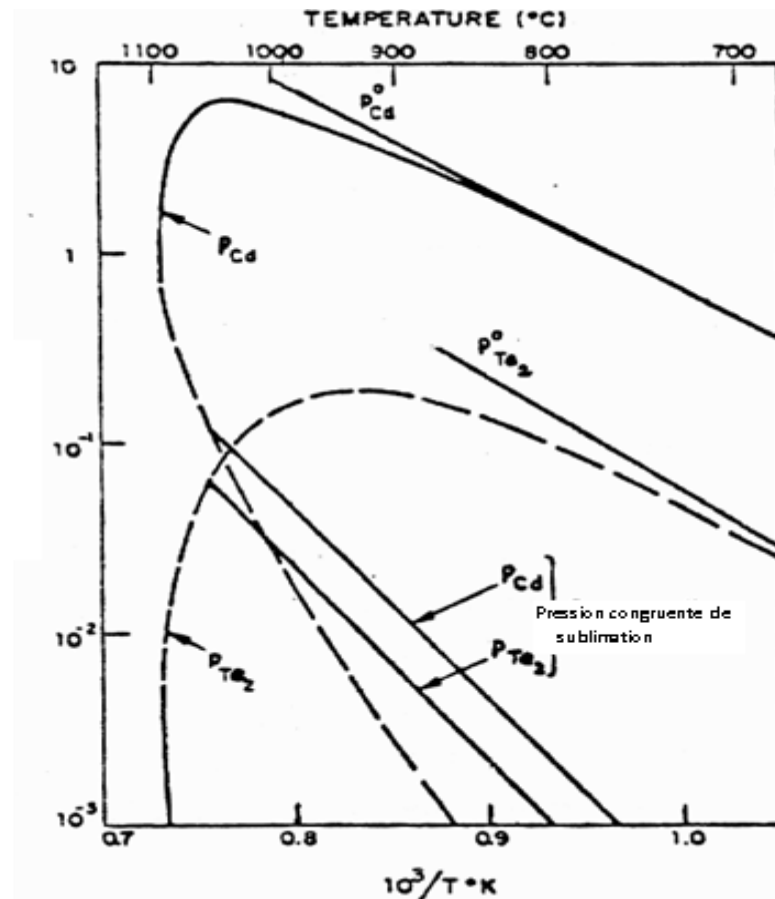


Fig. I.11. Diagramme de phase pression-température de CdTe

I.8.1.6. Propriétés optiques et électriques :

CdTe est un semi-conducteur à gap direct, sa structure de bande (fig. I.12) [33], lui permet des transitions verticales radiatives entre la bande de valence et la bande de conduction (fig. I.12.a). Il présente une large bande interdite, d'environ 1.51 eV à température ambiante, ce qui lui donne un seuil d'absorption optique dans le domaine de l'infrarouge.

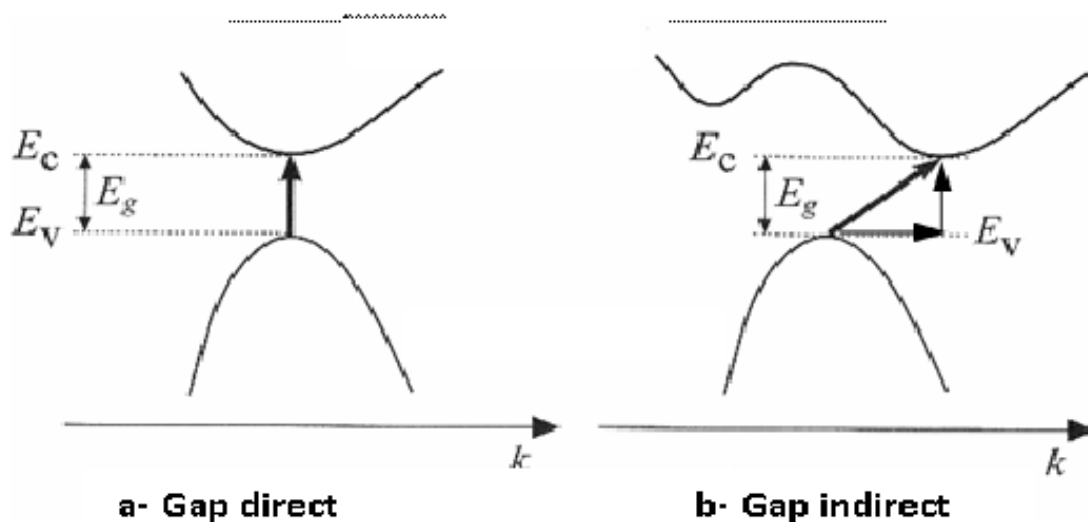


Fig. I.12. Transitions électroniques entre les extremas des bandes de valence et de conduction a) semi-conducteurs à gap direct, (les transitions sont verticales radiatives). b) semi-conducteurs à gap indirect, les transitions sont obliques (non radiatives).

CdTe peut présenter les deux types de conductivité n ou p; leur obtention, facile à contrôler, justifie les multiples applications de ce matériau dans le domaine de l'optoélectronique, notamment en détection infrarouge et en tant que substrat pour l'épitaxie des couches de CdHgTe. Le changement de type est aussi possible, notamment sous atmosphère de Cd [35].

I.8.1.7. Propriétés plastiques :

CdTe est un matériau plastique à température ambiante et même à températures plus basses [36].

Les scissions résolues sont de l'ordre de 25 MPa et 40 MPa avec pré-déformation à 300°K et sans pré-déformation à 220°K respectivement, elle chute à quelque MPa pour T=873K (déformations sous aire)

I.8.1.8. Propriétés cristallographique et énergétique :

Propriétés cristallographiques et énergétiques		
Grandeur	Symbole (unité)	Valeur
Paramètre de maille de la structure CFC	a (Å)	6.481
Longueur de liaison	L_{CdTe} (Å)	2.81
Plan de clivage	(110)	
Nombre de molécules $CdTe$ par cellule		4
Concentration volumique de $CdTe$ (ou Te)	(cm^{-3})	1.469×10^{23}
Numéro atomique de Cd	Z_{Cd}	48
Masse atomique de Cd	M_{Cd} (g/mole)	112.4
Energie de migration d'atome de Cd	H_{Cd} (eV)	5.6
Numéro atomique de Te	Z_{Te}	52
Masse atomique de Te	M_{Te} (g/mole)	127.6
Energie de migration d'atome de Te	H_{Te} (eV)	7.8
Affinité électronique	χ (eV)	4.28
Ionicité	f_i	0.72

Tab.I.6: Propriétés cristallographiques et énergétiques**I.8.1.9. propriétés optiques :**

Les propriétés optiques des semi-conducteurs sont fortement liées à leurs structures électroniques. Les propriétés optiques d'un matériau recouvrent principalement son indice de réfraction et son coefficient d'absorption. Remarquons que ces propriétés sont primordiales pour les composants optoélectroniques, puisqu'elles régissent le déplacement de la lumière dans le composant.

D'après la largeur du gap direct du CdTe, $E_g=1.52$ eV à $T=300$ K et la longueur d'onde à laquelle les photons devraient être émis, égale à ≈ 816 nm, le seuil d'absorption optique de ce matériau se trouve dans le domaine infrarouge.

La structure de bande qui permet des transitions verticales radiatives très important entre la bande de valence et la bande de conduction lui confère une efficacité d'absorption optique et de luminescence remarquable.

Différentes applications utilisent les propriétés optiques de ce matériau, à savoir la fabrication des détecteurs de rayons γ , et des cellules solaires.

Les photons arrivant à la surface d'un matériau sont réfléchis ou transmis. Une fois qu'ils ont pénétré dans celui-ci, des phénomènes de diffusion peuvent avoir lieu avec plus ou moins d'efficacité selon leur énergie. Dans le cas d'un matériau semi-conducteur, le matériau sera transparent pour les photons d'énergie inférieure à E_g , tandis que ceux d'énergie supérieure pourront être absorbés et engendrer une paire électron-trou. Les coefficients d'absorption α et de réflexion R sont calculés en fonction de la longueur d'onde λ à partir de l'indice de réfraction complexe donné par :

$$\tilde{n} = n - ik(\lambda) \quad (\text{I.3})$$

Où k est le coefficient d'extinction, ou d'atténuation.

• Le coefficient d'absorption α est défini par :

- L'indice de réfraction n , de CdTe, varie en fonction de la longueur d'onde λ selon la formule suivante [37] :

Où λ est exprimé en μm

On obtient : $n = 2.82$ pour $1.06 \mu\text{m}$, $n = 2.75$ pour $1.40 \mu\text{m}$ et $n = 2.67$ pour $10.6 \mu\text{m}$.

- Le coefficient de réflexion R à $10.6 \mu\text{m}$ est égal à 20.7%
- Le coefficient d'absorption optique α est égal à 104cm^{-1}
- Constantes diélectriques

A : $T=300$ K, les valeurs des constants diélectriques optiques ϵ_{∞} et statique ϵ_s sont égales à [38] :

$$\varepsilon_{\infty} = 7.1$$

$$\varepsilon_S = 10.7$$

I.8.1.10. propriétés thermiques :

Les principales propriétés thermiques sont données par les coefficients suivants [37] :

- Conductivité thermique à 300K : $\lambda = 0.075 \text{ W cm}^{-1} \text{ K}^{-1}$
- Coefficient linéaire d'expansion thermique à 300K : $\alpha = 4.67 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
- Température de fusion : $T_f = 1092 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- Chaleur spécifique à 300K : $C = 0.2082 \text{ J. g}^{-1} \text{ K}^{-1}$

I.9. les Applications du CdTe

Le tellure de cadmium sera utilisé comme matériau pour fabriquer des cellules solaires, car il est souvent placé entre deux couches de sulfure KSMH et il est inclus dans l'installation de puces de cellules solaires, qui sont absorbées de manière aussi économique en termes de coûts de conception

Le tellure de cadmium peut former un alliage avec du mercure pour donner le tellure de cadmium HgCdTe utilisé pour la fabrication du grattoir.

Le tellure de cadmium peut former un alliage avec du zinc pour donner le tellure de cadmium HgCdTe zinc, qui s'étend

Ainsi, le tellure de cadmium peut être utilisé comme détecteur pour plusieurs applications en spectroscopie nucléaire

I.10. Conclusion :

Dans le premier chapitre, nous décrivons les propriétés structurales et optoélectroniques des matériaux semiconducteurs II-VI,

Nous présentons ensuite les caractéristiques spécifiques de ces matériaux en insistant spécialement sur les propriétés physiques et particulièrement les propriétés optiques. . Nous présentons aussi leurs intérêts et applications

CHAPITRE II

II.1.Introduction

Dans ce deuxième chapitre nous avons présenté les notions de base concernant le rayonnement solaire, le tellurure de cadmium, et la cellule solaire à hétérojonction que nous avons jugés utiles pour la compréhension du sujet.

II.2.Rayonnement solaire

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique, sa décomposition en longueurs d'ondes est appelée spectre électromagnétique. Elle est en effet composée de toutes sortes de rayonnement de couleurs différentes, caractérisées par leur gamme de longueur d'onde. La fréquence de la lumière détermine sa couleur. Les photons, grains de lumière qui composent ce rayonnement, sont porteurs d'une énergie qui est liée à leur fréquence (longueur d'onde) par la relation :

$$E = h\nu = h \frac{c}{\lambda} \quad (\text{II.1})$$

Où h : est la constante de Planck, ν : la fréquence, c : est la vitesse de la lumière et

λ : est la longueur d'onde.

La figure II.1 montre la partie visible du spectre électromagnétique. La gamme des longueurs d'onde visible est comprise entre 390 nm (violet) à 780 nm (rouge).

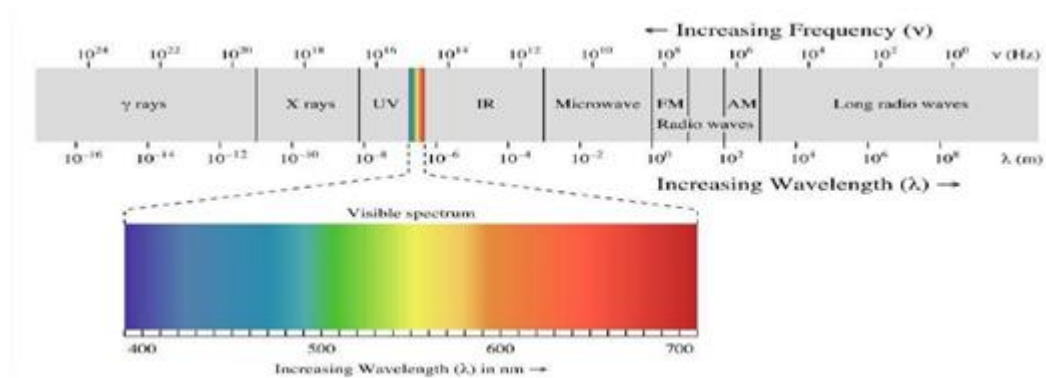


Fig.II.1 : Spectre électromagnétique [51]

Le soleil décharge continuellement une énorme quantité d'énergie radiante dans le système solaire, la terre intercepte une toute petite partie de l'énergie solaire rayonnée dans l'espace. Une moyenne de 1367 watts atteint chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère terrestre (pour une distance moyenne Terre-soleil de 150 Millions de km), c'est ce que l'on appelle la constante solaire égale à 1367W/m^2 .

La part d'énergie reçue sur la surface de la terre dépend de l'épaisseur de l'atmosphère à traverser. Celle-ci est caractérisée par le nombre de masse d'air AM.

Le rayonnement qui atteint le niveau de la mer à midi dans un ciel clair est de 1000 W/m² et est décrit en tant que rayonnement de la masse d'air "1" (ou AM1).

Lorsque le soleil se déplace plus bas dans le ciel, la lumière traverse une plus grande épaisseur d'air, perdant plus d'énergie. Puisque le soleil n'est au zénith que durant peu de temps, la masse d'air est donc plus grande en permanence et l'énergie disponible est donc inférieure à 1000 W/m². Les scientifiques ont donné un nom au spectre standard de la lumière du soleil sur la surface de la terre : AM1.5G ou AM1.5D.

Le nombre "1.5" indique que le parcours de la lumière dans l'atmosphère est 1.5 fois supérieur au parcours le plus court du soleil, c'est-à-dire lorsqu'il est au zénith, correspondant à une inclinaison du soleil de 45° par rapport au zénith est donné par la formule

$$OM = \frac{OA}{\sin h} \quad (\text{II.2})$$

Donc l'Air Masse :

$$\frac{OM}{OA} = \frac{1}{\sin h} \quad (\text{II.3})$$

Le « G » représente le rayonnement "global" incluant rayonnement direct et rayonnement diffus. Le rayonnement diffus concerne tout le rayonnement dont la trajectoire entre le soleil et le point d'observation n'est pas géométriquement rectiligne et qui est dispersé ou réfléchi par l'atmosphère ou bien le sol. En considérant ceci, on obtient une référence du spectre global AM1.5G avec une puissance de 1000W/m², et la lettre « D » tient compte seulement du rayonnement direct.

