



**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ «Abbès LAGHROUR» DE KHENCHELA
FACULTÉ DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE**



Département des Sciences de la Matière

N° de série :.....

Mémoire de fin d'études

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

Filière : Physique

Spécialité : Physique des Matériaux

Intitulé :

**Etude et stimulation d'une cellule
photovoltaïque a base du CdTe avec
SCAPS**

Réalisé par : -CHORFI Neama
- DEROUICHE Mofida

Dirigé par :M. BOUROUCHA Azzeddine

Membres de jury :
-HAMMAM Zobir *Président*
- BOUDJEMA Khireddine *Examineur*

Présenté le 06/07/2017

Remerciements

Nous remercions ALLAH le tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté, la santé et la patience de mener à terme ce présent travail

*Nous exprimons toute nos profonde gratitude, nos profonde reconnaissance et nos sincères remerciements à **monsieur BOUROUCHA Azzeddine** pour nous avoir encadrés tout le long de notre travail, qui par ses conseils a été un guide précieux dans l'élaboration de ce mémoire.*

Nous remercions chaleureusement les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'évaluer notre travail.

Dédicaces

Je dédie ce travail en signe de respect et de

reconnaissance:

A mes parents.

A toute ma famille sans exception.

A tous mes amis (es).

A ceux qui ont m'aidé de loin ou de près

durant ma carrière.

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre I : généralité sur CdTe	4
I.1. Introduction	5
I.2. Le matériau tellure de cadmium CdTe	5
I.3. Les propriétés fondamentales du CdTe	5
I.3.1. Structure cristalline	5
I.3.1.a. structures sphalérite	6
I.3.1.b. Structure hexagonale de type würtzite	7
I.3.2. Structure des bandes d'énergie	8
I.3.2.1. masses effective	9
I.4. les défauts cristallographiques	10
I.4.1. Les défauts ponctuel	10
I.4.1.a. les lacunes	10
I.4.1.b. Les interstitiels	11
I.4.2. Les atomes d'impuretés	12
I.4.3. les défauts linéaires (dislocations)	14
I.4.4. Les défauts plans	15
I.4.4.a. Les joints de grains	15
I.4.4.b. Les surfaces et les interfaces cristallines	16
I.5. Visualisation des défauts	16
I.6. propriétés électriques	18
I.7. propriétés optiques	19
I.8. propriétés thermiques	20
I.9. Diagramme de phase	20
I.9.1. Diagramme de phase composition-température	20
I.10. Conclusion	21
Chapitre II : étude d'une cellule photovoltaïque	22
II.1. Introduction	23
II.2. Rayonnement solaire	23
II.3. Normalisation	24
II.4. Historique du photovoltaïque	26
II.5. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	28
II.6. Notions de base sur les cellules solaires	28

II.6.1. Concepts importants sur les semi-conducteurs	28
II.6.2. La conversion photovoltaïque	30
II.7. Paramètres caractéristiques d'une cellule photovoltaïque	31
II.7.1. Caractéristique idéale et schéma équivalent.....	31
II.7.2. La jonction PN	33
II.7.3. Le générateur PV et ses performances	34
II.7.4. caractéristique courant / tension	34
II.7.4.1. Courant de court-circuit (I_{cc})	36
II.7.4.2. Tension à circuit ouvert (V_{co})	36
II.7.5. La puissance maximale P_{max}	37
II.7.6. Le facteur de forme FF	37
II.7.7. Le rendement de conversion η	37
II.7.8. Le rendement quantique, EQE.....	38
II.7.9. La résistance série	38
II.7.10. La résistance shunt	38
II.8. Les Différents Types de Cellules Photovoltaïques	39
II.9. Conclusion	40
Chapitre III : Logiciel SCAPS	41
III.I. Introduction	42
III.2 Notions de base	43
III.2.1. Lancer SCAPS	45
III.2.2 Définir le problème	45
III.2.3. Définir le point de fonctionnement	45
III.2.4. Sélection des caractéristiques à simuler	47
III.2.5. Lancer le calcul	47
III.2.6. Afficher les courbes simulées	47
III.2.7. Les courbes I-V	48
III.3. Définition d'une cellule solaire	49
III.3.1. Edition de la structure d'une cellule solaire	49
III.3.2. Contacts	50
III.3.3. Définition des couches	51
Chapitre VI : Résultats et Discussion.....	55
IV.1. Introduction	56
IV.2. Résultats et Discussion	56
IV.2.1. Structure de la cellule étudiée	57

IV.3. Les résultats de la simulation	58
IV.3.1. Caractéristique I-V	58
IV.3.2. Influence de l'éclairement et de la température	58
IV.3.2.1. Influence de la température	59
IV.3.2.2. Influence de l'éclairement	63
IV.3.3. Influence de la résistance série et la conductance shunt.....	66
IV.3.3.1. Influence de la résistance série	66
IV. 3.3.2. Influence de la résistance shunt	70
IV.4. conclusion	74
Conclusion générale	75

Tableau des figures

Tableau des figures

Figure (I. 1)	a) structures sphalérite b) structure würtzite de <i>CdTe</i> observées dans les directions normales à [011] et [110]	(6)
Figure (I. 2)	Structure de la blende de zinc de CdTe	(6)
Figure (I. 3)	Structure de bande électronique de <i>CdTe</i> déterminée par la méthode du pseudo-potential empirique incluant le couplage	(8)
Figure (I. 4)	Représentation simple de la structure de bande du CdTe au voisinage du centre Γ de la zone de Brillouin (Les valeurs du gap E_g , du couplage spin-orbite Δ_{SO} et des masses effectives m^* sont indiquées)	(9)
Figure (I. 5)	Sites interstitiels dans <i>CdTe</i> avec les deux types possibles	(12)
Figure (I. 6)	Energies de quelques défauts ponctuels dans la bande interdite de <i>CdTe</i> à température ambiante	(13)
Figure (I. 7)	dislocation coin	(15)
Figure (I. 8)	dislocation vis	(15)
Figure (I. 9)	Les différents défauts pouvant exister dans <i>CdTe</i> obtenus à partir des Images de cathodoluminescence.	(17)
Figure (I.10)	Corrélation entre image de cathodoluminescence (a) et image d'etch-pits (b) pour C6 (<i>CdZnTe</i>)	(17)
Figure (I.11)	diagramme de phase composition-température de <i>CdTe</i>	(21)
Figure (I.12)	Diagramme de phase pression-température de <i>CdTe</i>	(21)
Figure (II. 1)	Spectre électromagnétique	(23)
Figure (II. 2)	Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par Le soleil, notion de la convention AM	(25)
Figure (II. 3)	Spectres Solaires relèves dans plusieurs conditions selon la Convention AM. Source NREL solarspectrum	(25)
Figure (II. 4)	Le photovoltaïque dans le monde.	(27)
Figure (II. 5)	production de PV mondiale	(27)
Figure (II. 6)	Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque	(32)
Figure (II. 7)	Jonction P-N en polarisation directe	(33)
Figure (II. 8)	Jonction P-N en polarisation inverse.	(33)
Figure (II. 9)	caractéristique d'une jonction PN sous éclairement	(34)
Figure(II.10)	La caractéristique d'une cellule photovoltaïque non éclairée est celle en présence d'un éclairement.	(35)
Figure(II.11)	les différentes zones de caractéristique $I=f(V)$ d'une cellule photovoltaïque	(35)
Figure(II.12)	Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque en court-circuit	(36)
Figure(II.13)	Schéma électrique d'une cellule Photovoltaïque en circuit ouvert	(37)
Figure(II.14)	détermination graphique de résistance shunt Et série	(39)

Tableau des figures

Figure(II.15)	Les différentes technologies des cellules photovoltaïques	(39)
Figure(III.1)	Panneau de démarrage de SCAPS, le panneau d'action ou principal.	(44)
Figure(III.2)	Définir le problème	(45)
Figure(III.3)	Le point de fonctionnement	(46)
Figure(III.4)	Panneau des bandes d'énergie	(47)
Figure(III.5)	Panneau d'affichage des courbes I-V à l'obscurité et en éclairage	(48)
Figure(III.6)	Définition de la structure d'une cellule solaire	(49)
Figure (III.7)	Panneau des propriétés des contacts	(50)
Figure (III.8)	Propriétés de la couche ajoutée	(52)
Figure (III.9)	Propriétés des dopages définis	(52)
Figure(III.10)	Modèle de l'absorption	(53)
Figure(III.11)	Définition des types de recombinaison présents	(53)
Figure (IV.1)	Paramètres physiques du CdTe en type p introduits dans SCAPS.	(56)
Figure (IV.2)	Paramètres physiques du CdTe en type n introduits dans SCAPS. IV.2.1. Cellule solaire p-n.	(57)
Figure (IV.3)	Schéma de la cellule solaire p-n étudiée	(57)
Figure (IV.4)	(a) Caractéristique courant-tension de la cellule solaire sous éclairage et dans l'obscurité à T=300k.	(58)
Figure (IV.5)	Influence de la température sur la caractéristique I-V d'une cellule solaire en obscurité G=0(W/m ²).	(59)
Figure (IV.6)	Influence de la température sur la caractéristique I-V d'une cellule solaire sous éclairage, G=1000(W/m ²)	(59)
Figure (IV.7)	Variation de la tension de circuit ouvert (V_{co}) avec la température (k) à G=1000(W/m ²).	(61)
Figure (IV.8)	Variation du Facteur de forme FF avec la température (k) à G=1000(W/m ²).	(61)

Tableau des figures

Figure (IV.9)	Variation de la densité de courant de court-circuit J_{sc} avec la température (k) à $G=1000(W/m^2)$	(62)
Figure(IV.10)	Variation du rendement de conversion photovoltaïque (η) avec la température (k) à $G=1000(W/m^2)$.	(62)
Figure(IV.11)	Influence de l'éclairement sur la caractéristique I-V d'une cellule solaire à $T=300k$	(63)
Figure(IV.12)	Variation de la tension de circuit ouvert (VCO) avec l'éclairement $T=300K$	(64)
Figure(IV.13)	Variation de la densité de courant de court-circuit J_{sc} avec l'éclairement à $T=300k$.	(65)
Figure(IV.14)	Variation du Facteur de forme FF avec l'éclairement à $T=300k$	(65)
Figure(IV.15)	Variation du rendement de conversion photovoltaïque (η) Avec l'éclairement à $T=300k$	(66)
Figure(IV.16)	Influence de la résistance série sur la caractéristique I-V d'une cellule solaire à $T=300 k, G=1000w/m^2$	(67)
Figure(IV.17)	Variation de la tension de circuit ouvert (VCO) avec la résistance série	(68)
Figure(IV.18)	Variation de la densité de courant de court-circuit J_{sc} avec la résistance série	(68)
Figure(IV.19)	Variation du Facteur de forme FF avec la résistance série	(69)
Figure(IV.20)	Variation du rendement de conversion photovoltaïque (η) avec la résistance série	(69)
Figure(IV.21)	Effet de la résistance shunt là sur la caractéristique I(V).	(70)
Figure(IV.22)	Variation de la tension de circuit, ouvert (VCO) avec la résistance shunt	(71)
Figure(IV.23)	Variation de la densité de courant de court-circuit J_{sc} avec la résistance shunt	(72)
Figure(IV.24)	Variation du Facteur de forme FF avec la résistance shunt	(72)
Figure(IV.25)	Variation du rendement de conversion photovoltaïque (η) avec La résistance shunt	(73)

Liste des tableaux

Liste des tableaux :

Tableau:(I. 1)	Exemple de nanotube de différentes structures : (a) Nanotube chiral (10, 5), (b) nanotube armchair (5, 5) et (c) un nanotube zigzag (9, 0) (simulé avec [16]).	(09)
Tableau (I.2)	Comparaison de la conductivité thermique des NTC avec celle de d'autres matériaux [32]	(16)
Tableaux (III.1)	Les paramètres utilisés dans l'étude	(44)



Introduction Générale

Introduction générale

Il semble clair que la consommation d'énergie dans le monde à l'heure actuelle va croître en raison de la croissance de la population mondiale et l'explosion du développement industriel. Actuellement, la production d'énergie est principalement basée sur les combustibles fossiles (pétrole, charbon et gaz naturel) qui ne sont pas renouvelables, et qui sont des ressources de disponibilité limitée. Ainsi, il peut être la cause de nombreux problèmes environnementaux tels que la pollution par production de gaz à effet de serre.

Il est donc important de développer de nouvelles sources d'énergie alternatives qui peuvent répondre à la demande croissante, et d'assurer le développement durable et la préservation de l'environnement. L'énergie solaire est l'une des candidats les plus promoteurs en tant que source d'énergie d'avenir. Cette énergie est une source inépuisable et propre. Elle est de plus en plus considérée comme source énergétique qui peut couvrir les besoins mondiaux en électricité. En effet, le rayonnement solaire peut être converti en électricité grâce à des dispositifs appelés cellules solaires photovoltaïques. Les cellules solaires photovoltaïques (PV) présentent beaucoup d'avantages. Elles sont élégantes, non polluants, silencieux et sans pièces rotatives.

L'énergie photovoltaïque, reposant sur la transformation directe des rayons lumineux 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 crises pétrolières, 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.

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..

Nous avons utilisé le logiciel de simulation SCAPS pour simuler les caractéristiques courantes tensions (J-V) dans les conditions standards d'une cellule solaire (p/n).

Introduction générale

Outre l'introduction et la conclusion générales, ce mémoire comprend quatre chapitres :

- Le premier chapitre est consacré à l'étude des propriétés physiques du Tellure de Cadmium, où on rappelle sa structure de bande et ses défauts.
- Dans le deuxième chapitre concerne une étude générale sur l'énergie photovoltaïque .Il comprend le fonctionnement de la cellule photovoltaïque, ses caractéristiques principales et les différentes cellules solaires à base du Tellure de Cadmium
- 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 CdTe.
- Dans Le quatrième et dernier chapitre le nous présenterons les résultats obtenus par la simulation numérique.



Chapitre I
Généralité sur CdTe

I.1. Introduction

Dans ce chapitre nous allons décrire brièvement les semi-conducteurs composés II-VI en mettant l'accent particulièrement sur le matériau CdTe : tellure de cadmium monocristallin, qui est au centre de ce travail. Nous présenterons l'ensemble de ses principales propriétés physiques qui seront utilisées au cours de notre étude. Enfin nous donnerons un résumé de ses principales applications technologiques.

I.2. Le matériau tellure de cadmium CdTe

Le tellure 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.3. Les propriétés fondamentales du CdTe

I.3.1. Structure cristalline

CdTe est un composé cristallin constitué de cadmium et de tellure. L'atome de cadmium étant de type II : cation possédant deux électrons de valence sur une orbitale s : $[\text{Cd}] = [\text{Kr}] 4d 10 5s 2$. L'atome de tellure étant de type VI : anion possédant six électrons de valence sur des orbitales s et p : $[\text{Te}] = [\text{Kr}] 4d 10 5s 2 5p 4$.

Le semi-conducteur *CdTe* peut cristalliser dans deux structures différentes : la structure cubique «sphalérite» (fig. I.1.a) et la structure hexagonale «Wurtzite» (fig. I.1.b). La structure cubique est la plus stable dans les conditions normales de température et de pression [2].

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 [2].

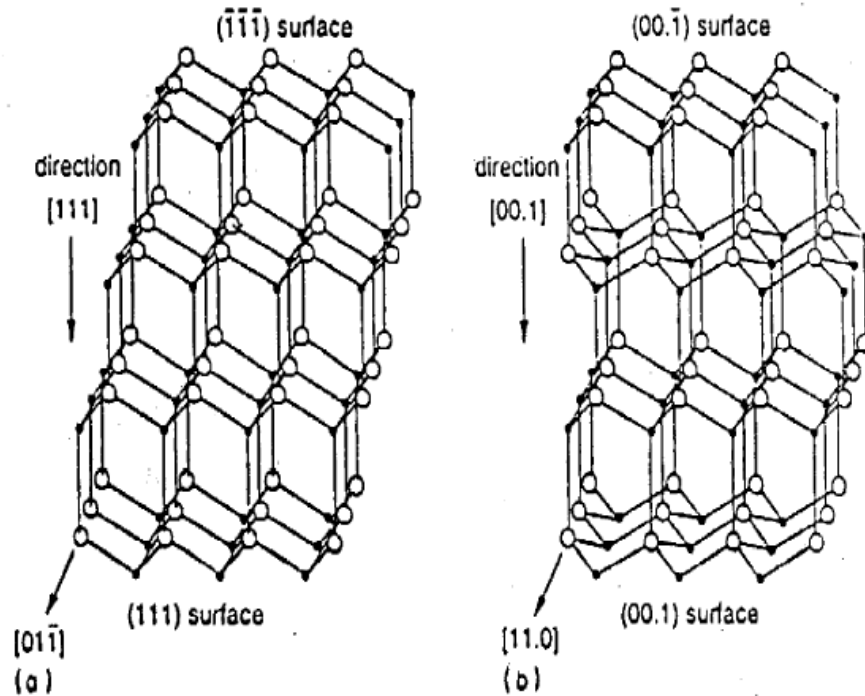


Fig.I.1. a) structures sphalérite b) structure wurtzite de *CdTe* observées dans les directions normales à $[011]$ et $[110]$

I.3.1.a structures sphalérite

La structure sphalérite (du type blende de zinc), la plus répandue, est la plus stable à la pression atmosphérique normale [3], 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 (Figure I.2) :

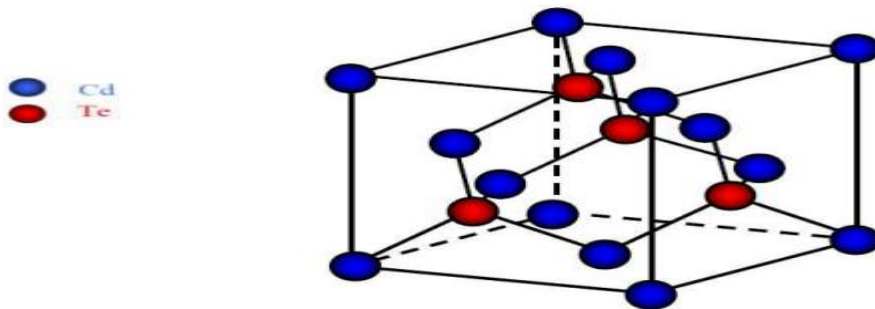
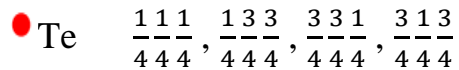


Fig.I.2 : Structure de la blende de zinc de *CdTe*.

● Cd $000, 0\frac{11}{22}, \frac{11}{22}0, \frac{1}{2}0\frac{1}{2}$



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 6.481Å à la température ambiante [4]).

Chaque atome de Te (respectivement Cd) disposé au centre d'un tétraèdre, a pour premiers voisins à 2.81Å 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) [3].

- 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 [5].

I.3.1.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 [6].

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 [7]

$$a = 4.56 \text{ Å}$$

$$c = 7.46 \text{ Å}$$

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

I.3.2. 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 [8], la méthode du pseudo-potentiel [9] et la méthode k.p [10]. La figure I.3 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.3). 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 [11] : $E_g = 1.6063 - 1.64 \times 10^{-6} T^2$
- soit par la formule empirique [12] : $dE_g/dT = -3.0, -3.5$ 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, $E_g = 1.606 \text{ eV}$ [13,14]. à 300 K, $E_g = 1.520 \text{ eV}$ [15]

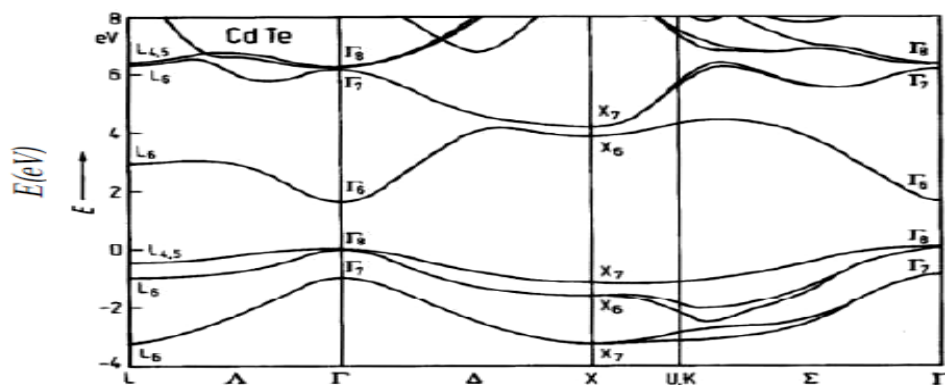


Fig.I.3 : Structure de bande électronique de CdTe déterminée par la méthode du pseudo-potentiel empirique incluant le couplage spin-orbite [16].

I.3.2.1. masses effective

On introduit la notion de masse effective m^* , afin de tenir compte de la courbure de bande que voit chaque porteur de charge. Dans l'approximation du potentiel parabolique, chaque bande i possède, au voisinage de $k=0$, une énergie :

$$E(k) = \frac{\hbar^2 k^2}{2m_i^*} \quad (\text{I.1})$$

où \hbar représente la constante de Planck réduite. On définit m^* par rapport à la masse de l'électron au repos m_0 . Par exemple, les électrons dans la bande de conduction de CdTe ont une masse effective : $m_e^* = 0,0909 m_0$ [17].

Le tableau I.1 regroupe les différentes valeurs des masses effectives des trous qui ont été déterminé par la méthode de résonance cyclotronique [18] selon les directions cristallographiques : [100], [110] et [111].

Directions	$\frac{m_{lh}^*}{m_0}$	$\frac{m_{hh}^*}{m_0}$	Références
[100]	0.12 ± 0.01	0.6 ± 0.01	[18]
[110]	0.12 ± 0.02	0.81 ± 0.05	[19]
[111]	0.11 ± 0.01	0.69 ± 0.02	[18]

Tab.I.1 : Masses effectives des trous dans CdTe. Trous légers (lh, pour light-holes) et trous lourds (hh, pour heavy-holes).

