

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Hadj Lakhdar de Batna

Faculté de Technologie

Département d'Electronique

Mémoire

Présenté Pour l'obtention du diplôme de

MAGISTER EN ELECTRONIQUE

Option:

Instrumentation

Présenté par

HOUDA CHABANE

Ingénieur d'état en Electronique

THEME :

ETUDE D'UNE CELLULE SOLAIRE A BASE DE STRUCTURE PIN

Soutenu-le : 10 /03 /2015

Devant le jury :

Dr. MAHAMDI Ramdane	Prof.	Université de Batna	Président
Dr. BENHAYA Abdelhamid	Prof.	Université de Batna	Rapporteur
Dr. TELIA Azzedine	Prof.	Université de Constantine	Examineur
Dr. DIBI Zohir	Prof.	Université de Batna	Examineur
Dr. DJEFFAL Fayçal	Prof.	Université de Batna	Examineur

2014 / 2015

SOMMAIRE

Sommaire	I
Résumé	V
Remerciements	VI
Dédicaces	VII
Liste des figures	VIII
Liste des tableaux	IX
Liste des symboles	X
Introduction générale	1
Chapitre1 Les énergies renouvelables et matériaux photovoltaïques	
1.1. Introduction	4
1.2. Utilisation de l'énergie solaire	6
1.2.1. Utilisation passive de l'énergie solaire	6
1.2.2. Utilisation active de l'énergie solaire	6
1.2.3. La production d'électricité	6
1.2.3.1. La conversion photovoltaïque	6
1.2.3.2. La conversion thermodynamique	7
1.3. Les composantes de la lumière solaire	7
1.3.1. Le rayonnement direct	8
1.3.2. Le rayonnement diffus	8
1.3.3. Le rayonnement dû à l'albédo	8
1.4. Le spectre solaire	9
1.5. L'intensité du rayonnement	10
1.6. Notion de la Masse d'air	10
1.7. Matériaux photovoltaïques	11
1.7.1. La bande interdite	11
1.7.2. Interaction rayonnement / matière	13
1.7.2.1. Transitions radiatives	13
1.7.2.1.1. Absorption	13
1.7.2.1.2. Emission spontanée	13
1.7.2.1.3. Emission stimulée	13
1.7.2.2. Transition directe	14
1.7.2.3. Transition indirecte	14
1.7.3. La recombinaison	14
1.7.3.1. Recombinaison des porteurs en excès	14
1.7.3.2. Mécanismes de recombinaisons	15
1.7.3.3. Vitesse de recombinaison en surface	15
1.7.4. Création de porteurs en excès	16
1.7.4.1. Création de porteurs en excès par Photoexcitation	16
1.7.4.2. Création de porteurs en excès par Injection électrique	19
1.7.4.3. Création de porteurs en excès par d'Autres processus	20
1.8. Conclusion	20
Chapitre2 Les cellules photovoltaïques	
2.1. Introduction	21
2.2. L'Effet Photovoltaïque	21
2.2.1. Les avantages du photovoltaïque	21

2.2.2. Principe de la conversion photovoltaïque	22
2.3. La cellule solaire	23
2.3.1. Principe de fonctionnement d'une cellule solaire	23
2.3.1.1. L'Absorption des photons	23
2.3.1.2. La Création de paires électrons/trous	24
2.3.1.3. La Collecte	24
2.3.2. Modes de fonctionnement	25
2.3.2.1. Le mode photoconducteur	25
2.3.2.2. Le mode photovoltaïque	25
2.4. La Caractérisation électriques	25
2.4.1. La caractéristique courant tension	26
2.4.2. Le photocourant	27
2.4.2.a) Le courant dans la région quasi-neutre N	27
2.4.2.b) Le courant dans la région quasi-neutre P	27
2.4.2.c) Le courant dans la région de déplétion	27
2.4.2.d) Le photocourant total	28
2.4.3. Le courant d'obscurité	28
2.4.3.a) Le courant d'obscurité total	28
2.4.3.b) Le courant d'injection (diffusion)	28
2.4.3.c) Le courant de recombinaison	29
2.4.3.d) Le courant tunnel	29
2.4.4. La réponse spectrale	29
2.5. Paramètres d'une cellule solaire	30
2.5.1. Paramètres physiques	30
2.5.2. Paramètres photovoltaïques	31
2.6. Circuit équivalent d'une cellule solaire	34
2.6.1. Le modèle idéal	34
2.6.2. Le modèle réel	34
2.7. Différentes structures de cellules solaires	35
2.7.1. La structure à jonction PN	35
2.7.2. La structure Schottky	35
2.7.3. La structure MIS	35
2.7.4. La structure à jonction PIN	36
2.7.4. Structure à avalanche	36
2.8. Différentes couches d'une cellule solaire à jonction PN	37
2.8.1. Texturation de surface	37
2.8.2. Couche anti-reflet	37
2.8.3. La Couche BSF	38
2.8.4. Les Contacts face avant et arrière	38
2.9. Conclusion	39
Chapitre3	La cellule solaire à structure PIN
3.1. Introduction	40
3.2. La structure PIN de base	40
3.3. Principe de fonctionnement de la cellule solaire à structure PIN	41
3.4. Types de structure PIN	42
3.4.1. Selon le dopage de la zone intrinsèque	42
3.4.2. Selon la technologie de fabrication	43

3.4.2.1. Les cellules solaires à jonction PIN à silicium amorphe	43
3.4.2.2. Les cellules solaires à jonction PIN à silicium microcristallin (mc-Si)	45
3.4.2.3. Cellules solaires PIN organiques	46
3.4.2.4. Cellules PIN sur nanofils de Si	48
3.5. La physique de la jonction PIN	49
3.5.1. La jonction PIN à l'équilibre thermique	49
3.5.1.1. La barrière de potentiel	49
3.5.1.2. Le comportement en inverse d'une jonction PIN	50
3.5.1.5. Le courant de fuite	51
3.5.1.6. La capacité de zone déserte	52
3.5.1.7. La tension d'avalanche	53
3.5.2. Le comportement en direct	54
3.5.2.1. Bas niveau	54
3.5.2.2. Profils $n(x)$ et $p(x)$ dans la zone I	55
3.5.2.3. Calcul de la caractéristique $J(V)$	56
3.5.2.4. Calcul de V	57
3.5.2.5. temps de transit des trous	58
3.5.2.6. Equation de diffusion ambipolaire	58
3.6. Caractéristique de la cellule solaire à structure PIN	59
3.6. 1. Caractéristique $I(V)$ En obscurité	59
3.6. 2. Caractéristique $I(V)$ d'une cellule PIN illuminée	59
3.7. les avantages des jonctions PIN	59
3.8. Conclusion	60
Chapitre4	Simulation et résultats
4.1. Introduction	61
4.2. Présentation d'Atlas	61
4.3. Les commandes d'Atlas	62
4.4. Spécification de la structure	62
4.4.1. Présentation de la structure	62
4.4.1.1. Mesh	63
4.4.1.2. Region	64
4.4.1.3. Electrodes	64
4.4.1.4. Doping	65
4.4.2. Spécification des modèles des matériaux	65
4.4.2.1. Material	65
4.4.2.2. Models	66
4.4.2.3. Beam	66
4.4.3. Sélection de la méthode numérique	66
4.4.4. Spécification des solutions	66
4.5. Etapes de simulation	67
4.6. Présentation des résultats	68
4.6.1. Courbe $I(V)$ type de la cellule PN	68
4.6.1.1. Courbe de puissance de la cellule PN	70
4.6.1.2. $I(V)$ en fonction de l'intensité lumineuse	71
4.6.2. Courbe $I(V)$ type de la cellule PIN	71
4.6.2.1. Effet de l'irradiance sur la caractéristique $I(V)$ de la cellule solaire PIN	73
4.6.2.2. Comparaison entre $I(V)$ des cellules PN et PIN	74

4.6.3. L'effet de l'épaisseur de la couche intrinsèque sur les paramètres de la cellule	75
4.6.3.1. L'effet de l'épaisseur de la zone intrinsèque sur le rendement de la cellule PIN	75
4.6.3.2. L'effet de l'épaisseur de la zone intrinsèque sur I(V) de la cellule PIN	76
4.6.4. L'effet de l'émetteur sur les paramètres de la cellule PIN	77
4.6.4. 1.L'effet de la Variation du dopage de l'émetteur	77
4.6.4.2. L'effet de la Variation de l'épaisseur de l'émetteur	78
4.6.5. L'effet de la température	79
4.6.6. L'effet de la couche anti réflexion	80
4.6.7. La réponse spectrale	82
4.6.7.1. La réponse spectrale en fonction de l'épaisseur de la zone I	82
4.6.7.2. Comparaison	83
4.8. Conclusion	84
Conclusion générale	85
Bibliographie	87
Annexe	90

Résumé

La cellule solaire en silicium cristallin est restée le leader du marché des cellules solaires pour le dernier demi siècle. Malgré des années de recherche d'autres matériaux, cette technologie (c-Si) est toujours dominante à plus de 80% des ventes au niveau mondial. Le rendement de la cellule solaire dépend des photons absorbés et des paires électrons-trous générés dans la zone de charge d'espace, qui doit avoir une valeur optimale pour que le photocourant soit essentiellement dû à la photogénération de porteurs dans cette zone. Il est donc judicieux d'augmenter artificiellement l'épaisseur de la zone de charge d'espace en intercalant une couche intrinsèque I entre P et N, ce qui donne une cellule solaire à base d'une structure PIN.

Dans ce contexte, nous avons étudiés cette cellule par la simulation numérique à deux dimensions sous éclairage avec un spectre AM1.5 effectuées sous SILVACO/ATLAS. On a défini une cellule PN de référence avec un ensemble de paramètres physiques, on a analysé leurs influences sur le rendement de conversion. Ensuite, on a intercalé une couche intrinsèque I entre les deux régions N et P, pour obtenir une cellule à structure PIN qu'on a étudié à l'aide du logiciel TCA-Silvaco pour déterminer l'influence de différents paramètres, tels que le dopage de l'émetteur, la température, l'intensité du flux lumineux, l'épaisseur de la zone intrinsèque I et la couche antireflet, sur le rendement de conversion.

Summary

Crystalline silicon solar cell remained the market leader for the last half century. Despite years of research of other materials, this technology (c-Si) is always dominant over 80% of worldwide sales. The efficiency of the solar cell depends on the absorbed photons and the electron-hole pairs generated in the space charge region, the thickness of which has to be well chosen so that the photocurrent is essentially due to the photogénération of carriers in this region. It is therefore wise to artificially increase the thickness of the space charge region by interposing an intrinsic layer I between the regions P and N, to obtain a PIN solar cell.

In this context, we studied the operation of this cell by numerical simulation in two dimensions under illumination with an AM1.5 spectrum performed under SILVACO / ATLAS. We define a reference PN cell with a set of physical parameters, analyzing their influence on the conversion efficiency. Then, an intrinsic layer I is inserted between N and P regions, to obtain a PIN solar studied by the help of TCA-Silvaco to determine the effect of different parameters such as the doping of the emitter, the temperature, the intensity of the irradiance, the thickness of the intrinsic region, the nature and the thickness of the antireflective layer.

Remerciements

Je remercie en premier lieu notre Dieu le tout puissant de m'avoir accordé la volonté et la puissance pour terminer ce travail.

Je remercie Monsieur Mahamdi Ramdane, Professeur au département d'Electronique, Université Hadj Lakhdar de Batna, pour l'intérêt qu'il a porté à mon travail et de m'avoir fait l'honneur de présider le jury de soutenance.

Mes remerciements à Monsieur Benhaya Abdelhamid, Professeur au département d'Electronique, Université Hadj Lakhdar de Batna, pour avoir encadré mon travail.

Mes remerciements à Monsieur Telia Azzeddine, Professeur au département d'Electronique, Université Mentouri de Constantine, de m'avoir honoré par sa présence au jury en tant qu'examineur.

Mes remerciements à Monsieur Dibi Zohir, Professeur au département d'Electronique, Université Hadj Lakhdar de Batna, de m'avoir honoré par sa présence au jury en tant qu'examineur.

Il m'est agréable d'exprimer ma profonde reconnaissance à Monsieur Djeffal Faiçal, Professeur au département d'Electronique, Université Hadj Lakhdar de Batna, de m'avoir honoré par sa présence au jury en tant qu'examineur et pour son orientation et ses conseils.