II .3.Normalisation :

Les conditions standards de qualification des modules Photovoltaïques sont : un spectre AM1.5 sous un éclairage de 1000W/m² et une température de 25°C.

L'irradiation solaire dépend :

- de l'orientation et l'inclinaison de la surface,
- de la latitude du lieu et son degré de pollution,
- de la période de l'année,
- de l'instant considéré dans la journée, -de la nature des couches nuageuses.

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

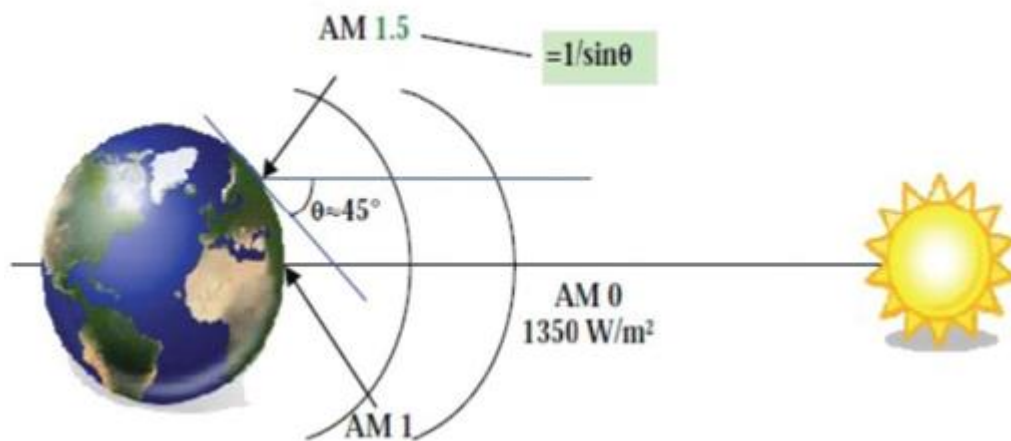


Fig. II.2 : Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par Le soleil, notion de la convention AM [52].

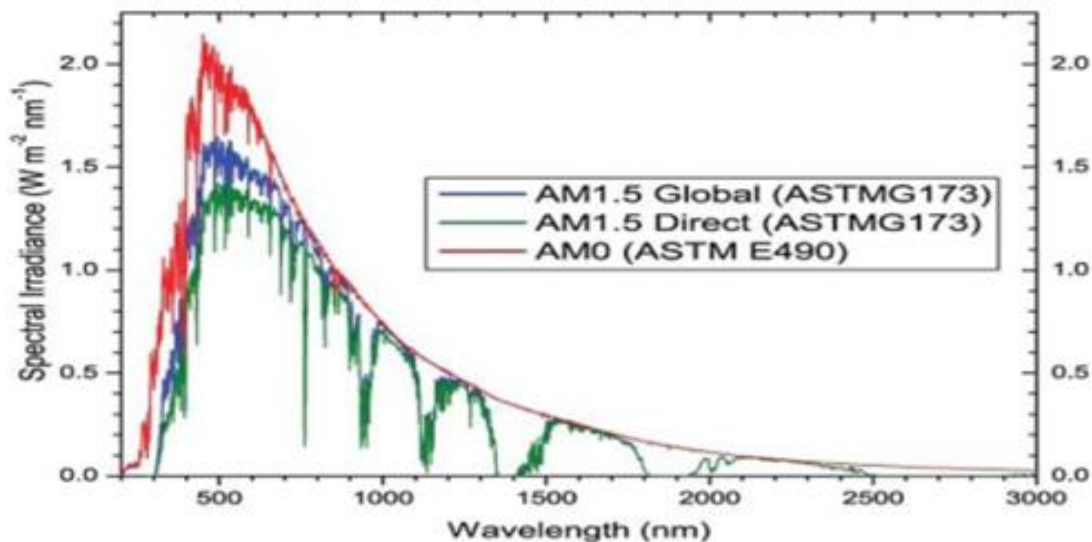


Fig. II.3 : Spectres Solaires relèves dans plusieurs conditions selon la Convention AM. Source NREL solarspectrum [52].

II.4. Historique du photovoltaïque.

C'est en 1839 qu'Edmond Becquerel découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. En 1873 Willoughby Smith découvre la photoconductivité du sélénium, et en 1875, Werner Von

Siemens expose devant l'académie des sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs, en 1877 W.G. Adams et R.E. Day développent une jonction solide à base de sélénium dont le rendement était de l'ordre de 1%. Cependant, la première véritable vision de l'énergie photovoltaïque est due à Charles Frits, qui, en reprenant les travaux d'Adams et Day, a cherché à établir un développement industriel des cellules au

sélénium. Frits pensait pouvoir faire concurrence aux technologies de production électrique naissantes de l'époque, sa vision était que chaque bâtiment pouvait être équipé de cellules solaires et être indépendant de la distribution centralisée. Albert Einstein a découvert, en travaillant sur l'effet photoélectrique, que la lumière n'avait pas qu'un caractère ondulatoire, mais que son énergie était portée par des particules, les photons.

En 1954, Carl Fuller, au sein des laboratoires de la société Bell, cherchait à améliorer les diodes au silicium en y introduisant certains dopants. Son collègue Gerald

Pearson eut l'idée de mesurer le courant produit sous illumination par les diodes de Fuller. A la surprise générale, un courant important fut observé. Ce fut le début d'un véritable projet de cellules solaires au sein de la société Bell où un rendement de 6 % fut rapidement démontré. 1954 est aussi le début des cellules en couches minces basées sur des diodes Schottky avec le Cds. A cause de leur prix élevé, la seule véritable, mais très importante, application pour les premières cellules solaires a été dans le domaine spatial qui fut le terrain de développement du photovoltaïque jusqu'au début des années 70. 1958 voit le lancement de plusieurs satellites équipés de systèmes photovoltaïques. La forte pression du programme spatial engendre des progrès très rapides en termes de rendement des cellules. De 8 % en 1957, et 9 % en 1958, on atteint 10 % en 1959 pour arriver à 14 % en 1960. Les années 60 voient un ralentissement de l'évolution du rendement des cellules au silicium mais des progrès rapides en ce qui concerne les cellules à base de CdS



Fig. II.4 : Le photovoltaïque dans le monde.

Cependant, au cours des années 80, la technologie photovoltaïque terrestre a progressé régulièrement par la mise en place de plusieurs centrales de quelques mégawatts, et même est devenue familière des consommateurs à travers de nombreux produits de faible puissance y faisant appel : montres, calculatrices, balises radio et météorologiques, pompes et réfrigérateurs solaires.

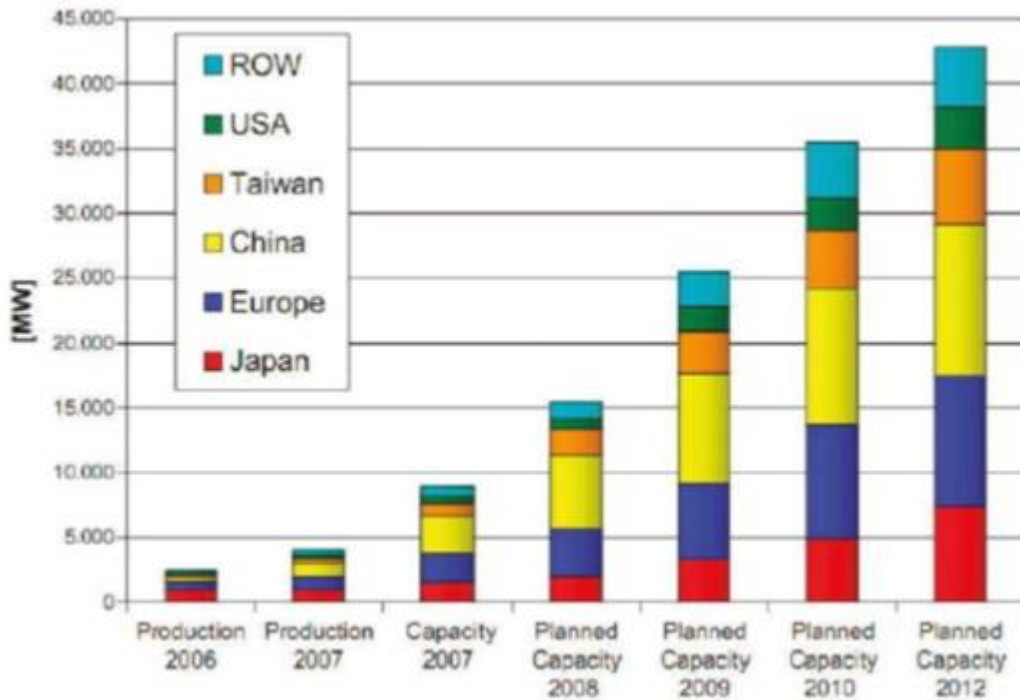


Fig. II.5 : production de PV mondiale [53].

II.5.Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque a été mis en évidence pour la première fois par E. Becquerel en 1839, il découvrit que certains matériaux délivraient une petite quantité d'électricité quand ils étaient exposés à la lumière. Albert Einstein expliqua le phénomène photoélectrique en 1912, mais il fallut attendre le début des années 50 pour sa mise en application pratique dans la réalisation d'une cellule photovoltaïque en silicium d'un rendement de 4,5% [54]. Nous présentons ici les mécanismes de la génération de porteurs électroniques au sein d'un semi-conducteur sous l'impact de photons.

II.6.Notions de base sur les cellules solaires.

II.6.1.Concepts importants sur les semi-conducteurs :

Les semi-conducteurs sont une famille des solides ayant un gap d'énergie modéré (jusqu'à quelques électrons volts) dans la distribution des états d'énergie permise. $T = 0 \text{ K}$

dans un matériau pur, ce gap sépare une bande entièrement remplie (bande de valence) de celle qui est entièrement vide (bande de conduction). Pour $T > 0$ K, un nombre fini d'états électroniques sont occupés dans la bande de conduction ("électrons libres") et un nombre fini d'états sont inoccupés dans la bande de valence ("trous libres"). Ces électrons et trous libres peuvent gagner de l'énergie cinétique depuis un quasi-continuum d'états plus ou moins élevés mis à leur disposition, respectivement, et ils sont donc en mesure de répondre à des champs électriques et des gradients de concentration qui permettent la circulation du courant macroscopique.

Les concentrations à l'équilibre des électrons et des trous peuvent être modifiées par des dopants extrinsèques, mais aussi par les niveaux des défauts (états additionnels à l'intérieur du gap d'énergie) qui sont intrinsèques dans le semi-conducteur. L'occupation des états de la bande de conduction et de valence est régie par les statistiques de Fermi-Dirac,

$$F(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_f}{KT}\right)} \quad (\text{II.4})$$

Où K est la constante de Boltzmann et T la température absolue.

L'équation (II.4) décrit la probabilité d'occupation d'électrons dans la bande de conduction et, similairement, le $1 - F(E)$ décrit la probabilité pour les trous dans la bande de valence. Si le niveau de Fermi E_f n'est pas très proche de l'un des bords de la bande,

$E_c - E_f \gg kT$ et $E_f - E_v \gg kT$, $F(E)$ et $1 - F(E)$ peuvent pour des causes pratiques, être remplacés par les facteurs de Boltzmann

$$\exp\left(\frac{-E - E_f}{KT}\right) \quad (\text{II.5})$$

Pour les électrons dans la bande de conduction et les trous dans la bande de valence respectivement.

Les semi-conducteurs sont classifiés en tant que type-n ou type-p selon lesquels des électrons ou trous sont les porteurs majoritaires. Le niveau de Fermi peut être calculé par les relations suivantes :

$$\text{et } n = N_c \exp\left(\frac{-E_c - E_f}{KT}\right) \quad (\text{II.6})$$

$$p = N_v \cdot \exp\left(\frac{-E_f - E_v}{KT}\right) \quad (\text{II.7})$$

Ou :

$$N_c = 2 \left(\frac{2\pi m_n K T}{h^2} \right) \quad \text{et} \quad N_v = 2 \left(\frac{2\pi m_p K T}{h^2} \right) \quad (\text{II.8})$$

Sont les densités effectives des états dans la bande de conduction et de valence. Pour les semi-conducteurs dopes soit avec des niveaux donneurs ou accepteurs peu profonds, n est similaire à la densité des donneurs et p est similaire à la densité des

accepteurs. Tous les paramètres dans l'équation (II. 8) ont leur signification habituelle, m_p et m_n sont les masses effectives des électrons et des trous. A l'équilibre, le produit de n et p est constant et dépend seulement de la température, des masses effectives, et du gap d'énergie du semi-conducteur,

$$np = n_i^2 = N_c N_v \exp\left(\frac{-E_g}{K T}\right) \quad (\text{II.9})$$

II.6.2. Non-équilibre :

Dans les conditions de non-équilibre, comme sous illumination ou sous injection des porteurs en raison de polarisation électrique appliquée extérieurement, aucun niveau uniforme de Fermi n'existe. Dans l'état stationnaire, cependant, des quasi-niveaux de Fermi E_{fn} et E_{fp} peuvent être introduits, qui sont essentiels dans l'analyse et l'interprétation des semi-conducteurs. Ces quasi-niveaux de Fermi sont définis par

$$n = N_c \exp\left(\frac{-E_c - E_{fn}}{K T}\right) \quad (\text{II.10})$$

et

$$p = N_v \exp\left(\frac{-E_{fp} - E_v}{K T}\right) \quad (\text{II.11})$$

En supposant que E_{fn} et E_{fp} dans la région de type-n et de type-p d'une diode à jonction p-n sont en équilibre avec le contact électrique respectif, la différence entre les quasi-niveaux de Fermi à proximité de la région de charge d'espace de la diode est donnée par la tension appliquée V , et s'ensuit que le produit np est dépendant de la tension :

$$np = n_i^2 \exp\left(\frac{qV}{K T}\right) \quad (\text{II.12})$$

Plus d'informations sur les propriétés des semi-conducteurs peuvent être trouvés dans de nombreux ouvrages sur les semi-conducteurs [55] et les cellules solaires [56-57].

II.7. La conversion photovoltaïque.