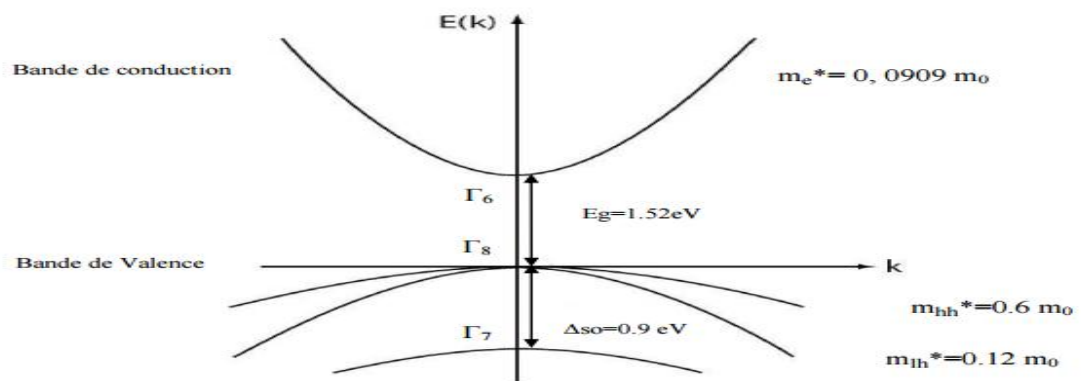


Fig.I.4 : Représentation simple de la structure de bande du CdTe au voisinage du centre Γ de la zone de Brillouin (Les valeurs du gap E_g , du couplage spin-orbite ΔSO et des masses effectives m^* sont indiquées)

Grandeur	Valeur
E_g	1.606 eV
ϵ_∞	7.4
ϵ_0	10.6
Δ_{so}	0.90 eV
$m_{hh,z}$	0.4
m_e	0.096

Tab. I.2 Valeurs de quelques paramètres physiques de *CdTe* [20]

I.4. les défauts cristallographiques

Il est généralement connu qu'un réseau cristallin parfait n'est possible que Mathématiquement, et en fait, il n'existe pas dans les cristaux réels. Les défauts ou les imperfections sont trouvés dans tous les solides cristallins. La présence des défauts a généralement un effet profond sur les propriétés physiques d'un cristal [21]. Par conséquent, il est important de discuter les différents types de défauts qui sont observés dans un solide cristallin, ce qui est particulièrement vrai pour CdTe

I.4.1. Les défauts ponctuels

I.4.1.a. les lacunes

Ce sont des nœuds du réseau où manquent des atomes. Les lacunes se forment surtout à la surface des cristaux, grâce aux déplacements successifs des atomes diffusant à l'intérieur du cristal. Dans les cristaux ioniques, on distingue généralement les lacunes cationiques chargées positivement et les lacunes anioniques chargées négativement.

Dans le cas où la concentration des lacunes serait notablement plus grande que la concentration à l'équilibre (le cristal est alors sursaturé en lacunes) l'excès de lacunes peut coalescer et donner naissance à des pores dans le cristal.

La création de lacunes dans les cristaux covalents, comme *Ge* et *Si* fait apparaître des liaisons covalentes non saturées, qui cherchent à s'accaparer des électrons provenant soit de la bande de valence du cristal, soit des atomes d'impuretés. De ce fait les lacunes dans ces cristaux se comportent comme des accepteurs [22].

Dans les semi-conducteurs ioniques, les composés *II-VI* (à titre d'exemple), la création d'une lacune cationique fait apparaître auprès des ions négatifs avoisinants un

excès de charge positive, d'où la tendance à capter les électrons de la bande de valence et d'autres niveaux occupés, ces lacunes se comportent donc comme des accepteurs.

La création d'une lacune anionique fait apparaître auprès des ions avoisinants un excès de charge négative, ce qui fera passer les électrons dans la bande de conduction ou sur des niveaux vides ; les lacunes anioniques sont donc des centres donneurs. On doit noter que certaines lacunes peuvent être ionisées plusieurs fois [23].

La concentration des lacunes n_1 à l'équilibre est donnée par [21] :

$$n_1 \approx N \exp\left(-\frac{E}{K_B T}\right) \text{ Pour } N \gg n_1 \quad (\text{I.2})$$

Où E_1 : est l'énergie nécessaire pour porter un atome d'un site à l'intérieur du réseau à un site à la surface du cristal. N : nombre d'atomes dans le réseau.

K_B : est la constante de Boltzmann et T : la température en Kelvin.

I.4.1.b. Les interstitiels

Il s'agit des atomes formant normalement le réseau du cristal, qui ont quitté leurs sites réguliers pour occuper des sites interstitiels. Vu que l'énergie d'insertion est grande vis-à-vis de l'énergie de formation des lacunes, la probabilité d'insertion des atomes propres du réseau dans les sites interstitiels est notablement plus petite que la probabilité de formation de lacunes.

On peut rencontrer deux types de sites interstitiels, les sites tétraédriques et les sites octaédriques, ce que l'on peut voir sur le (tab I.3) et la fig I.9.

Tétraédrique			Octaédrique		
Nbr	atome	Dist	Nbr	atome	Dist
4	Te	2.8065	4	Cd	2.8065
6	Cd	3.2406	6	Te	3.2406
12	Te	5.3739	12	Cd	5.3739
8	Cd	5.6129	8	Te	5.6129
12	Te	7.0627	12	Cd	7.0627
24	Cd	7.2462	24	Te	7.2462

Tab.I.3 : Sites interstitiels dans *CdTe* et position des voisins



Fig.I.5 : Sites interstitiels dans CdTe avec les deux types possibles

La combinaison d'une lacune et d'un interstitiel (auto-interstitiel), qui se forme lorsqu'un atome passe d'un site régulier dans un site interstitiel est désignée sous le nom de défauts de Frenkel. L'énergie de formation des défauts de Frenkel est approximativement égale à la somme des énergies de formation des lacunes et des interstitiels.

La concentration minimum de défauts ponctuels pouvant exister dans le cristal CdTe, est obtenue à une température T voisine du zéro absolu. A mesure que la température s'élève, l'amplitude des vibrations thermiques des atomes occupant des sites réguliers du réseau augmente, et certains atomes passent des sites réguliers dans des sites interstitiels ou auto-interstitiels, et laissent derrière eux des lacunes. Donc, pour toute température différente de zéro ($T \neq 0$) le réseau comporte une certaine concentration de défauts ponctuels (lacunes + interstitiels). Cependant ces défauts peuvent apparaître dans le réseau d'un cristal également sous l'influence de différentes actions externes, susceptibles de modifier son énergie (irradiation, contraintes mécaniques ou électriques, etc.).

I.4.2. Les atomes d'impuretés

Ce sont des atomes étrangers présents d'une façon volontaire ou non dans la matrice semi-conducteur. Ils peuvent se trouver en site substitutionnel comme en site interstitiel.

Les donneurs simples tels que As, P, par exemple en sites substitutionnels dans le silicium ont une faible énergie d'ionisation, comparativement à l'énergie de la bande interdite. On dit que ces centres sont peu profonds ou superficiels "shallow centers".

Alors que l'or ou le fer sont considérés comme centres profonds "deep centers" à cause de leurs niveaux qui se trouvent approximativement au milieu de la bande interdite [22].

Les impuretés en substitution peuvent être classées selon l'emplacement qu'elles occupent dans le tableau périodique par rapport à l'atome remplacé. D'abord, si l'impureté appartient à la même ligne elle est appelée impureté isocore. Si l'impureté appartient à la même colonne elle est appelée impureté isovalente ou iso-électronique. Si l'impureté appartient à une colonne située à droite, elle libère ses électrons de valence en surnombre et devient positive (c'est-à-dire qu'elle libère un nombre égale à l'écart entre la valence de l'atome de remplacement et celle de l'atome remplacé) et reconstitue avec le reste les liaisons covalentes avec les atomes voisins. Si l'impureté appartient à une colonne située à gauche, le site puise parmi les électrons les plus accessibles du cristal-en premier lieu parmi les électrons de valence- le complément d'électrons nécessaire à la reconstitution des liaisons covalentes avec les proche voisins et devient négative [24].

Les états de charges positifs d'une impureté sont appelés états donneurs et les états de charges négatifs sont appelés états accepteurs (fig I.6).

Selon cette définition, une impureté peut offrir un ou plusieurs états donneurs, dans ce cas on dit que cette impureté est *donatrice*. De même, une impureté peut offrir un ou plusieurs états accepteurs et l'on dit que cette impureté est *acceptrice*. Il existe des impuretés qui peuvent donner des états donneurs et des états accepteurs, on dit qu'elles sont *amphotères*.

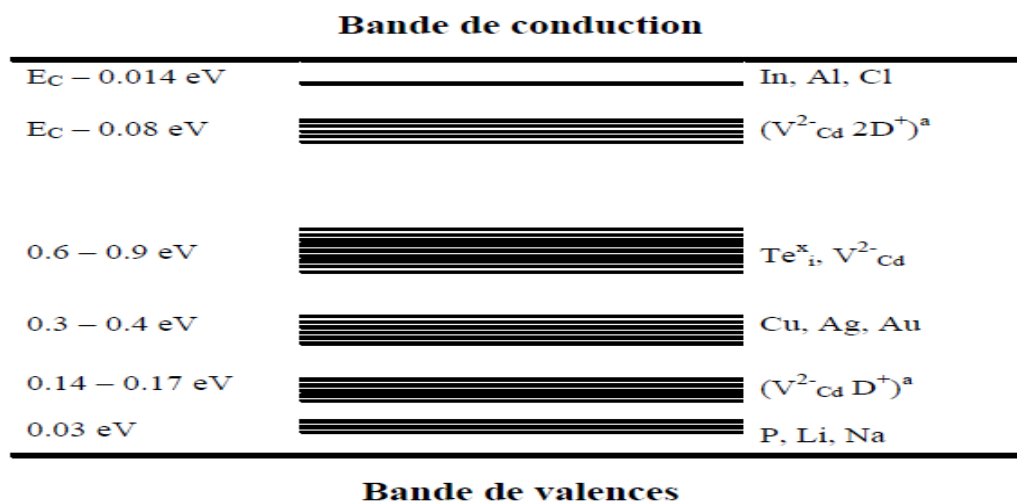


Fig.I.6 : Energies de quelques défauts ponctuels dans la bande interdite de CdTe à température ambiante.

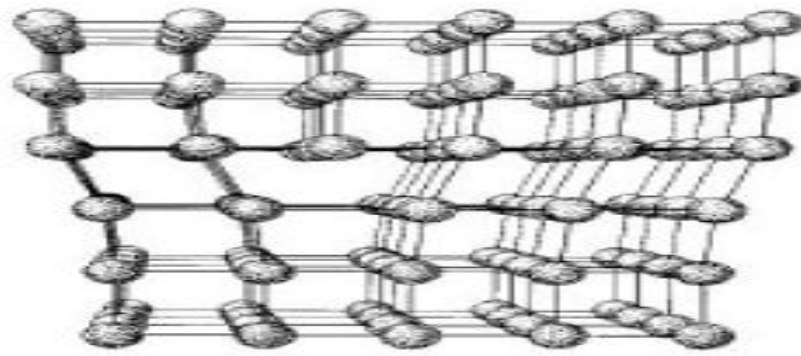
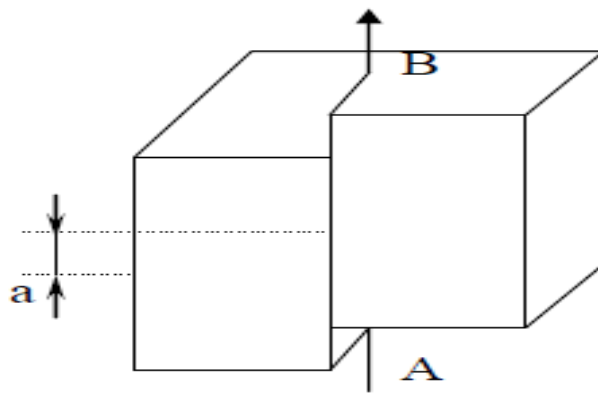
I.4.3. les défauts linéaires (dislocations)

On entend par dislocations, les distorsions du réseau cristallin produites par le glissement de certaines parties du cristal par rapport à d'autres. Deux cas limites de ces glissements, dont la combinaison permet de décrire n'importe quel type de glissement dans les cristaux, caractérisent les dislocations ce sont les dislocations coins et les dislocations vis. La dislocation coin (fig. I.7) est la droite marquant le bord du demi-plan réticulaire excédentaire, déterminant la distorsion du réseau. Il est évident que la plus forte perturbation du réseau se situe à proximité immédiate de la ligne de dislocation ; les atomes se trouvant immédiatement au-dessus de cette ligne sont soumis à des contraintes de compression et les rangées d'atomes immédiatement au-dessous du bord du demi-plan réticulaire excédentaire se trouvent cependant à des distances plus grandes que dans un cristal non disloqués, ce qui signifie que cette région du cristal est tendue.

Une dislocation vis peut être considérée comme le résultat de déplacement d'une partie du cristal par rapport à l'autre, parallèlement à l'axe de dislocation AB (fig.I.8); on peut dire qu'un cristal comportant une dislocation vis est constituée par un seul plan réticulaire incurvé selon une surface hélicoïdale, de tel sorte qu'à chaque rotation autour de l'axe de dislocation, ce plan s'élève (ou s'abaisse) d'un pas d'hélice égal à la distance inter-réticulaire a (paramètre de réseau).

Il ressort des définitions de ces deux types de dislocations qu'un contour bâti sur les vecteurs de translation du réseau considéré tout autour de la ligne de dislocation ne peut être fermé. Le vecteur b que l'on doit ajouter pour fermer ce contour est appelé vecteur de Burgers. Dans le cas d'une dislocation coin b est perpendiculaire à la ligne dislocation et correspond à la distance inter-réticulaire introduite par le demi-plan réticulaire excédentaire. Dans le cas d'une dislocation vis le vecteur b définit le pas d'hélice et sa direction est parallèle à l'axe de dislocation [24].

L'énergie de formation des dislocations rapportées à une distance interatomique le long de la ligne de dislocation varie selon les cristaux et varie entre 3 et 30eV. Du fait de la grande valeur des énergies de formation des dislocations, leur nombre ne dépend pratiquement pas de la température (les dislocations ne sont pas des défauts thermiques).

**Fig.I.7 dislocation coin****Fig.I.8 : dislocation vis**

I.4.4. Les défauts plans

I.4.4.a. Les joints de grains

A partir de 1930, les joints de grains furent considérés comme des zones de transition raccordant des cristaux d'orientation différente. Ces joints de grains peuvent jouer le rôle de sources et de puits de défauts (lacunes, interstitiels) et dislocations. Au cours d'une trempe, par exemple, les lacunes s'éliminent beaucoup plus vite au voisinage des joints qu'à l'intérieur des grains. Le rôle des joints au cours de la déformation plastique est très important : sous l'action de contrainte, ils peuvent émettre des dislocations. A haute température, une partie non négligeable de la déformation plastique est attribuée au glissement relatif des cristaux contigus le long des joints de grains (glissement inter-granulaire). D'autre part, les atomes d'impuretés peuvent ségréger aux joints de grains, ce qui a pour effet d'abaisser l'énergie inter-faciale, les détails pour *CdTe* sont donnés dans la référence [25].

I.4.4.b. Les surfaces et les interfaces cristallines

La surface cristalline constitue un autre type de défauts bidimensionnels parce que, à la surface du semi-conducteur les états électroniques (du volume) sont modifiés en raison d'une part, d'un phénomène intrinsèque, et d'autre part de phénomènes extrinsèques. Le phénomène intrinsèque résulte de la rupture de la périodicité du réseau. Cette rupture de périodicité entraîne l'existence d'états électroniques différents de ceux existant dans le volume, ce sont les *états de surface*. A ce phénomène intrinsèque, il faut ajouter des phénomènes extrinsèques résultant de l'adsorption à la surface d'atomes étrangers dont les plus courants sont les atomes d'oxygène qui entraînant une oxydation de la surface du semi-conducteur. On dit alors qu'on est en présence d'une oxydation de la surface du semi-conducteur (couche d'oxyde natif). La présence d'une part d'atomes étrangers et d'autre part de distorsions du réseau, résultant de la différence de maille entre le semi-conducteur et son oxyde, entraîne l'existence d'états de surface extrinsèques [26]. Si on considère l'interface entre deux matériaux au niveau d'une hétéro-structure (la Surface étant le cas particulier de l'interface du semi-conducteur avec le vide), le réseau passe sur une distance de quelques angströms de la périodicité d'un matériau à celle de l'autre. Il en résulte des états électroniques différents de ceux de chacun des matériaux, ce sont les *états d'interface*.

I.5. Visualisation des défauts

L'imagerie rendant compte des défauts cristallins dans *CdTe* est faite essentiellement par topographie de rayon X [27,28], par cathodoluminescence [27] ou par EBIC [29]. La révélation des défauts par attaque chimique (etch-pits) [30] restera une méthode grossière pouvant aider à estimer approximativement la densité de dislocations et sera donc, dans ce contexte, très utile pour comparer les cristaux entre eux.

La figure I.13 est une image de cathodoluminescence qui permet de voir les différents défauts cristallins dans *CdTe* [31].



Fig.I.9 : Les différents défauts pouvant exister dans *CdTe* obtenus à partir des Images de cathodo luminescence.

Une correspondance et une complémentarité sont déduites de l'observation combinée des images de topographie de rayons X et de cathodo luminescence. Les défauts ainsi observés ont été identifiés comme des sous joints de grains et des dislocations vis [27].

Une autre corrélation a été faite entre la cathodo luminescence et les etch-pits. L'échantillon déformé à température ambiante et les dislocations ainsi introduites sont visualisées par etch-pits et cathodo luminescence (fig I.10). Les points noirs représentent des dislocations émergeant en surface, ce qui est en très bon accord avec les piqûres d'attaque qui représentent à leur tour les mêmes dislocations émergentes [32].

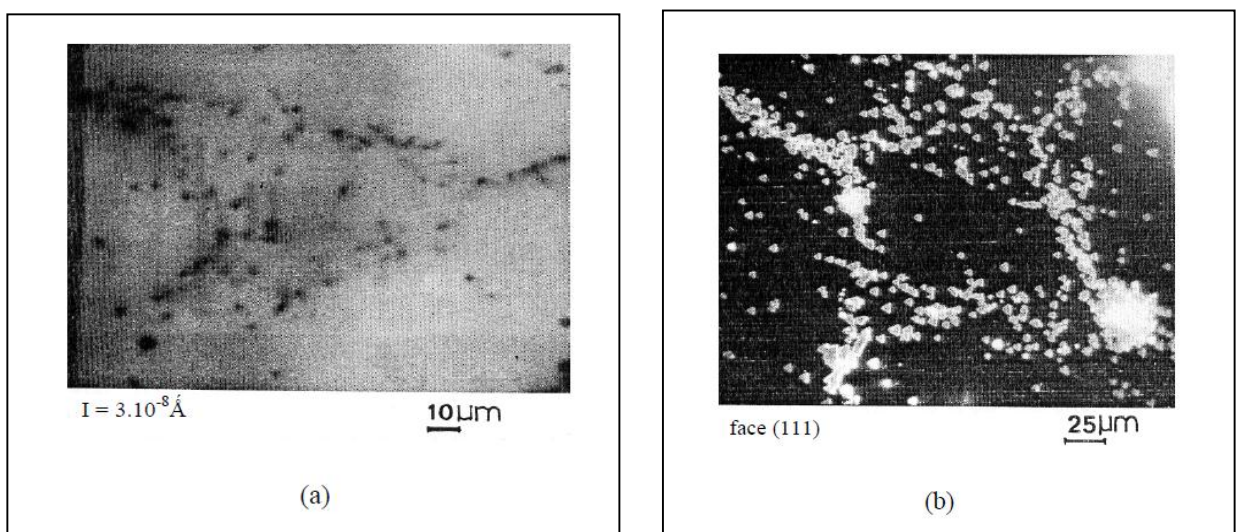


Fig.I.10 : Corrélation entre image de cathodoluminescence (a) et image d'etch-pits (b) pour C6 (*CdZnTe*) [33]

Une étude regroupant la topographie de rayons X, la cathodoluminescence, l'EBIC a été réalisée par Auleytner et al [34] pour mettre en évidence les différents défauts cristallins de *CdTe* et consolider les observations en corrélant les différentes méthodes entre elles.

I.6. propriétés électriques

CdTe est le seul matériau II-VI, avec HgTe, qui présente les deux types de conductivité n ou p suivant les conditions de croissance, le traitement après croissance et le dopant incorporé. Le changement de type est aussi possible lors des recuits thermiques, notamment sous atmosphère de Cd [35].

D'après Nobel [36], le comportement de type p est dû à des défauts accepteurs associés à des lacunes de cadmium, alors que le comportement de type n est dû à des défauts donneurs associés à un excès de cadmium. Les accepteurs sont soit des atomes de tellure interstitiels ou des lacunes de cadmium, les donneurs sont soit des atomes de cadmium interstitiels ou des lacunes de tellure.

Selon une recherche bibliographique on trouve des résistivités à la température ambiante comprise entre 10^{-2} et $10^7 \Omega \cdot \text{cm}$, avec des concentrations en porteurs entre 10^{15} et 10^{17}cm^{-3} .

Les mobilités des trous sont de l'ordre de 50 à $100 \text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$, et celles des électrons de 500 à $1050 \text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ [37]. Les paramètres qui influencent le plus la mobilité des porteurs de charges sont la température et la densité des impuretés [38].

La diffusion des porteurs de charge par les imperfections du réseau cristallin, les impuretés et les défauts étendus entraînent une réduction de la mobilité de ces derniers.

La longueur de diffusion des trous dans le matériau CdTe de type n diminue de 5 à $0.18 \mu\text{m}$ lorsque la concentration n des porteurs augmente de 2×10^{13} à $8 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ [39,40], selon la loi : $\text{Log}(L_h) \approx 4.9 - 0.315 \log(n)$ [42].

Où : L_h est exprimé en μm et n en cm^{-3} .

En revanche, la longueur de diffusion des électrons dans CdTe de type p est de 0.4 à 2.0 μm pour des concentrations variant de 1×10^{15} à $8 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ [42,43].

Les durées de vie (τ), des porteurs de charge minoritaires ont les mêmes variations que les longueurs des diffusions en raison de la relation qui les lie ($L = (D\tau)^{1/2}$), où D est la constante de diffusion.