Je tiens à remercier Monsieur Mokhtari, le chef du département de l'électronique, Université Hadj Lakhdar de Batna, pour avoir été très compréhensif et coopératif pour que je puisse avancer dans mes études et mon mémoire de magister.

Un grand merci pour les étudiants de magister qui ont été d'une grande aide dans la programmation avec Silvaco Atlas, surtout Mr. Ferhati Hichem .

Mes derniers remerciements vont à ma famille, mes amies et les collègues de travail qui m'ont encouragé et donné la force de passer les moments difficiles.

DEDICACES

A mes très chers parents qui m'ont toujours soutenu

dans les bons et les mauvais moments de ma vie,

A mon petit soleil, à mon très cher fils Moumene Abderrahmane,

A ma très chère sœur qui a toujours été là pour m'encourager,

A mes chères nièces: Ilhem, Amina et Yasmine,

A mes très chers frères et à ma belle sœur,

A toutes mes amies et cousines,

A tous les professeurs qui m'ont enseigné durant toutes les étapes

scolaires de ma vie, un grand merci.

LISTE DES FIGURES

Numéro	Le titre	Page
Fig 1.1	L'énergie incidente à la surface de la terre en kWh/m ² par an	4
Fig 1.2-a	La centrale solaire en Californie (SEGS-Kramer Junction) .	5
Fig 1.2-b	La centrale solaire de Ghana	5
Fig 1.2-c	La centrale solaire de Kagoshima-JAPAN	5
Fig 1. 3.a	Systèmes solaire à concentration	7
Fig 1. 3.b	Système solaire avec moteur stirling	7
Fig 1.4	Les 3 différents types de rayonnement solaire	8
Fig1.5	Le spectre solaire	9
Fig1.6	l'énergie solaire en fonction des longueurs d'ondes	9
Fig1.7.a	L'irradiance en fonction des longueurs d'ondes	10
Fig1.7.b	L'irradiance en fonction des l'énergie	10
Fig1.7.c	L'Air Mass	11
Fig1.8	Les rayonnements et semiconducteurs	12
Fig1.9	Courbes de dispersion. a) Electrons dans un semiconducteur à gap direct. b) Electrons dans un semiconducteur à gap indirect.	13
Fig1.10	Mecanismes de recombinaisons	15
Fig1.11	La photoexcitation	17
Fig1.12	La photogénération et taux de génération en fonction du gap	18
Fig1.13	Taux l'absorption de photon dans un semiconducteur	19
Fig 2.1	Structure de base d'une cellule solaire	23
Fig 2.2	a)photogénération dans la cellule solaire b) diagramme d'énergie	24
Fig 2.3	La courbe caractéristique courant tension d'une cellule solaire	26
Fig 2.4	Caractéristique I-V dans le nouveau repère.	26
Fig 2.5	Dimensions de la cellule solaire	28
Fig 2.6	La Réponse Spectrale d'une cellule solaire	30
Fig 2.7	Caractéristiques I(V) et paramètres I _{cc} ,V _{oc}	31
Fig 2.8	Rendement fonction de gap	33
Fig 2.9	Schéma électrique équivalent d'une cellule solaire idéale	34
Fig 2.10	Schéma électrique équivalent d'une cellule solaire réelle	34
Fig 2.11	I(V) pour plusieurs valeurs de la résistance série	37
Fig 2.12	La structure d'une cellule photovoltaïque standard	38
Fig 3.1	Structure de base d'une cellule solaire pin a) entrée de lumière top b) entrée de coté	41
Fig 3.2	Principe de fonctionnement d'une cellule solaire à structure PIN	41
Fig 3.3	Possibilités de dopage de la zone intrinsèque	42
Fig 3.4	Cellule PIN monojonction	43
Fig 3.5	Cellules solaires à jonction PIN à silicium amorphe a)double jonction b) triple jonction	44
Fig 3.6	Cellules solaires à jonction PIN à silicium microcristallin (mc-Si)	45
Fig3.7	Structure de la cellule en silicium « couche mince ».	45
Fig 3.8	Cellule HIT	46
Fig 3.9	Structure de type jonction pin organique à couche mince d'une cellule solaire	47
Fig 3.10	Cellules PIN sur nanofils de Sillicium.	48
Fig3.11	a) le profil de densité de charge $\rho(x)$ pour PN e) pour PIN b) le profil champ pour jonction PN f) pour une jonction PIN c) le profil potentiel électrostatique pour PN g) pour une jonction PIN d) diagramme de bandes pour PN h) pour une jonction PIN	50
Fig 3.12	(a) : Vue en coupe d'une diode semi-infinie PiN sous polarisation inverse, (b) :Profil du champ dans une diode PIN	50
Fig3.13	Tension de claquage en fonction de la concentration de dopants et de l'épaisseur de la zone intrinsèque pour Si	51

Fig3.14	Zones déplétées dans la diode à l'équilibre thermodynamique	52
Fig3.15	schéma équivalent de la diode PIN à l'équilibre	52
Fig3.16	Zones déplétées dans la diode pour une tension inverse appliquée supérieure à la tension de perçage et schéma équivalent correspondant	53
Fig 3.17	Les tensions de la jonction PIN	54
Fig 3.18	a : diodes PIN courtes b : diodes PIN longues	55
fig 3.19	La barrière de potentiel dans les diodes	60
Fig 4.1	Entrées et sorties d'Atlas	61
Fig 4.2	Groupe de Commandes de Silvaco ATLAS	62
Fig 4. 3	Structure de la cellule solaire à jonction PN conventionnelle en silicium	63
Fig 4.4	Définition du maillage avec ATLAS	63
Fig 4.5	Définition des régions avec ATLAS	64
Fig 4. 6	Les Electrodes Réalisées	64
Fig 4.7	Dopage effectuée de la structure	65
Fig 4.8	Caractéristique I(V) de la cellule solaire conventionnelle	69
Fig 4. 9	Courbe de puissance de la cellule PN	69
Fig4.10	Caractéristique I(V) de la cellule PN en fonction de l'intensité lumineuse	71
Fig4.11	la structure de la cellule PIN	71
Fig 4.12	Caractéristique I(V) de la cellule PIN	72
Fig 4.13	Courbe de puissance de la cellule PIN	72
Fig 4.14	Caractéristique I(V) de la cellule PIN en fonction de l'intensité lumineuse	73
Fig 4.15	Comparaison des I(V) des cellules PN et PIN a- en obscurité b- en illumination	74
Fig 4.16	L'effet de l'épaisseur de la zone intrinsèque a- sur le rendement, b- sur le courant I_{cc}	75
Fig 4.17	L'effet de l'épaisseur de la zone intrinsèque la caractéristique I(V) de la cellule PIN	76
Fig 4.18	L'effet du dopage de l'émetteur sur la caractéristique I(V) de la cellule PIN	77
Fig 4.19	L'effet du dopage de l'émetteur sur : a- le I_{cc} de la cellule PIN b- le rendement de la cellule PIN	78
Fig 4.20	L'effet de la température sur I(V)	79
Fig 4.21	L'effet de la CAR sur I(V)	80
Fig 4.22	L'effet de l'épaisseur de la CAR	81
Fig 4.23	La réponse spectrale de la cellule PIN pour $W_i=0.1\mu m, 0.5\mu m, 1\mu m, 5\mu m, 10\mu m$.	82
Fig 4.24	Les réponses spectrales des cellules PN et PIN	83
Fig 4.25	Les réponses spectrales des cellules PN et PIN(différentes W_i)	83

LISTE DES TABLEAUX

Numéro	Le titre	Page
Tableau1.1	Bande interdite de quelque semiconducteurs	12
Tableau3.1	Matériaux et gap et ondes absorbées par les structures PIN	44
Tableau4.1	<i>Paramètres de simulation du silicium à 300 K.</i>	66
Tableau4.2	paramètres de la cellule de référence utilisés	68
Tableau4.3	Paramètres simulés d'une cellule conventionnelle	70
Tableau4.4	Paramètres simulés de la cellule à structure PIN	73
Tableau4.5	l'effet de l'épaisseur W de la couche intrinsèque sur Paramètres une cellule PIN	75
Tableau4.6	L'effet de la Température sur les paramètres de la cellule PIN	79
Tableau4.7	L'effet de la nature de la couche anti-réfléchissante sur les paramètres de la cellule PIN	80
Tableau4.8	L'effet de l'épaisseur de la couche anti-réfléchissante sur les paramètres de la cellule PIN	81

Liste des symboles

Symbole	Description
E	Energie.
$\xi(x)$	Champ électrique.
ξ_C	Champ électrique critique.
E_g	Largeur de la bande interdite (gap).
$\rho(x)$	Densité de charges électriques.
$\alpha(\lambda)$	Coefficient d'absorption
$G(\lambda, x)$	Taux de génération des paires électron-trous.
n, p	Concentration des électrons et des trous respectivement.
n_0, p_0	Concentration des électrons et des trous à l'équilibre respectivement.
j_n, j_p	Densité de courant des électrons et des trous respectivement.
J_r	Densité de courant de saturation inverse.
J_{ph}	Densité de courant de photo génération.
J	Densité de courant de sortie de la cellule.
J_{sc}	Courant de court circuit.
N_a, N_d	Concentration des atomes accepteurs et des atomes donneurs respectivement.
τ_n, τ_p	Durée de vie des électrons et des trous respectivement.
τ_0	Durée de vie de recombinaison du porteur
μ_n, μ_p	Mobilité des électrons et des trous respectivement.
D_n, D_p	Constante de diffusion des électrons et des trous respectivement.
L_n, L_p	Longueur de diffusion des électrons et des trous respectivement.
L_c	Longueur de collection effective.
L_{in}, L_{ip}	Longueur de diffusion effective des électrons et des trous respectivement.
U_n, U_p	Taux de recombinaison des électrons et des trous respectivement.
T°	Température de la cellule.
n_i	Concentration intrinsèque.
S_n, S_p	Vitesse de recombinaison des électrons et des trous à la surface respectivement.
$\epsilon_0, \epsilon_r, \epsilon$	Permittivité du vide, permittivité relative et permittivité totale respectivement.
$R(\lambda)$	Coefficient de réflexion.
	La longueur d'onde d'un photon en μm
	La constante de Planck,
	La vitesse de la lumière dans le vide
k	Le vecteur d'onde
q	La charge de l'électron
ϕ	Le Flux lumineux
$U_t = kT/q$	Potentiel thermodynamique.
V_d	Potentiel de diffusion.
V	Tension de sortie de la cellule.
V_{oc}	Tension de circuit ouvert.
V_j	Tension extérieure appliquée
V_m	Tension max
V	Tension de diffusion de la jonction PI

V	Tension de diffusion de la jonction IN
V_{BR}	Tension de claquage.
V	la chute de tension dans la zone I.
I_m	Courant max
FF	Facteur de forme.
$SR()$	Réponse spectrale.
P_m	Puissance maximale.
η	Rendement de conversion.
W_P	Epaisseur de la couche P.
W_I	Epaisseur de la couche I.
W_N	Epaisseur de la couche N.
H	Epaisseur totale de la cellule
L	Longueur de la cellule
S	Surface de la cellule.
d_{CAR}	Epaisseur de la couche diélectrique
R_s	Résistance série.
R_{sh}	Résistance parallèle.
R_L	La charge extérieure.
N_a	Densité des dopants accepteurs ionisés dans un matériau
N_d	Densité des dopants donneurs ionisés dans un matériau
N_c	Densité d'état au bord de la bande de conduction.
N_v	Densité d'état au bord de la bande de valance.
ψ	Potentiel électrostatique
P_{in}	Puissance incidente
	L'angle de refraction
C_j	Capacité de jonction.
τ	Durée de vie ambipolaire.
La	Longueur de vie ambipolaire.
T_p	Temps de transit des trous à travers la zone intrinsèque
J_T	La densité totale de courant dans la diode

Introduction générale

Selon l'Agence Internationale de l'Energie, la consommation énergétique mondiale a quasiment doublé entre 1973 et 2007, en passant de 5.4×10^4 à 9.6×10^4 TWh par an. Plus de 15% de cette énergie est aujourd'hui consommée sous forme d'électricité. Au niveau mondial, plus de 80% de l'électricité est produite à partir de combustibles fossiles (67%) et fissiles (15%) non renouvelables. A ce rythme de consommation, les réserves des combustibles fossiles seront épuisées dans une centaine d'années [01].