La conversion photovoltaïque est la transformation directe d'une énergie électromagnétique en énergie électrique continue. Cette énergie électromagnétique est le plus souvent le rayonnement solaire. En ce sens, l'énergie photovoltaïque utilise la fusion nucléaire. Pour des applications photovoltaïques, c'est le nombre de photons par unité de longueur d'onde qui est réellement utile puisque ce sont les photons qui créent des paires électron-trou. Par exemple, avec un rendement quantique de 1, chaque photon crée une paire électron-trou. Par conséquent, le nombre de photons en fonction de la longueur d'onde est l'information pratique à connaître dans les applications photovoltaïques. En utilisant la formule de Planck, on déduit de l'irradiante (une énergie par unité de surface et de longueur d'onde) ce nombre de photons. On obtient alors le graphique 1.5. La longueur d'onde correspondant au maximum de photons est de l'ordre de 650 nm – 670 nm. Le nombre total de photons sur la plage « utile » 300 nm – 1107 nm est d'environ $2,72 \times 10^{21}$

La plupart des cellules photovoltaïques utilisent des semi-conducteurs (amorphes ou cristallins, alliages ou pas) pour transformer un photon en une paire électron-trou. Si l'on utilise un seul matériau semi-conducteur (simple jonction), il y a un compromis entre le nombre de photons utiles (qui peuvent être absorbés) et l'énergie délivrée par photon. Un matériau avec un gap important absorbe moins de photons car il a une longueur d'onde de coupure plus petite. Le courant est donc plus faible. Un matériau avec un faible gap absorbe plus de photons mais a une tension plus faible. En effet, les paires électron-trou créées thermalisent très vite à l'énergie égale à la bande interdite E_g du semi-conducteur. Ce compromis a été quantifié par Shockley et Queisser [58]. Avec un seul matériau et sans technologies « exotiques » le rendement de conversion maximal est de 31 % pour un gap d'environ 1,4 eV. Le gap du silicium cristallin n'est pas très loin de cet optimum, avec 1,12 eV le maximum théorique accessible pour une simple jonction en c-Si est d'environ 29 % [59].

II.8. Paramètres caractéristiques d'une cellule photovoltaïque.

II.8.1. Caractéristique idéale et schéma équivalent :

Les cellules photovoltaïques ou les plaques solaires sont des composants Optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité par un processus appelé « effet photovoltaïque », a été découverte par E. Becquerel en 1839.

Elles sont réalisées à l'aide de matériaux semi-conducteurs, c'est à dire ayant des propriétés intermédiaires entre les conducteurs et les isolants.

La taille de chaque cellule va de quelques centimètres carrés jusqu'à 100 cm² ou plus sa forme est circulaire, carrée ou dérivée des deux géométries.

Les cellules se branchent en série, ce qui permet aux électrons générés par une cellule d'être repris par la suivante. Le but est d'avoir une différence de potentiel normalement entre 6 et 24 V.

La fig. (II.6) suivante représente le schéma électrique d'une cellule photovoltaïque.

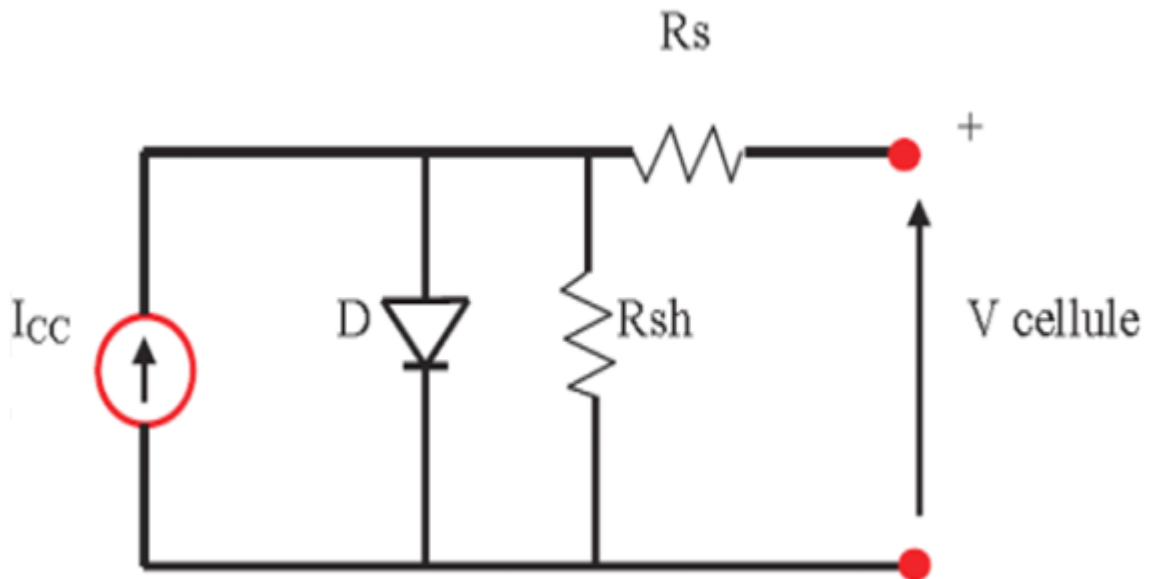


Fig. II. 6: Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque [60]

La cellule PV peut se modéliser à partir de l'équation

$$I = I_{cc} - I_s \left(\exp \left(\frac{V + R_s \times I}{n \times V_T} \right) - 1 \right) - \frac{V + R_s \times I}{R_{sh}} \quad (\text{II.13})$$

Ou : $V_T = \frac{kT}{e}$

Avec :

I_s (A) : courant de saturation

V_T (V) : potentiel thermodynamique

k (J.K) : constante de Boltzmann (1.380×10^{-23} J/K)

T (K) : température effective de la cellule

e : charge de l'électron (1.602×10^{-19} C)

n : facteur de non idéalité de la jonction [60]

I (A) : courant fourni par la cellule

V (V) : tension aux bornes de la cellule

I_{cc} (A) : courant de court-circuit de la cellule dépendant de l'ensoleillement et de la température

R_{sh} (Ω) résistance de shunt caractérisant les courants de fuites de la jonction

R_s (Ω) résistance série représentant les diverses résistances des contacts et de connexions

[60]

II.8.2. La jonction PN :

Une jonction P-N est créée par la mise en contact d'un semi-conducteur dopé N et d'un semi-conducteur dopé P. La jonction entraîne l'égalisation des niveaux de Fermi par décalage des bandes. Si l'on applique une tension positive du côté de la région P, les porteurs majoritaires positifs (les trous) sont repoussés vers la jonction. Dans le même temps, les porteurs majoritaires négatifs du côté N (les électrons) sont attirés vers la jonction. Arrivés à la jonction, soit les porteurs se recombinent (un électron tombe dans un trou) en émettant un photon éventuellement visible (LED), soit ces porteurs continuent leur course au travers de l'autre semi-conducteur jusqu'à atteindre l'électrode opposée : le courant circule, son intensité varie en exponentielle de la tension.

Si la différence de potentiel est inversée, les porteurs majoritaires des deux côtés s'éloignent de la jonction, bloquant ainsi le passage du courant à son niveau. Ce comportement asymétrique est utilisé notamment pour redresser le courant alternatif.

La jonction P-N est à la base du composant électronique nommé diode, qui ne permet le passage du courant électrique que dans un seul sens. De manière similaire, une troisième région peut être dopée pour former des doubles jonctions N-P-N ou P-N-P qui forment les transistors bipolaires. Dans ce cas-là, les deux semi-conducteurs de même type sont appelés l'émetteur et le collecteur. Le semi-conducteur situé entre l'émetteur et le collecteur est appelé la base, et a une épaisseur de l'ordre du micromètre. Lorsqu'on polarise la jonction émetteur-base en direct, celle-ci est passante alors que la jonction base-collecteur est bloquée. Cependant la base est assez fine pour permettre aux nombreux porteurs majoritaires injectés depuis l'émetteur (fortement dopé) de la traverser avant d'avoir le temps de se recombiner. Ils se retrouvent ainsi dans le collecteur, produisant un courant contrôlé par la tension de base.

[61]

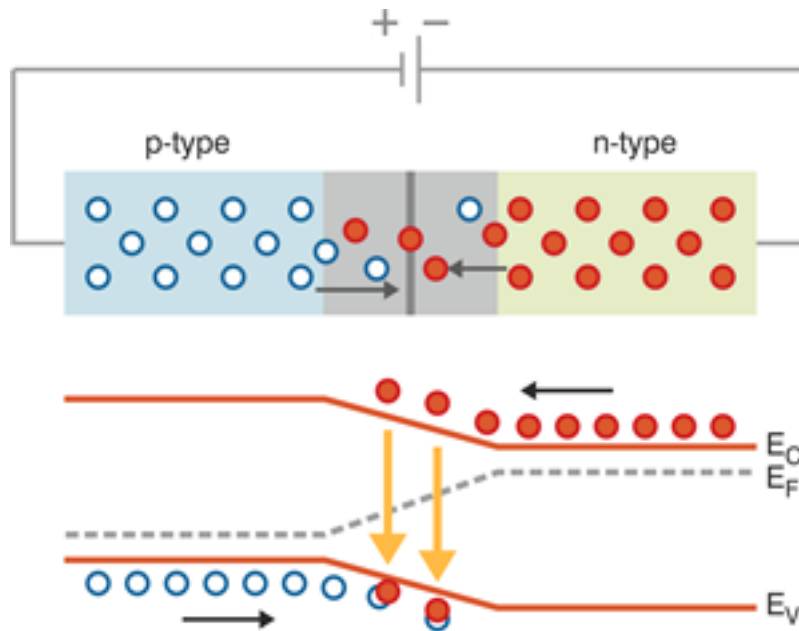


Fig. II.7: Jonction P-N en polarisation directe. [61]

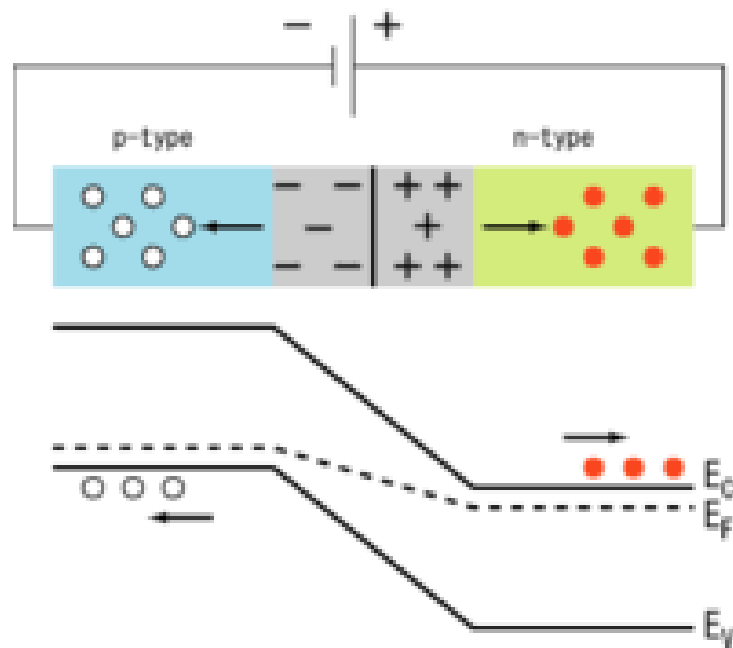


Fig. II.7: Jonction P-N en polarisation inverse. [61]

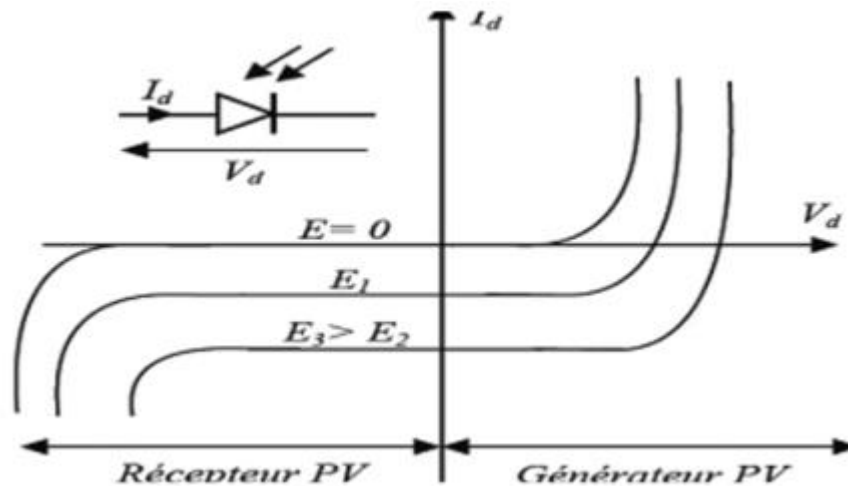


Fig. II.9 : caractéristique d'une jonction PN sous éclairement [61]

II.8.3. Le générateur PV et ses performances

Un générateur photovoltaïque ou module est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques élémentaires montées en série et/ou parallèle afin d'obtenir des caractéristiques électriques désirées tels que la puissance, le courant de court-circuit ou la tension en circuit ouvert [62].

II.8.4. Caractéristiques courant / tension

La courbe de la caractéristique d'une cellule PV représente la variation du courant qu'elle produit en fonction de la tension aux bornes de la cellule PV depuis le court-circuit (tension nulle correspondant au courant maximum ne produit) jusqu'au circuit ouvert (courant nul pour une tension maximale aux bornes de la cellule).

Cette courbe est établie dans des conditions ambiantes de fonctionnement données (répartition du rayonnement donnée, cellule PV à une température donnée, air ambiant circulant à une vitesse donnée). En effet, le fonctionnement des cellules photovoltaïques dépend des conditions d'ensoleillement et de température à la surface de la cellule. Ainsi, chaque courbe courant-tension correspond à des conditions spécifiques de fonctionnement.

A température fixée, pour les deux régimes (sous obscurité et sous éclairement) la caractéristique courant / tension d'une cellule a l'allure suivante :

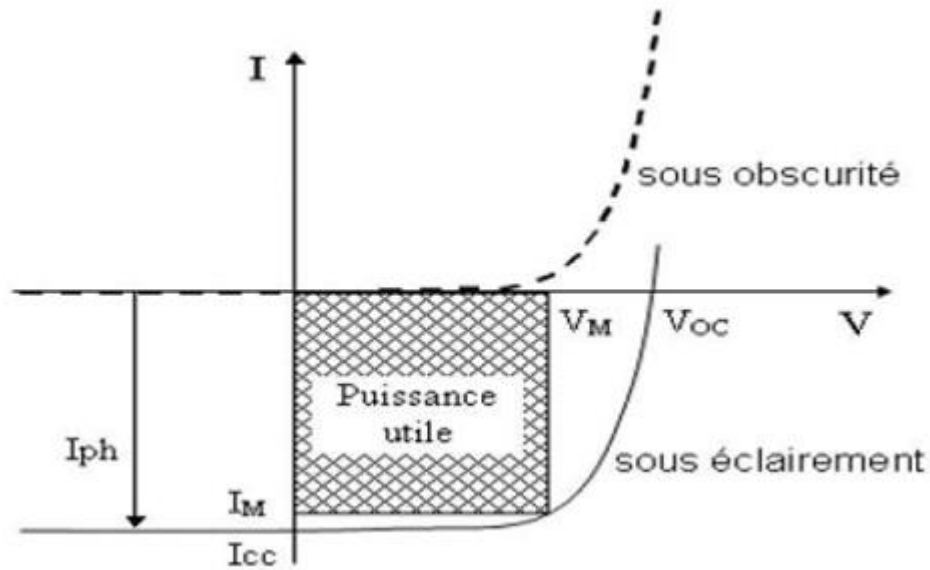


Fig. II.10 : La caractéristique d'une cellule photovoltaïque non éclairée est celle en présence d'un éclairement. [61].