La durée de vie des trous montre une diminution allant de 20 à 0.5ns en fonction de l'augmentation de la concentration n des électrons dans n-CdTe [44,45].

La durée de vie des électrons augmente de 10 à 30 ns en fonction de l'augmentation de la concentration p des trous dans p-CdTe [46].

I.7. 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 :

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

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

➤ Le coefficient d'absorption α est défini par :

$$\alpha(\lambda) = \frac{4\pi k(\lambda)}{\lambda} \quad (I.4)$$

➤ L'indice de réfraction n , de CdTe, varie en fonction de la longueur d'onde λ selon la formule suivante [47] :

$$n^2 = 5.68 + \left[\frac{1.53\lambda^2}{\lambda^2 - 0.366} \right] \quad (I.5)$$

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 10.6μ est égal à 20.7%
- Le coefficient d'absorption optique α est égal à 10^4cm^{-1}
- Constantes diélectriques :

A $T=300 \text{K}$, les valeurs des constants diélectriques optiques ϵ_∞ et statique ϵ_s sont égales à [48] :

$$\epsilon_\infty = 7.1$$

$$\epsilon_s = 10.7$$

I.8. propriétés thermiques

Les principales propriétés thermiques sont données par les coefficients suivants [47] :

- 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. Diagramme de phase

I.9.1. Diagramme de phase composition-température

Le diagramme de phase de *CdTe* est assez simple (fig I.11), il a un point de fusion à $1092 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ pour une concentration approximative de tellure de $50 \text{ at } \%$.

Deux paliers eutectiques à $324 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ pour la région riche en Cd et à $449 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ pour la région riche en Te [49].

Le composé stœchiométrique représenté par une ligne se trouve en réalité répartie sur un domaine étroit tel qu'on aura un point de fusion à $897 \text{ }^\circ\text{C}$ et $1092 \text{ }^\circ\text{C}$ pour une concentration de tellure de $49,99985\%$ et de $50,00085\%$ respectivement [50].

I.9.2. Le diagramme de phase pression-température

Le diagramme de phase pression-température de *CdTe* présenté sur la Figure I.12 permet de savoir avec précision les conditions d'élaboration des cristaux [49].

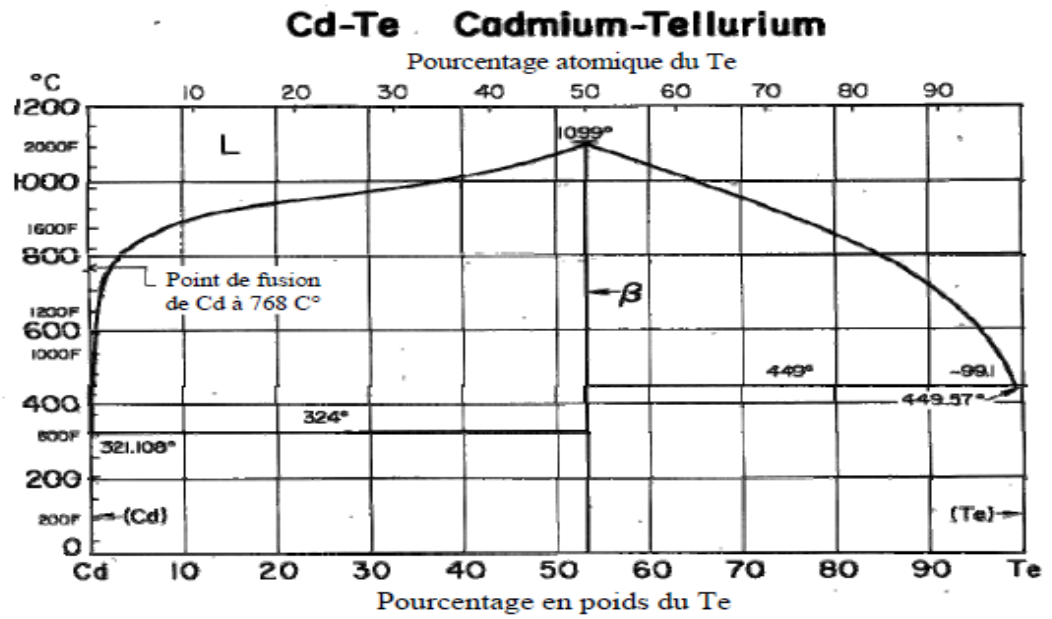


Fig.I.11 : diagramme de phase composition-température de CdTe

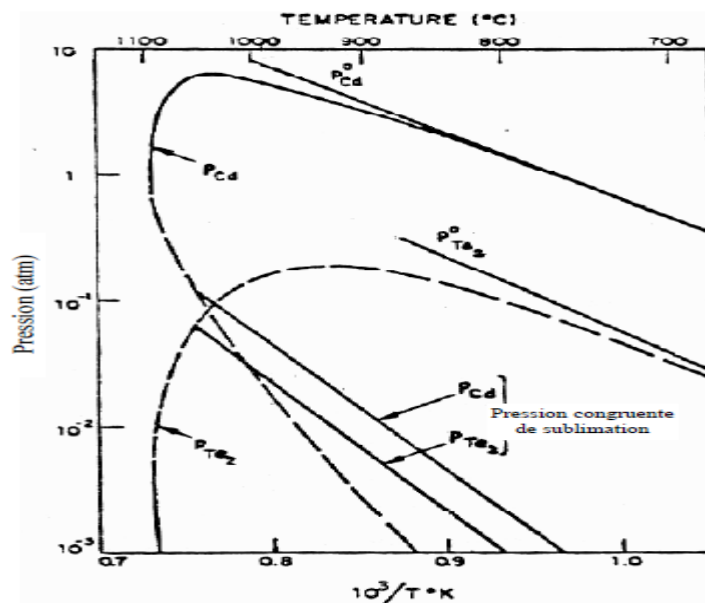


Fig.I.12 : Diagramme de phase pression-température de CdTe

I.10. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les propriétés générales du semi-conducteur CdTe, un semi-conducteur de la famille II-VI. En raison de ses propriétés variées (structurales, électriques, optiques....)



Chapitre II

étude d'une cellule photovoltaïque

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 reliée 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).

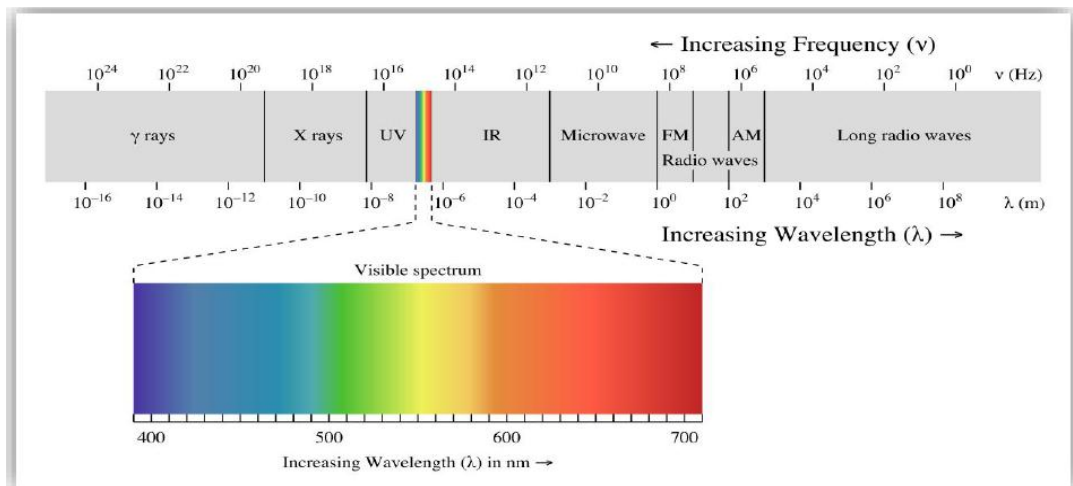


Fig.II.1 : Spectre électromagnétique [51]

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/m².

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

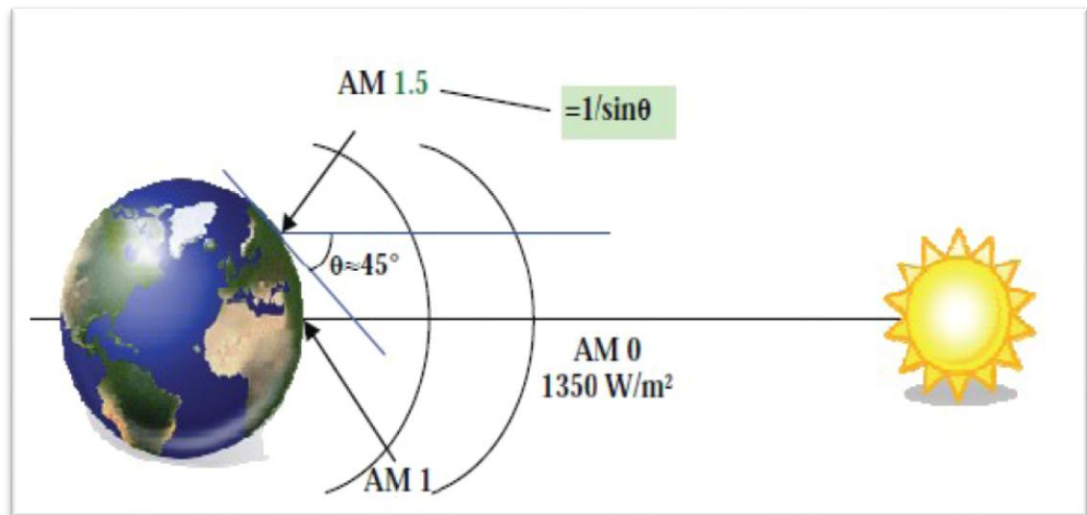


Fig. II.2 : Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par Le soleil, notion de la convention AM [52].

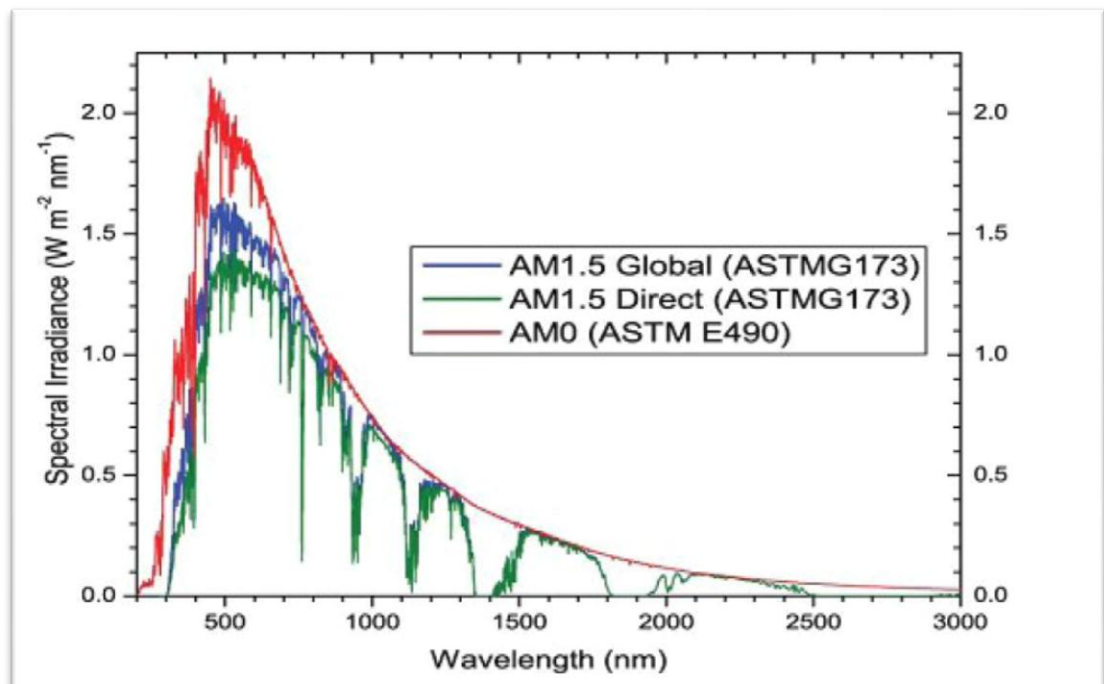


Fig. II.3 : Spectres Solaires relèves dans plusieurs conditions selon la Convention AM. Source NREL solarspectrum [52].

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 ou 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.

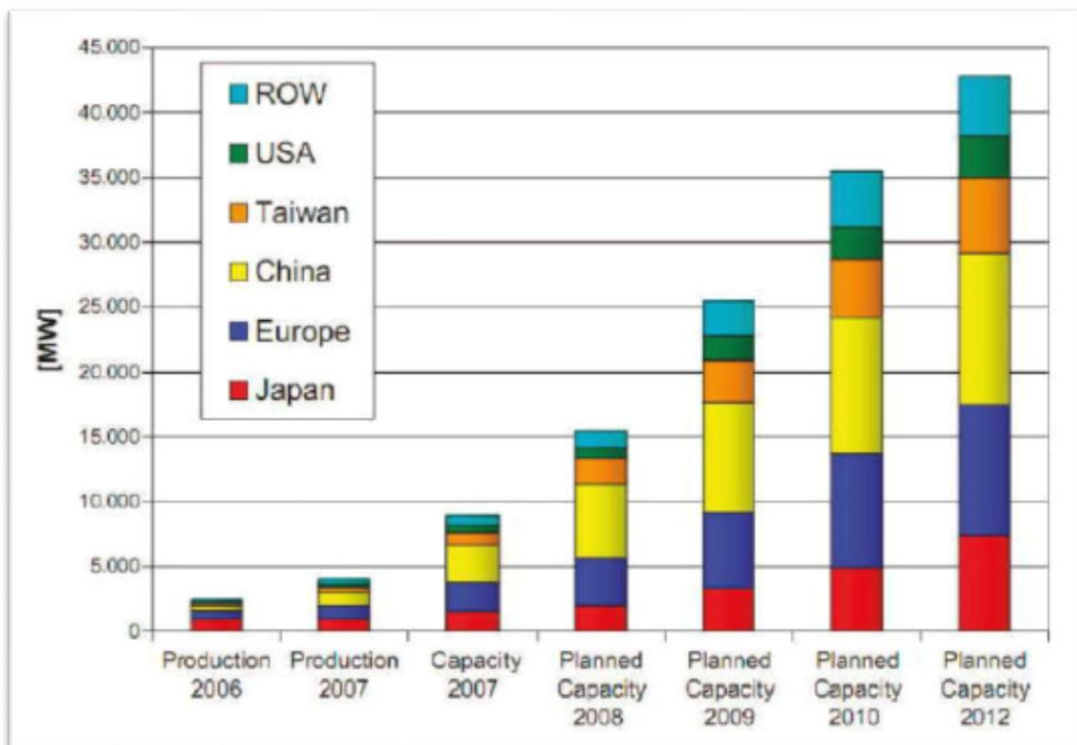


Fig. II.5 : production de PV mondiale [53].

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. $T = 0$ 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 :

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

et

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

Ou :

$$N_c = 2 \left(\frac{2\pi m_e^i KT}{h^2} \right) \quad \text{et} \quad N_v = 2 \left(\frac{2\pi m_h^i KT}{h^2} \right) \quad (\text{II.8})$$

Sont les densités effectives des états dans la bande de conduction et de valence. Pour les semi-conducteurs dopés 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_e^i et m_h^i 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,

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

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

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

et

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

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 :

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

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.6.2. 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. 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.7. Paramètres caractéristiques d'une cellule photovoltaïque.

II.7.1. 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.

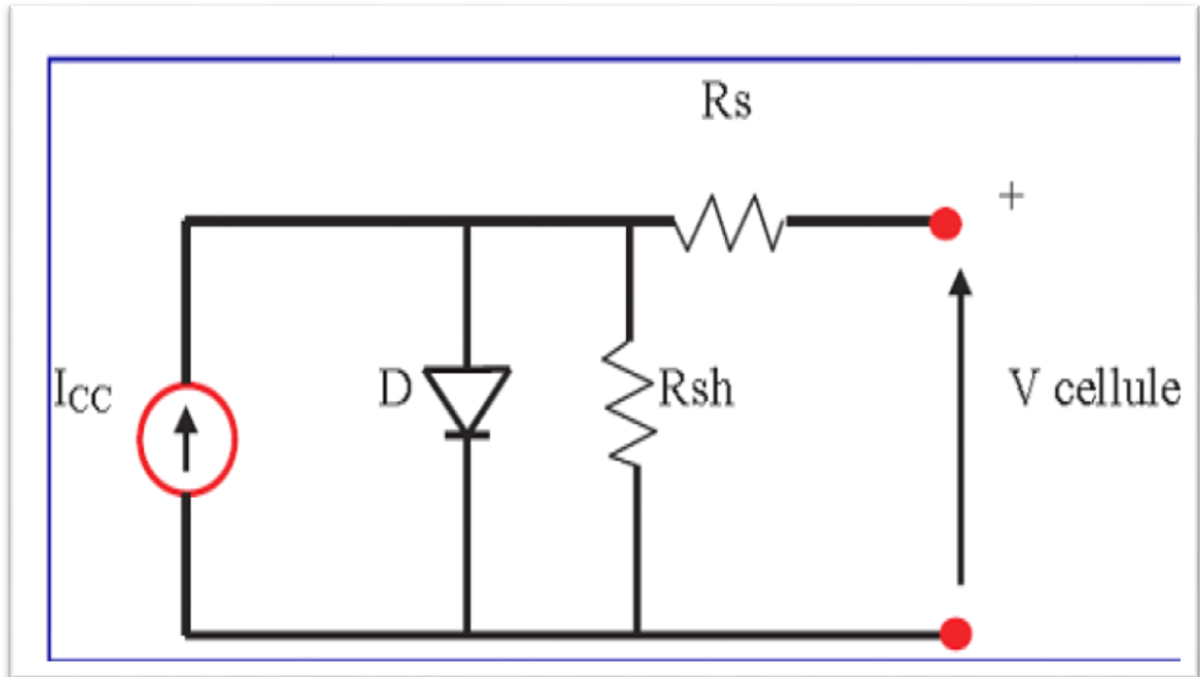


Fig. II. 6: Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque [60]

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.7.2. 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]

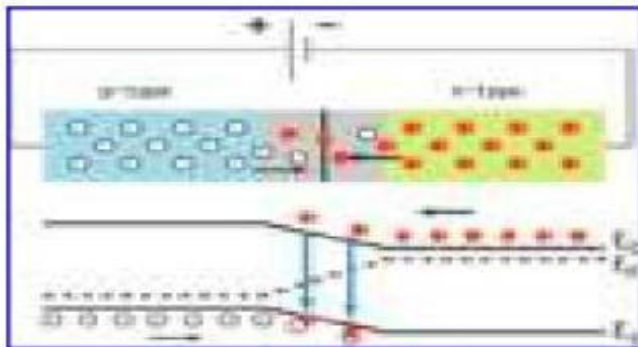


Fig. II.7: Jonction P-N en polarisation directe. [61]

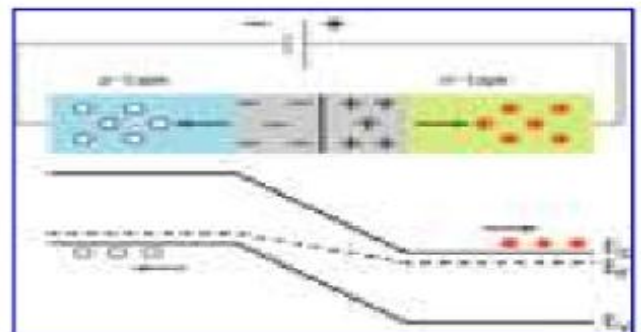


Fig. II.8: Jonction P-N en polarisation inverse. [61]

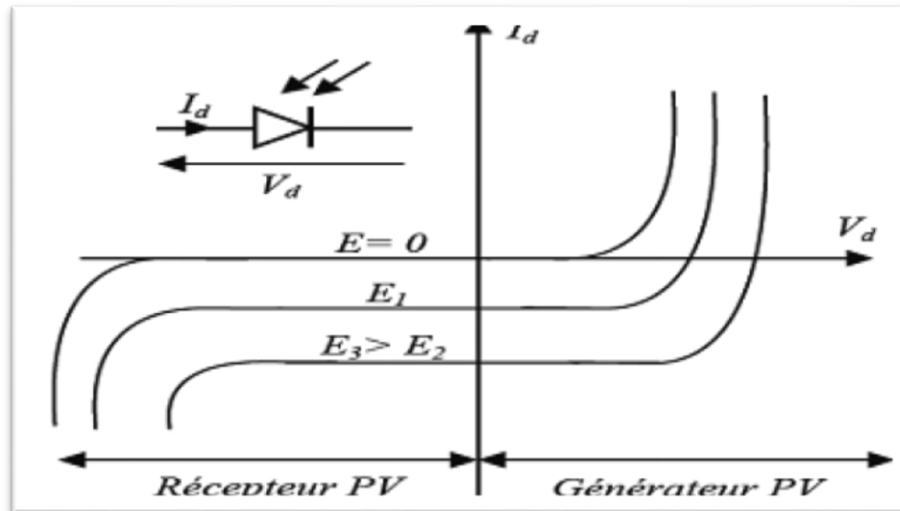


Fig. II.9 : caractéristique d'une jonction PN sous éclairement [61]

II.7.3. Le générateur PV et ses performances

Un générateur photovoltaïque ou module est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïque 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.7.4. 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 :

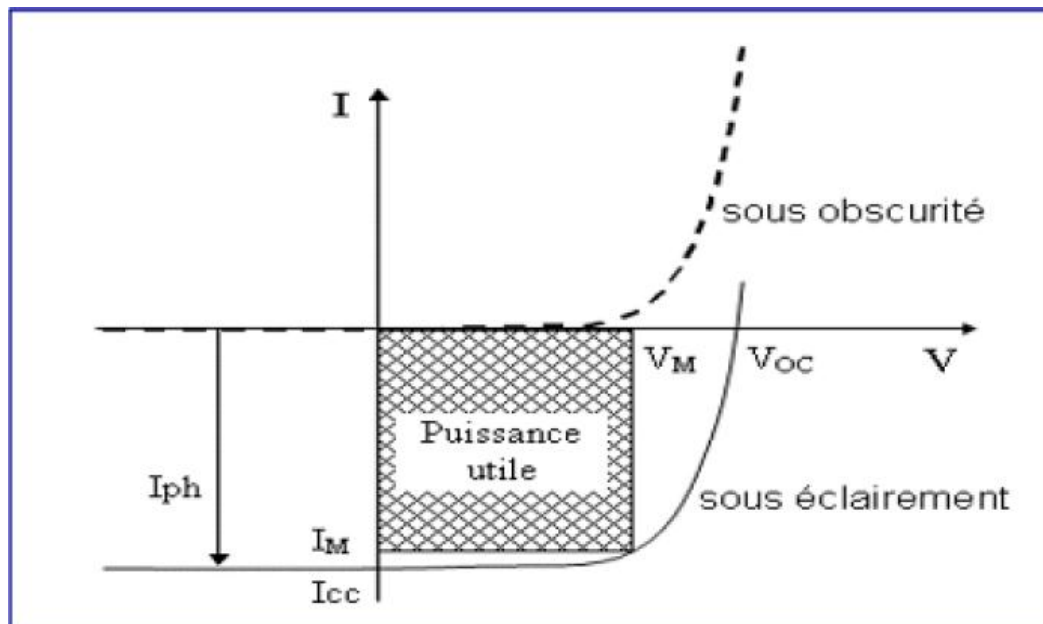


Fig. II.10 : La caractéristique d'une cellule photovoltaïque non éclairée est celle en présence d'un éclairciment. [61].