Le secteur électrique mondial est en pleine mutation du fait de la libération des marchés et de la prise de conscience des effets induits des filières de production sur l'homme et son environnement. Comme l'effet de serre qui confronte la planète aux phénomènes de réchauffement climatique. Les filières vertes comme l'éolien, l'hydroélectricité et le solaire photovoltaïque présentent pour les années à venir les meilleurs potentiels de réduction des gaz à effet de serre. La filière solaire photovoltaïque représente théoriquement le plus grand potentiel [02].

En pratique, la technologie de fabrication des cellules solaires a toujours été coûteuse et elle l'est encore. En effet, au début de son développement, le silicium monocristallin était utilisé vu sa qualité et sa disponibilité. Il est à noter, au passage, que 50% du coût de la cellule vient du coût du matériau utilisé dans sa fabrication [03]. Pour cette principale raison, de grands efforts ont été faits par les chercheurs pour préparer les matériaux avec les propriétés requises et à bas coûts. Bien que le silicium, sous forme amorphe, figure parmi les matériaux sélectionnés pour les applications photovoltaïques, mais il n'est pas considéré comme matériau idéal pour la conversion photovoltaïque à cause de sa faible absorption des radiations solaires, ce qui nécessite une couche épaisse pour obtenir des résultats satisfaisants [04].

Bien que la cellule solaire en silicium monocristallin a été le leader du marché des cellules solaires pour le dernier demi siècle, cependant, le poly-silicium est en hausse rapide ces dernières années en termes de réduction des prix. Malgré des années de recherches et de

développement d'autres matériaux binaires, ternaires,etc, tels que CdTe, composés CIGS et composés III-V de classe semi-conducteur, cependant, la technologie à base de silicium cristallin (c-Si) est toujours dominante à plus de 80% des ventes au niveau mondial [04]. La principale raison est que les cellules c-Si permettent d'obtenir les meilleures performances au niveau du module avec 13 à 15% de rendement en moyenne [05].

A cause des coûts élevés de l'expérimentation, les chercheurs ont recourt à l'utilisation de logiciels de simulation tel que SILVACO pour prédire la réponse des structures à base de matériaux préparés pour la conversion photovoltaïque. Ces logiciels permettent des centaines de combinaisons de paramètres avant la fabrication réelle du dispositif. C'est un moyen rapide, consistant et pas cher pour le design de cellules solaires. Il permet, entre autre, la visualisation des paramètres qui influencent le comportement des cellules solaires.

La cellule solaire de base est souvent une jonction PN en semiconducteur dont le rendement dépend des photons absorbés et des paires électrons-trous générés dans la zone de charge d'espace, qui doit avoir une valeur optimale pour que le photocourant soit essentiellement dû à la photogénération de porteurs dans cette zone. Il est donc judicieux d'augmenter artificiellement l'épaisseur de la zone de charge d'espace.

L'une des possibilités d'améliorer cette absorption est d'intercaler une couche intrinsèque entre P et N, ce qui donne une cellule solaire à base d'une structure PIN [06]. L'objectif de notre travail est l'étude de cette cellule à structure PIN par simulation en utilisant Atlas TCAD, un module du logiciel SILVACO.

Le mémoire est composé de quatre chapitres et il est organisé comme suit :

- Le premier chapitre présente des notions générales sur les énergies renouvelables.

- Le deuxième chapitre est consacré aux cellules solaires en général. On présente leurs constituants de base, leur principe de fonctionnement, leurs caractéristiques électriques et leurs paramètres les plus influents.
- Le troisième chapitre est consacré à la cellule solaire à base d'une structure PIN où on présente son principe de fonctionnement, sa caractéristique courant-tension et les paramètres qui gouvernent son fonctionnement.
- Le quatrième et dernier chapitre, est consacré à la simulation numérique du comportement de la cellule solaire de structure PIN à base de silicium monocristallin. Les résultats obtenus sont présentés, commentés et comparés aux valeurs expérimentales tirées de la littérature.

Enfin, le mémoire se termine par une conclusion générale récapitulant les résultats obtenus au cours de la simulation et donne quelques critères s'inscrivant dans la perspective d'une meilleure efficacité des cellules solaires à base d'une structure PIN.

Chapitre 1 :

**Les énergies renouvelables
Et matériaux photovoltaïques**

1.1. Introduction:

Face aux énergies tirées de combustibles fossiles qui tendent à se raréfier, il existe des énergies nouvelles fournies par le soleil, le vent, les chutes d'eau, les marées, la chaleur de la terre ou la croissance des végétaux: ce sont les énergies renouvelables. Parmi elles, on recense le solaire photovoltaïque et thermique, l'éolien, l'hydroélectricité, la biomasse et la géothermie [7].

L'énergie solaire vient de la fusion nucléaire qui se produit au centre du Soleil [8]. Ce dernier, qui n'est rien d'autre qu'un immense réacteur de fusion thermonucléaire situé à 150 millions de km de la Terre, confiné par des champs magnétiques d'une puissance extraordinaire et recyclant lui-même ses propres déchets, est de très loin la principale source d'énergie de notre planète. Même le charbon, le pétrole et le gaz naturel sont issus de son activité, puisqu'ils proviennent de la décomposition et de l'évolution dans le sous-sol sur une très longue durée de matières organiques (plantes) qui ont bénéficiées à l'origine de l'énergie solaire pour leur croissance grâce à la photosynthèse [9].

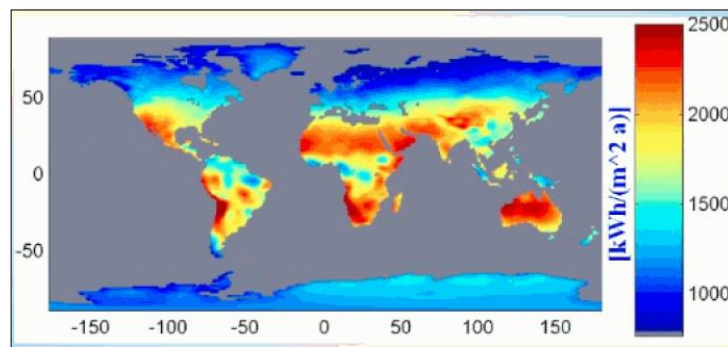


Fig-1.1- l'Énergie incidente à la surface de la terre en kWh/m² par an.

L'énergie solaire se propage dans le Système solaire et dans l'Univers sous la forme d'un rayonnement électromagnétique de photons. Globalement la Terre reçoit en permanence une puissance de 170 millions de gigawatt (soit 170 millions de milliards ou $1,7 \times 10^{17}$ joules par seconde), dont 122 sont absorbés alors que le reste est réfléchi. L'énergie totale absorbée sur une année est donc de 3 850 zettajoules (10^{21} joules) (figure-1.1-); par comparaison, la photosynthèse capte 3 ZJ, le vent contient 2,2 ZJ, et l'ensemble des usages humains de l'énergie, 0,5 ZJ dont 0,06 ZJ sous forme d'électricité [9].

L'énergie solaire, possède l'énorme avantage d'être inépuisable à l'échelle de la durée de vie du soleil, soit 5 milliards d'années. En plus elle est extraordinairement abondante, puisque

l'irradiation que le Soleil fait parvenir sur la Terre chaque année représente plus de 10 000 fois la consommation mondiale actuelle d'énergie primaire, toutes formes et tous usages confondus.

Le monde aujourd'hui voit des réalisations de plus en plus importantes de centrales solaires; comme dans le désert des Mojaves (Californie et Arizona) (Fig-1.2-a)) où se trouvent les plus grandes centrales solaires thermodynamiques au monde, notamment la centrale solaire SEGS d'une puissance totale de 354 MW et celle de Solana d'une puissance de 280 MW.



Fig-1.2-a)- la centrale solaire en Californie (SEGS-Kramer Junction) .



Fig-1.2-b)- la centrale solaire de Ghana.



Fig-1.2-c)- la centrale de Kagoshima-JAPAN-

Quand au Japon, il va construire la plus grande centrale photovoltaïque flottante du monde; près de 290 000 panneaux solaires. De quoi fournir de l'électricité à 22 000 familles. Comme un radeau, l'immense rectangle sera maintenu à la surface à l'aide de flotteurs en plastique. Construire sur l'eau permet non seulement de diminuer les coûts de loyer, mais aussi d'utiliser l'onde dans le circuit de refroidissement et de mieux stocker l'énergie produite. Au total, la centrale de Kagoshima aura une puissance de 70 MW (Fig-1.2-c)).

En Afrique, Le Ghana inaugurera en octobre 2015 la plus grande centrale d'énergie solaire d'Afrique, au total, plus de 630.000 panneaux photovoltaïques avec une capacité de production de 155 MW (Fig-1.2-b)).

1.2. Utilisation de l'énergie solaire:

1.2.1. Utilisation passive de l'énergie solaire:

Il s'agit principalement d'utiliser directement l'énergie lumineuse pour les besoins en éclairage de jour et de chauffage à l'intérieur des pièces à travers les fenêtres ou des baies vitrées pour être ensuite absorbée par les murs, les planchers et les meubles, puis diffusée ensuite sous forme de chaleur. Cette technique permet de faire diminuer la consommation des autres énergies et, parce qu'elle est totalement non polluante et renouvelable, est aujourd'hui défendue comme un des meilleurs moyens de faire diminuer les rejets en CO₂ provoqués par le chauffage des habitations. Elle nécessite une conception réfléchie des bâtiments et l'utilisation de certains matériaux de construction.

1.2.2. Utilisation active de l'énergie solaire :

Elle utilise la chaleur transmise par le rayonnement, pour le chauffage (un bâtiment, chauffe-eau solaire), pour la production de l'électricité et la purification de l'eau (distillateur solaire). Ça permet de chauffer grâce à des capteurs thermiques. Elle peut être utilisée :

- Directement (pour chauffer un bâtiment par exemple).
- Indirectement (comme la production de vapeur d'eau pour entraîner des alternateurs et ainsi obtenir une énergie électrique).

Deux principes fondamentaux sont appliqués et parfois combinés :

- Capturer l'énergie du rayonnement solaire grâce à un corps noir ;
- Concentrer le rayonnement solaire en un point (par exemple le four solaire).

1.2.3. La production d'électricité:

Il existe deux manières de produire de l'électricité à partir de l'énergie solaire :

1.2.3.1. La conversion photovoltaïque:

L'effet photovoltaïque permet de convertir directement l'énergie lumineuse du soleil en électricité grâce à des semi-conducteurs dans des cellules solaires groupées dans des modules solaires (Fig-1.2-a,b,c). Bien que cette filière énergétique soit largement minoritaire

dans les bilans énergétiques mondial, européen et français, son taux de croissance (30 à 60% par an) et la chute des coûts de production qui accompagne son développement depuis quelques années présage un potentiel de développement très élevé pour l'avenir.

1.2.3.2. La conversion thermodynamique:

Elle est basée sur la concentration du rayonnement solaire pour obtenir de la chaleur à haute température et la transformer ensuite en énergie mécanique puis électrique à travers des cycles thermodynamiques. Ces systèmes peuvent employer différentes technologies pour concentrer et exploiter la chaleur. On a par exemple ; les tours à concentration optique, les capteurs horizontaux cylindro-paraboliques, les moteur Stirling, etc. Le prix de revient du kWh électrique devient intéressant pour de grandes installations (environ deux fois moindre que celui du photovoltaïque), mais ce système est difficilement applicable pour de petites installations et son intégration dans le bâti n'est pas évidente.



Fig-1. 3-a)- Systèmes solaire à concentration.

b)- Système solaire avec moteur stirling.

1.3. Les composantes de la lumière solaire:

La partie du rayonnement solaire exploitée par les systèmes photovoltaïques se limite à la lumière, mais elle peut elle-même être décomposée en trois éléments (Fig-1.4-) dont la proportion est variable suivant le lieu et le moment :

1.3.1. Le rayonnement direct :

Ce rayonnement est le plus puissant, il provient directement du soleil sans subir d'obstacles sur sa trajectoire (nuage, immeubles...). C'est lui qui nous aveugle lorsque l'on cherche à regarder le soleil "droit dans les yeux" par temps découvert.