Cette caractéristique est décalée vers le bas d'un courant I (courant de court-circuit). de même, elle coupe l'axe des abscisses en V (tension maximale de circuit ouvert). On peut regrouper trois zones essentielles :

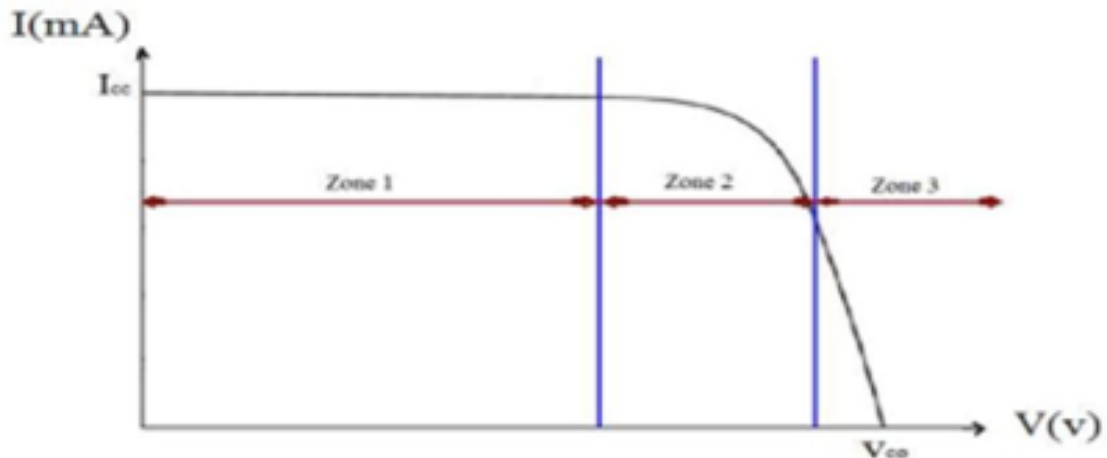


Fig. II.11: les différentes zones de caractéristique $I=f(V)$ d'une cellule photovoltaïque [61].

- **La zone 1 :** où le courant reste constant quelle que soit la tension. Pour cette région, le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.

• **La zone 2** : correspondant au coude de la caractéristique. La région intermédiaire entre les deux zones précédentes, représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur, où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé.

• **La zone 3** : qui se distingue par une variation de courant correspondant à une tension presque constante. Dans ce cas, le générateur est assimilable à un générateur de tension [11].

II.8.4.1. Courant de court-circuit (I_{cc})

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule. Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température.

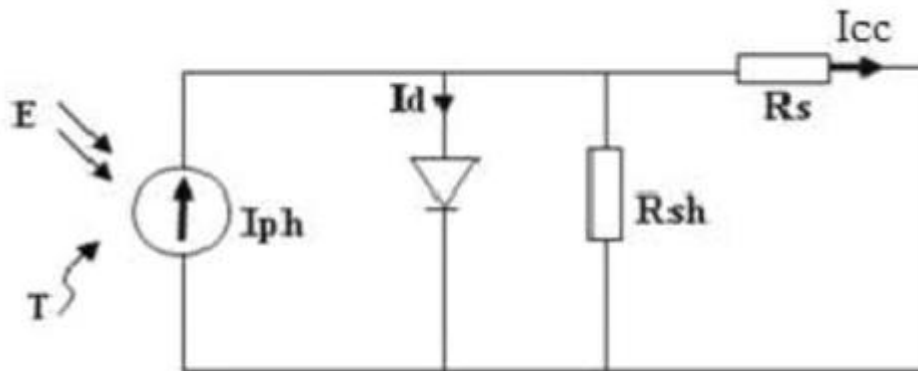


Fig.II.12 : Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque en court-circuit [61].

$$I(V = 0) = I_{ph} \quad (\text{II.14})$$

II.8.4.2. Tension à circuit ouvert (V_{co})

La tension à circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend de la barrière d'énergie, et décroît avec la température. Elle varie peu avec l'intensité lumineuse. [61].

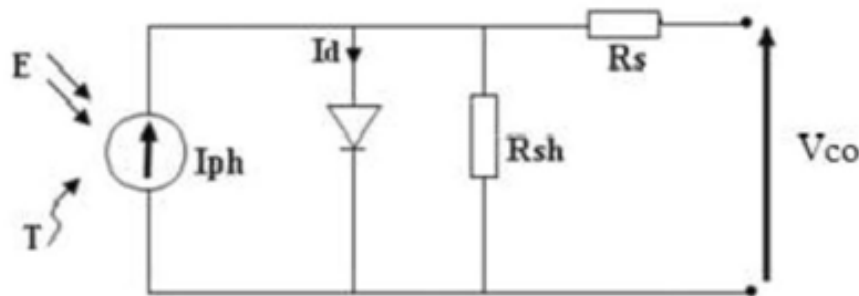


Fig.II.13 : Schéma électrique d'une cellule Photovoltaïque en circuit ouvert [61].

$$I_{PH} - \left(\exp\left(\frac{V_{CO}}{V_T} - 1\right) - \frac{V_{CO}}{R_{sh}} \right) = 0 \quad (\text{II.15})$$

$$V_{CO} = V_T \ln\left(\frac{I_{PH}}{I_0}\right) \quad (\text{II.16})$$

II.8.5. La puissance maximale P_{max}

Suivant la formule $P = VI$, pour que P soit maximal, il faut être dans les conditions où le produit VI est maximal : c'est le point de charge idéal de la photopile.

II.8.6. Le facteur de forme FF

Le facteur de forme met en évidence non seulement l'efficacité d'une cellule photovoltaïque mais aussi et surtout son vieillissement. Il est défini par le rapport de la puissance maximale P_m et de la valeur du produit $I_{cc} \cdot V$ [62] :

$$FF = \frac{P_m}{J_{cc} V_{CO}} = \frac{J_m V_m}{J_{cc} V_{CO}} \quad (\text{II.17})$$

II.8.7. Le rendement de conversion η

Le rendement de conversion (efficiency) exprime en pourcentage, désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente P_{inc} [63] :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{FF \times I_{cc} \times V_{CO}}{P_{in}} \quad (\text{II.18})$$

II.8.8. Le rendement quantique, EQE

Le rendement quantique est le rapport entre le nombre d'électrons dans le circuit externe et le nombre de photons incidents. Lorsque les photons perdus par réflexion (à la fenêtre de la cellule) et les photons perdus par transmission à travers toute l'épaisseur de la cellule (à cause de l'absorption incomplète) ne sont pas pris en compte, cette grandeur s'appelle alors le rendement quantique interne, IQE (internal quantum efficiency). Dans le cas contraire, ce paramètre s'appelle le rendement quantique externe, EQE (external quantum efficiency). Le rendement quantique externe est défini comme suit :

$$EQ(\lambda) = \frac{J_{cc}(\lambda)}{J_{ph}(\lambda)} \times \frac{E_{ph}(\lambda)}{e} = \frac{J_{cc}(\lambda)}{J_{ph}(\lambda)} \times \frac{h c}{e \lambda} \quad (\text{II.19})$$

où $J_{cc}(\lambda)$ est le flux lumineux incident, e la charge de l'électron et E_{ph} l'énergie

du photon (avec h étant la constante de Planck, c la vitesse de la lumière et λ la longueur d'onde).

L'EQE est aussi désigné sous le terme d'IPCE (de l'expression anglaise Incident Photon to Current Efficiency). En remplaçant les trois constantes par leur valeur numérique, on obtient :

$$IPCE = 1.24 \times \frac{J_{cc}}{\phi(\lambda) \times \lambda} \quad (\text{II.20})$$

Où J_{cc} est exprimé en $A.cm^{-2}$, $J(\lambda)$ en $W.cm^{-2}$ et λ , en μm . [63]

II.8.9. La résistance série

La résistance série est gouvernée par les résistivités des matériaux, par les résistances de contact, des électrodes et par la grille collectrice. Elle agit sur la pente de la caractéristique dans la zone où la cellule se comporte comme un générateur de tension.

Elle ne modifie pas la V_{oc} mais elle peut diminuer notablement la valeur de I_{cc} [64].

II.8.10. La résistance shunt

La résistance parallèle (ou shunt) caractérise les pertes par recombinaison dues aux épaisseurs des régions N et P et de la zone de charge et d'espace. R_p est donc liée directement au processus de fabrication, l'existence de défaut de structures et aux états de surface. Elle traduit l'existence de shunts à travers l'émetteur également, connue sous le nom de résistance de court-circuit.

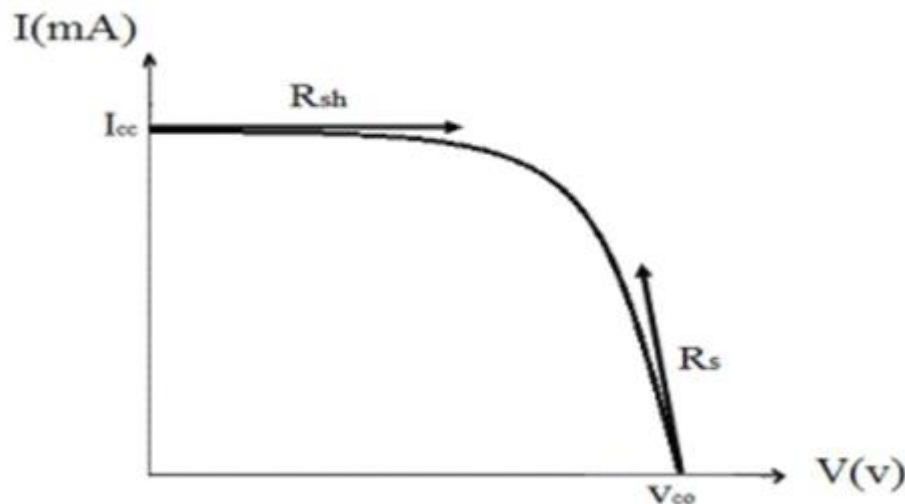


Fig. II.14: détermination graphique de résistance shunt Et série

Différentes méthodes de détermination des résistances shunt et série ont été proposées par des chercheurs. La méthode la plus simple est la méthode graphique qui consiste à évaluer R_{sh} , R_s à partir de la pente de la caractéristique I(V), au point de court-circuit pour R_{sh} , et au point de circuit-ouverte pour R_s .

$$R_{sh} = \left(\frac{\Delta V}{\Delta I}\right)I = I_{cc} \quad (\text{II.21})$$

$$R_s = \left(\frac{\Delta V}{\Delta I}\right)I = I_{co} \quad (\text{II.22})$$

II.9. Les Différents Types de Cellules Photovoltaïques

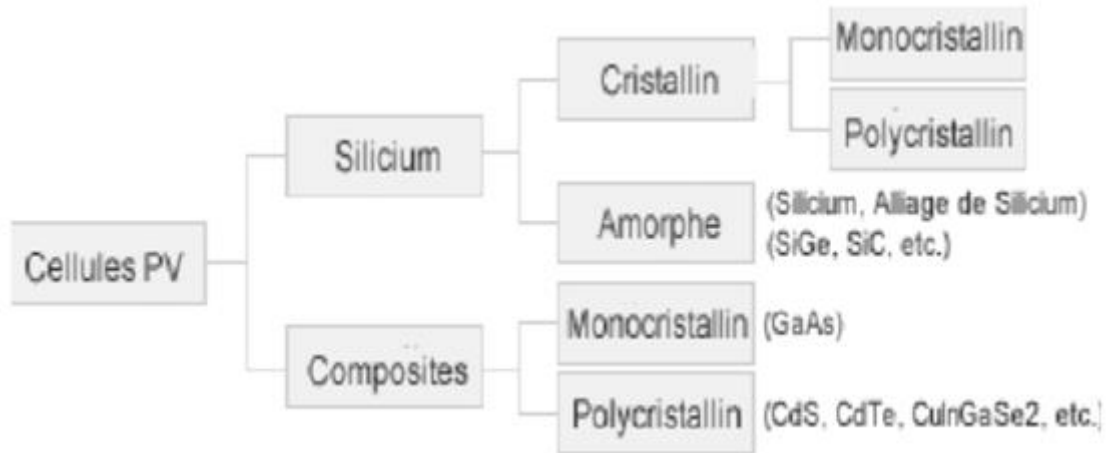


Fig. II. 15 : Les différentes technologies des cellules photovoltaïques. [64]

Il existe un grand nombre de technologies mettant en œuvre l'effet photovoltaïque. Beaucoup sont encore en phase de recherche et développement [64]

II.10. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les bases indispensables à la compréhension du sujet. Nous avons rappelé quelques notions sur le rayonnement solaire, et son application dans le domaine photovoltaïque. Nous avons ensuite expliqué le fonctionnement des cellules photovoltaïques et leurs caractéristiques principales.

CHAPITRE III

III.I. Introduction

SCAPS est un logiciel de simulation des cellules solaires unidimensionnelles développé par le département des systèmes électronique et informatique (ELIS) de l'Université de Gent, Belgique. Plusieurs chercheurs ont contribué à son développement : Marc Burgelman, Koen Decock, Johan Verschuere, Alex Niemegeers, Stefaan Degraeve.

Une description du logiciel, et les algorithmes qu'il utilise, se trouve dans la littérature.

Le logiciel est disponible gratuitement pour la communauté de la recherche de photovoltaïques (établissements et Instituts de recherche). Il fonctionne sur PC sous Windows 95, 98, NT, 2000, XP, Vista, Windows 7, et occupe environ 50 Mo d'espace disque.

Le logiciel peut être téléchargé gratuitement. Il faut rapporter à la connaissance de Marc Burgelman le téléchargé d'une version de SCAPS (le nom et l'adresse d'institution, et le nom du promoteur pour les étudiants de doctorat).

SCAPS est développé à l'origine pour des structures des cellules de CuInSe_2 et de CdTe . Cependant, plusieurs versions 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).

Un aperçu de ses caractéristiques principales est donné ci-dessous :

- Jusqu'à 7 couches semi-conducteurs.
- Presque tous les paramètres peuvent être introduits avec variations graduées (en dépendance de la composition et de la profondeur de la cellule) : Par exemple,

χ , ϵ , N_c , N_v , V_{thn} , V_{thp} , μ_n , μ_p , $N_{A,D}$, tous les pièges (défauts) N_t .