Cette caractéristique est décalée vers le bas d'un courant I_{cc} (courant de court-circuit).

De même, elle coupe l'axe des abscisses en V_{co} (tension maximale de circuit ouvert). On peut regrouper trois zones essentielles :

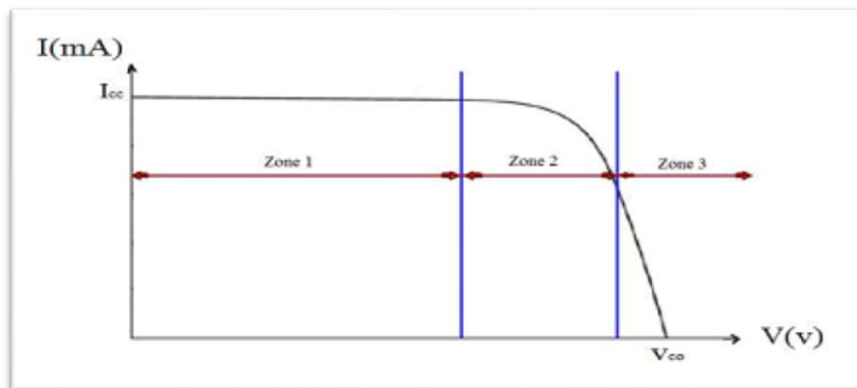


Fig. II.11: les différentes zones de caractéristique $I=f(V)$ d'une cellule photovoltaïque [61].

- **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.7.4.1. 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.

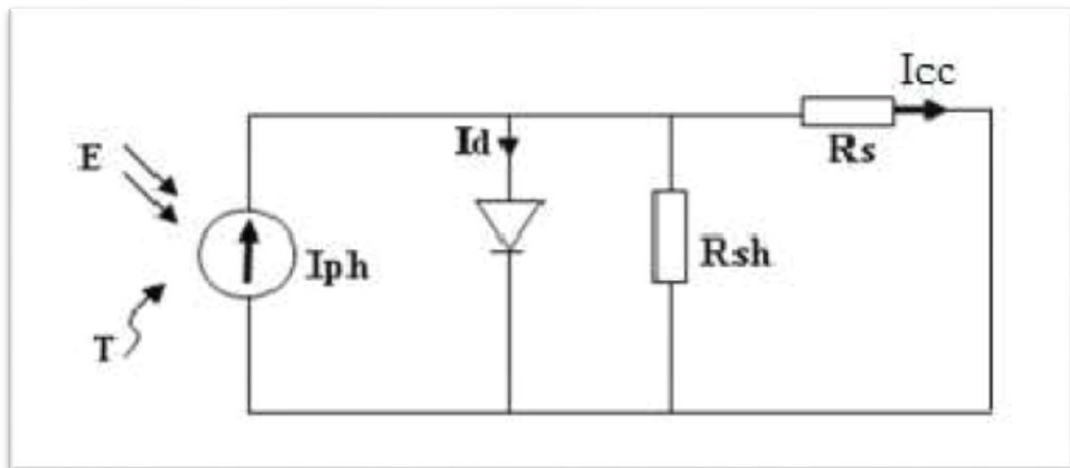


Fig.II.12 : Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque en court-circuit [61].

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

II.7.4.2. 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].

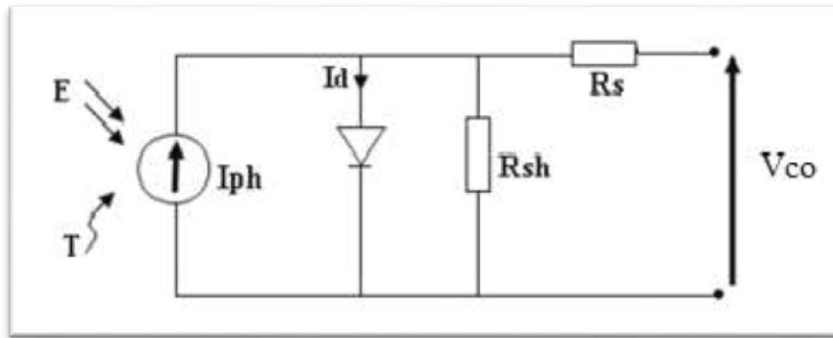


Fig.II.13 : Schéma électrique d'une cellule Photovoltaïque en circuit ouvert [61].

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

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

II.7.5. 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.7.6. 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 $I_{cc} \cdot V_{co}$ [62] :

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

II.7.7. 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.7.8. 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 :

$$EQE(\lambda) = \frac{J_{cc}(\lambda)}{\varphi(\lambda)} \times \frac{E_{ph}(\lambda)}{e} = \frac{J_{cc}(\lambda)}{\varphi(\lambda)} \times \frac{hc}{e\lambda} \quad (\text{II.19})$$

où $J_{cc}(\lambda)$ est le flux lumineux incident, e la charge de l'électron et E_{ph} l'énergie du photon (avec $E_{ph}(\lambda) = \frac{hc}{\lambda}$, 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 :

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

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

II.7.9. 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_{co} mais elle peut diminuer notablement la valeur de I_{cc} [64].

II.7.10. 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.

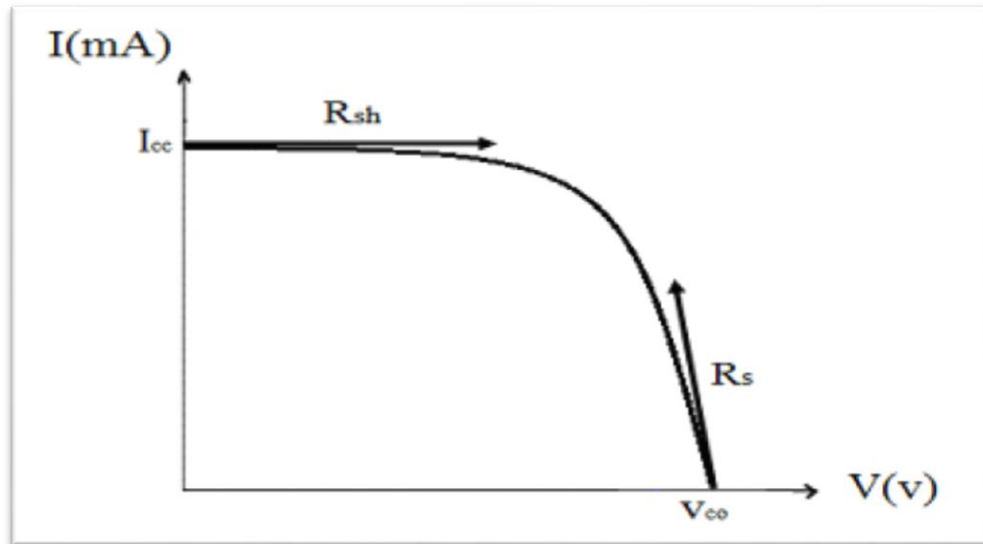


Fig. II.14: détermination graphique de résistance shunt Et série

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 .

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

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

II.8. Les Différents Types de Cellules Photovoltaïques

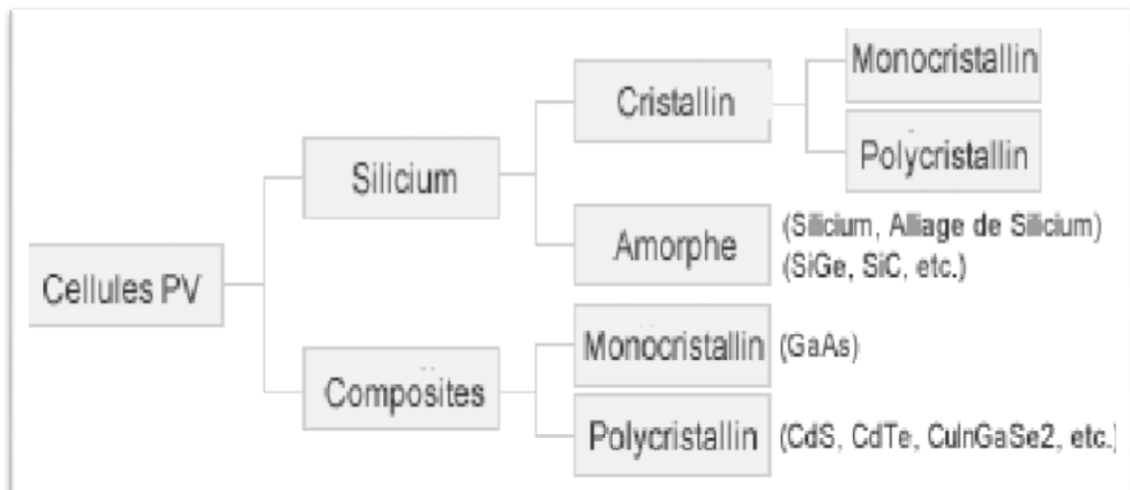


Fig. II. 15 : Les différentes technologies des cellules photovoltaïques. [64]

Il existe un grand nombre de technologies mettant en œuvre l'effet photovoltaïque.

Beaucoup sont encore en phase de recherche et développement [64]

II.9. 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
Logiciel SCAPS

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 Verschraegen , Alex Niemegeers , Stefaan Degrave .

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 à Marc Burgelman le téléchargé d'une version de SCAPS (le nom et 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 CuInSe₂ et de CdTe .

Cependant, Plusieurs version ont amélioré ses capacités de façon à devenir applicable pour des cellules solaires cristallines (Si et GaAs) et des cellules amorphes (a-Si et de Si micro-morphe) .

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, $\chi, \varepsilon, N_c, N_v, V_{thn}, V_{thp}, \mu_n, \mu_p, N_A, N_D$, 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

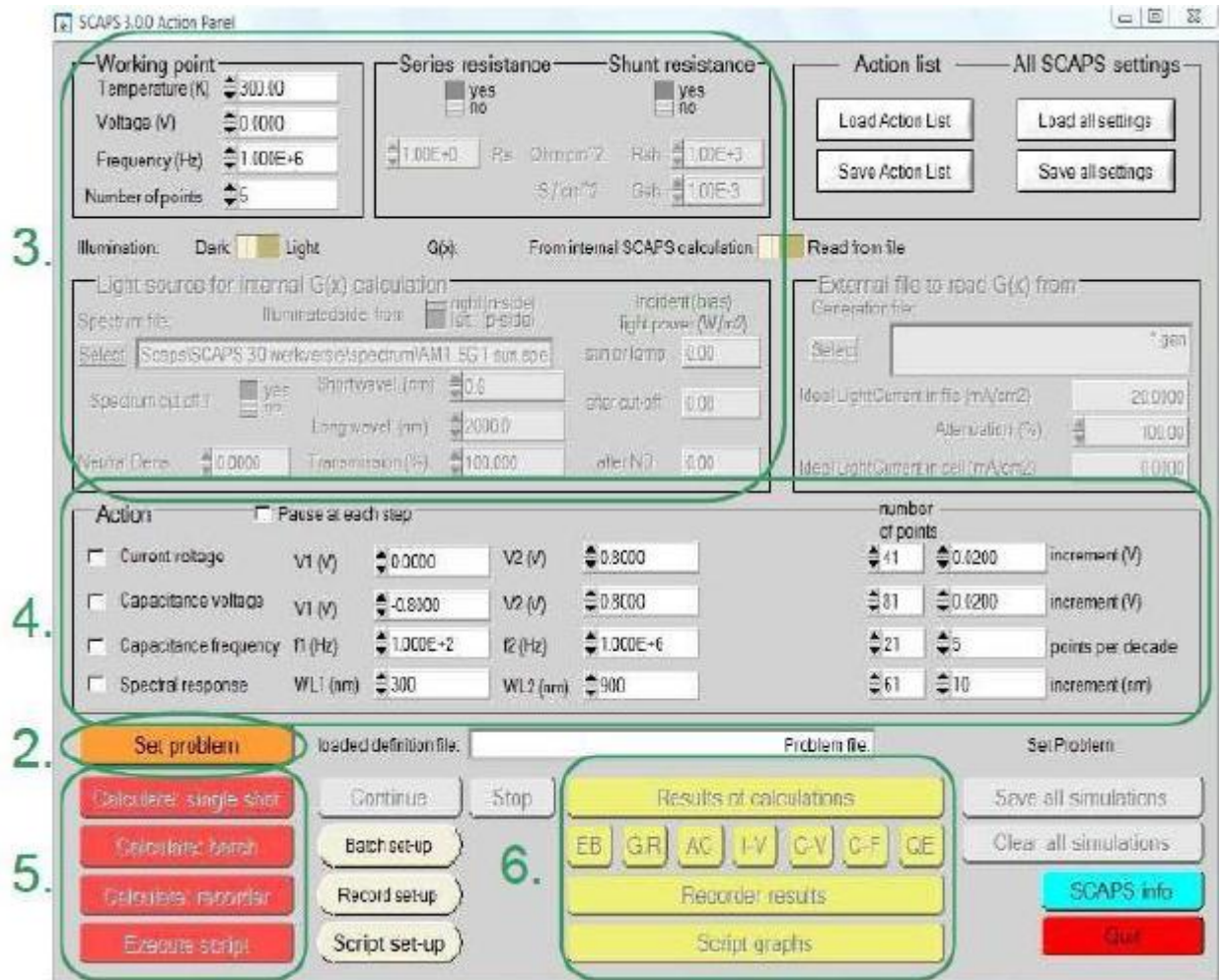


Fig.III.1 : Panneau de démarrage de SCAPS, le panneau d'action ou principal.

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).

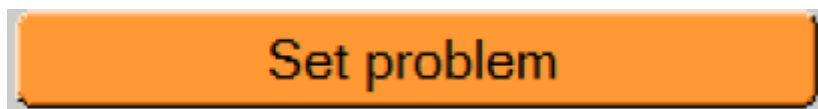
Ces étapes sont plus détaillées dans ce qui suit.

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 choisissant 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.

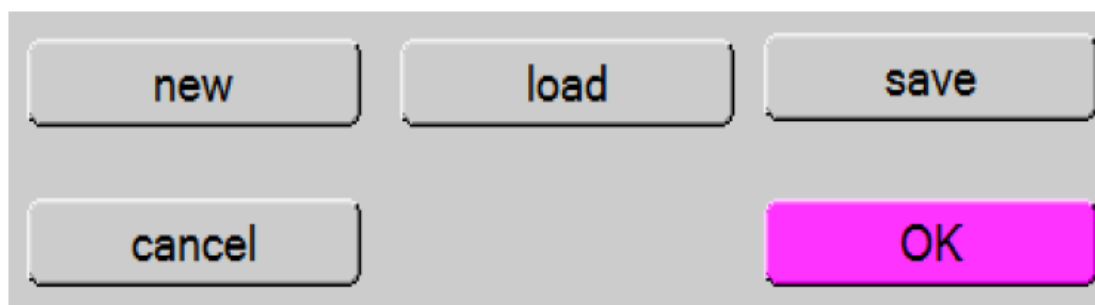


Fig III. 2 : Définir le problème

III.2.3. Définir le point de fonctionnement :

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

- ❖ **La température T** : Importante pour toutes les mesures. Note : dans SCAPS, seulement $N_c(T), N_v(T)$ les vitesses thermiques, le voltage thermique kT et tous leurs dérivés sont les seuls variables qui ont une dépendance thermique explicite ; on doit saisir manuellement, pour chaque valeur T , les paramètres du matériau correspondant.

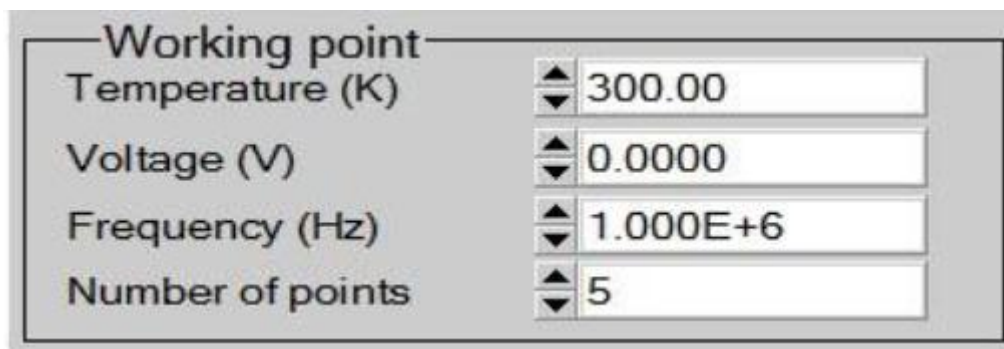


Fig. III. 3 : Le point de fonctionnement

- ❖ **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).

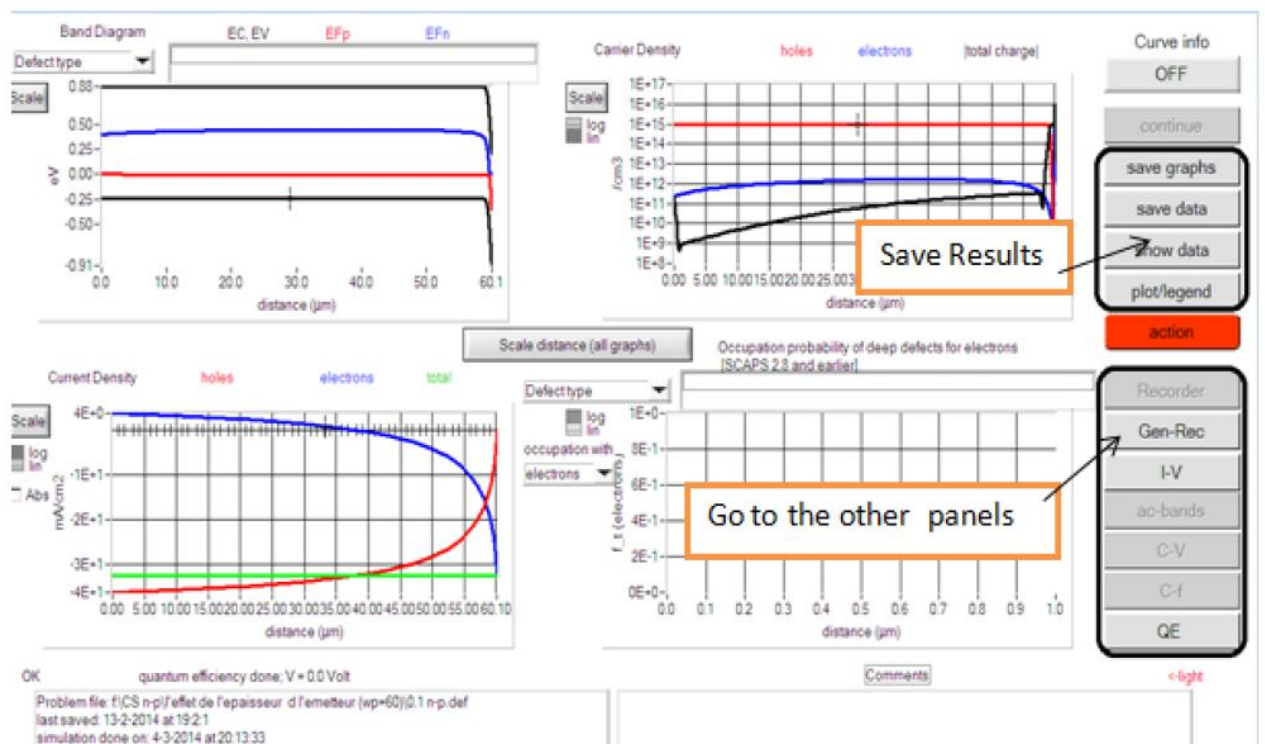


Fig III. 4: Panneau des bandes d'énergie

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 éclairement. 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.