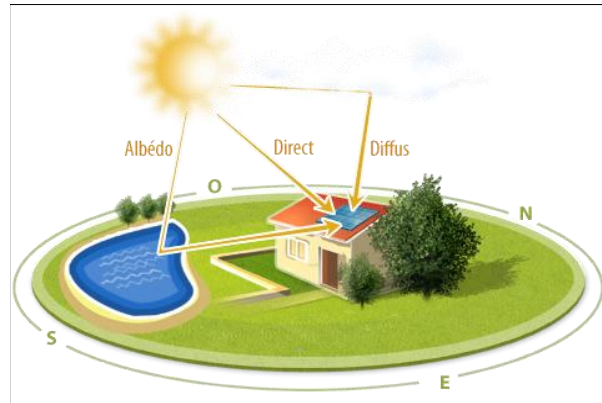


Fig -1.4- Les 3 différents types de rayonnement solaire

1.3.2. Le rayonnement diffus :

Il provient des multiples diffractions et réflexions du rayonnement solaire direct par les nuages. C'est à lui que nous devons la "lumière du jour" qui nous permet d'y voir clair même quand le temps est couvert. Bien que son intensité soit moins forte, le rayonnement diffus représente généralement une part significative du rayonnement total, parfois même majoritaire, (il est de 10% à 20% pour un ciel dégagé et peut aller jusqu'à 100% pour un ciel nuageux) [10], il est de 60% par exemple en Allemagne ou à Lille contre 40% dans le Sud de la France. Il est également important dans les zones intertropicales.

1.3.3. Le rayonnement dû à l'albédo:

Il résulte de la réflexion du rayonnement solaire direct par le sol, qui est d'autant plus important que la surface est claire et réfléchissante (neige, étendue d'eau, ...). C'est lui qui peut nous faire attraper des coups de soleil à la montagne ou à la mer sans qu'on les sente venir.

1.4. Le spectre solaire:

Le photon est la particule élémentaire du rayonnement électromagnétique. Ce dernier comprend aussi bien la lumière visible que les ondes radios ou les rayons X [8]. Un rayonnement est caractérisé par sa longueur d'onde, sa fréquence, son énergie et son intensité [11]. Le photon peut avoir des énergies très différentes. A chaque énergie qu'il peut prendre est reliée une longueur d'onde qui lui est inversement proportionnelle. L'ensemble des longueurs d'ondes du rayonnement électromagnétique permet de définir le spectre électromagnétique représenté par la (Fig-1.5-).

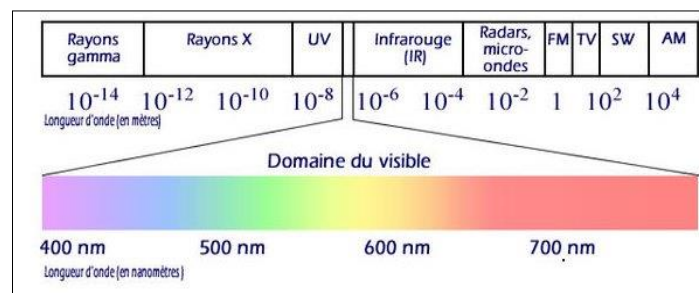


Fig-1.5- Le spectre solaire

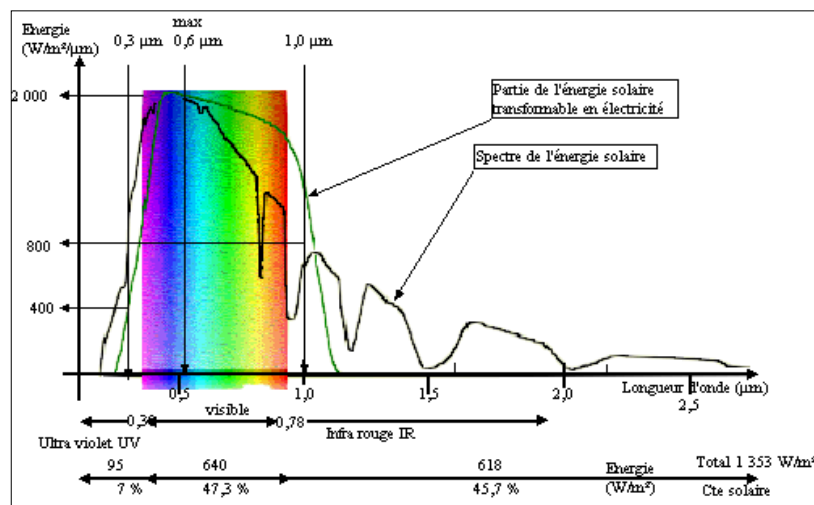


Fig-1.6- l'énergie solaire en fonction des longueurs d'ondes.

D'après la (Fig-1.6-), 9% de l'énergie du rayonnement solaire se trouve dans la bande des ultraviolets $< 0,4 \mu m$, 47% dans la bande visible $0,4$ à $0,8 \mu m$ et 44% dans la bande des infrarouges $> 0,8 \mu m$, on voit bien que la partie de l'énergie solaire max transformable en électricité correspond au domaine visible [12].

1.5. L'intensité du rayonnement :

Le rayonnement se caractérise par son domaine Spectral comme on vient de voir et par son intensité (plus un corps est chaud ($> 0^{\circ}\text{K}$) plus il émet un rayonnement intense). La confrontation entre le rayonnement solaire et les éléments du système climatique font qu'à la surface du sol, la densité de puissance n'est plus que de 0.9 kW/m^2 , en raison de l'absorption essentiellement par l'ozone, l'eau et gaz carbonique. En outre, le spectre n'est plus continu mais présente des bandes d'absorption (Fig-1.7-).

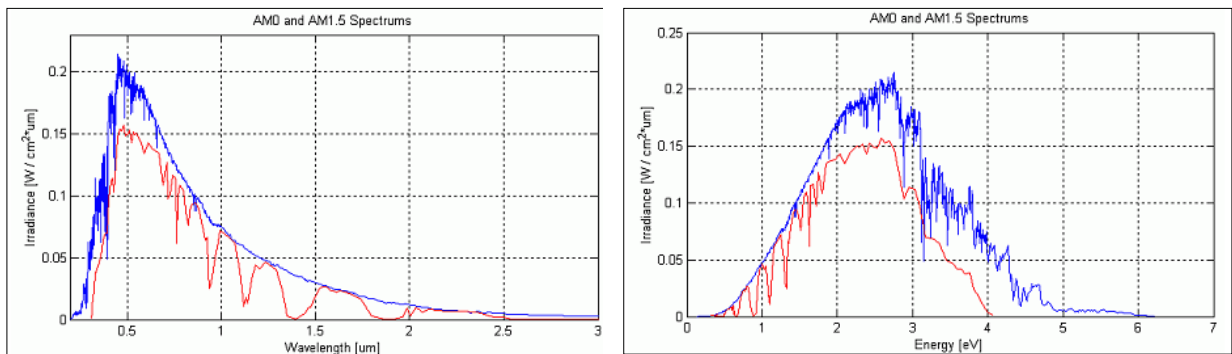


Fig-1.7- a)-L'irradiance en fonction des longueurs d'ondes **b)**- L'irradiance en fonction des l'énergie

1.6. Notion de la Masse d'Air :

Quand le soleil est directement vertical (position du zénith), la quantité d'énergie reçue à midi est max car l'épaisseur de l'atmosphère est minimum au niveau de la mer, c'est repéré comme : Air Mass 1 (AM1), masse d'air. L'énergie solaire atteignant la surface terrestre dans cette condition n'est plus que de 1000 Wm^2 . N'importe quel changement de l'angle du soleil (l'AM >1) l'énergie arrivant à la surface de la terre diminue [10].

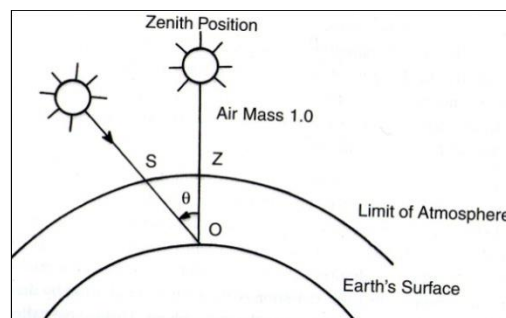


Fig-1.7- l'Air Mass

L'Air Masse définie par :

$$AM = 1 / \cos \alpha \quad (1.1)$$

- α l'angle que fait la direction du soleil avec la verticale.
- AM1 = correspond au soleil au zenith ($\alpha = 0$)
- AM4 = correspond à l'horizon ($\alpha = 75^\circ$)
- AM1.5 = correspond ($\alpha = 48,19^\circ$)
- AM0 utilisé pour préciser les conditions au dessus de l'atmosphère AM

1.7. Matériaux photovoltaïques:

L'intérêt de l'utilisation de semi conducteurs pour la réalisation des cellules photovoltaïques tient à la possibilité de contrôler, par divers moyens, aussi bien la quantité de courant électrique susceptible de les traverser, que par la direction que peut prendre ce courant, la possibilité de moduler dans le temps et dans l'espace la concentration interne des porteurs de charges. Cette faculté est elle-même dépendante de la structure électronique fondamentale des semi-conducteurs qui les différencie nettement des métaux et dans une moindre mesure des isolants [13]. En effet les semi conducteurs produisent de l'électricité lorsqu'ils sont exposés à la lumière. Le plus connu d'entre eux est le silicium cristallin.

En 2011, 87 % des installations photovoltaïques installées dans le monde comportaient du silicium mono ou multi cristallin. Bien qu'étant l'élément chimique le plus abondant sur Terre après l'oxygène, le silicium ne peut être trouvé à l'état pur. Il doit donc être extrait de la silice, purifié, mis en forme puis dopé avant d'être utilisé. Toutes ces opérations ont un important coût énergétique. Pourtant aujourd'hui le silicium cristallin est utilisé par 90% des panneaux produits dans le monde. Mais il existe de nombreuses autres technologies déjà industrialisées comme les couches minces ou en phase de recherche.

1.7.1. La bande interdite:

La famille des matériaux semi-conducteurs, peut être classée en deux familles. Les matériaux à gap direct, comme la plupart des composés issues des colonnes III- V du tableau périodique et les matériaux à gap indirect comme le silicium (colonne IV) [12]. La bande interdite (l'énergie de gap) E_g d'un semi-conducteur détermine comment réagit une cellule solaire à la lumière. Le tableau 1.1 montre les valeurs de la bande interdite de quelques semi-

conducteurs. Elle est propre à chaque semi-conducteur mais selon le besoin on la change en les combinant (composés binaires, ternaires....).

Matériel	Bande interdite (eV) à 300 k
Si	1.12
Ge	0.66
GaAs	1.42
InP	1.34
CdS	2.42
CdTe	1.48

Tableau-1.1- : bande interdite de quelque SC

La bande interdite du matériau semi-conducteur détermine la longueur d'onde de la lumière nécessaire pour générer de l'énergie électrique. La relation reliant la bande interdite et la longueur d'onde est:

$$\lambda = h c / E_g = 1.24 / E_g \quad (1.2)$$

donc : Energie du photon = $1.24 / \lambda$ Où

- λ est la longueur d'onde en μm
- h est la constante de Planck,
- c est la vitesse de la lumière dans le vide
- E_g est l'énergie de gap en eV ($1eV=1.6 \times 10^{-19} J$).

Dans le cas d'arséniure de gallium, la longueur d'onde qui correspond à $1.42 eV$ est $0.873 \mu m$. A une énergie supérieure à $1.1 eV$, le silicium génère de l'électricité. Pour l'arséniure de gallium, une lumière d'énergie supérieure à $1.43 eV$ excite ses électrons de la couche extérieure.