- Mécanismes de recombinaison : bande à bande (direct), la SRH Auger.
- les niveaux de 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, IPV).
- 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 : du côté p ou n.
- points pour les calculs de travail : la tension, la fréquence, la température.
- le logiciel calcule les bandes d'énergie, les concentrations et les courants à un point de fonctionnement donné les caractéristiques (JV), les caractéristiques du courant alternatif (C et G en fonction de V et / ou f), la réponse spectrale (également avec polarisation lumière ou tension).
- calculs de lots possible ; présentation des résultats et les paramètres en fonction.
- chargement et la sauvegarde de tous les paramètres ; démarrage de SCAPS dans une configuration personnalisée, un langage de script compris une fonction utilisateur libre.
- interface utilisateur très intuitive.
- un centre de langage de script à exécuter SCAPS d'un « fichier de script toutes les variables internes peuvent être consultés et tracée par le script.
- un établissement ajustement de courbe intégré.
- un panneau pour l'interprétation des mesures d'admission.

III.2 Notions de base :

SCAPS est un programme conçu pour fonctionner sous le système Windows, développé par LabWindows/CVI de la national Instruments. SCAPS s'ouvre avec l'icône 'Action Panel'. La fenêtre qui s'ouvre est présentée dans la fig. III.1

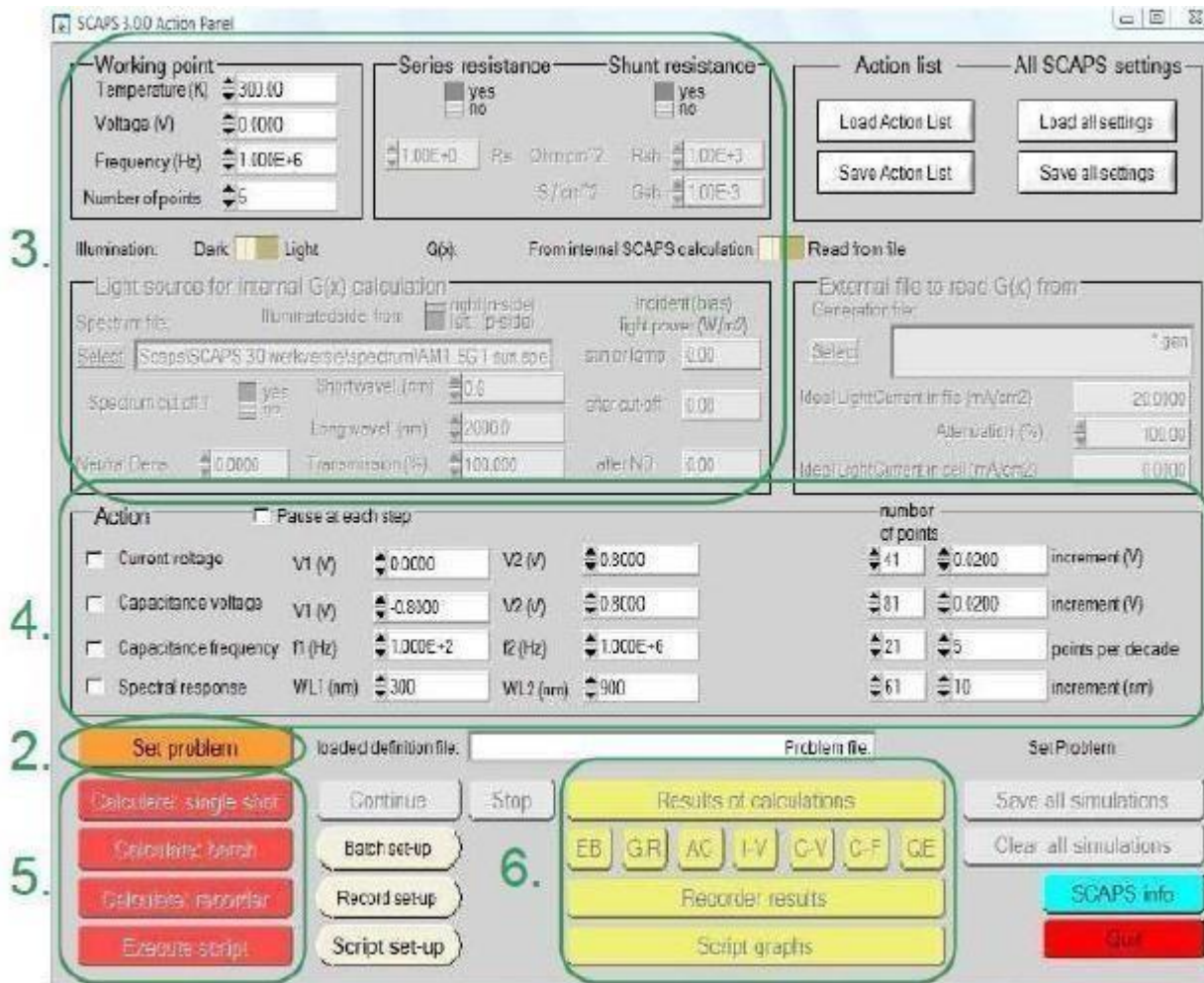


Fig.III.1 : Panneau de démarrage de SCAPS, le panneau d'action ou principal.

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(s)calcul(s).
6. Afficher les courbes de simulation (voir la section 6).

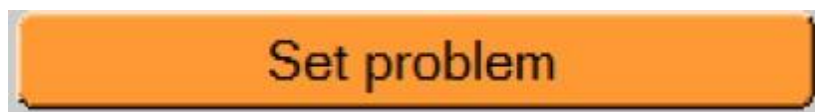
Ces étapes sont plus détaillées dans ce qui suit.

III.2.1. Lancer SCAPS :



On clique sur l'icône ci-dessus sur le bureau, ou bien double-clique sur le fichier SCAPS3200.EXE dans le gestionnaire de fichiers (ou dans n'importe quelle autre version de SCAPS). SCAPS s'ouvre avec le panneau d'action.

III.2.2 Définir le problème :



On clique sur le bouton SET PROBLEM dans le panneau d'action, et en 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 'SET PROBLEM' dans le panneau d'action.

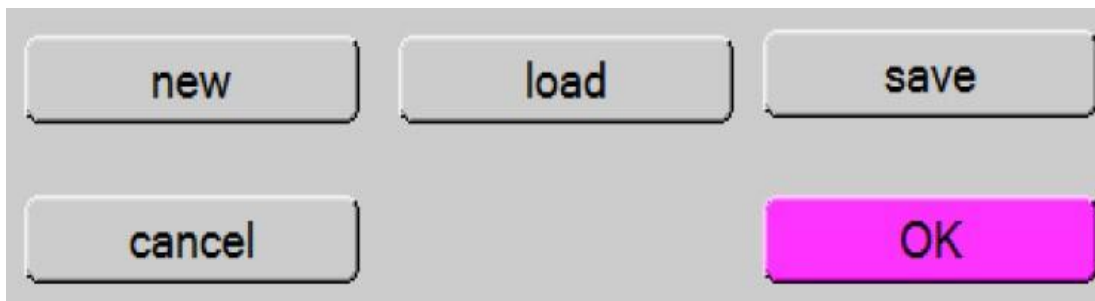


Fig III. 2 : Définir le problème

III.2.3. Définir le point 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, seulement (T) , (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.

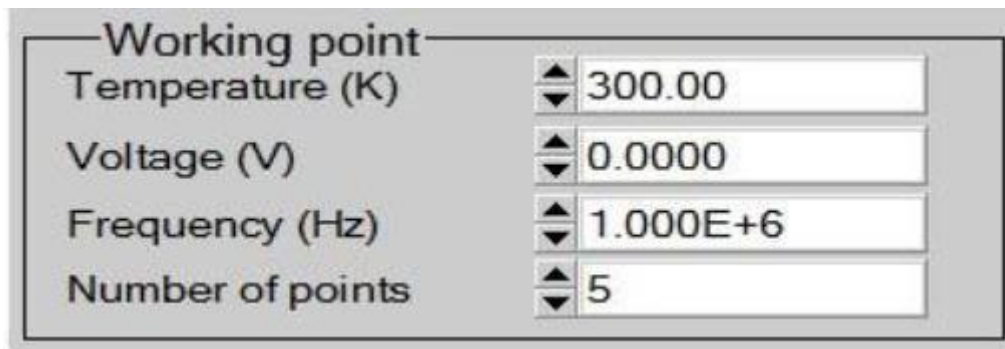


Fig. III. 3 : Le point de fonctionnement

❖ **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 Q E(y). 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.

❖ **La fréquence f** : elle ne concerne pas les simulations I-V, Q E(y) et C-f. C'est la fréquence dans laquelle la caractéristique C-V est simulée.

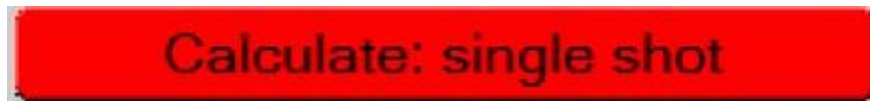
❖ **L'illumination** : elle est utilisée dans toutes les mesures. Pour Q E(y), elle détermine les conditions de polarisation de la lumière. Les paramètres de base sont : l'obscurité ou la lumière, le choix du côté illuminé, le choix du spectre.

Le spectre d'illumination one Sun (= 1000 W/m²) avec la masse d'air 1.5 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.

III.2.4. Sélection des caractéristiques à simuler :

Dans la partie Action du panneau action, on peut choisir un ou plusieurs mesures à simuler : I-V, C-V, C-F et Q E(y). On peut ajuster également, les valeurs initiales et finales de l'argument, ainsi que le nombre des étapes.

III.2.5. Lancer le calcul :



III.2.6. Afficher les courbes simulées :

Après les calculs, SCAPS passe au panneau de bande d'énergie, présenté dans la figure II.4. 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).



Fig. III. 4: Panneau des bandes d'énergie

III.2.7. Les courbes I-V :

La figure II.5 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.

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.

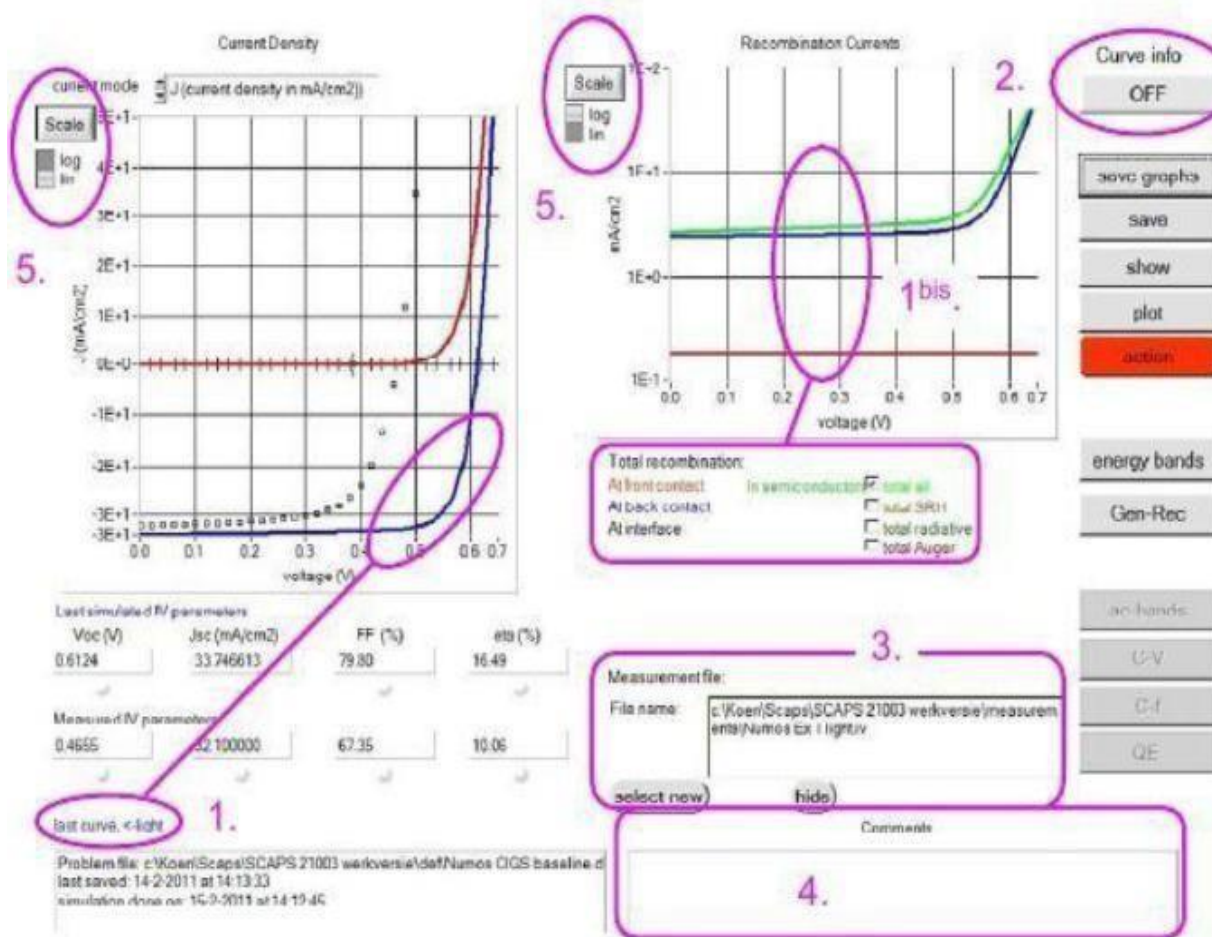


Figure III. 5 : Panneau d’affichage des courbes I-V à l’obscurité et en éclaircissement.

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).

III.3. Définition 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 dès les modifier au risque dès les rendre inutilisables par la suite. Les propriétés des couches, contacts et de l'interface peuvent être modifiées en cliquant sur le bouton approprié comme le montre la figure II.6. De la même manière, des couches peuvent être rajoutées en cliquant 'ADD LAYER'.