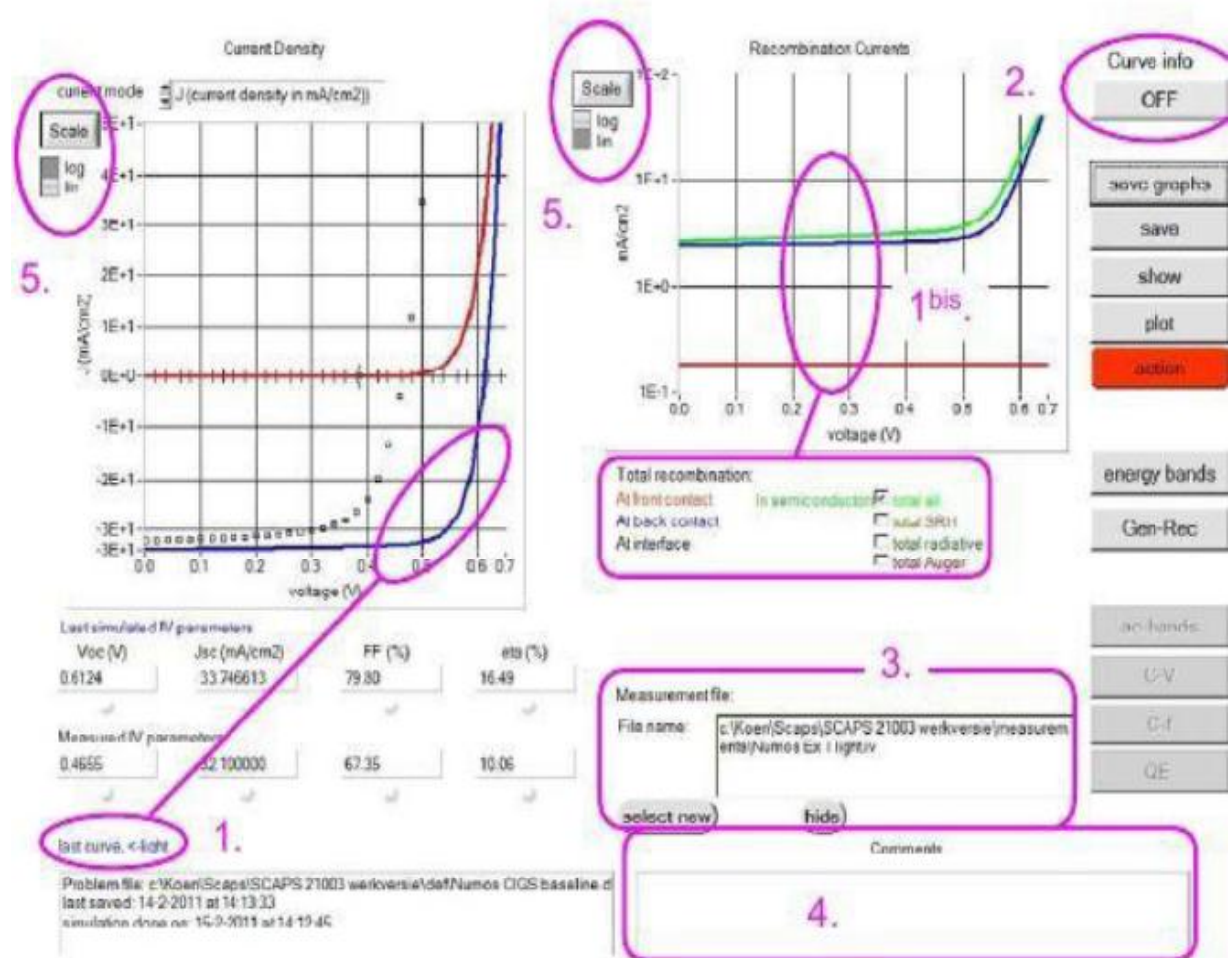


Figure III. 5 : Panneau d'affichage des courbes I-V à l'obscurité et en éclairement.

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'.

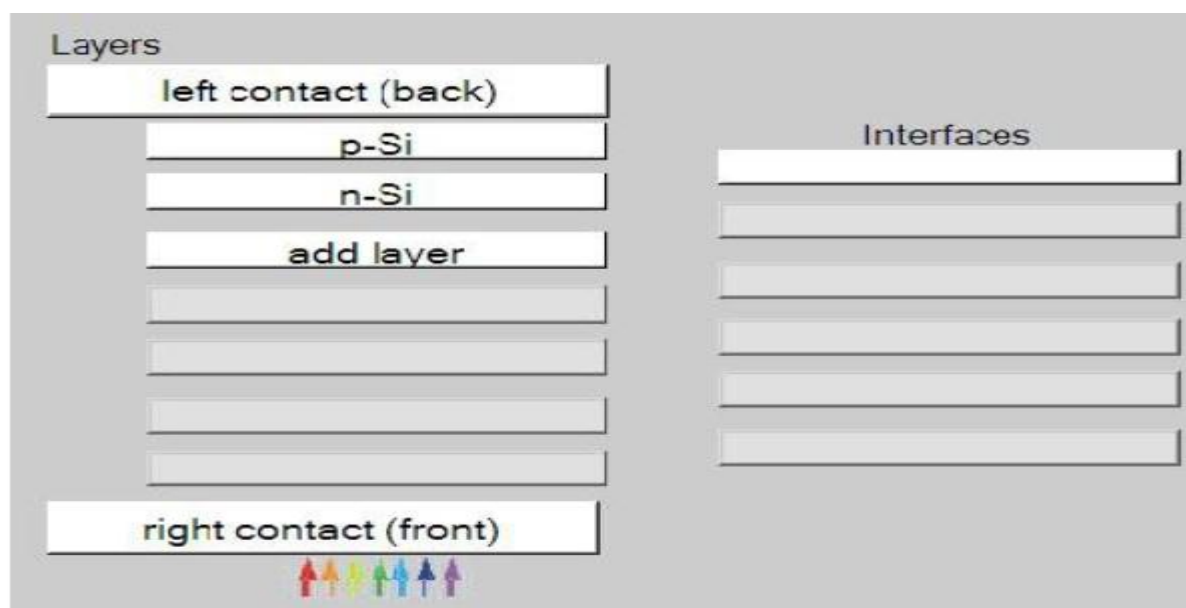


Fig III. 6 : Définition de la structure d'une cellule solaire

III.3.2. Contacts :

Les propriétés des contacts peuvent être introduites 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 screenshot displays the 'CONTACT PROPERTIES PANEL' with two main sections: 'Electrical properties' and 'Optical properties'.

Electrical properties:

- Thermionic emission / surface recombination velocity (cm/s):
 - electrons: 1.00E+5
 - holes: 1.00E+7
- Metal work function (eV): 5.0000 or flat bands
- Majority carrier barrier height(eV):
 - relative to EF: 0.2000
 - relative to EV or EC: 0.0000
- Allow tunneling
- Effective mass of electrons: 1.00E+0
- Effective mass of holes: 1.00E+0

Optical properties:

- optical filter:
- Filter Mode: transmission, reflection
- Filter Value: 0.700000
- Complement of Filter: 3.0000E-1
- From Value: (light grey bar)
- From File: (dark grey bar)
- Select Filter File: [Text input field]

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
	1.000E+0
	effective mass of holes
	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

Absorption model Show / Set alpha(composition; lambda)

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

show save

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.

Band to band recombination

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

Defect 4 of layer 1

defect type	Single Donor (0/+) ▼
capture cross section electrons (cm ²)	1.000E-15
capture cross section holes (cm ²)	1.000E-15
energetic distribution	Gauß ▼
reference for defect energy level Et	Above EV (SCAPS < 2.7) ▼
energy level with respect to Reference (eV)	0.600
characteristic energy (eV)	0.200

Nt grading dependent on position x: Nt (x) ▼ exponential ▼

Nt total (1/cm ³)	Left (x=0) ▼	1.000E+15	Right (x=1) ▼	1.000E+14
Nt peak (1/eV/cm ³)	Left (x=0) ▼	2.821E+15	Right (x=1) ▼	2.821E+14

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.



Capitre IV
Résultats et Discussion

IV.1.Introduction

Dans cette section, nous présenterons les résultats de la simulation numérique de la caractéristique J-V par le logiciel SCAPS de la cellule étudiée qui est une jonction **p-n** en CdTe.

IV.2. Résultats et Discussion

Les paramètres physiques du CdTe 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-CdTe
thickness (μm)	0.200
	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 ($1/\text{cm}^3$)	$7.500\text{E}+17$
VB effective density of states ($1/\text{cm}^3$)	$1.800\text{E}+18$
electron thermal velocity (cm/s)	$1.000\text{E}+7$
hole thermal velocity (cm/s)	$1.000\text{E}+7$
electron mobility (cm^2/Vs)	$5.000\text{E}+2$
hole mobility (cm^2/Vs)	$6.000\text{E}+1$
<input type="checkbox"/> Allow Tunneling	effective mass of electrons
	effective mass of holes
	$1.000\text{E}+0$
	$1.000\text{E}+0$
no ND grading (uniform)	
shallow uniform donor density ND ($1/\text{cm}^3$)	$1.000\text{E}+17$
no NA grading (uniform)	
shallow uniform acceptor density NA ($1/\text{cm}^3$)	$0.000\text{E}+0$

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

IV.2.1. Structure de la cellule étudiée :

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

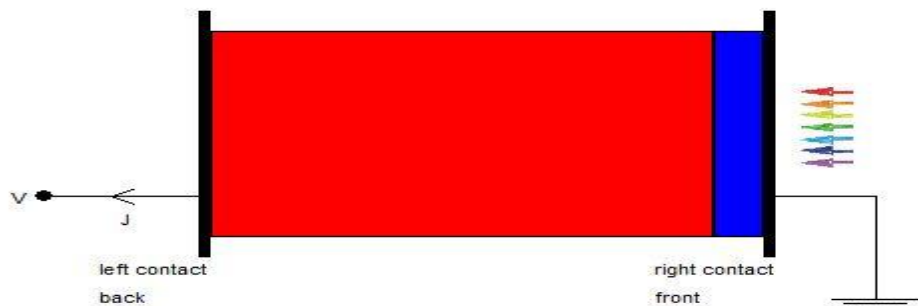


Fig. IV. 3: Schéma de la cellule solaire p-n étudiée

IV.3. Les résultats de la simulation

IV.3.1. Caractéristique I-V

Sous un éclairage donné, toute cellule photovoltaïque est caractérisée par une courbe courant-tension (I-V) représentant l'ensemble des configurations électriques que peut prendre la cellule.

IV.3.2. Influence de l'éclairage et de la température

L'éclairage et la température modifient la caractéristique I-V de la cellule solaire, pas dans sa forme générale mais pour les valeurs I_{cc} , V_{co} , I_m et V_m :

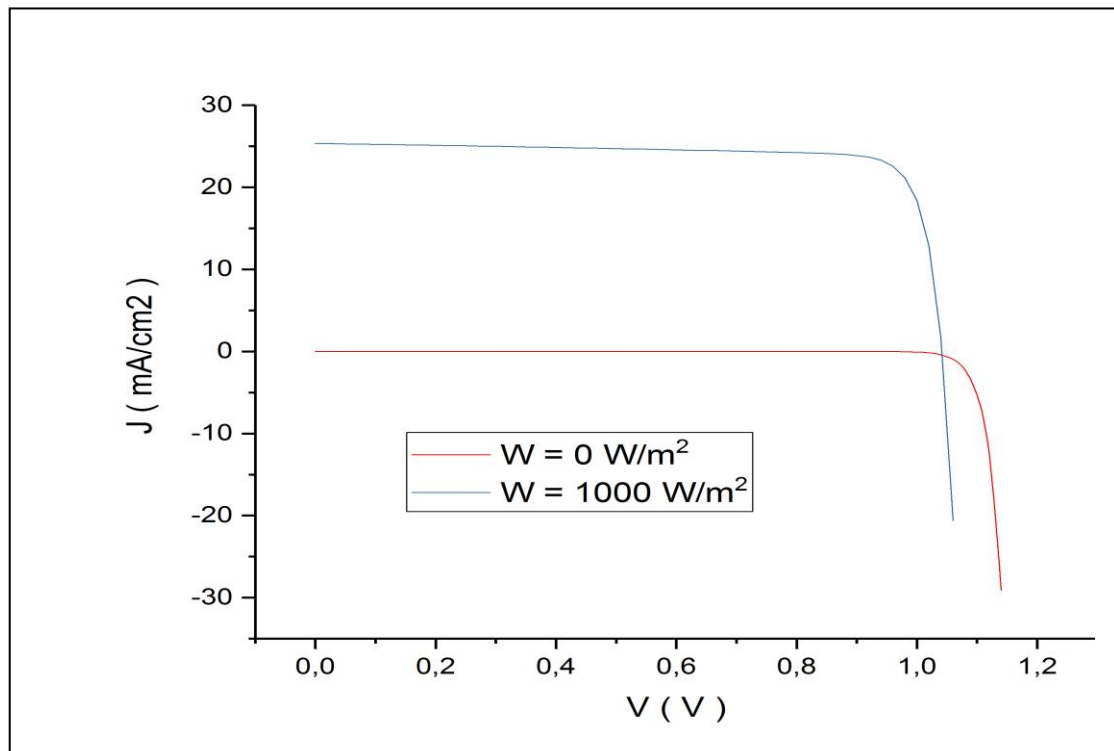


Fig.IV.4 : (a) Caractéristique courant-tension de la cellule solaire sous éclairage et dans l'obscurité à T=300k.

Dans l'obscurité aucun courant ne peut être généré par le dispositif cellule solaire.

A partir de la courbe obtenue, on peut déterminer les propriétés intrinsèques du matériau.

En revanche, sous illumination, une cellule délivre du courant ; on peut alors déduire de la courbe courant-tension.

IV.3.2.1. Influence de la température

La température est un paramètre très important dans le comportement des cellules solaires puisqu'elles sont exposées au rayonnement solaire. La figure (IV.5) et la figure (IV.6) montre l'influence de la température, sur la caractéristique $I(V)$ de la cellule solaire lorsque la température varie en obscurité et sous éclairement.

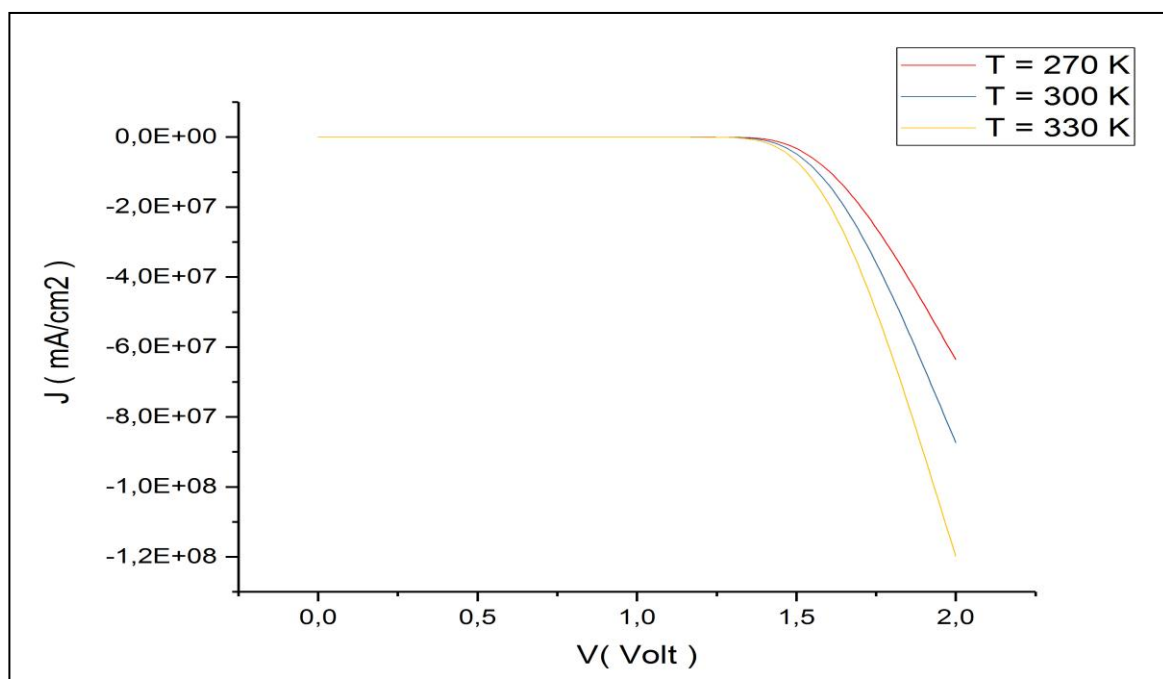


Fig. IV. 5: Influence de la température sur la caractéristique I-V d'une cellule solaire en obscurité $G=0(W/m^2)$.

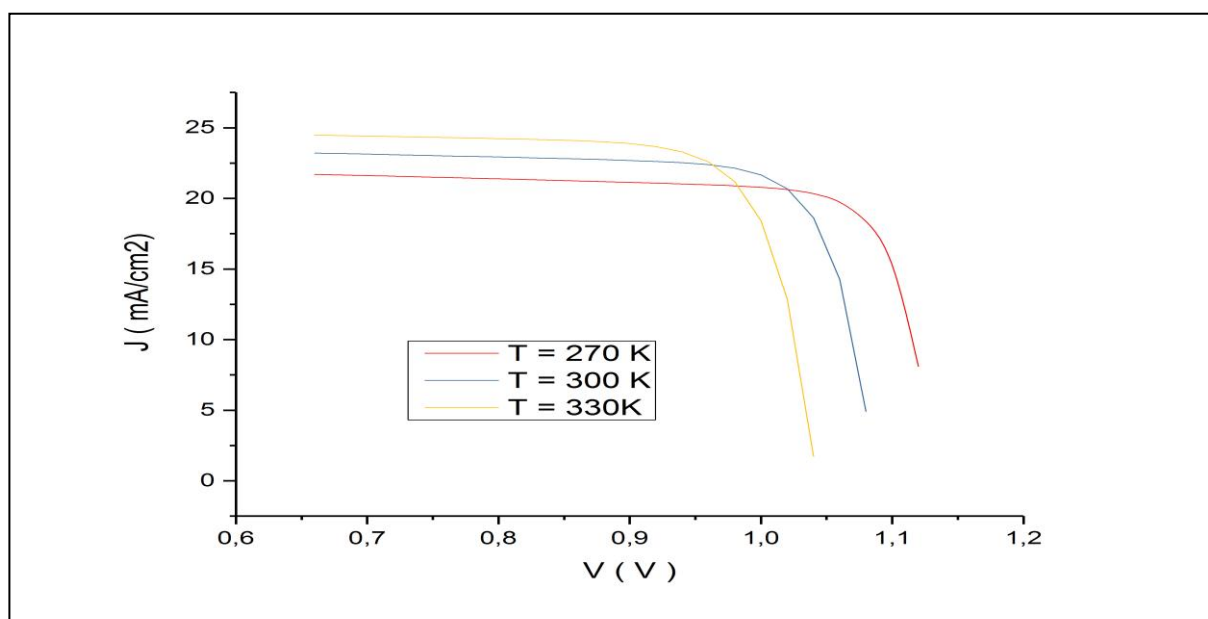


Fig. IV. 6: Influence de la température sur la caractéristique I-V d'une cellule solaire sous éclairement, $G=1000(W/m^2)$

Nous avons effectué une simulation où nous avons maintenu un éclairement constant ($G=1000\text{W/m}^2$) pour différentes température (**270k,300k,330k**). La courbe des caractéristiques va présenter des allures différentes selon la température.

Pour la fig. (IV.6) Nous remarquons que le courant dépend de la température puisque le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, on constate que la température influe négativement sur la tension de circuit ouvert.

Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue. (IV.5).

❖ **Effet de la température sur les caractéristiques électriques de la cellule :**

Nous choisissons quelques valeurs de la température pour tracer :

- La caractéristique tension de circuit ouvert V_{CO} .
- La caractéristique densité de courant de court-circuit J_{sc} .
- La caractéristique Facteur de forme FF .
- Le rendement de conversion la cellule solaire étudiée η (%).

Les paramètres de la structure tirés des différentes caractéristiques représentées précédemment, sont récapitulés dans le tableau (IV.1) :

T(k)	$\eta(\%)$	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm²)	$FF(\%)$
270	21.1480	1.131059	22.92979871	81.5424
300	21.7178	1.086009	24.27019236	82.3967
330	21.8993	1.042008	25.34779929	82.9124

Tab. IV. 1: Effet de la température sur les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire à base de CdTe.

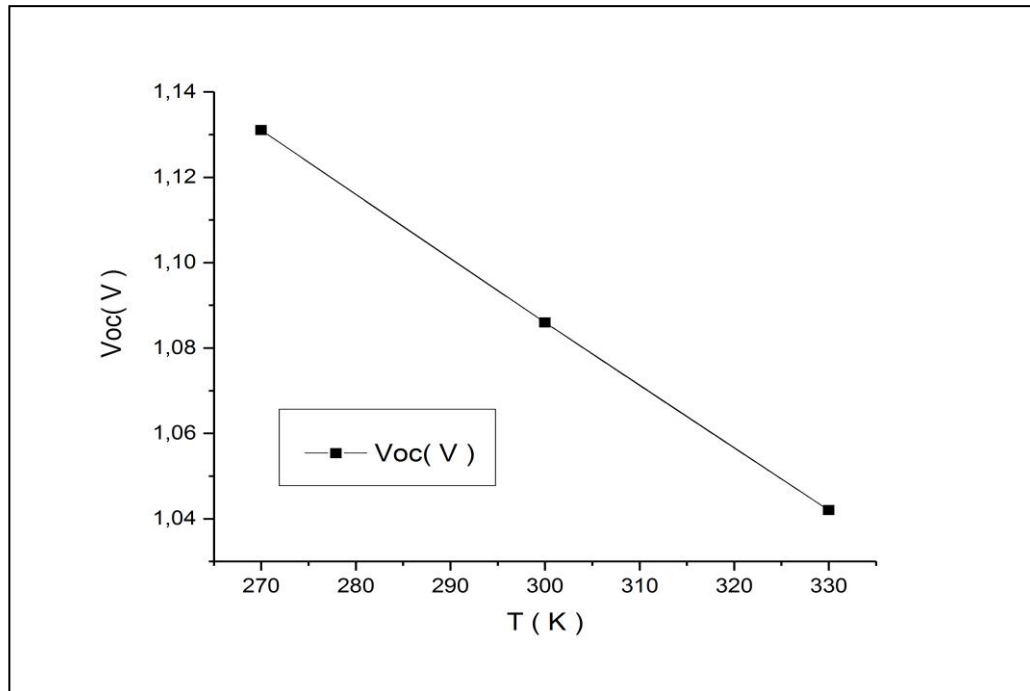


Fig. IV. 7: Variation de la tension de circuit ouvert (V_{co}) avec la température (k) à $G=1000(W/m^2)$.