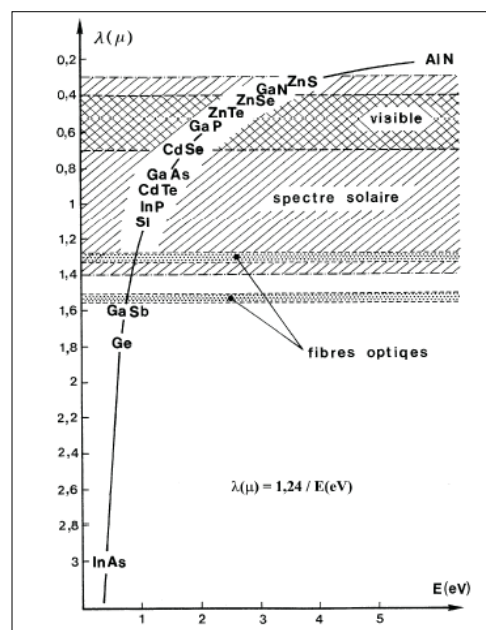


Fig-1.8- Rayonnements et semiconducteurs [14]

On voit bien que le spectre solaire conditionne le choix des matériaux pour les convertisseurs d'énergies.

1.7.2. Interaction rayonnement / matière:

1.7.2.1. Transitions radiatives :

L'émission et la réception font intervenir des échanges d'énergie entre les photons d'une part, et les électrons des atomes d'autre part. Il existe trois procédés d'interaction entre un photon et un électron dans un solide :

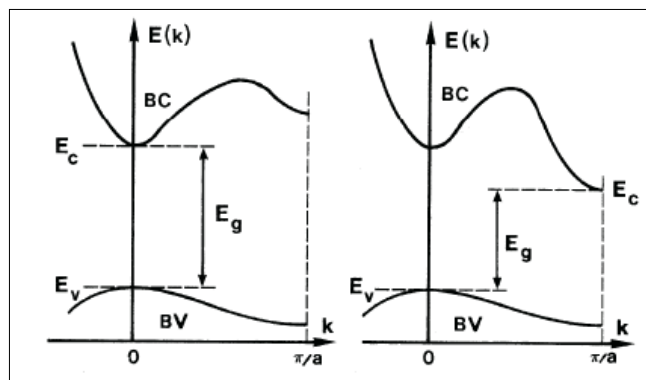


Fig-1.9- Courbes de dispersion. a) Electrons dans un semiconducteur à gap direct. b) Electrons dans un semiconducteur à gap indirect.

1.7.2.1.1. L'Absorption:

L'énergie égale ou supérieure à E_g (Fig-1.9 –a)) implique que l'équilibre est perturbé, l'électron de l'état E_v , absorbe le photon et se déplace à l'état excité E_c . Ce phénomène est utilisé dans les photodétecteurs.

1.7.2.1.2. L'émission spontanée :

L'état excité E_c , est un état instable après un temps court, sans aucune stimulation externe, l'atome retourne à l'état E_v en cédant un photon d'énergie E_g (recombinaison). On utilise ce processus pour le fonctionnement de photoémetteurs.

1.7.2.1.3. Emission stimulée (monochromatique) :

Quand le photon d'énergie égale ou supérieure à E_g heurte un atome dans un état excité (dans E_c), l'atome peut être stimulé à faire une transition à l'état E_v en cédant son énergie qui

est en phase avec la radiation incidente. Un photon présent dans le matériau semi-conducteur peut provoquer la transition d'un électron de la bande de conduction sur un état vide de la bande de valence avec la production d'un deuxième photon de même énergie. Cette émission stimulée est à la base de la réalisation des lasers à semi conducteurs. Pour les cellules solaires le phénomène dominant sur les trois est l'absorption.

1.7.2.2. Transition directe :

On appelle transition directe le passage d'un électron d'un niveau énergétique à un autre sans que sa quantité de mouvement ne soit modifiée. Cette transition est spécifique au semi-conducteur à gap direct (Fig-1.9- a) où le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence sont caractérisés par le même vecteur d'onde k .

1.7.2.3. Transition indirecte :

On appelle transition indirecte le passage d'un électron d'un niveau énergétique à un autre avec modification de sa quantité de mouvement. Cette transition est spécifique au semi-conducteur à gap indirect (Fig-1.9-b) où le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence sont caractérisés par des vecteurs d'onde K différents.

1.7.3. La recombinaison :

1.7.3.1. Recombinaison des porteurs en excès :

Si la concentration des porteurs excède la valeur à l'équilibre, l'excès de porteurs se recombine et l'annihilation se produit. Le taux de cette annihilation est ;

$$\mathbf{n-n_0 / \tau_0 = p-p_0 / \tau_0 \quad [cm^{-3}sec^{-1}] \quad (1.3)}$$

- n_0, p_0 densités à l'équilibre.
- τ_0 durée de vie recombinaison du porteur.

Si τ_0 est grand dans un SC, il fera un très bon matériau de cellules solaire. Dans un Si presque parfait, la durée de vie recombinaison est de quelques millisecondes. Mais dans un Si de basse qualité, la durée de vie est très faible du à la présence de point de défauts actif électriquement, dislocations et des limites de grains qui accélèrent la recombinaison.

1.7.3.2. Mécanismes de recombinaisons :

Trois mécanismes de recombinaisons fonctionnent en dépend de la nature du **SC** et la densité de dopage ;

1. Recombinaisons bande à bande, c'est la plus dominante dans les SC à gap direct et à haute densité de dopages (Fig-1.10-a) .

2. Recombinaison AUGER : dominante dans les SC fortement dopés (Fig-1.10-b).

3. Recombinaison à travers des pièges : ou des centres de recombinaison, dominante dans les SC fortement dopés à gap indirect (Fig1.10-c) .

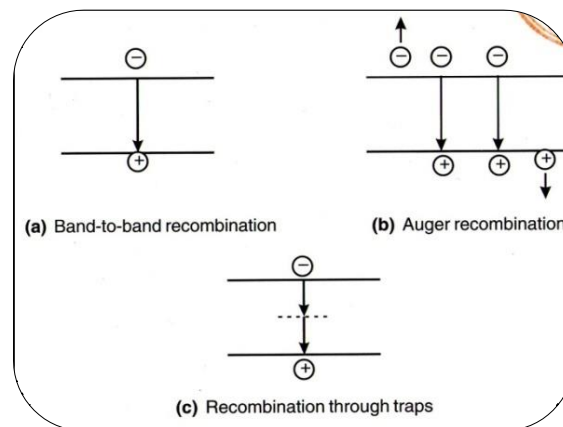


Fig-1.10- Les mécanismes de recombinaisons

Généralement un seul mécanisme domine dans un SC, et le taux de recombinaison τ est la somme des trois [10]. Le taux de recombinaison est relié à la longueur de diffusion L qui est la distance parcourue avant de se recombinaison. La densité de porteur en excès des porteurs minoritaires, diminue exponentiellement avec la distance du plan du semiconducteur où ils ont été générés, elle est donnée par :

$$L = \sqrt{\frac{kT\mu\tau}{q}} \quad \text{ou} \quad \sqrt{D\tau} \quad (1.4)$$

Où : k : constante de Boltzmann

T : température.

μ : la mobilité

q : charge de l'électron

D : la constante de diffusion

1.7.3.3. Vitesse de recombinaison en surface

En raison de phénomènes intrinsèques (disparition de la périodicité du réseau) et extrinsèques (adsorption d'atomes étrangers), la surface du semiconducteur est le siège d'états spécifiques, appelés états de surface, dont les niveaux d'énergie peuvent se situer dans le gap.

Certains de ces états jouent le rôle de centre de recombinaison [14]. La durée de vie des porteurs en surface est de ce fait toujours inférieure à leur durée de vie en volume. Il en résulte que dans un semiconducteur excité, la densité de porteurs excédentaires en surface est toujours inférieure à sa valeur en volume. Ce gradient de concentration Δn donne naissance à un courant de diffusion qui s'écrit :

$$J_n = \pm e D_n \frac{d \Delta n}{dx} \quad (1.5)$$

on exprime le courant j sous une autre forme

$$J_n = e \Delta n S \quad (1.6)$$

$$S = \pm \frac{D_n}{\Delta n} \frac{d \Delta n}{dx} \quad (1.7)$$

S est appelée vitesse de recombinaison en surface, Δn et $d\Delta n/dx$ sont respectivement la densité de porteurs excédentaires et son gradient, à la surface.

1.7.4. Création de porteurs en excès :

Plusieurs processus peuvent être utilisés pour créer un excès de porteurs dans un semiconducteur ; la photo excitation, l'injection et d'autre processus.

1.7.4.1. Création de porteurs en excès par Photoexcitation :

Tout photon ne subira pas automatiquement la photodétection [14], il doit posséder une énergie $E_{\text{photon}} \geq E_g$. Si un SC d'énergie de gap E_g , absorbe une lumière d'énergie $h\nu$ qui est supérieure à E_g , chaque photon absorbé fait passer un électron de BV à BC, créant une paire électron/trou (e/t) [10], L'excès de porteurs par rapport à l'équilibre est créé.

Soit :

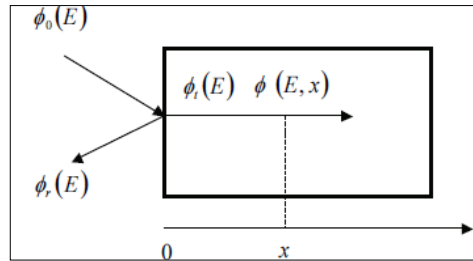
- $\phi_0(E)$ le flux de photons incidents d'énergie E , longueur d'onde $\lambda(\mu\text{m})=1,24 / E(\text{eV})$. C'est le nombre de photons d'énergie E qui frappent l'unité de surface du semiconducteur par seconde, il s'exprime en ph/s/cm^2 .
- Si $R(E)$ est le coefficient de réflexion du semiconducteur pour le rayonnement d'énergie E , le flux de photons $\phi_t(E)$ transmis à la surface, c'est-à-dire entrant effectivement dans le semiconducteur s'écrit :

$$\phi_t(E) = (1 - R(E)) \phi_0(E) \quad (1.8)$$

Réellement la lumière incidente pénètre une distance x de la surface avant d'être absorbée [6]. Les photons sont absorbés au cours de leur propagation dans le matériau. On définit le

coefficient d'absorption α du matériau comme la variation relative de la densité de rayonnement par unité de longueur. Ainsi, si la densité de rayonnement varie de $d\phi$ sur une longueur dx , α est donné par :

$$\alpha(E, x) = -\frac{1}{\phi(E, x)} \frac{d\phi(E, x)}{dx} \quad (1.9)$$



-Fig1.11- La photoexcitation

- **α positif** quand $d\phi$ est négatif, lorsqu'il y a absorption du rayonnement.
- Si **α est constant** dans tout le matériau, $\alpha(E, x) = \alpha(E)$ et l'intégration de l'expression (1.8) donne :

$$\frac{d\phi(E, x)}{\phi(E, x)} = -\alpha(E) dx \quad \text{Ln}(\phi(E, x)) = \text{Ln}(\phi_t(E)) - \alpha(E)x \quad (1.10)$$

soit :
$$\phi(E, x) = \phi_t(E) e^{-\alpha(E)x} \quad (1.11)$$

Le flux de photons d'énergie E à l'abscisse x à l'intérieur du sc s'écrit donc en fonction du flux incident :

$$\phi(E, x) = (1-R(E)) \phi_0(E) e^{-\alpha(E)x} \quad (1.12)$$

- Si **$\alpha(E) = 0$** , le rayonnement traverse le matériau sans atténuation, le matériau est transparent à ce rayonnement. C'est le cas des semiconducteurs intrinsèques pour des rayonnements d'énergie $E < E_g$. Dans certains SC, α passe à zéro d'une façon abrupte (sc à gap direct) et graduellement dans d'autre. Ce comportement est important dans le choix du SC pour la fabrication des cellules solaires [10].
- Si par contre **$\alpha(E) \neq 0$** ; le matériau absorbe le rayonnement d'énergie E , qui s'atténue alors exponentiellement au cours de sa propagation. Cette absorption se traduit par la création de paires électron-trou. Chaque photon absorbé crée une paire électron-trou, de sorte qu'en un

point d'abscisse x le nombre de paires créées par seconde est égal au nombre de photons disparus.

Le taux de génération de porteur par unité de surface est fonction de E_g ; la réflexion de la lumière incidente sur la surface et la collecte incomplète de porteurs de charge affecte ce taux. La Figure-1.12- montre qu'une énergie E_g faible génère plus de courant électrique.