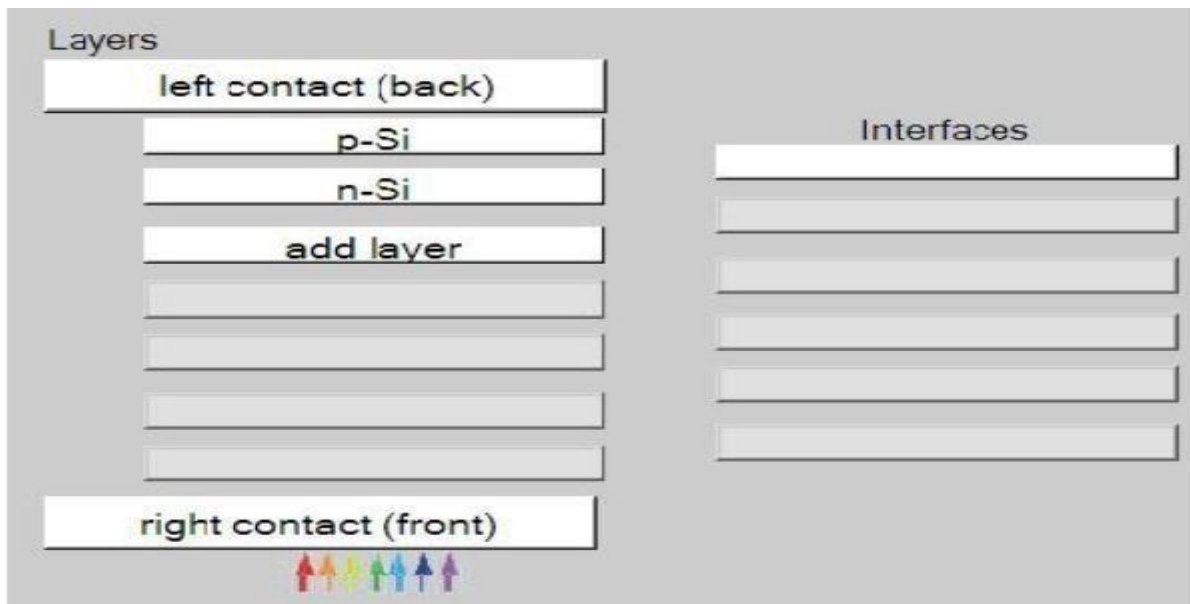


Fig. III. 6 : Définition de la structure d'une cellule solaire

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 la figure II.7.

The image shows two panels from the SCAPS software interface:

- 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
 - Filter Value:
 - Complement of Filter:
 - From Value: (light grey bar)
 - From File: (dark grey bar)
 - Select Filter File:

Fig. III. 7 : Panneau des propriétés des contacts.

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 II.8) 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, les vitesses 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 II.9, 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 II.10.

L'absorption peut être définie par le modèle analytique fourni par SCAPS, comme elle peut être introduite sous forme de données. SCAPS fournit 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.

SCAPS 3.2.01 Layer Properties Panel

LAYER 2	n-Si
thickness (μm)	0.100
	uniform pure A (y=0)
The layer is pure A: y = 0, uniform	0.000
Semiconductor Property P of the pure material	pure A (y = 0)
bandgap (eV)	1.120
electron affinity (eV)	4.050
dielectric permittivity (relative)	11.900
CB effective density of states ($1/\text{cm}^3$)	2.800E+19
VB effective density of states ($1/\text{cm}^3$)	1.000E+19
electron thermal velocity (cm/s)	1.000E+7
hole thermal velocity (cm/s)	1.000E+7
electron mobility (cm^2/Vs)	1.500E+3
hole mobility (cm^2/Vs)	4.500E+2
<input type="checkbox"/> Allow Tunneling	effective mass of electrons
	effective mass of holes
	1.000E+0
	1.000E+0

Fig. III. 8 : Propriétés de la couche ajoutée

no ND grading (uniform)	
shallow uniform donor density ND ($1/\text{cm}^3$)	1.000E+16
no NA grading (uniform)	
shallow uniform acceptor density NA ($1/\text{cm}^3$)	0.000E+0

Fig. III. 9 : Propriétés des dopages définis

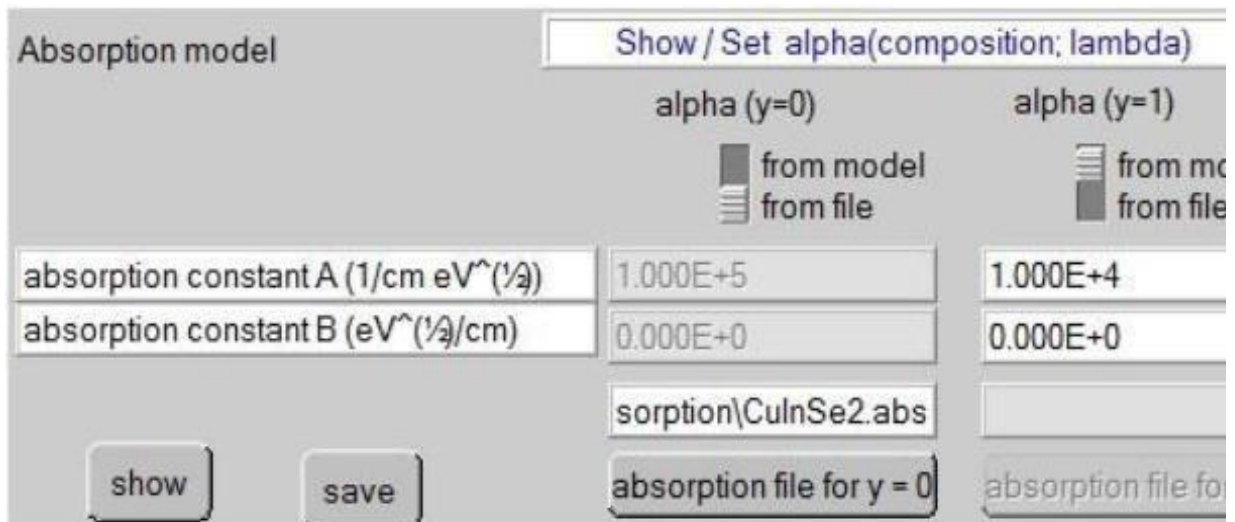


Fig. III. 10 : Modèle de l'absorption

Le type des recombinaisons en volume présent est indiqué dans le côté droite du panneau des propriétés de la couche (Figure II.11). Tous les types des recombinaisons sont présents ; directs ou à travers les pièges.

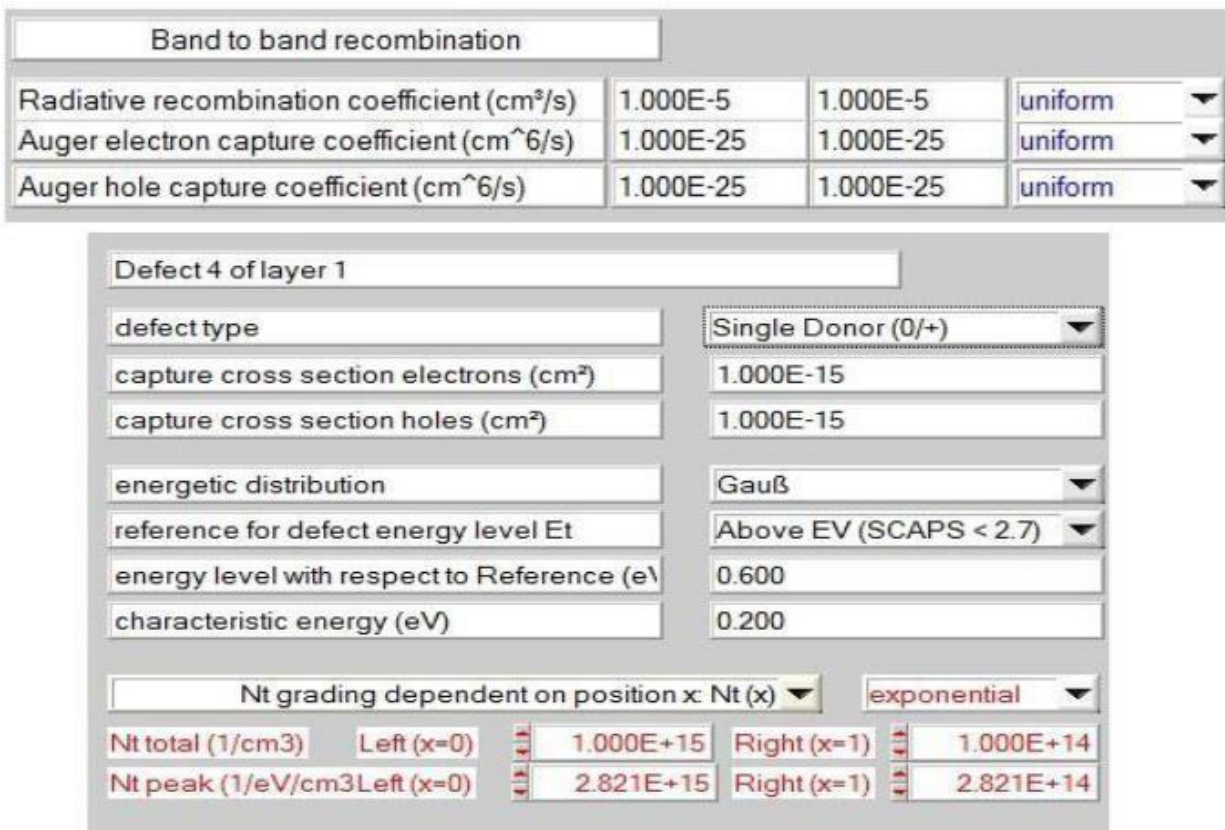


Fig. III. 11 : Définition des types de recombinaison présents

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

CHAPITRE IV

IV. 1. Introduction

Dans le but d'optimiser une conception spécifique d'une structure d'hétérojonction p-CdTe/n-CdS, nous devons étudier et analyser l'influence des paramètres physiques et technologiques sur les performances du dispositif.

Dans ce travail nous allons étudier l'effet de l'épaisseur de la couches CdTe et CdS sur la densité de courant de court circuit (J_{sc}), la tension de circuit ouvert (V_{co}), le facteur de remplissage (FF), et le rendement de conversion photovoltaïque (η). Nous avons étudié en même temps la réponse spectrale liée a cet effet.

IV.2. Structure de la cellule étudiée :

Les paramètres physiques du p-CdTe et n-CdS définis dans l'interface du logiciel SCAPS sont présentés dans Figure (IV.1) et Figure (IV.2) :

LAYER 1	p-CdTe
thickness (μm)	2.000
	uniform pure A (y=0)
The layer is pure A: y = 0, uniform	0.000
Semiconductor Property P of the pure material	pure A (y = 0)
bandgap (eV)	1.500
electron affinity (eV)	4.280
dielectric permittivity (relative)	9.400
CB effective density of states ($1/\text{cm}^3$)	7.500E+17
VB effective density of states ($1/\text{cm}^3$)	1.800E+18
electron thermal velocity (cm/s)	1.000E+7
hole thermal velocity (cm/s)	1.000E+7
electron mobility (cm^2/Vs)	5.000E+2
hole mobility (cm^2/Vs)	6.000E+1
<input type="checkbox"/> Allow Tunneling	
effective mass of electrons	1.000E+0
effective mass of holes	1.000E+0
no ND grading (uniform)	
shallow uniform donor density ND ($1/\text{cm}^3$)	0.000E+0
no NA grading (uniform)	
shallow uniform acceptor density NA ($1/\text{cm}^3$)	1.000E+17

Fig.IV.1 : Paramètres physiques du CdTe en type p introduits dans SCAPS.

LAYER 2	n CdS
thickness (μm)	0.020
	uniform pure A (y=0)
The layer is pure A: y = 0, uniform	0.000
Semiconductor Property P of the pure material	pure A (y = 0)
bandgap (eV)	2.400
electron affinity (eV)	4.000
dielectric permittivity (relative)	10.000
CB effective density of states ($1/\text{cm}^3$)	2.200E+18
VB effective density of states ($1/\text{cm}^3$)	1.800E+19
electron thermal velocity (cm/s)	1.000E+7
hole thermal velocity (cm/s)	1.000E+7
electron mobility (cm^2/Vs)	1.000E+2
hole mobility (cm^2/Vs)	2.500E+1
<input type="checkbox"/> Allow Tunneling	effective mass of electrons 1.000E+0 effective mass of holes 1.000E+0
no ND grading (uniform)	
shallow uniform donor density ND ($1/\text{cm}^3$)	1.100E+8
no NA grading (uniform)	
shallow uniform acceptor density NA ($1/\text{cm}^3$)	0.000E+0

Fig.IV.2 : Paramètres physiques du CdS en type n introduits dans SCAPS. IV.2.1. Cellule solaire p-n .

La figure (IV.3) montre un schéma de la cellule **p-CdTe/n-CdS**. La région n éclairée qui constitue l'émetteur est à gauche et la région p, plus épaisse, qui forme le collecteur est à droite.

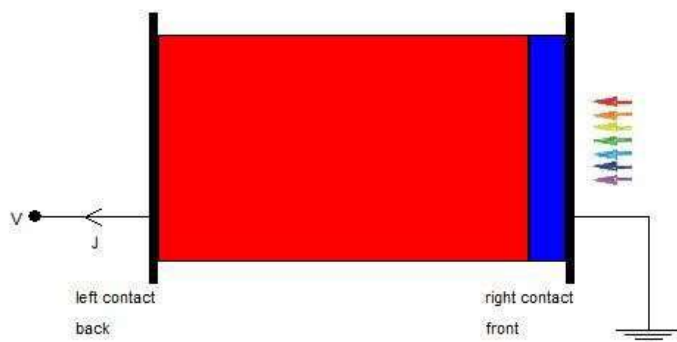


Fig. IV. 3: Schéma de la cellule solaire p-CdTe/n-CdS étudiée.

IV. 3. Résultats et discussions

IV. 3. 1. Effet de l'épaisseur de la couche CdTe (W_{CdTe})

La variation de l'épaisseur donné les valeurs de différents caractéristiques de la cellule solaire étudiée, elles sont représenté par le tableau IV.1 avec : $E_g = 1.5 \text{ eV}$; $W_{CdS} = 10 \text{ nm}$.

$W_{CdTe}(\mu\text{m})$	$V_{oc}(v)$	$J_{sc}(\text{mA}/\text{cm}^2)$	FF(%)	$\eta(\%)$
1	0.9183	35.991854	76.38	24.96
2	0.9376	36.515675	78.99	27.04
3	0.9475	36.898194	79.71	27.87
4	0.9541	37.097984	79.74	28.23

Tableau IV.1: Effet de l'épaisseur de la couche CdTe (W_{CdTe}) sur les paramètres de la cellule solaire.

On choisit ces valeurs pour tracer les caractéristiques de la cellule (figure IV.3).

La caractéristique J-V et la réponse spectrale obtenues sont présentées dans les figures IV. 4 et IV. 5, respectivement.