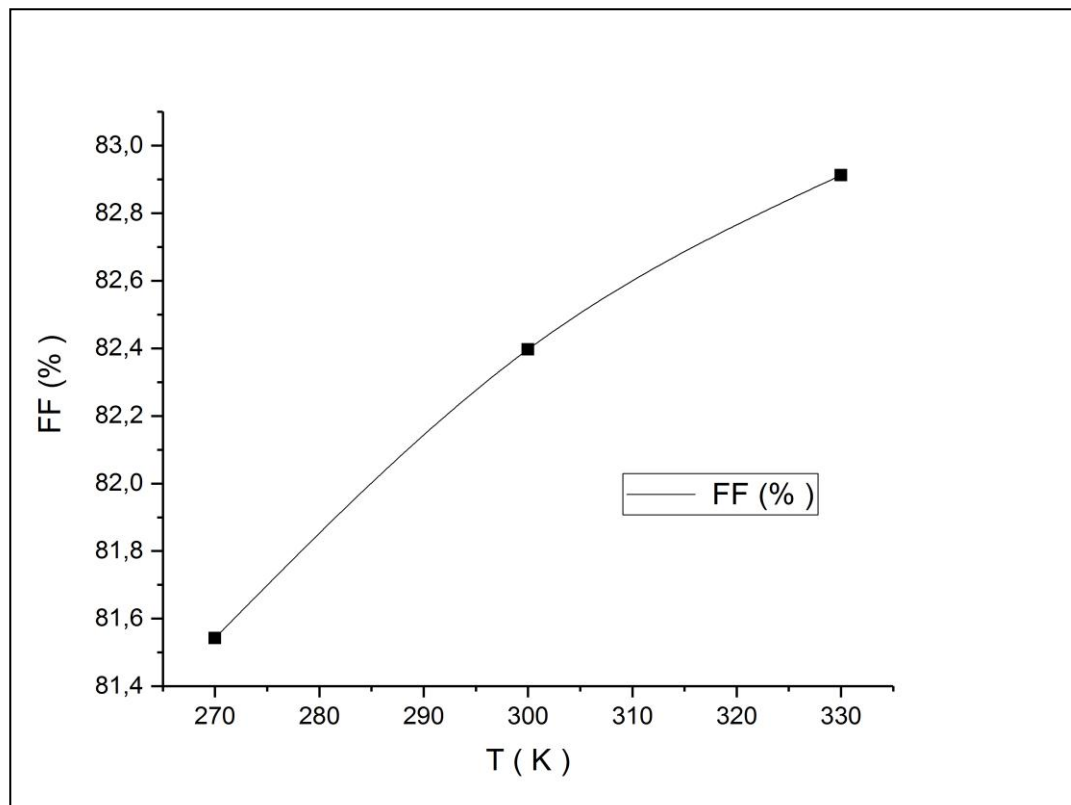


Fig.IV.8: Variation du Facteur de forme FF avec la température (k) à $G=1000(W/m^2)$.

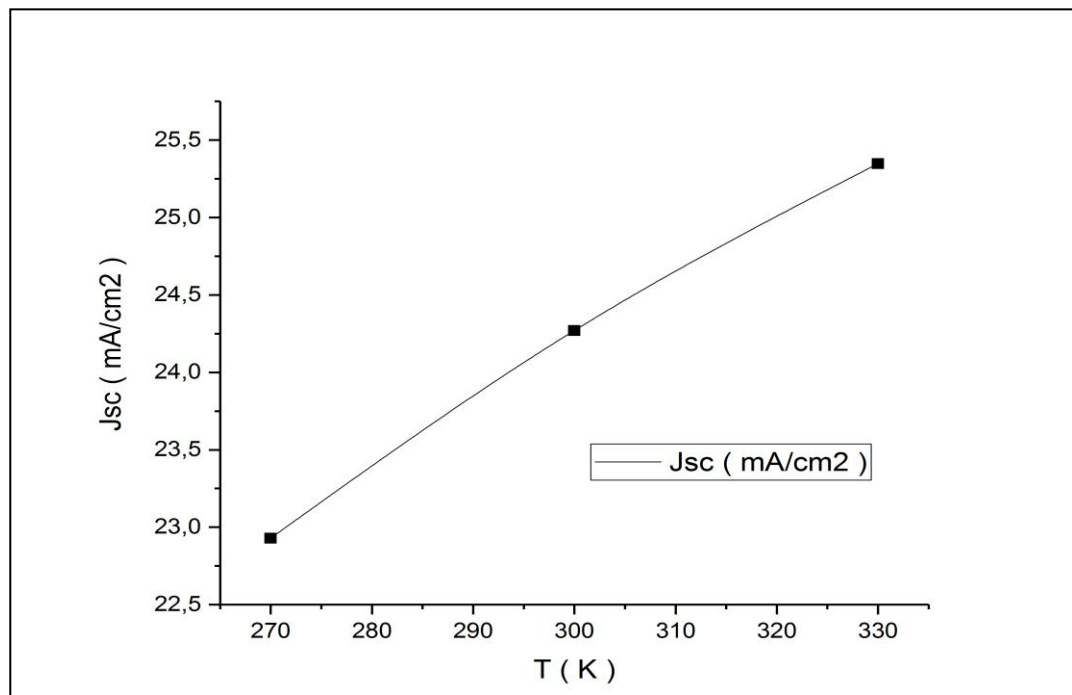


Fig.IV.9: Variation de la densité de courant de court-circuit J_{sc} avec la température (k) à $G=1000(W/m^2)$

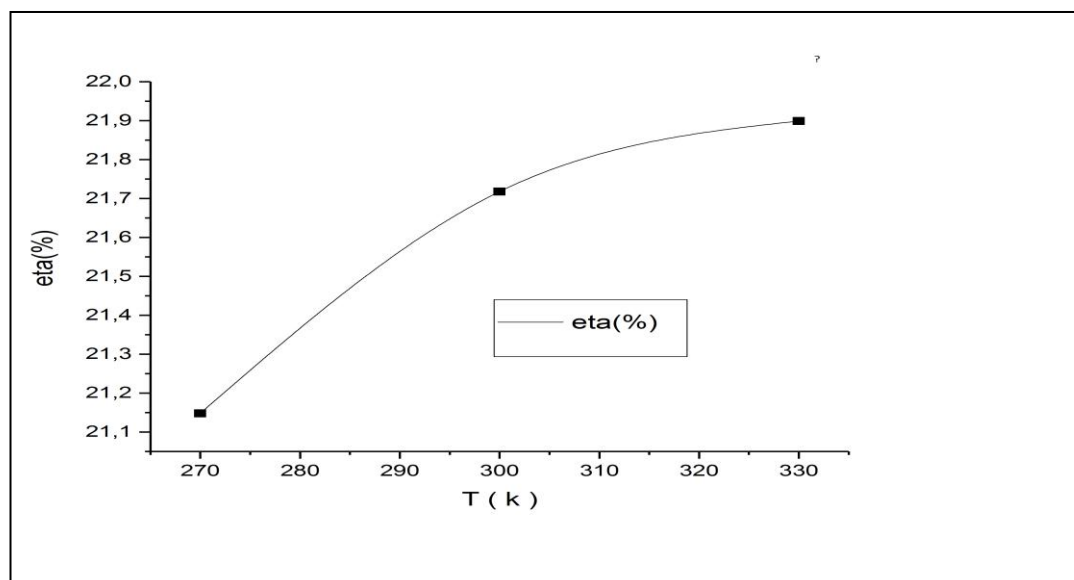


Fig. IV. 10 : Variation du rendement de conversion photovoltaïque (η) avec la température (k) à $G=1000(W/m^2)$.

On observe que l'augmentation de la température provoque une augmentation du courant du court-circuit (J_{sc}) fig (IV.9), en même temps on assiste à une diminution nette de la tension en circuit ouvert (V_{co}) fig (IV.7), et une augmentation du Facteur de forme FF fig (IV.8) et du rendement fig (IV.10).

IV.3.2.2. Influence de l'éclairement

Les figures (IV.11) présentent des courbes pour différents niveaux de rayonnement : Nous avons fixé la température ($T=300\text{k}$) pour différents éclairagements ($800\text{W}/\text{m}^2$, $900\text{W}/\text{m}^2$, $1000\text{W}/\text{m}^2$).

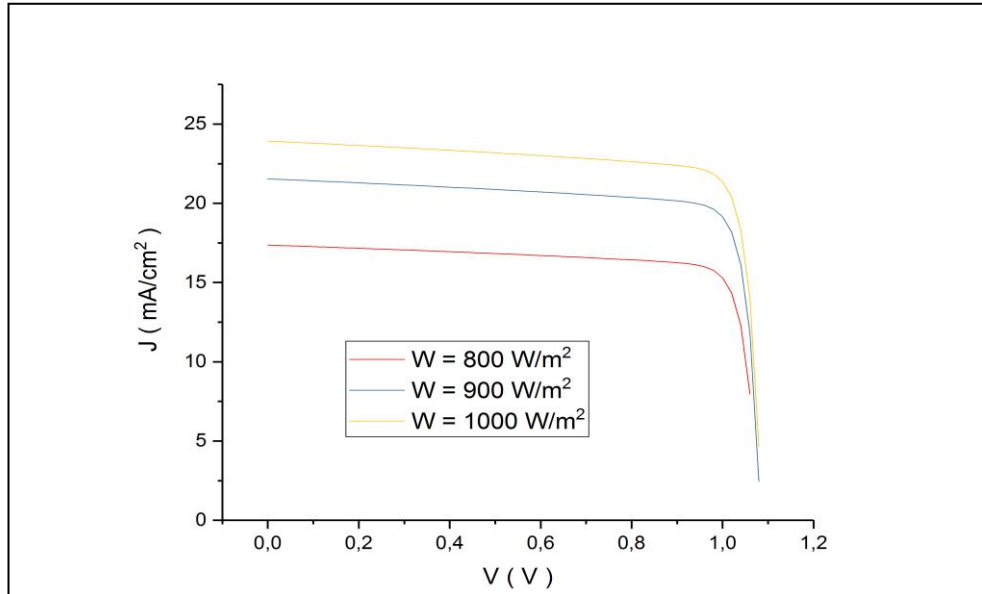


Figure IV. 11 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique I-V d'une cellule solaire à $T=300\text{k}$

Pour la figure (IV.11) on remarque que pour l'éclairement $G=1000\text{ w}/\text{m}^2$ le courant $J_{sc}=23.93146817\text{ (mA}/\text{cm}^2)$ et pour $G=900\text{w}/\text{m}^2$ le courant $J_{sc}= 21.54250426\text{ (mA}/\text{cm}^2)$ on peut voir que le courant subit une variation importante, quand l'éclairement augmente le courant de court-circuit augmente, mais par contre la tension augmente légèrement quand l'éclairement augmente figure (IV.11).

Effet de l'éclairement sur les caractéristiques électriques de la cellule:

- Nous choisissons quelques valeurs de la température pour tracer :
- La caractéristique tension de circuit ouvert V_{co} .
- La caractéristique densité de courant de court-circuit J_{sc} .
- La caractéristique Facteur de forme FF .
- Le rendement de conversion la cellule solaire étudiée η (%).

Les paramètres de la structure tirés des différentes caractéristiques représentées précédemment, sont récapitulés dans le tableau IV -3 :

$G(W/m^2)$	$\eta(\%)$	$V_{oc}(v)$	$J_{sc}(mA/cm^2)$	$FF(\%)$
800	20.1403	1.077618	17.36729683	82.5576
900	21.3804	1.083135	21.54250426	82.4830
1000	21.4323	1.085694	23.93146817	82.4881

Tab. IV. 2: Effet de l'éclairement sur les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire à base de CdTe

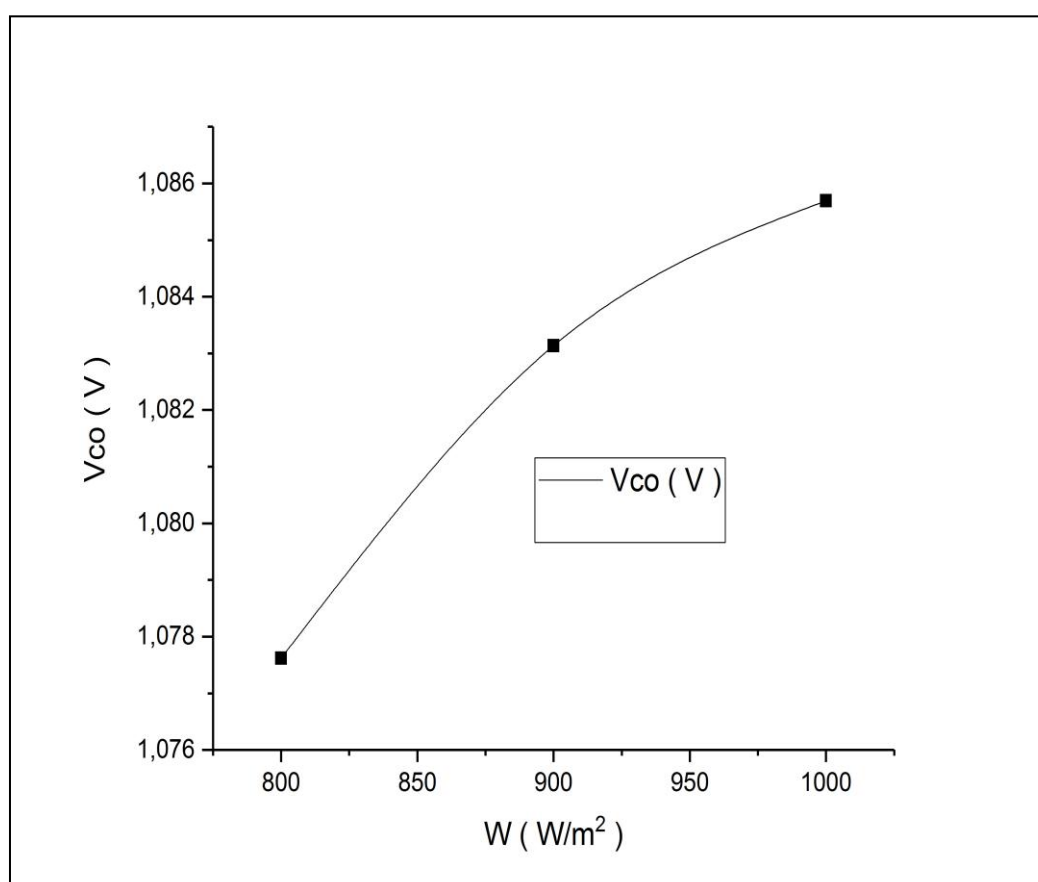


Fig. IV. 12 : Variation de la tension de circuit ouvert (V_{CO}) avec l'éclairement $T=300K$

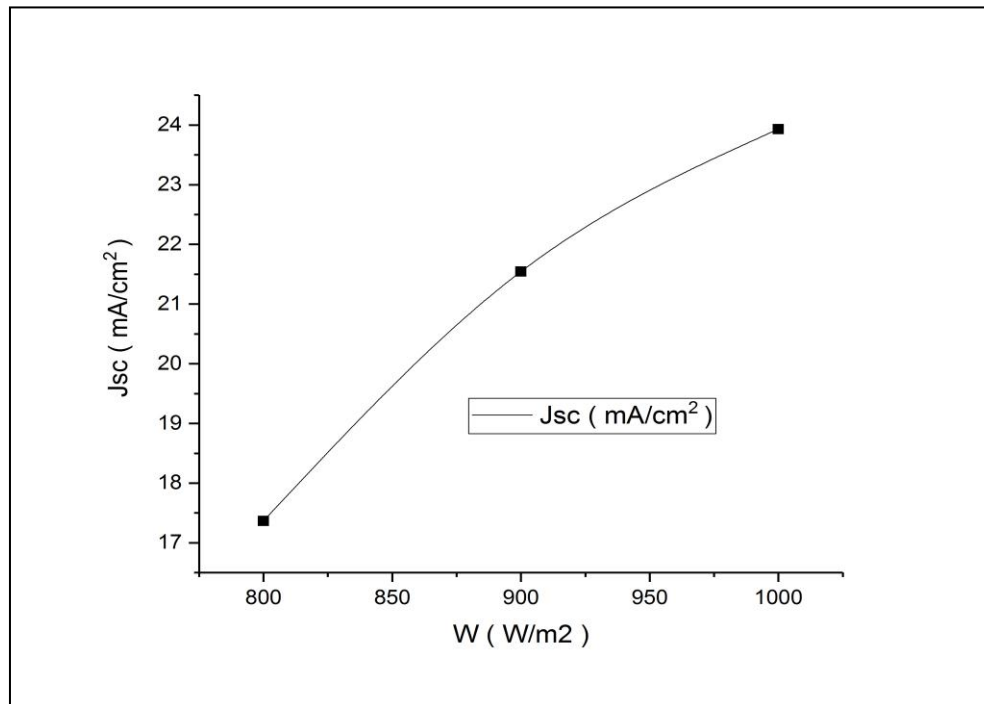


Fig. IV. 13: Variation de la densité de courant de court-circuit J_{sc} avec l'éclairement à $T=300k$.

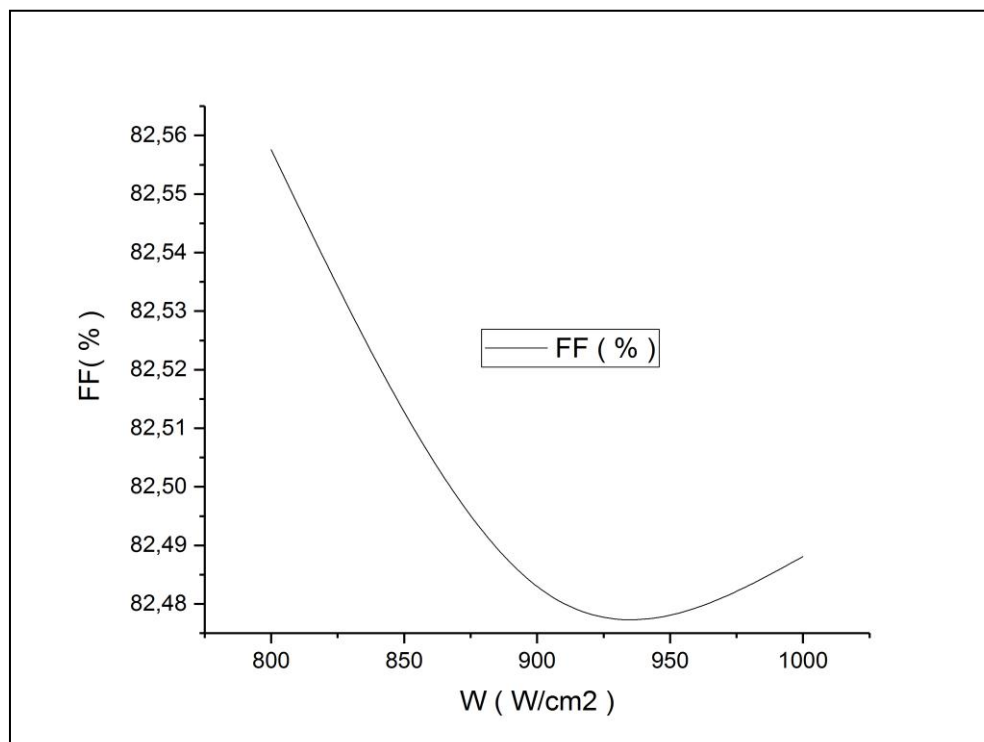


Fig. IV. 14 : Variation du Facteur de forme FF avec l'éclairement à $T=300k$

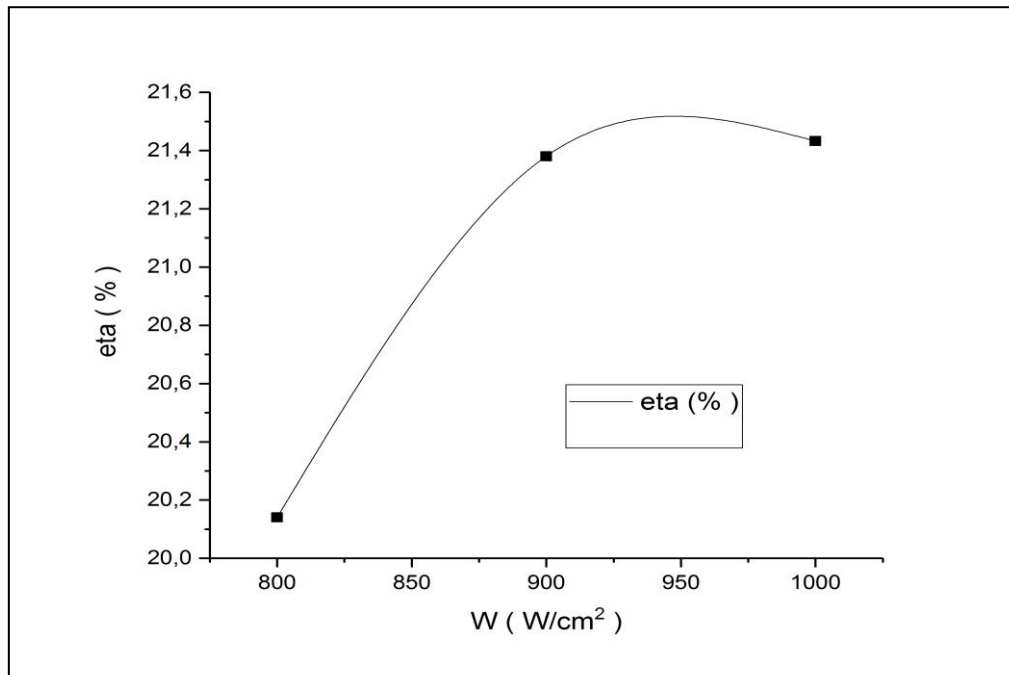


Fig. IV. 15: Variation du rendement de conversion photovoltaïque (η) Avec l'éclairement à $T=300k$

Nous remarquons sur la fig.(IV.12) que plus on augmente l'éclairement, les différents paramètres et caractéristiques s'améliorent : la tension en circuit ouvert augmente légèrement avec l'augmentation de l'éclairement, le courant de court-circuit augmente de la même manière fig.(IV.13) d'où une augmentation remarquable du rendement électrique fig.(IV. 15). En même temps on assiste à une diminution du Facteur de forme FF. fig.(IV.14).