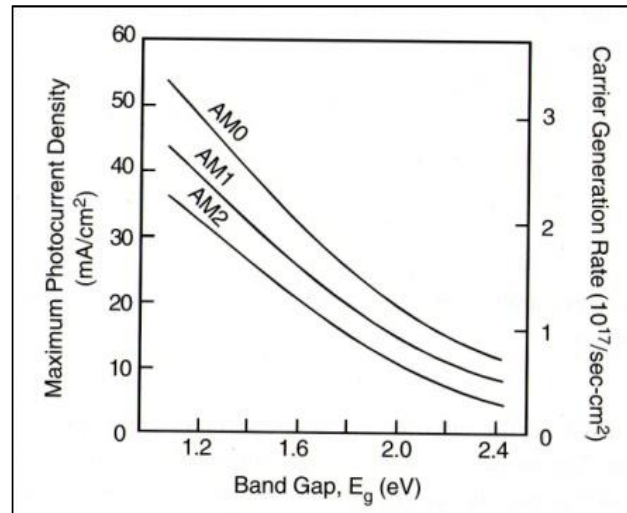


Fig-1.12- La photogénération et taux de génération en fonction du gap

- Le taux de génération de paires électron-trou et donc égal au taux de disparition de photons,

$$g(E, x) = - \frac{d\phi(E, x)}{dx} \quad (1.13)$$

$$g(E, x) = (1-R(E)) \phi_0(E) \alpha(E) e^{-\alpha(E)x} \quad (1.14)$$

- Si le rayonnement n'est pas monochromatique, le taux global de génération de paires électron-trou au point d'abscisse x est obtenu en intégrant l'expression précédente sur tout le spectre, soit

$$g(x) = \int_E g(E, x) dE \quad (1.15)$$

- Si $\alpha(E)$ est petit ; le rayonnement est peu absorbé, il pénètre alors profondément dans le matériau. Il crée peu de porteurs par unité de volume mais il en crée dans un grand volume.
- Au contraire si $\alpha(E)$ est grand; le rayonnement est très absorbé, les porteurs sont créés dans un petit volume sous la surface.

La figure-1.13- illustre le taux l'absorption de photon et courant max de la cellule en fonction de l'épaisseur du matériau, pour semiconducteur à gap direct et indirect[10] . Il est clair que pour le SI, jusqu'à une épaisseur d'environ 100 µm et plus, pas d'absorption, Tandis que pour le GaAs, une épaisseur d'1 µm est suffisante pour absorber tous les photons. Evidement les semiconducteur à gap direct sont plus favorisés pour la fabrication des cellules solaires ; plus grande économie de matériau.

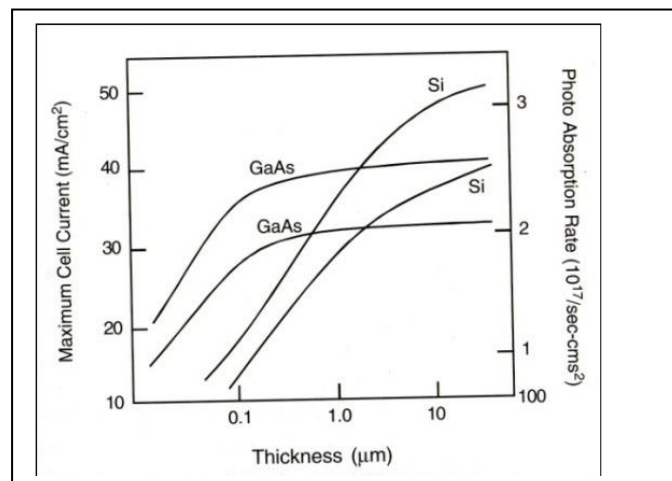


Fig-1.13- Taux l'absorption de photon dans un semiconducteur

Le coefficient de réflexion $R(E)$ est fonction de la nature du semiconducteur, mais en règle générale varie peu avec l'énergie pour des rayonnements dont l'énergie est voisine du gap du matériau, on peut écrire $R(E)=R$. Par contre sa valeur est très sensible à l'angle d'incidence du rayonnement, elle est minimum en incidence normale où elle est donnée par n est l'indice de réfraction du matériau et ϵ_r sa constante diélectrique relative.

$$R = \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2 = \left(\frac{\sqrt{\epsilon_r} - 1}{\sqrt{\epsilon_r} + 1} \right)^2 \quad (1.16)$$

Pour tous les semiconducteurs n varie entre 3 et 4 de sorte que R varie entre 0,25 et 0,35. Ainsi, dans les meilleures conditions c'est-à-dire en incidence normale, environ 30% du rayonnement excitateur est réfléchi par le semiconducteur.

1.7.4.2. Création de porteurs en excès par Injection électrique :

Lorsque l'on polarise une jonction PN dans le sens direct, les électrons majoritaires dans la région de type n, sont injectés dans la région de type p où ils deviennent excédentaires par

rapport à l'équilibre thermodynamique et diffusent en se recombinant. Si les recombinaisons sont radiatives, cette partie de la jonction PN est le siège d'une émission de rayonnement.

1.7.4.3. Création de porteurs en excès par d'autres processus :

- l'effet d'avalanche dans une jonction PN polarisée en inverse,
- l'effet tunnel dans une diode tunnel ou une jonction Schottky.
- La cathodoexcitation, qui consiste à bombarder le semiconducteur par un faisceau d'électrons, permet aussi par ionisation par choc de créer des paires électron-trou.
- Notons enfin l'effet Destriau, utilisé dans les panneaux électroluminescents. Une poudre de semiconducteur, généralement un composé II-VI, enrobée dans un liant isolant, est prise en sandwich entre deux armatures dont l'une est transparente.
- L'application d'une tension aux plaques du condensateur permet une injection d'électrons dans la bande de conduction, par choc ou par effet tunnel, à partir de niveaux accepteurs.

1.8. Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons présenté quelques notions indispensables à la compréhension du fonctionnement des cellules solaires ; sur le rayonnement solaire, et son application dans le domaine photovoltaïque, l'effet de ce rayonnement sur les matériaux spécialement les semi conducteurs.

Chapitre 2 :

Les Cellules photovoltaïques

2.1. Introduction:

La découverte en 1839 du français Antoine-César Becquerel (1788 - 1878) ; que certains matériaux, notamment les semi-conducteurs ont une capacité à convertir directement les différentes composantes de la lumière du soleil (et non sa chaleur) en électricité, représente l'effet photovoltaïque utilisé dans le fonctionnement des cellules solaires.

2.2. L'Effet Photovoltaïque:

Le terme « photovoltaïque » est composé du mot de grec ancien « photos » (lumière, clarté) et du nom de famille du physicien italien (Alessandro Volta) qui inventa la pile électrique en 1800 [15]. Cet effet photovoltaïque représente la seule alternative existante à la production d'électricité à partir de la force mécanique, puisque toutes les autres techniques sans exception, renouvelables ou non, font appel à des génératrices tournantes (alternateurs ou dynamos) qui peuvent être actionnées de diverses manières : vapeur, vent, force de l'eau, courants marins, ...

2.2.1. Les avantages du photovoltaïque:

Le photovoltaïque possède de nombreuses qualités qui présente autant d'avantages :

- ▶ La source d'énergie « le soleil » est gratuite, omniprésente, et inépuisable [04].
- ▶ La conversion directe des radiations solaires en électricité c'est-à-dire pas de hautes températures, Pas de pollution [04].
- ▶ Basé sur un phénomène physique imperceptible, son fonctionnement n'occasionne strictement aucune nuisance ou impact sur l'environnement immédiat : ni mouvement, ni bruit, ni odeur, ni émission quelconque donc le risque de panne ou d'accident est donc quasiment nul et le niveau de fiabilité très élevé.
- ▶ Les caractéristiques physiques des matériaux photovoltaïques ne s'altèrent pas dans le temps (sauf pour les matériaux organiques), et la baisse de rendement des panneaux, que l'on peut éventuellement observer et due essentiellement aux imperfections mineures de fabrication, est très lente et très limitée, ce qui permet aux fabricants d'apporter une garantie de rendement pouvant aller jusqu'à 30 ans.

- ▶ L'alternance jour/nuit étant un phénomène universel, même si sa répartition temporelle peut être très différente selon les lieux, le photovoltaïque peut fonctionner en tout point du globe terrestre avec un écart de potentiel annuel allant de 1 à 4 en entre le moins bon et le meilleur site.

- ▶ La quantité d'énergie récupérable en un lieu donné est directement proportionnelle à la surface exposée à la lumière du soleil, ce qui confère au photovoltaïque un caractère intrinsèquement modulaire et flexible : la surface des capteurs va de quelques cm² pour l'alimentation d'une calculette à plusieurs centaines de milliers de m² pour les centrales au sol et cette taille peut être modifiée à tout moment par simple ajout (ou retrait) de « tranches », sans même interrompre le fonctionnement de l'installation existante.

Toutes ces qualités dont le photovoltaïque dispose fait que ses domaines d'application sont extrêmement divers et peuvent répondre à une grande variété de besoins dans toutes sortes de situations, d'autant plus que les différentes technologies de fabrication des modules qui sont aujourd'hui disponibles et qui le seront demain grâce aux nombreux axes recherche de l'industrie permettent d'adapter le système photovoltaïque aux caractéristiques du lieu et à l'utilisation prévue de l'énergie produite.

2.2.2. Principe de la conversion photovoltaïque:

L'optimisation de la conversion de l'énergie solaire en électricité requiert au moins que trois phénomènes physiques de base aient lieu quasi-simultanément (absorption, génération, collecte):

- Les photons heurtent la surface du matériau photovoltaïque (semi-conducteur) disposé en cellules ou en couche mince, transfèrent leur énergie aux électrons qui gravitent autour des atomes. C'est l'effet photoélectrique.

- Du fait de l'énergie qu'ils gagnent, les électrons "s'excitent". Ils reviennent généralement à l'état d'équilibre - leur niveau initial - en libérant l'énergie des photons sous forme de chaleur : le matériau chauffe au soleil. Mais il est aussi possible de récupérer cette énergie sous forme électrique. L'électron excité forme avec le « trou » qu'il laisse au niveau inférieur une paire « électron-trou ».

- Les cellules photovoltaïques sont des jonctions PN, faites en associant un semi-conducteur de type n avec un semi-conducteur de type p, comme le silicium dopé phosphore et le silicium dopé bore. Soumises à un champ électrique dans une jonction PN branchée sur un circuit extérieur, les paires électrons-trou vont se séparer et les électrons excités vont se mettre en mouvement dans une direction particulière : un courant électrique est créé.
- Le courant électrique continu qui se crée est alors recueilli par des fils métalliques très fins connectés les uns aux autres et acheminé à la cellule suivante.
- Le courant s'additionne en passant d'une cellule à l'autre jusqu'aux bornes de connexion du panneau, et il peut ensuite s'additionner à celui des autres panneaux raccordés en "champs".

2.3. La cellule solaire:

La cellule photovoltaïque est une photodiode optimisée pour produire un flux de courant d'électrons en réponse à une irradiation par une lumière utilisant l'effet photovoltaïque [14]. La jonction par laquelle la lumière pénètre dans le semi-conducteur doit être suffisamment mince pour passer la plupart de la lumière sur la région active (région d'appauvrissement) où la lumière est convertie en paires électrons/ trous [16].

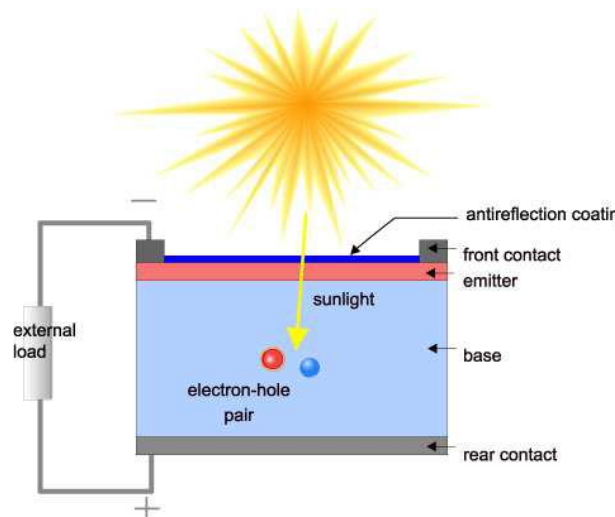


Fig-2.1- Structure de base d'une cellule solaire

2.3.1. Principe de fonctionnement d'une cellule solaire :

Trois phénomènes physiques de base traduisent le fonctionnement d'une cellule solaire:

2.3.1.1. L'Absorption des photons : dont $h\nu > E_g$ par le matériau.

2.3.1.2. La Création de paires électrons/trous; les photons incidents créent des paires électrons-trous dans chacune des régions N,P et ZCE. Le comportement de ces porteurs libres diffère suivant le lieu de leur création (Fig-2.2-a) :

a) Dans les régions électriquement neutres P et N :

Les photoporteurs minoritaires diffusent, ceux qui atteignent la zone de charge d'espace sont propulsés par le champ électrique vers la région où ils deviennent majoritaires. Ces photoporteurs contribuent donc au courant par leur diffusion, ils créent un photocourant de diffusion.

b) Dans la zone de charge d'espace ZCE :

Les paires électrons-trous créées par les photons sont dissociées par le champ électrique ; L'électron est propulsé vers la région de type n, Le trou vers la région de type p. Ces porteurs donnent naissance à un photocourant de génération.