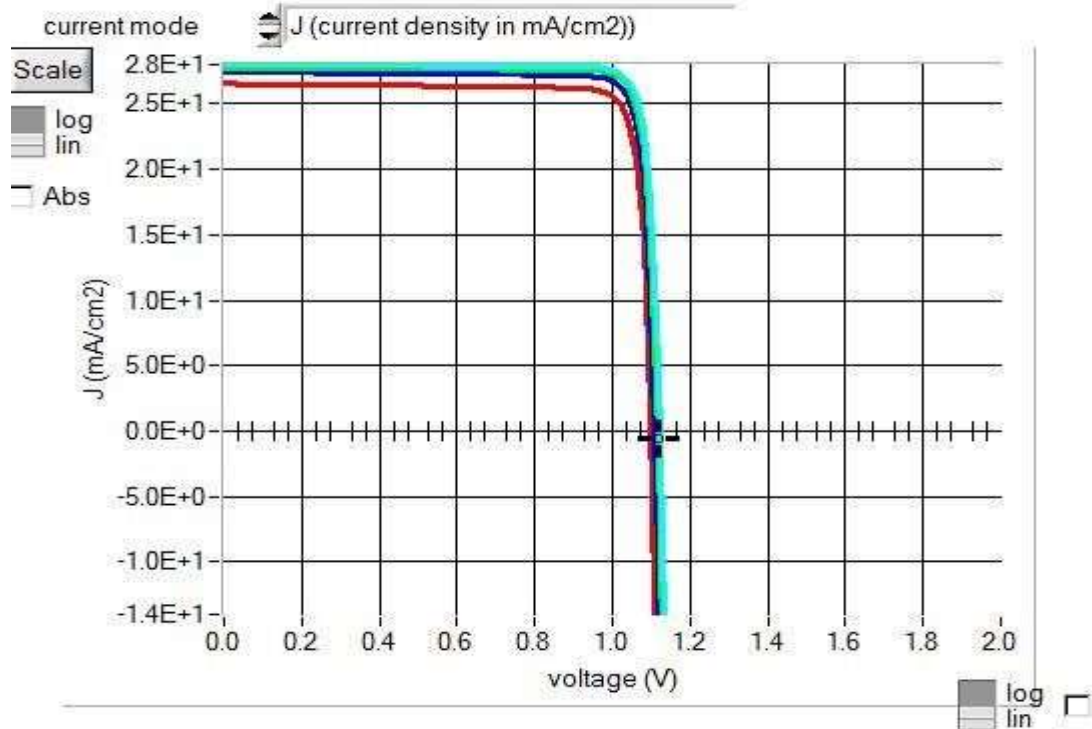


Figure IV.4 - Caractéristique J-V avec l'effet de l'épaisseur W_{CdTe}
 (le rouge pour $W_{CdTe} = 5 \mu\text{m}$)

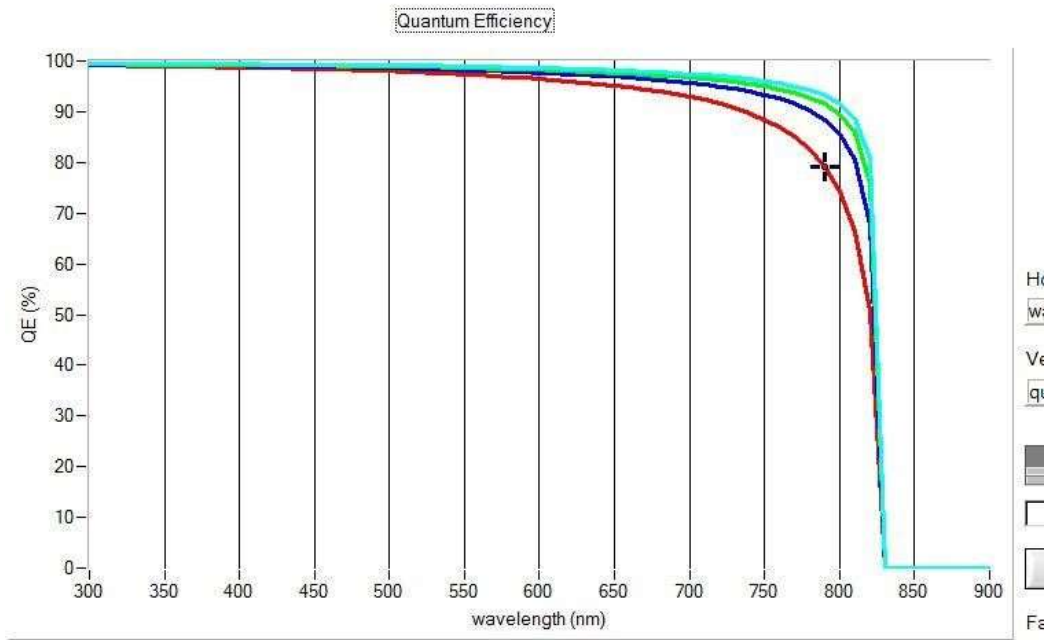
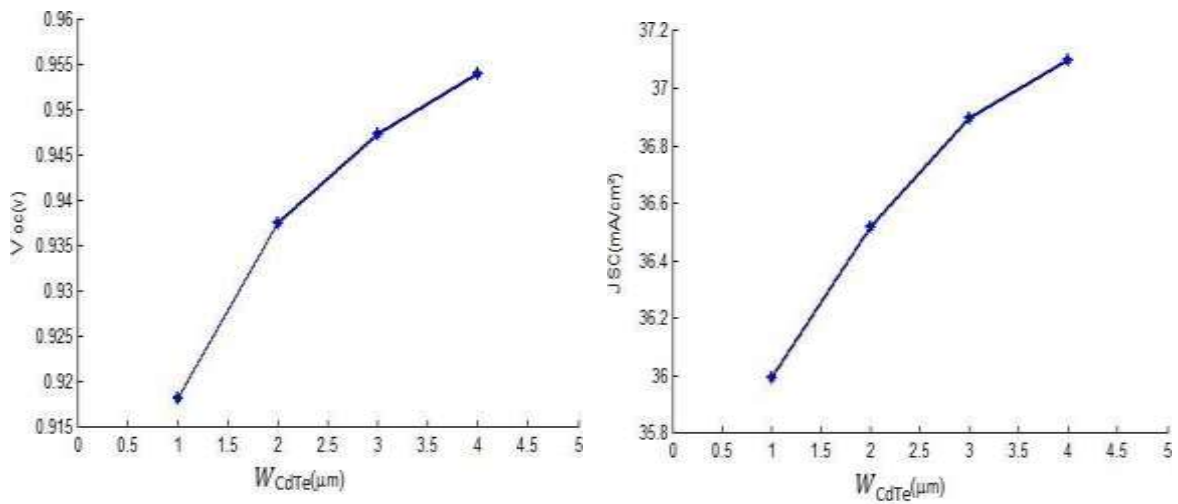
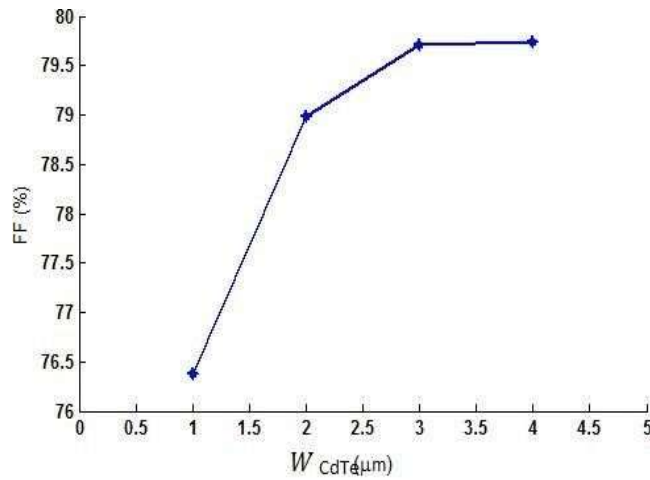


Figure IV.5- Réponse spectrale avec l'effet de l'épaisseur $WCdTe$

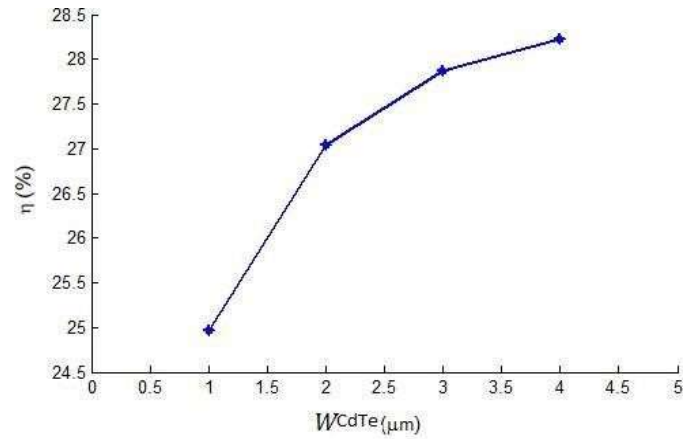


a)

b)



c)



d)

Fig. IV.6: effet de l'épaisseur du CdTe(WCdTe) sur : a) la tension de circuit ouvert V_{oc} a) le courant de court-circuit J_{sc} . c) le facteur de forme FF d) le rendement η

La figure IV.6. (d) montre qu'il y a une augmentation du rendement avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche CdTe. Nous avons pu obtenir un rendement maximal de 27.87% avec une épaisseur de 3 μm . Le changement de la valeur du rendement quand l'épaisseur dépasse 3 μm est très faible. Alors on va choisir 3 μm comme valeur optimale.

Pour la réponse spectrale, elle n'est sensible à la variation du collecteur (couche pCdTe) pour les longueurs d'onde courtes, elle est sensible pour des longueurs d'onde de l'ordre de 0.8 nm.

IV. 3. 2. Effet de l'épaisseur de la couche CdS (d_s)

L'épaisseur de la couche W_{CdS} varier de 10nm a 100nm, avec :

$W_{CdTe} = 3 \mu m$; $E_g = 1.5 eV$. Les résultats obtenus sont dans le tableau IV.2.

$W_{CdS} (\mu m)$	$V_{oc}(v)$	$J_{sc}(mA/cm^2)$	FF(%)	η (%)
0.01	0.9475	36.898194	79.71	27.87
0.02	0.9465	36.623725	80.51	27.91
0.03	0.9455	36.118268	81.27	27.75
0.04	0.9446	35.528309	82.12	27.56
0.05	0.9440	35.073078	82.63	27.36

0.06	0.9436	34.739462	82.77	27.13
0.07	0.9433	34.448045	82.80	26.91
0.08	0.9431	34.174371	82.79	26.68
0.09	0.9429	33.913674	82.78	26.47
0.1	0.9427	33.666354	82.76	26.26

Tableau IV.2: Effet de l'épaisseur de la couche CdS (W_C) sur les paramètres de la cellule solaire.

La caractéristique J-V et la réponse spectrale obtenues sont présentées dans les figures IV. 7 et IV. 8, respectivement.