IV.3.3. Influence de la résistance série et la conductance shunt

Les deux résistances parasites R_s et R_{sh} vont modifier la caractéristique I-V de la cellule solaire en particulier sous éclairement :

IV.3.3.1. Influence de la résistance série

L'effet de la résistance série R_s sur la caractéristique I-V de la cellule solaire sous éclairement est illustré sur la fig (IV.16) ci-dessous.

Nous avons effectué une simulation où nous avons maintenu une température et éclairement constant ($T=300k$; $G=1000W/m^2$) pour différentes résistances série (R_s). La courbe des caractéristiques va présenter des allures différentes selon R_s .

A partir de la fig (IV. 16) nous concluons que les performances d'une cellule sont d'autant plus dégradées que R_s est grande, la fig (IV. 16) montre l'influence de

la résistance série sur la caractéristique I-V. On observe que l'augmentation de la résistance série provoque une faible diminution de la tension du circuit ouvert (V_{co}), en même temps on assiste à une diminution nette de courant du court-circuit (J_{sc}).

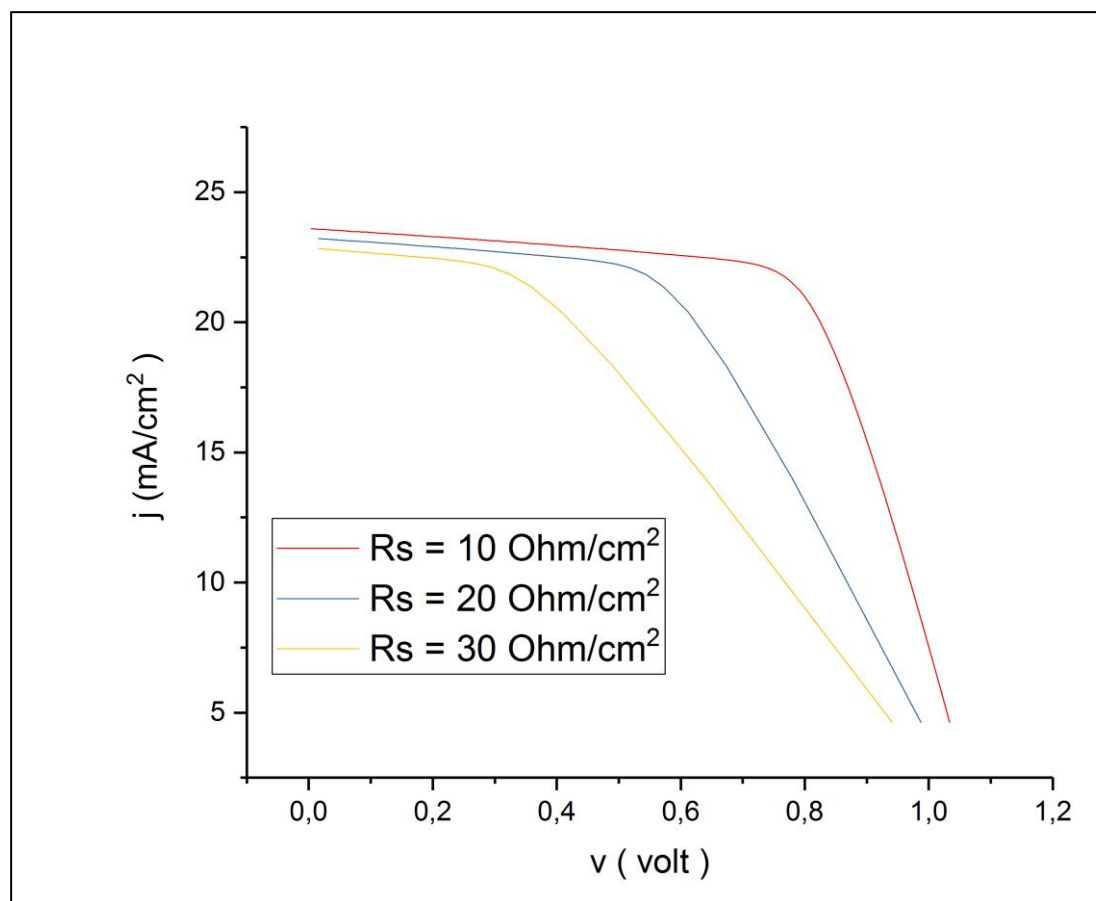


Fig.IV. 16: Influence de la résistance série sur la caractéristique I-V d'une cellule solaire à $T=300k$, $G=1000w/m^2$

Les paramètres de la structure tirés des différentes caractéristiques représentées précédemment, sont récapitulés dans le tableau

$R_s[ohm.cm^2]$	$\eta(\%)$	$V_{oc}(v)$	$J_{sc}(mA/cm^2)$	$FF(\%)$
10	16.8022	1.087129	23.60048406	65.4885
20	12.4842	1.087249	23.24462316	49.3979
30	8.9841	1.087293	22.85539406	36.1526

Tab. IV. 3: Effet de la résistance série sur les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire à base de CdTe.

Nous choisissons quelques valeurs de la résistance série pour tracer :

- La caractéristique tension de circuit ouvert V_{CO} .
- La caractéristique densité de courant de court-circuit J_{sc} .

- La caractéristique Facteur de forme FF .
- Le rendement de conversion la cellule solaire étudiée η (%).

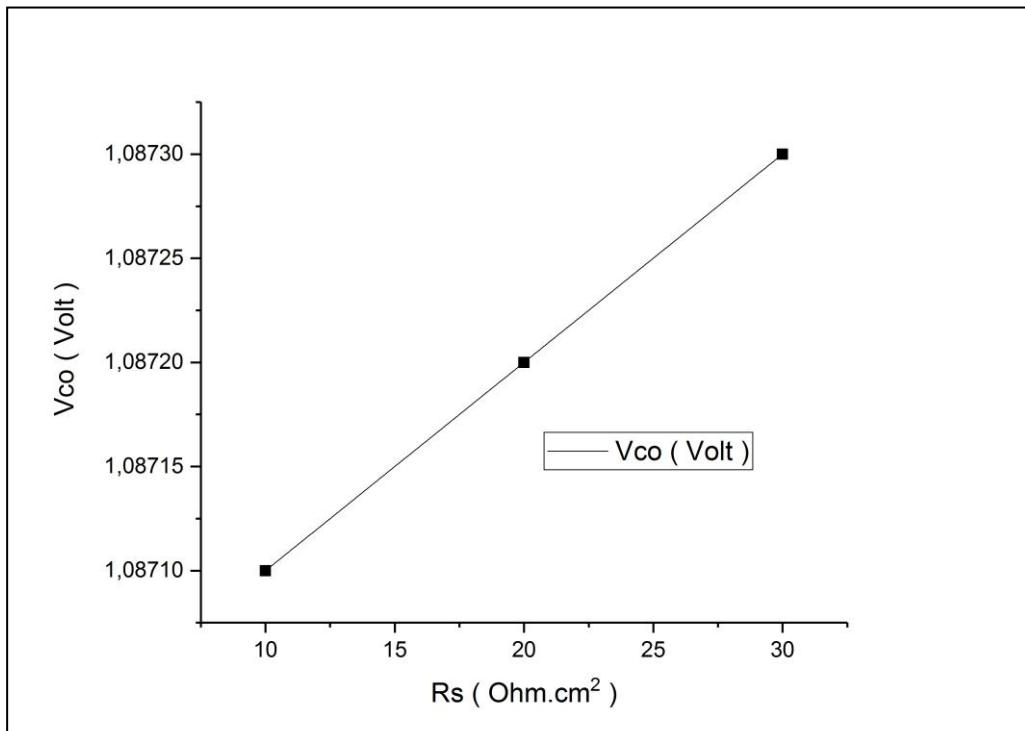


Fig. 17: Variation de la tension de circuit ouvert (V_{CO}) avec la résistance série

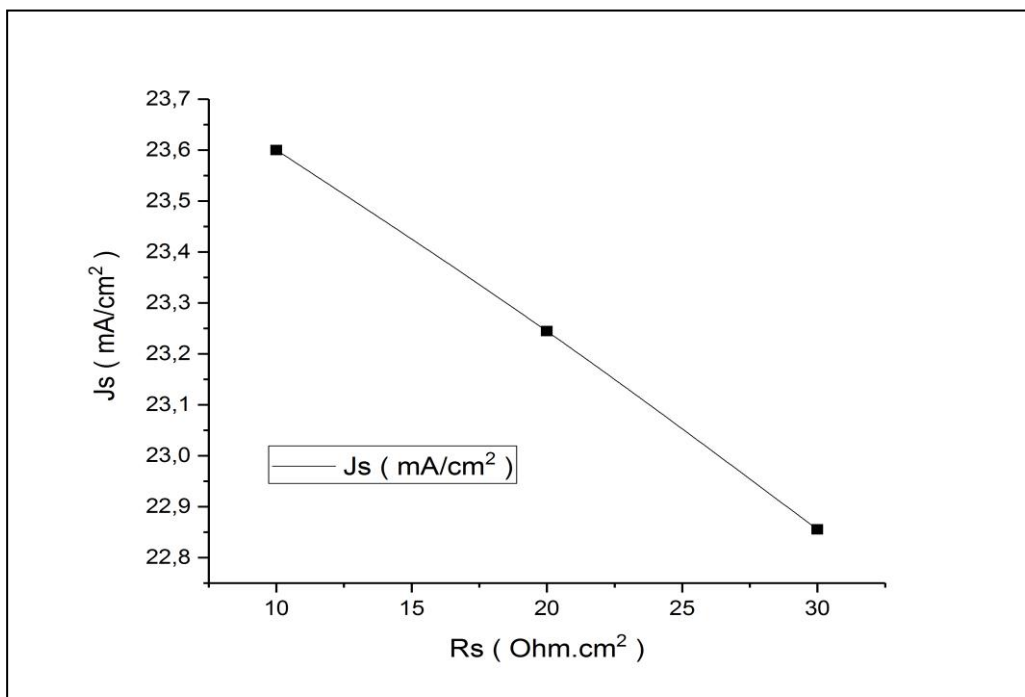


Fig. 18 : Variation de la densité de courant de court-circuit J_{sc} avec la résistance série

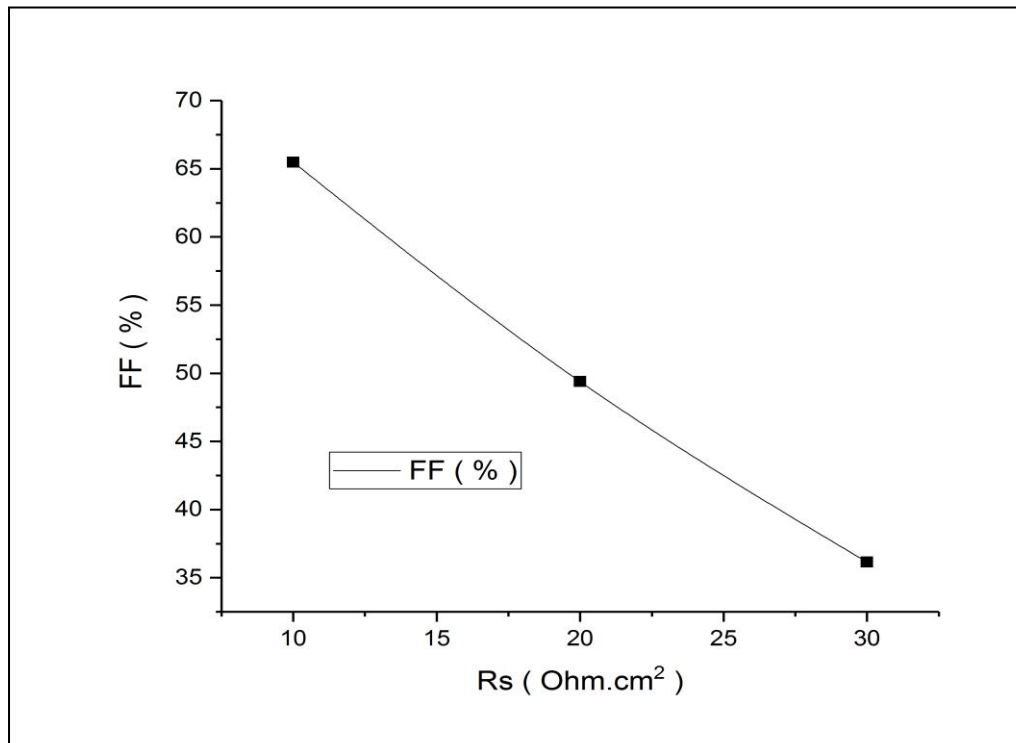


Fig.IV. 19: Variation du Facteur de forme FF avec la résistance série

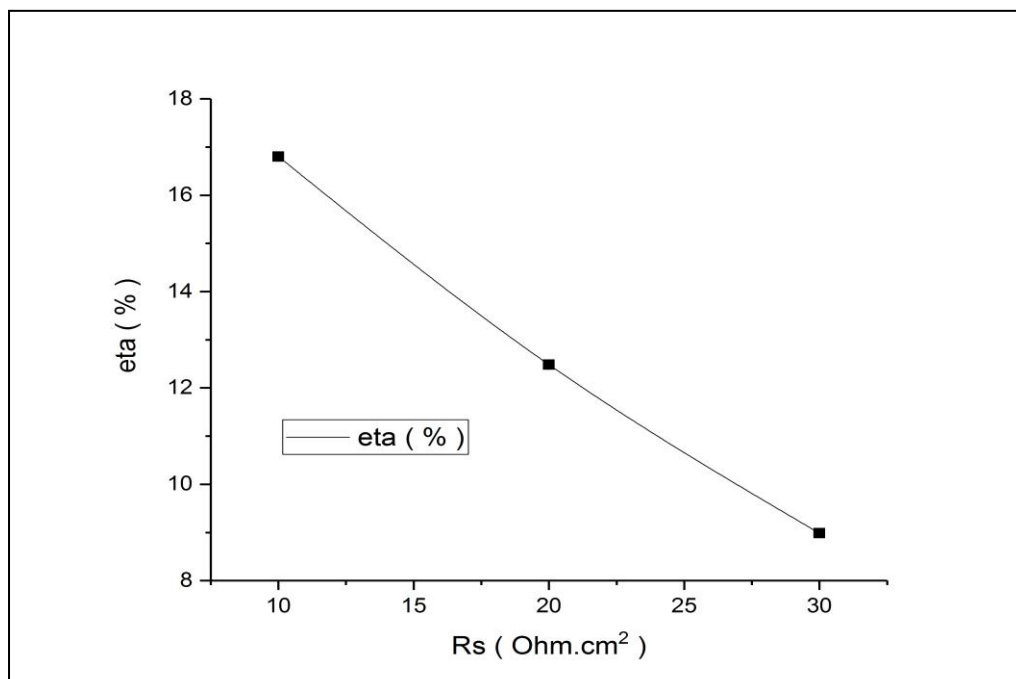


Fig. 20: Variation du rendement de conversion photovoltaïque (η) avec la résistance série

On remarque que la tension de circuit ouvert (V_{co}) et le courant du court-circuit (I_{cc}) ne sont pas Une modification importante, mais la caractéristique se déforme très rapidement sous l'effet de R_s . Cette influence se traduit par une diminution de la pente de la caractéristique I-V dans la zone où la cellule fonctionne comme une source de tension¹ lorsque R_s augmente. L'augmentation de la résistance série a un effet réductif considérable sur le point de fonctionnement et le facteur de forme (FF) de la cellule.

IV.3.3.2. Influence de la résistance shunt

Elle est considérée comme une conductance de fuite. Son effet se fait sentir surtout dans la partie génération du courant, elle agit comme s'il on devait soustraire au photo courant utile, outre le courant de diode, un courant supplémentaire proportionnel à la tension développée. Elle est généralement très élevée et elle est constatée sur la caractéristique I(V) par la présence d'une légère pente au voisinage du point de I_{cc} .

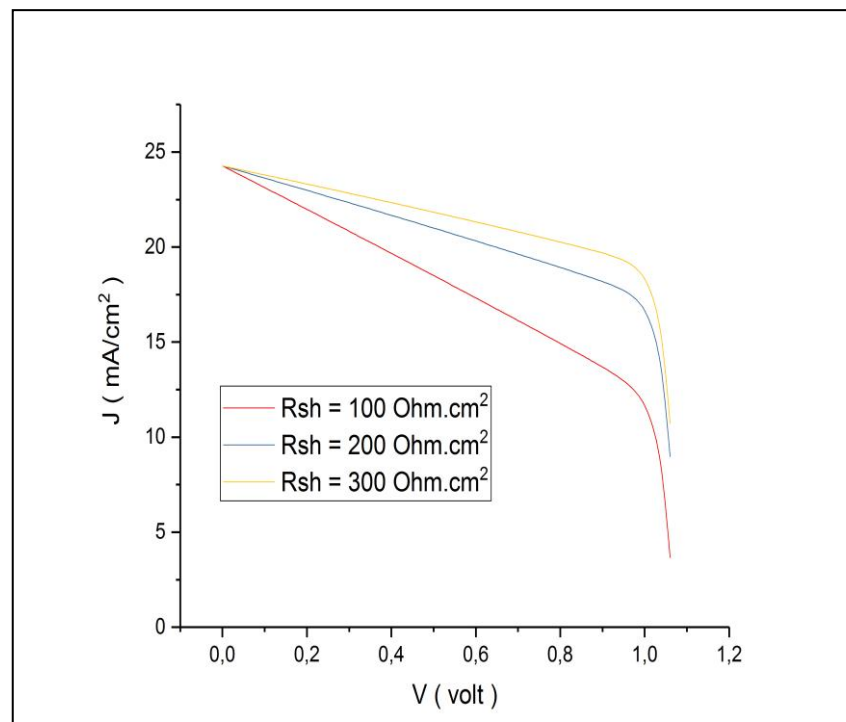


Fig. IV. 21: Effet de la résistance shunt là sur la caractéristique I(V).

La fig (IV.21) illustre l'effet de la résistance shunt R_{sh} sur la caractéristique I-V de la cellule solaire sous éclairage. On remarque que la tension de circuit ouvert (V_{co}) et le courant du court-circuit (I_{cc}) ne sont pas modifiés ; mais la caractéristique

se déforme très rapidement, cette influence se traduit par une augmentation de la pente de la caractéristique $I-V$.

Effet de la résistance shunt sur les caractéristiques électriques de la cellule :

Les paramètres de la structure tirés des différentes caractéristiques représentées précédemment, sont récapitulés dans le tableau IV -3 :

Rsh (Ohm.cm^2)	η (%)	Voc (v)	Jsc (mA/cm^2)	FF(%)
100	16.8022	1.087129	23.60048406	65.4885
200	12.4842	1.087249	23.24462316	49.3979
300	8.9841	1.087293	22.85539406	36.1526

Tab.IV. 4: Effet de la résistance shunt sur les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire à base de CdTe.

Nous choisissons quelques valeurs de la température pour tracer :

- La caractéristique tension de circuit ouvert VCO .
- La caractéristique densité de courant de court-circuit Jsc .
- La caractéristique Facteur de forme FF .
- Le rendement de conversion la cellule solaire étudiée η (%)

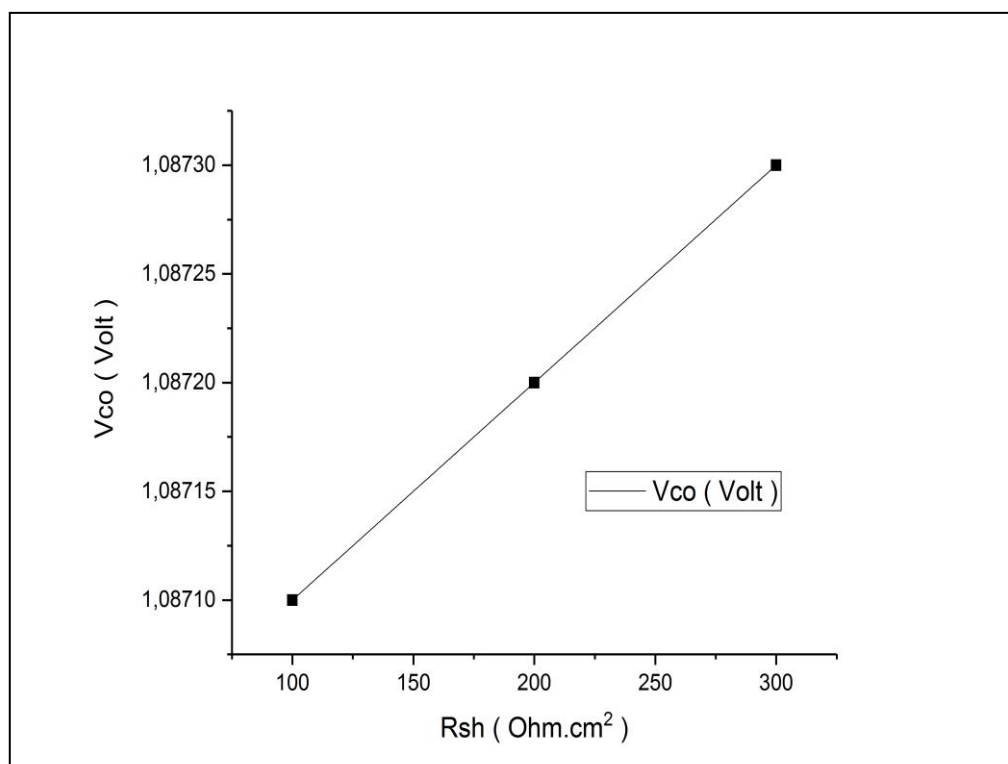


Fig.IV. 22 : Variation de la tension de circuit, ouvert (VCO) avec la résistance shunt