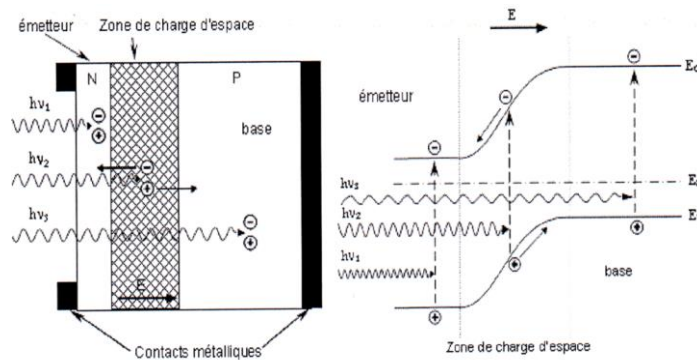


Fig -2.2- a) photogénération dans la cellule solaire b) diagramme d'énergie

2.3.1.3. La Collecte : sans perte des porteurs créés en le séparant par le champ interne du dispositif (champ jonction ou hétérojonction) dans un circuit électrique extérieur, en reliant les cotés de la jonction à une charge R_c , un courant I la parcourt et une différence de potentiel apparaît:

$$I = I_{ph} - I_d(v) \quad (2.1)$$

$$I = I_{ph} - I_s \left[e^{\left(\frac{qv}{kT}\right)} - 1 \right] \quad (2.2)$$

I_s : le courant de saturation

I_{ph} : le courant de court circuit généré par la lumière

$I_d(V)$: courant d'obscurité de la diode

La différence potentiel de contact constitue une barrière d'énergie potentielle donnée par :

$$V_d = \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{N_d N_a}{n_i^2} \right] \quad (2.3)$$

En l'absence d'une polarisation externe, existe un champ électrique interne qui s'oppose au mouvement des porteurs majoritaires mais qui accélère les minoritaires. Il existe au niveau de la jonction une barrière de potentiel dont la hauteur est la différence entre les niveaux d'énergie des accepteurs et des donneurs (Fig-2.2-b).

2.3.2. Modes de fonctionnement

Il existe deux modes de fonctionnement de la cellule solaire :

2.3.2.1. Le mode photoconducteur:

La cellule solaire correspond à un capteur passif. Elle est polarisée en inverse par une tension négative V et reliée à un circuit de faible impédance (R faible ou ampèremètre)

De l'équation (2.2), la tension de polarisation inverse $|V| \gg kT/e$, l'expression devient

$$I = -I_s - I_{ph} \quad \text{on a } I_{ph} > I_s \Rightarrow I \approx -I_{ph}$$

Le courant mesuré est égal au photo-courant et donc proportionnel au rayonnement incident. Ce mode de fonctionnement permet de réduire le temps de transit.

2.3.2.2. Le mode photovoltaïque :

La cellule solaire correspond à un capteur actif puisqu'aucune source de polarisation externe n'est associée à la diode qui, fonctionnant en convertisseur d'énergie, est équivalente à une pile qui débite son photocourant dans une charge. La diode est reliée à un circuit de forte impédance (R grand ou voltmètre) de sorte que $I = 0$. Le photo-voltage est proportionnel au logarithmique du photo-courant. De l'équation (2.2)

$$I = 0 \Rightarrow V = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \quad (2.4)$$

2.4. La Caractérisation électriques :

Il existe deux techniques électro-optiques importantes pour caractériser les piles solaires. La première technique consiste à mesurer la caractéristique $I(V)$ dans sous un rayonnement polychromatique. La deuxième consiste à mesurer la réponse spectrale sous un rayonnement monochromatique .

2.4.1. La caractéristique courant tension :

Sous obscurité la cellule fonctionne comme une diode, elle a la même caractéristique. Sous éclairissement la caractéristique $I(V)$ de la cellule ne passe plus par l'origine des coordonnées et commence à décaler vers le bas et plus le photocourant est important plus le décalage est grand (I est grand), dans la pratique, on mesure soit le photocourant débité par la diode, soit le photovoltage qui apparaît aux bornes de la diode. La caractéristique $I(V)$ est donnée par l'expression :

$$I(V) = I_d(v) - I_{ph}$$

$$I(V) = I_s \left[e^{\frac{qv}{kT}} - 1 \right] - I_{ph} \quad (2.5)$$

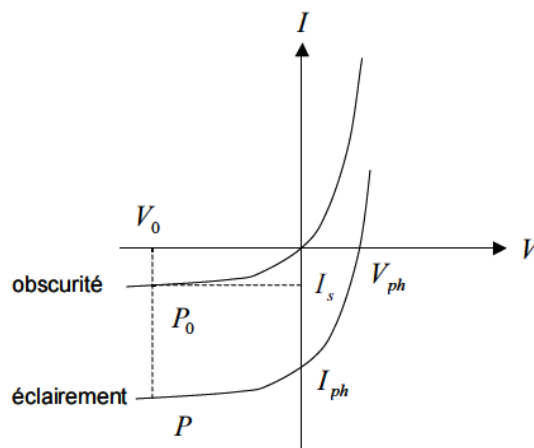


Fig-2.3- la courbe caractéristique courant tension d'une cellule solaire

La cellule photovoltaïque possède une caractéristique $I(V)$ non linéaire (Fig-2.3-). La caractéristique balaie 3 quadrants sur les 4 existants. Dans le 3ème quadrant, le système fonctionne en récepteur dont la résistance varie fortement avec l'éclairissement, c'est la photorésistance. Dans le 4ème quadrant, le système fonctionne en générateur dont le courant de court-circuit est proportionnel à l'éclairissement et dont la tension à vide est celle de la diode en polarisation directe (0.5 à 0.8 Volts pour Si) c'est la cellule photovoltaïque à jonction PN, dans cette région le produit VI est négatif (Fig-2.3-) la cellule fournit de l'énergie [14]. Si on se limite à cette région active et si on compte positivement le courant inverse, la figure 2.3 se ramène à la figure la figure 2.4

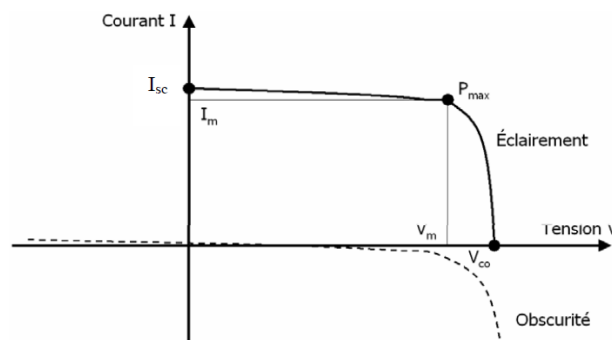


Fig-2.4- Caractéristique I-V dans le nouveau repère.

2.4 .2. Le photocourant :

Le photocourant résultant est la somme de trois composantes, le courant de diffusion des photoélectrons de la région de type p, le courant de photogénération dans la zone de charge d'espace et le courant de diffusion des phototrous de la région de type n.

2.4 .2.a) Le courant dans la région quasi-neutre N :

La densité du photocourant de trous à la limite de la zone de déplétion est donnée par :

$$J_p = -qD_p \left. \frac{dp_n}{dx} \right|_{x_j} = \left[\frac{qF(1-R)\alpha L_p}{\alpha^2 L_p^2 - 1} \right] \times \left[\frac{\left(\frac{s_p L_p}{D_p} + \alpha L_p \right) - \exp(-\alpha x_j) \left(\frac{s_p L_p}{D_p} \cosh \frac{x_j}{L_p} + \sinh \frac{x_j}{L_p} \right)}{\left(\frac{s_p L_p}{D_p} \sinh \frac{x_j}{L_p} + \cosh \frac{x_j}{L_p} \right)} - \alpha L_p \exp(-\alpha x_j) \right] \quad (2.6)$$

2.4 .2.b) Le courant dans la région quasi-neutre P :

La densité du photocourant d'électrons collectés à la limite de la zone de déplétion est donnée par :

$$J_n = qD_n \left. \frac{dn_p}{dx} \right|_{x_j+w} = \left[\frac{qF(1-R)\alpha L_n}{\alpha^2 L_n^2 - 1} \right] \times \exp(-\alpha(x_j + w)) \times \left[\alpha L_n - \frac{\frac{s_n L_n}{D_n} \left(\cosh \frac{h'}{L_n} - \exp(-\alpha h') \right) + \sinh \frac{h'}{L_n} + \alpha L_n \exp(-\alpha h')}{\left(\frac{s_n L_n}{D_n} \sinh \frac{h'}{L_n} + \cosh \frac{h'}{L_n} \right)} \right] \quad (2.7)$$

2.4 .2.c) Le courant dans la région de déplétion :

Le flux d'électrons et de trous est égale au nombre de paires électron trou créées dans la zone de déplétion. Son expression est donnée par :

$$\begin{aligned} J_{zce} &= -q \times (1-R) \times \int_{x_j}^{x_j+w} \alpha \times F_0(\lambda) \times \exp(-\alpha(\lambda) \times x) dx \\ &= -q \times F_0(\lambda) \times (1-R) \times [\exp(-\alpha \times (x_j + w)) - \exp(-\alpha \times x_j)] \\ &= q \times F_0(\lambda) \times (1-R) \times \exp(-\alpha \times x_j) [1 - \exp(-\alpha w)] \end{aligned} \quad (2.8)$$

2.4 .2.d) Le photocourant total :

La densité du photocourant totale de la cellule représente la somme des trois composantes calculées ci-dessus en fonction de la longueur d'onde du rayonnement incident. Il est indépendant de la tension extérieure et est proportionnel à l'éclairement :

$$J(\lambda) = J_p(\lambda) + J_n(\lambda) + J_{zce}(\lambda) \quad (2.9)$$

2.4 .3. Le courant d'obscurité :

Soient la cellule aux dimensions suivantes (figure 2.5-)

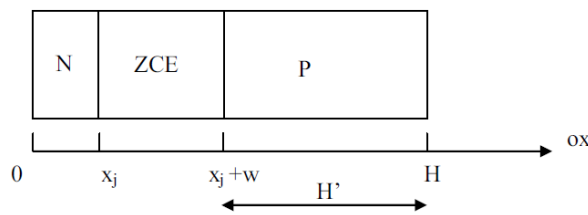


Fig- 2.5- Dimensions de la cellule solaire

2.4 .3. a)- Le courant d'obscurité total :

Les mécanismes de transport des porteurs excédentaires s'assimilent à ceux qui ont été identifiés pour le photocourant. La densité du courant d'obscurité total est la somme de ces trois types :

$$J_{tot} = J_{inj} + J_r + J_{tun} \quad (2.10)$$

2.4 .3. b)-Le courant d'injection (diffusion) :

$$J_{inj} = J_0 \times \left(\exp\left(\frac{qV_j}{kT}\right) - 1 \right) \quad (2.11)$$

$$J_0 = \frac{qD_n n_i^2}{l_n N_a} \frac{\frac{s_n l_n}{D_n} \cosh \frac{h'}{l_n} + \sinh \frac{h'}{l_n}}{\frac{s_n l_n}{D_n} \sinh \frac{h'}{l_n} + \cosh \frac{h'}{l_n}} + \frac{qD_p n_i^2}{l_p N_d} \frac{\frac{s_p l_p}{D_p} \cosh \frac{x_j}{l_p} + \sinh \frac{x_j}{l_p}}{\frac{s_p l_p}{D_p} \sinh \frac{x_j}{l_p} + \cosh \frac{x_j}{l_p}}$$

Où \$S_p\$ est la vitesse de recombinaison en surface avant et \$S_n\$ la vitesse de recombinaison en surface arrière.