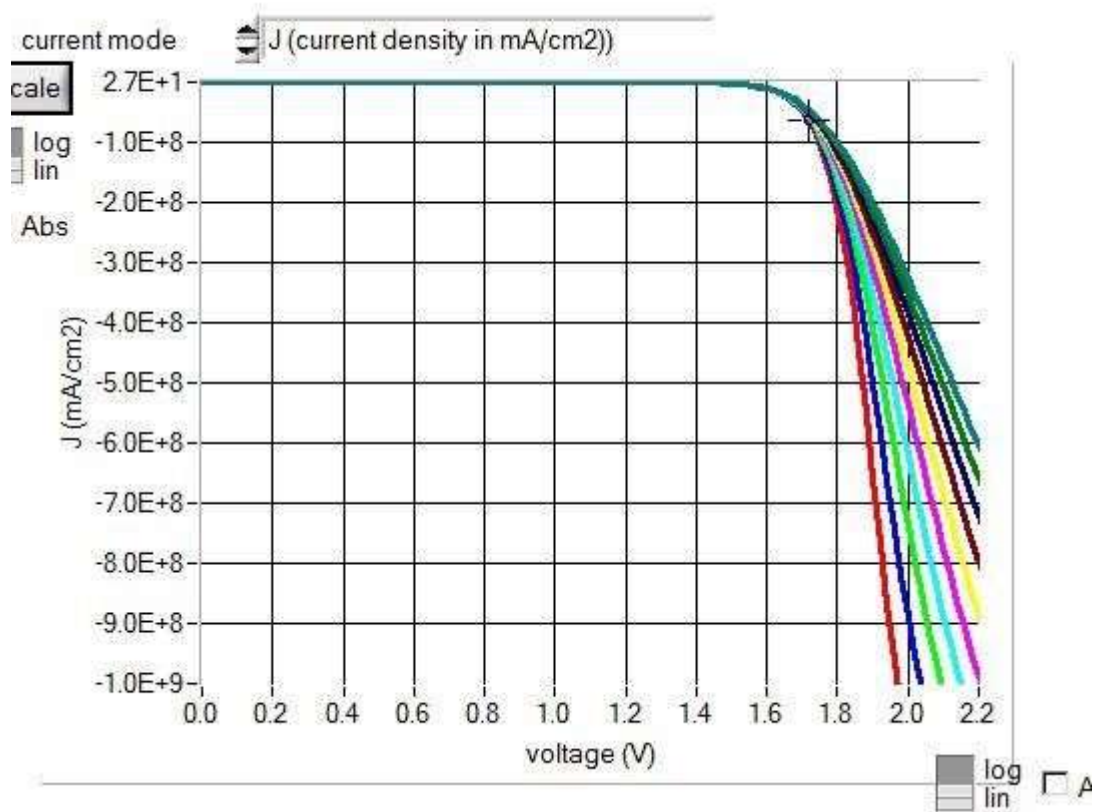


Figure IV.7- Caractéristique J-V avec l'effet de l'épaisseur W_{CdS}

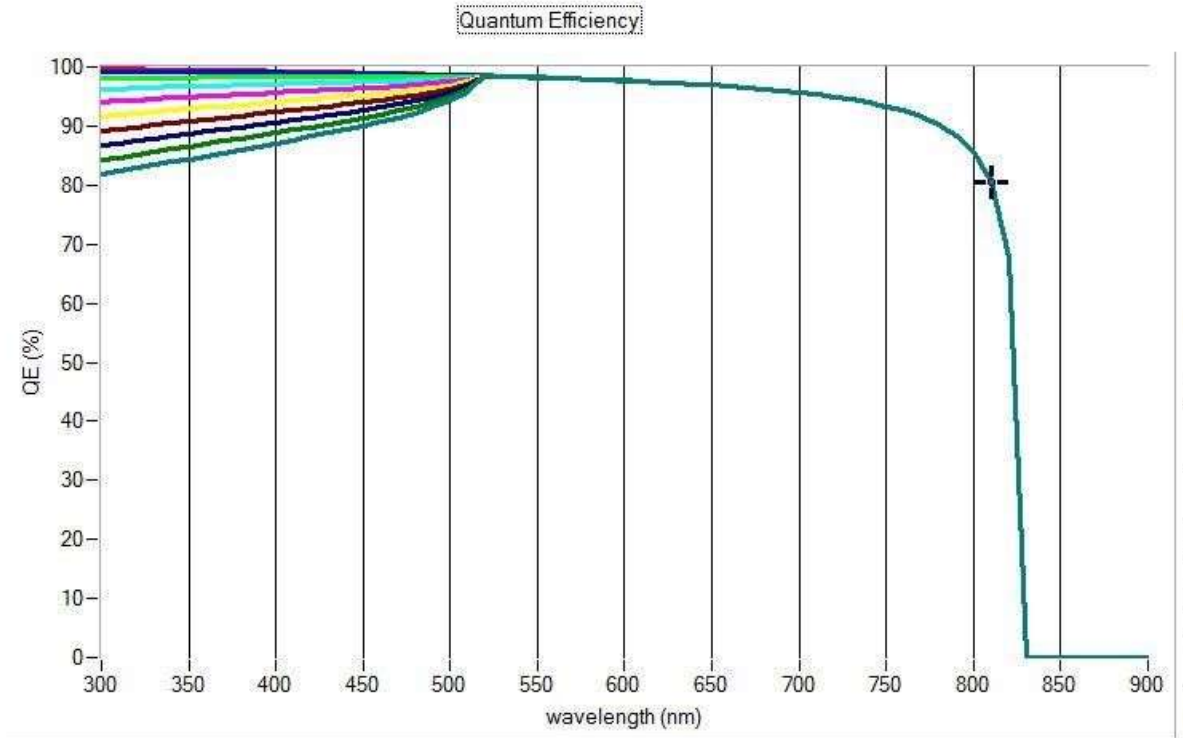
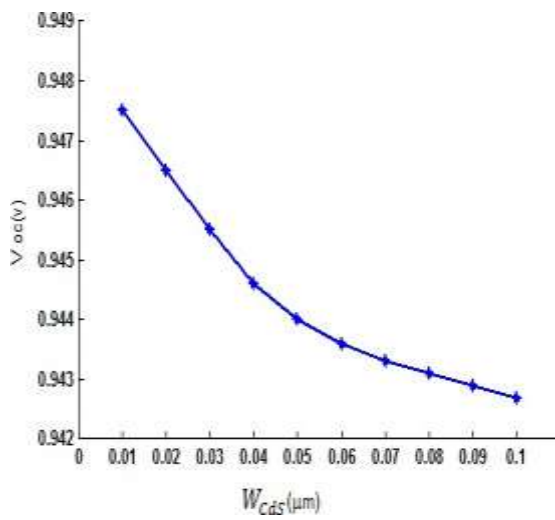
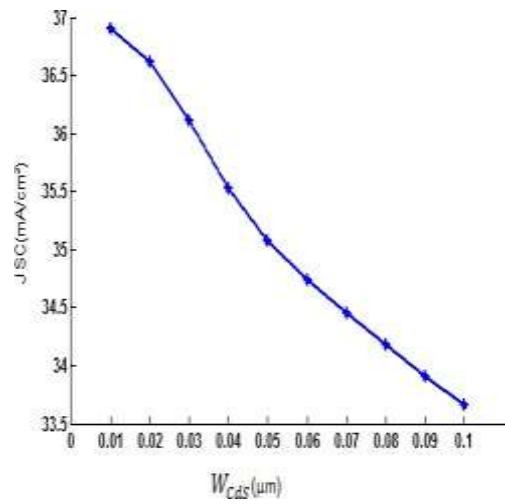


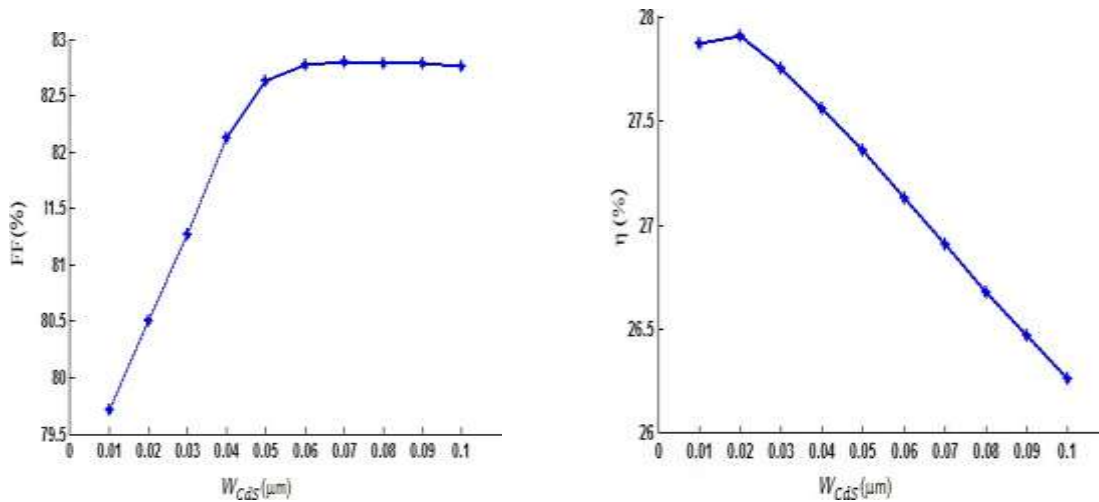
Figure IV.8- Réponse spectrale avec l'effet de l'épaisseur W_{CdS}



a)



b)



c)

d)

Fig. IV.9: Effet de l'épaisseur du CdS (W_{CdS}) sur :

a) la tension de circuit ouvert V_{oc} .

b) le courant de court-circuit J_{sc} .

c) le facteur de forme FF .

d) le rendement η

Nous remarquons sur la figure IV.9 que l'augmentation de l'épaisseur de la couche CdS diminue les différentes caractéristiques photovoltaïques de la cellule.

Puisque l'augmentation de l'épaisseur de la couche CdS permet d'augmenter nombre de photons absorbés dans cette couche avant d'être arrivé à la couche CdTe. Ce qui a comme effet de diminuer l'absorption dans l'absorbeur et par suite la densité de courant.

D'où, un rendement maximal de 27.87% obtenu pour la petite épaisseur de CdS de 10 nm. Donc, l'épaisseur optimale de la couche Cds est $W_{CdS} = 10$ nm.

Pour la réponse spectrale, une augmentation importante est remarquée pour les longueurs d'onde inférieures à 0.5 μm , puisque l'augmentation de l'épaisseur du collecteur favorise l'absorption et la photogénération des porteurs libres par la lumière.

Conclusion Générale

Dans ce travail, nous avons fait une simulation d'une cellule solaire à base de CdTe et CdS ayant une structure CdTe(p)/CdS(n) .

L'utilisation de l'outil de simulation SCAPS nous a permis à travers la mesure de la caractéristique (J-V) de la cellule d'obtenir les différentes caractéristiques à savoir : le courant de court-circuit J_{sc} , la tension de circuit ouvert V_{co} , le facteur de forme FF et le rendement de conversion η .

Cette simulation, nous permet d'étudier l'influence de la géométrie de la cellule en l'occurrence, les épaisseurs des deux couches CdS et CdTe et les propriétés du matériau à savoir le gap optique (réponse spectrale)

.

Les résultats obtenus ont montré que :

- ❖ L'augmentation de l'épaisseur de la couche tampon CdS ne fait que réduire les performances de la cellule.
- ❖ Cependant, les performances de la cellule augmentent avec l'augmentation de l'épaisseur de l'absorbeur CdTe.

Enfin, les paramètres optimaux qui donnent le meilleur rendement de la cellule sont les suivants :

$$W_{CdS_{opt}} = 10 \text{ nm}, W_{CdTe_{opt}} = 3 \text{ } \mu\text{m}$$

Comme perspective, on souhaite réaliser et caractériser cette cellule expérimentalement avec ces paramètres optimaux et faire une comparaison entre elles.

Bibliographies

- [1] J. L. Teyssier, H. Brunet, Introduction à la physique des matériaux conducteurs et semiconducteurs, ed. Dunod (1992)
- [2] S. Hariech; Thèse de doctorat «Elaboration et Caractérisations des Films Minces Chalcogénures à base de Cadmium et de Cuivre pour des Application Photovoltaïques» , Université Constantine 1(2013).
- [3] K. L. Narayanan, K. P. Vijayakumar, K. G. M. Nair, N. S. Thampi and K. Krishan ; J. Mater. Sci., 32 (1997) 4837.
- [4] I. N. Orgorodnikov, V. A. Pustovarov, V. S. Chermnykh; Optics and Spectroscopy (2001) 95 2 413.
- [5] Virginie Albe, thèse de doctorat, Université Montpellier II, Sciences et Techniques du Languedoc (1997).
- [6] A. Y. A. A. Jaber; Thèse de magister « A Comparative Study of Properties of CdS Thin Films Deposited by Thermal Evaporation and Chemical Bath Techniques», Université de Taïba, Arabie Saoudite (2011)
- [7] An-Najah National university faculty of graduate studies CdS thin film photo electrochemical electrodes, sahar mustafa Asad kurdruj 2011.
- [8] Thèse de magister harieche Barkahoum « étude des propriétés optiques des nanocristaux
- [9] J. Hiie, T. Dedova, V. Valdna, K. Muska, Thin Solid Films. 511-512 (2006) 443-447.
- [10] Li Wenyi, Cai Xun, Chen Qiulong, Zhou Zhibin, Materials Letters. 59 (2005)

- [11] Gary Hodes, Chemical Solution Deposition of Semiconductor Films, New York, 2002
- [12] J.N. Ximello-Quiebras, G. Contreras-Puente, J. Aguilar-Hernández, G. Santana-Rodriguez,
- [13] <http://www.stielec.ac-aix-marseille.fr/cours/abati/opto.htm>
- [14] <http://fr.wikipedia.org/utilisation/optoelectronique/CdS.htm>.
- [15] : M. R. Alrachidi, M. F. Elhajri, K. M. Elnaggar, A.K. Al-Othman, “A new estimation approach for determining the I–V characteristics of solar cells”, Solar Energy, Vol 85, 2011, p. 1543.
- [16] K. Zanio, Semiconductors and Semimetals, R. K. Willardson and C. Beer, Academic Press.
- [17] K. Zanio, Semiconductors and semimetals, Vol. 13: Cadmium Telluride, Academic Press, New York (1978).
- [18] D. J. Williams, in Properties of Narrow Gap Cadmium-based Compounds, EMIS Data reviews Series No. 10, edited by P. Capper INSPEC, London, 399 (1994).
- [19] J. C. Phillips, Bonds and Bands in Semiconductors, Academic Press, New York (1973).
- [20] T. H. Myers, S. W. Edwards and J. F. Schetzina, J. Appl. Phys. 52, 4231 (1981).
- [21] S. A. Semiletov, Sov. Phys. Crystallogr. 1, 236 (1956).
- [22] L. C. Allen., Phys. Rev. 98, 993 (1955).
- [23] J. C. Phillips, Phys. Rev. 112, 685 (1958).
- [24] R. A. Smith, Semiconductors, 2nd Ed., Cambridge University Press, London (1979).
- [25] R. Legros, Thèse de doctorat d'état, université de Paris VI (1980).
- [26] J. T. Benhlal, K. Strauch, R. Granger and R. Triboulet, Opt. Mater. 12, 143 (1999).
- [27] R. Pässler, Phys. Status Solidi B, 216, 975 (1999).
- [28] R. Pässler, J. Appl. Phys. 89, 6235 (2001).000
- [30] J. R. Chelikowsky and M. L. Cohen, Phys. Rev. B 14, 556 (1976).
- [31] K. Zanio, semiconductors and semimetals, R. K. Willardson and C. Beer, Academic Press New York (1978).
- [32] H. Hartmann, R. Mach and B. Sell, Current topics in materials science, Vol. 9,

E. Kaldisnorth Holland(1982).

[33] K. Zanio, semiconductors and semimetals, R. K. Willqrdson and C. Beer, AcademicPress New York(1978).

[34] F. A. Sellim, V. Swaminathan, F. A. Karoger, Physic. Stat. Sol., A29, 465,(1975).

[35] E. Y. Gutmananas, N. Travitsky, U. Plitt and P. Hassen, Scripta. Metall. 13, 293(1979).

[36] S. Adachi, Optical Constants of Crystalline and AmorphousSemiconductors:Numerical Data and Graphical Information, Kluwer AcademicPublishers, Boston(1999).

[37] A. N. Pikhtin and A. D. Yaskov, Sov. Phys. Semicond. 12, 622(1978).

Résumé :

Dans le contexte global de la diversification de l'utilisation des ressources naturelles, le recours aux énergies renouvelables et en particulier le solaire photovoltaïque se fait de plus en plus fort. A ce titre, le développement d'une nouvelle génération de cellules photovoltaïques à base de CdTe/CdS semble prometteur. Dans ce travail de modélisation et de simulation, nous utilisons le logiciel SCAPS, pour étudier les performances des cellules solaires à base de CdTe/CdS. Nous évaluons dans un premier temps, le courant de court circuit J_{cc} , la tension en circuit ouvert V_{co} , le facteur de forme FF et le rendement électrique η pour une structure typique de CdTe/CdS. Par la suite nous nous intéressons au gap et à l'épaisseur de la couche CdTe et l'épaisseur de CdS pour étudier l'influence de celles-ci sur les paramètres de sortie, surtout le rendement électrique de la structure.

Mots Clés: Cellule solaire, photovoltaïque simulation, SCAPS.

Abstract:

In the global context of the diversification of the use of the natural resources, the recourse to renewable energies and in particular the solar photovoltaic one is done more and more loud. For this reason, the development of a new generation of photovoltaic cells based on CdTe/CdS seems promising. In this work of modeling and simulation, we use the software SCAPS, to study the performances of the solar cells based on CdTe/CdS. We evaluate initially, the current of short-circuit I_{SC} , the tension in open circuit V_{OC} , the factor of form FF and the electrical efficiency η for a typical structure of CdTe/CdS. Thereafter we are interested by the gap and the thickness of the layer CdTe/CdS and thickness of the CdS to investigate the influence of these on the output parameters, especially the electrical efficiency of the structure.

Keys Words: Solar cells, photovoltaic, simulation, SCAPS.

ملخص

في السياق العام الاستخدام المتنوع للموارد الطبيعية والرجوع الي الطاقة المتجددة وبشكل خاص الطاقة الشمسية الكهروضوئية اصبح اقوي ولهذا فان تطوير جيل جديد من الخلايا الضوئية القائمة علي اساس CdTe/CdS تبدو واعدة في هدة النمذجة و المحاكاة نستخدم برنامج scaps لدراسة اداة الخلايا الشمسية القائمة علي اساس CdTe/CdS. نقيم في البداية تيار الدارة القصيرة و توتر الدارة المفتوحة و عامل الشكل و المردود الكهربائي للهيكل النمذجي CdTe/CdS نهتم كذلك بسمك الطبقة CdTe و سمك الطبقة لدراسة تأثيرها علي خصائص لبحلية لضوئية وخاصة المردود CdS

كلمات مفتاحية . الخلايا الشمسية الكهروضوئية المحاكاة scaps