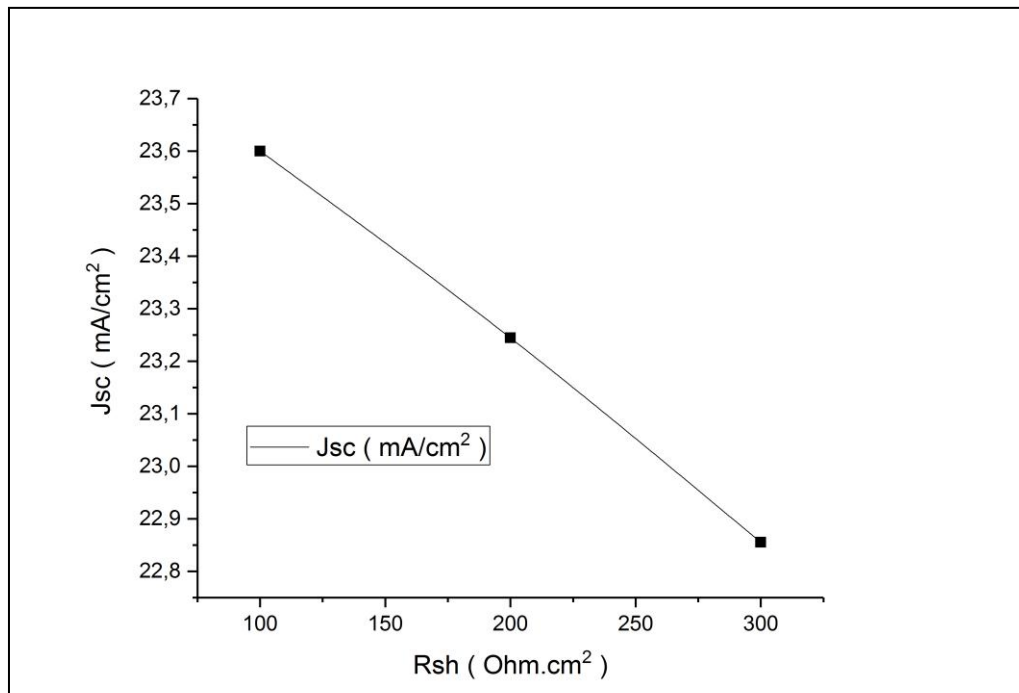


Fig.IV. 23 : Variation de la densité de courant de court-circuit J_{sc} avec la résistance shunt

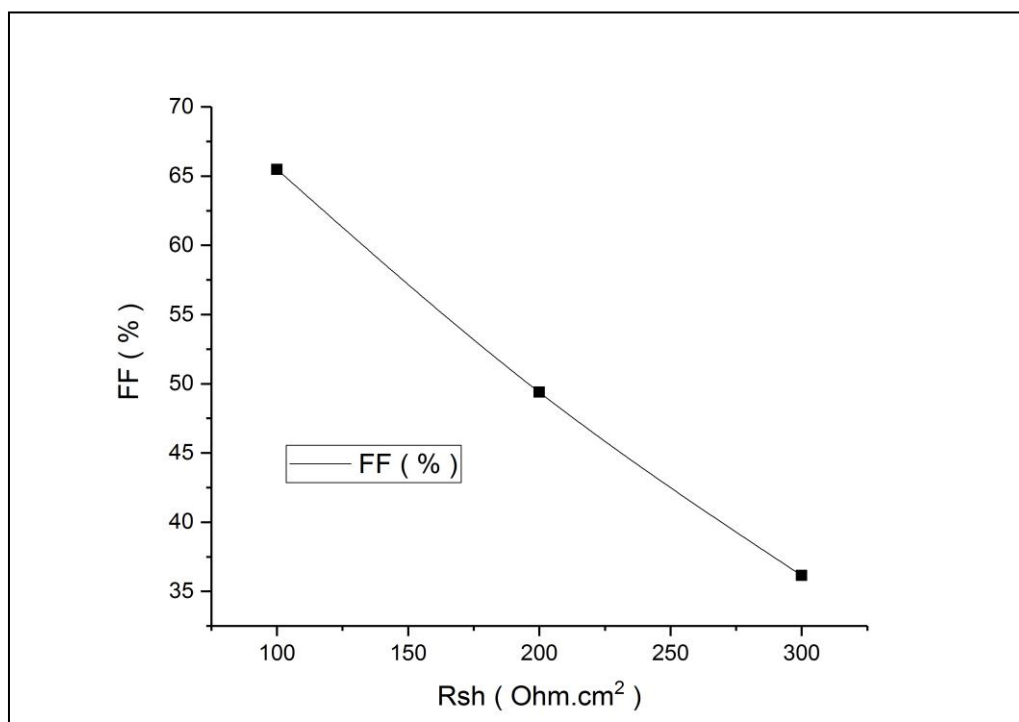


Fig.IV. 24 : Variation du Facteur de forme FF avec la résistance shunt

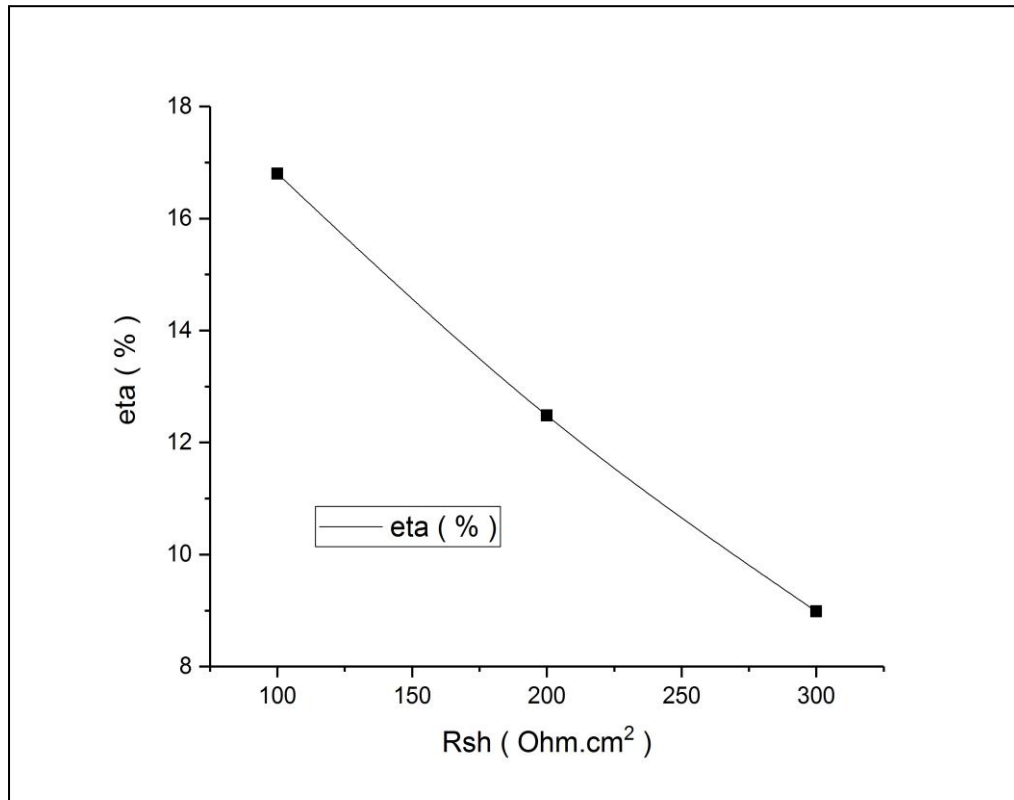


Fig. IV. 25 : Variation du rendement de conversion photovoltaïque (η) avec La résistance shunt

On observe que l'augmentation de la résistance série provoque une faible augmentation de la tension en circuit ouvert (V_{co}) fig. (IV. 22), et une diminution du Facteur de forme FF fig. (IV. 24), du rendement fig. (IV. 25). Et de courant de court-circuit J_{sc} fig. (IV. 23).

VI.4. conclusion

Les résultats que nous avons obtenus dans ce chapitre montrent bien 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.

Comme conclusion, on trouve que :

- Le courant dépend de la température puisque le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, mais la température influe négativement sur la tension de circuit ouvert et le rendement. Quand la température augmente la tension de circuit ouvert et le rendement diminue
- Nous constatons que lorsque le courant subit une variation importante, quand l'éclairement augmente le courant de court-circuit augmente, mais par contre la tension augmente légèrement quand l'éclairement augmente et une augmentation remarquable du rendement électrique.
- Nous constatons que lorsque R_s diminue la caractéristique courant – tension augmente, contrairement à la résistance shunt R_{sh} qui augmente lorsque la caractéristique courant - tension augmente



Conclusion

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

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

Dans ce travail nous avons utilisé la simulation numérique pour l'étude des caractéristiques d'une cellule solaire à base de CdTe. Nous avons aussi optimisé les paramètres physiques et électriques d'une structure spécifique de cellule solaire à base de CdTe pour obtenir un rendement de conversion électrique maximal.

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.

Nous avons effectué dans ce mémoire la simulation numérique des caractéristiques électriques, courant-tension, d'une cellule solaire en silicium cristallin par le logiciel SCAPS. De structure p-n de la cellule est faite pour constater le meilleur rendement de conversion. Pour différentes caractéristiques, on a fait également une étude de l'influence de l'éclairement et de la température et de la résistance en série et parallèle. Et du collecteur sur les paramètres de sortie de la cellule qui sont, la tension de circuit ouvert V_{oc} , le courant de court-circuit J_{sc} , le facteur de forme FF et le rendement de conversion η .

Et comme conclusion de ce travail on peut dire :

- L'éclairement et la température sont deux paramètres extrêmement importants dans le comportement des cellules solaires. Ils influent énormément sur la caractéristique I-V de la cellule solaire. Nous remarquons la baisse du rendement causée par l'augmentation de la chaleur sur la cellule et l'augmentation du rendement causée par l'augmentation de l'éclairement.
- Nous constatons que lorsque R_s diminue la caractéristique courant - tension augmente, contrairement à la résistance shunt R_{sh} qui augmente lorsque la caractéristique courant - tension augmente

Bibliographies

- [1]: 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.
- [2] K. Zanon, *Semiconductors and Semimetals*, R. K. Willardson and C. Beer, Academic Press.
- [3] K. Zanio, *Semiconductors and semimetals*, Vol. 13: Cadmium Telluride, Academic Press, New York (1978).
- [4] 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).
- [5] J. C. Phillips, *Bonds and Bands in Semiconductors*, Academic Press, New York (1973).
- [6] T. H. Myers, S. W. Edwards and J. F. Schetzina, *J. Appl. Phys.* 52, 4231 (1981).
- [7] S. A. Semiletov, *Sov. Phys. Crystallogr.* 1, 236 (1956).
- [8] L. C. Allen., *Phys. Rev.* 98, 993 (1955).
- [9] J. C. Phillips, *Phys. Rev.* 112, 685 (1958).
- [10] R. A. Smith, *Semiconductors*, 2nd Ed., Cambridge University Press, London (1979).
- [11] R. Legros, Thèse de doctorat d'état, université de Paris VI (1980).
- [12] J. T. Benhlal, K. Strauch, R. Granger and R. Triboulet, *Opt. Mater.* 12, 143 (1999).
- [13] R. Pässler, *Phys. Status Solidi B*, 216, 975 (1999).
- [14] R. Pässler, *J. Appl. Phys.* 89, 6235 (2001).
- [15] B. Segall, *Phys. Rev.* 150, 734 (1966).
- [16] J. R. Chelikowsky and M. L. Cohen, *Phys. Rev. B* 14, 556 (1976).
- [17] H. Kobori, T. Ohyama and E. Otsuka, *Solid State Commun.* 84, 383 (1992).
- [18] L. S. Dang, G. Neu and R. Romestain, *Sol. Stat. Commu.* 44, 1187 (1982).
- [19] R. Romestain, C. Weisbuch, *Phys. Rev. Lett.* 45, 2067 (1980).
- [20] L. Börnstein. *Semiconductors*, volume III/17.B. Springer, Berlin, (1999).
- [21] S.S. Li, *Semiconductor Physical Electronics*, 2 éd, New York, Springer, 2006.
- [22] N. ohkubo et al, *J. Appl. Phys. Lett* 53 (12), 16 septembre (1994)
- [23] E. Y. Gutmananas, N. Travitsky, U. Plitt and P. Hassen, *Scripta. Metall.* 13, 293 (1979)
- [24] N. ohkubo et al, *J. Appl. Phys.* 73 (2), 15 January (1993).
- [25] Y. Sayad, *Modélisation de défauts due aux traitements thermiques dans les semi-conducteurs*.
- [26] M. Brousseau, *les défauts ponctuels dans les semi-conducteurs*, (les éditions de

Physique).

- [27] J. Auleytner ; Colloque C4, supplément au n° 9, Tome 44, 313 (1983).
- [28] B. K. Tanner, X Ray diffraction topography, Pergamon international Library, Vol. 10.
- [29] B. Sieber and M. Dupuy : Colloque C4, supplément au n° 9, Tome 44, 297 (1983).
- [30] M. Inoue, I. Teramoto and S. Takayanagi: J. Applied physics, Vol. 33, n° 8, 2578 (1962).
- [31] J. P. Chamonal : Thèse de 3ème cycle, Université scientifique et Médicale, Grenoble (1982).
- [32] K. Nakagawa, Maeda and S. Takeuchi: Appl. Phys. Lett. 34 (9), 574 (1979).
- [33] K. Guergouri : étude des défauts cristallins et des propriétés physiques associées dans *CdTe* et ces alliages avec *ZnTe* et *MnTe*, thèse de doctorat, université paris 6 (1987).
- [34] M. Klimkiewicz, J. Quleytner, T. Warminski: Crystal. Res. Tech, 16, 2, 175-181 (1981).
- [35] F. A. Selim, V. Swaminathan, F. A. Kröger, Phys. Stat. Sol. A 29, 465 (1975).
- [36] D. de Nobel, Philips Res. Rep. 14, 361 (1959).
- [37] S. Adachi, Handbook on physical properties of semiconductors, Vol. 3: II-VI compound semiconductors, Kluwer Academic Publishers, Boston (2004).
- [38] F. Lévy, Traité des matériaux : Tome 18, Physique et technologie des semiconducteurs, 1^{ère} édition, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, (1995).
- [39] D.R. Wight, D. Bradley, G. Williams, M. Astles, S.J.C. Irvine, J. Cryst. Growth 59, 323 (1982).
- [40] J. Gautron and P. Lemasson, J. Cryst. Growth 59, 332 (1982).
- [41] R. Triboulet and P. Siffert, CdTe and Related Compounds, Physics, Defects, Hetero- and Nano- Structures, Crystal Growth, Surface and Application, part1 : Physics, CdTe-Based Nanostructures, Semi magnetic Semiconductors, and Defects ,1ère édition, Elsevier, (2010).
- [42] S. P. Albright, V. P. Singh, J. F. Jordan, Sol. Cells 24, 43 (1988).
- [43] K. Mitchell, A. L. Fahrenbruch, R. H. Bube, J. Appl. Phys. 49, 829 (1977).
- [44] M. Chu, A. L. Fahrenbruch, R.H. Bube, J. F. Gibbons, J. Appl. Phys. 49, 322 (1978).
- [45] D.R. Wight, D. Bradley, G. Williams, M. Astles, S. J. C. Irvine, J. Cryst. Growth 59, 323 (1982).

- [46] D. R. Wight, D. Bradley, G. Williams, M. Astles, S. J. C. Irvine, *J. Cryst. Growth* 59, 323
- [47] S. Adachi, *Optical Constants of Crystalline and Amorphous Semiconductors: Numerical Data and Graphical Information*, Kluwer Academic Publishers, Boston (1999).
- [48] A. N. Pikhtin and A. D. Yaskov, *Sov. Phys. Semicond.* 12, 622 (1978).
- [49] K. Zanio, *semiconductors and semimetals*, R. K. Willardson and C. Beer, Academic Press New York (1978).
- [50] H. Hartmann, R. Mach and B. Sell, *Current topics in materials science*, Vol. 9, E. Kaldis north Holland (1982).
- [51] F. Kurker, " Micro fabrication based design and simulation of hétérojunction solar cell", MSc Thesis. INAS, çukurova university, ADA
- [52] M. Orgeret, '*Les piles Solaires, le Composant et ses Applications*', Edition Masson,(1985)
- [53] Ozge TUZEN, « Polycrystalline Silicon Films by Aluminum Induced Crystallization and Epitaxy: Synthesis, Characterizations and Solar Cells » Thèse de doctorat à l'Université de Strasbourg, 2009.
- [54] CHAPIN D.M., FULLER C.S., PEARSON G.L. A new silicon pn junction photocell for converting solar radiation into electrical power. *J. Appl. Phys.*,1954,Vol. 25, pp. 676-677
- [55] S. M. Sze, *Physics of Semiconductor Devices* (John Wiley & Sons, 1981), 2nd ed.
- [56] M. A. Green, *Solar Cells* (Prentice Hall, Englewood Cliff, NJ, 1982).
- [57] A. Luque and S. Hegedus, eds., *Handbook of Photovoltaic Energy Conversion and Engineering* (John Wiley & Sons Ltd, Chichester, West Sussex, England,2003).
- [58] W. Shockley , H.J. Queisser. « *Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells* ». *J. Appl. Phys*, 32 :510–519, 1961.
- [59] Jérôme Damon-Lacoste. « *Vers une ingénierie de bandes des cell*
- [60]: MARTINUZZI S., PALAIS O., PASQUINELLI M. and FERRAZZA F. N-type multicrystalline silicon wafers and rear junction solar cells. *The European Physical Journal – Applied Physics*, 2005, vol. 32, pp. 187-192.*ules solaires à hétérojonctions a-Si :H/c-Si .rôle prépondérant de l'hydrogène* ».2007
- [61] : Réalisation d'un système de pilotage d'un simulateur solaire : mesures I-V et extraction des paramètres- laboratoire de recherche URMER

[62] : L. Protin, S. Astier, "Convertisseurs photovoltaïques", Techniques de l'ingénieur, Réf D3360 – Vol DAB, <http://ti.idm.fr>

[63] : Dib Wassila: «Modélisation des structures photovoltaïques : aspects fondamentaux et appliqués», Thèse de Doctorat, 2010, Université AbouBekr Belkaid Tlemcen

[64] : F. Zouache, ‘‘Etude de la concentration solaire sur les Performances des systèmes Photovoltaïques’’, Thèse de magister, Université Mentouri, Constantine, 2009.

[65]: Alex Niemegeers, Marc Burgelman, Koen Decock, Johan Verschraegen, Stefaan Degrave, ‘‘SCAPS Manual’’, june 2015.

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** semble prometteur.

Dans ce travail de modélisation et de simulation

- ❖ Nous avons présenté un rappel sur les propriétés physiques du CdTe
- ❖ 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 ainsi que les paramètres limitant leur rendement.
- ❖ Nous avons effectué dans ce mémoire la simulation numérique des caractéristiques électriques, courant-tension, d'une cellule solaire en CdTe par le logiciel SCAPS. Den structure n-p de la cellule est faite pour Constaté le meilleur rendement de conversion. Pour Différentes caractéristique, on a fait également une étude de l'influence de l'éclairement et de la température et de la résistance en série et parallèle. Et du collecteur sur les paramètres de sortie de la cellule qui sont, la tension de circuit ouvert V_{CO} , le courant de court-circuit I_{SC} , le facteur de forme FF et le rendement de conversion η .

Et comme conclusion de ce travail on peut dire

- ❖ L'éclairement et la température sont deux paramètres extrêmement importants dans le comportement des cellules solaires. Ils influent énormément sur la caractéristique I-V de la cellule solaire. Nous Remarqué la baisse du rendement causée par l'augmentation de la chaleur sur la cellule et l'augmentation du rendement causée par l'augmentation de l'éclairement.
- ❖ Nous constatons que lorsque R_s diminue la caractéristique courant - tension augmente, contrairement à la résistance shunt R_{sh} qui augmente lorsque la caractéristique courant - tension augmente

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 seems promising.

In this work of modeling and simulation

- ❖ We presented a reminder of the physical properties of CdTe
- ❖ We recalled some idea of solar radiation and its application in the photovoltaic field. We then explained how photovoltaic cells and their main characteristics and parameters limiting their performance.
- ❖ We conducted in this memory the numerical simulation of electrical characteristics, current-voltage, a solar cell of CdTe by the SCAPS software. Den n-p structure of the cell is made to - Find the best conversion efficiency. To Different characteristic, also made a study of the influence of light and temperature and resistance in series and parallel. And the collector of the cell output parameters is, the open circuit voltage V_{CO} , the short-circuit current I_{SC} the form factor FF and conversion efficiency η .

And as a conclusion of this work we can say

- ❖ The illumination and temperature are two extremely important factors in the behavior of solar cells. They greatly influence the characteristic I-V solar cell. We noticed the decrease in yield caused by the increase of heat on the cell and increasing the efficiency caused by the increase of the illumination.
- ❖ We find that when R_s decreases the characteristic current - voltage increases, unlike the shunt resistor R_{sh} which increases as the characteristic current - voltage increases

ملخص

في السياق العام للاستخدام المتنوع للموارد الطبيعية الرجوع الى الطاقة المتجددة و بشكل خاص الطاقة الشمسية الكهروضوئية اصبح اقوى ولهذا تطوير جيل جديد من الخلايا الضوئية القائمة على اساس (CdTe) تبدو واعدة في الواقع. و في هذه النمذجة و المحاكاة

- ❖ قدمنا تذكير حول الخواص الفيزيائية ل (CdTe)
- ❖ أشرنا الى فكرة الاشعاع الشمسي وتطبيقاتها في مجال الخلايا الضوئية وخصائصها الرئيسية
- ❖ اجرينا في هذه المذكرة محاكاة عددية للخصائص الكهربائية للخلايا الشمسية من (CdTe) ذات تروب n-p بواسطة برنامج SCAPS. وذلك لهدف:
 - العثور على أفضل مردود التحول. من اجل خصائص مختلفة كما قدمنا دراسة تأثير الضوء ودرجة الحرارة و المقاومة على التسلسل وموازية. وجمع من معلومات حول خصائص الخلية الجهد على دارة مفتوحة V_{CO} التيار دارة قصر I_{SC} معامل الشكل FF ومردود التحويل η

وكخاتمة لهذا العمل يمكننا القول

- ❖ الاضاءة ودرجة الحرارة هما عاملان مهمان للغاية في سلوك الخلايا الشمسية. انها تأثر بشكل كبير على الخلايا الشمسية المميزة I-V لاحظنا انخفاض في المردود الناجم عن ارتفاع حرارة على الخلية وزيادة في المردود الناجمة عن زيادة الاضاءة
- ❖ نجد أنه عند انخفاض المقاومة على التسلسل R_s تتحسن مميزات الخلية تيار-جهد على عكس المقاومة التحويلة R_{sh} كلما زادت مميزات الخلية تيار-جهد تزيد.