2.4 .3. c)- Le courant de recombinaison :

$$J_r = \frac{q n_i w}{\sqrt{\tau_n \tau_p}} \times \frac{2kT \sinh\left(\frac{qv_j}{2kT}\right)}{q(v_d - v_j)} \times \frac{\pi}{2} \quad (2.12)$$

- n_i : la concentration intrinsèque .
- v_d : la tension de diffusion

2.4 .3. d)-Le courant tunnel :

$$J_{\text{tun}} = \frac{\sqrt{2m^*} q^3 E (v_d - v_j)}{4\pi^2 \hbar^2 E_g^{1/2}} \times \exp\left(-\frac{4\sqrt{m^*} E_g^{3/2}}{3qE\hbar}\right) \quad (2.13)$$

- Ou V_j est la tension extérieure appliquée et E le champ dans la jonction.

2.4 .2. La réponse spectrale :

La réponse spectrale **RS** d'une cellule photovoltaïque est le rapport entre le courant de court-circuit généré par la cellule et la puissance lumineuse incidente, en fonction des différentes longueurs d'onde formant le rayonnement incident (Fig-2.6). La réponse spectrale **RS** est donnée par la relation suivante:

$$RS = \frac{I_{cc}(\lambda)}{P_{in}(\lambda)} \quad (A/W) \quad (2.14)$$

La densité du photocourant totale de la cellule représente la somme des trois composantes calculées ci-dessus en fonction de la longueur d'onde du rayonnement incident [12]. Il est indépendant de la tension extérieure et est proportionnel à l'éclairement:

$$RS(\lambda) = \frac{J_p(\lambda) + J_n(\lambda) + J_{zcc}(\lambda)}{q \times F(\lambda) \times (1 - R(\lambda))} \quad (2.15)$$

D'une manière générale, la région de courtes longueurs d'ondes dans le diagramme de la réponse spectrale fournit des informations concernant l'émetteur, et la région de moyennes et faibles longueurs d'onde fournit des informations concernant la région de déplétion et la base.

A partir de l'expression la réponse spectrale, la densité du photocourant en fonction de la longueur d'onde est donnée par :

$$J_{ph}(\lambda) = q \cdot F(\lambda) \cdot (1 - R(\lambda)) \cdot RS(\lambda) \quad (2.16)$$

La densité totale sur tout le spectre utilisé est :

$$J_{ph} = q \times \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} F(\lambda) \times (1 - R(\lambda)) \times RS(\lambda) \times d\lambda \quad (2.17)$$

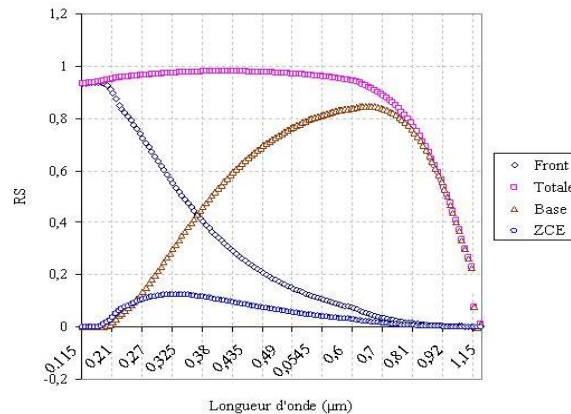


Fig- 2.6- La Réponse Spectrale d'une cellule solaire

2.5 .Paramètres d'une cellule solaire :

Un ensemble de paramètres physiques, technologiques et photovoltaïques sont à connaître ou à calculer pour élaborer ou caractériser une cellule solaire.

2.5 .1. Paramètres physiques :

Les paramètres physiques sont : le gap énergétique, la concentration intrinsèque, les masses effectives, la durée de vie des porteurs, la mobilité des porteurs de charges, la constante de diffusion, le coefficient d'absorption et le coefficient de réflexion.

◆ Le coefficient d'absorption :

Le premier phénomène à optimiser est l'absorption de la partie la plus intense du spectre solaire par un matériau approprié, ayant pour résultat la libération d'électrons. Logiquement on pense que le matériau idéal doit être choisi parmi les matériaux à petits "gap" afin d'absorber tous les photons solaires y compris les photons infrarouges dont l'énergie est inférieure à 1 eV.

Mais ce choix abaisse la valeur de la tension de sortie de la photopile qui est égale à E_g/q . En réalité, elle est directement proportionnelle au "gap" du matériau ; en tous cas elle ne peut lui être supérieure. Comme la puissance du photo-générateur est au plus égale au produit du courant par la tension, un compromis sur la valeur du "gap" est donc inévitable. Il est en général compris entre 1 et 1.5 eV et ne dépend que du matériau utilisé. A cause de nombreuses sources de pertes, dans la réalité, la tension de circuit ouvert d'une photopile dépasse rarement la valeur de la moitié du "gap". On conçoit bien que le système idéal à deux niveaux n'est pas adapté à un spectre continu de longueurs d'ondes comme le spectre solaire.

◆ Le coefficient de réflexion :

Dans le cas de la photopile idéale on fera l'hypothèse que 100 % du rayonnement pénètre dans le matériau, sachant qu'en réalité il faudra tenir compte de la réflexion sur la face avant et de l'absorption du verre protecteur, de la réflexion due au changement d'indice, et de la perte de surface active due à l'ombre portée par les grilles métalliques de collecte.

2.5 .2. Paramètres photovoltaïques :

La caractéristique courante tension qui relie les trois grandeurs, I , I_{ph} et I_d (V) permet de déterminer quatre grandeurs caractéristiques principales du fonctionnement des cellules solaires : Le courant de court-circuit I_{cc} , la tension en circuit ouvert V_{oc} , le facteur de forme FF, le rendement de conversion d'énergie η [17].

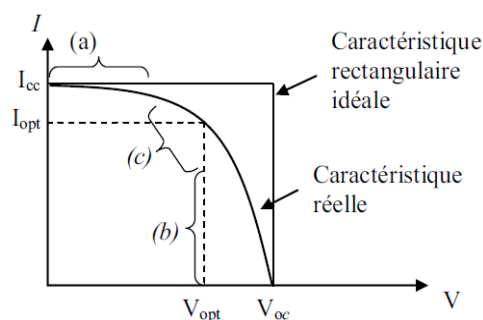


Fig- 2.7- Caractéristiques $I(V)$ et paramètres I_{cc} , V_{oc}

La caractéristique $I(V)$ de la figure-2.7- se divise en trois parties :

- La zone (a) où la cellule se comporte comme un générateur de courant I_{cc} proportionnel à l'éclairement, La zone (b) où la cellule se comporte comme un générateur de tension V_{oc} , La zone (c) où l'impédance interne du générateur varie rapidement.

a) Le courant de court-circuit I_{cc} :

Le courant de court-circuit exprimé en mA, est le courant qui circule dans la cellule sous éclairage et en court-circuitant les bornes de la cellule. Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et il dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs de charges et de la température.

b) La tension en circuit ouvert V_{co} :

La tension de circuit ouvert exprimée en V est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend de la barrière d'énergie et de la résistance shunt. Elle décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse.

$$V_{co} = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{I_{cc}}{I_s} + 1 \right) \quad (2.19)$$

c) La puissance débitée :

La puissance fournie par la pile est donnée par le produit VI, de l'équation (2.2) on

obtient :

$$P = V * I = V * (I_{ph} - I_s [e^{\frac{qV}{kT}} - 1]) \quad (2.20)$$

Cette puissance est maximum au point P_m (Fig-2.7-) définie par $dP/dV = 0$, la puissance débitée est alors donnée par le produit $V_m I_m$ qui s'écrit :

$$P_m = V_m I_m \quad (2.21)$$

d) Le Facteur de forme FF :

Le paramètre FF est le facteur de remplissage ou facteur de forme, il mesure le caractère rectangulaire de la courbe I(V). Il varie de 0,25 pour une cellule à faible rendement à 0,9 pour une cellule idéale. Le facteur de forme est défini par la relation suivante :

$$FF = \frac{P_m}{V_{co} \cdot I_{cc}} = \frac{V_m \cdot I_m}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (2.21)$$

e) Le rendement :

La performance d'une cellule photovoltaïque se mesure par son rendement de conversion de la lumière du soleil en électricité. La puissance générée par les panneaux solaires est calculée en kilowatt-crête (kWc). Le rendement, η (efficiency) des cellules PV 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_{in} .

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{ff \times V_{oc} \times I_{cc}}{P_{in}} \quad (2.22)$$

L'expression du rendement montre que les performances d'une photopile résultent directement des valeurs des trois paramètres I_{cc} , V_{co} et FF . Ces paramètres sont fonction d'une part de propriétés spécifiques du matériau telles que le gap, les coefficients d'absorption et de réflexion, la longueur de diffusion des porteurs ou la vitesse de recombinaison en surface, et d'autre part de paramètres technologiques tels que la profondeur de la jonction, la largeur de la zone de charge d'espace ou la présence de résistances parasites. . En pratique le rendement est mesuré pour une cellule sous condition de test standard (STC) ; Intensité d'irradiance de 1000 watts/m², AM 1.5, Température de 25°C. Le rendement de conversion, pour le silicium est d'une V_m de 75 à 90% de V_{co} , et I_m est 85 à 99% de I_{cc} .

$$\text{On a} \quad V_{co} = E_g / q \quad (2.23)$$

- Une E_g grande; réduit le courant de saturation inverse et augmente la V_{co} qui à son tour tend à augmenter le rendement. Une E_g grande veut dire que peu de photons peuvent être absorbés, ce qui diminue le rendement. Le résultat de Cette nette contradiction est montré par la Figure 2.8 où le rendement max est de 25% à $E_g = 1.5$ et diminue des deux cotés.

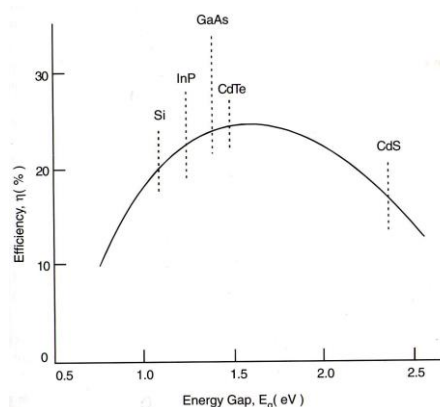


Fig-2.8-Rendement fonction de gap [10]

- Un matériau à gap direct comme GaAs a un coefficient d'absorption bien supérieur à un matériau à gap indirect comme Si, Dans le premier les photoporteurs sont donc créés sur une plus faible profondeur (1 à 2 μm) que dans le second (quelques dizaines de μm).

2.6.Circuit équivalent d'une cellule solaire :

2.6.1. Le modèle idéal :

C'est le modèle le plus simple pour représenter la cellule solaire. Il ne tient compte que du phénomène de diffusion. Le circuit équivalent de ce modèle est représenté sur la figure-2.9-, le courant est donné par la relation (2.2).

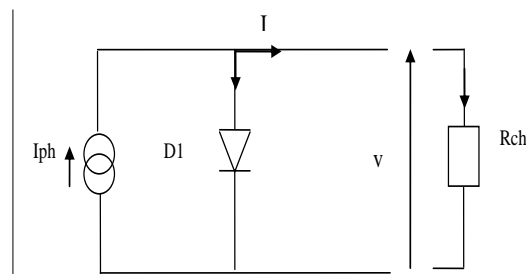


Fig -2.9- schéma électrique équivalent d'une cellule solaire idéale

2.6.2. Le modèle réel :

Ce modèle est celui d'une cellule solaire réelle (fig 2.10). L'expression de la caractéristique courant – tension sous éclairement s'écrit:

$$I = I_{ph} - I_{01} \left\{ \exp \left[\frac{q (V + R_s I)}{n k T} \right] - 1 \right\} - I_{02} \left\{ \exp \left[\frac{q (V + R_s I)}{k T} \right] - 1 \right\} - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (2.24)$$

I_{ph} étant le photocourant du aux photons incidents, les deux termes exponentiels représentent séparément le courant de saturation de diffusion (I_{01}) et le courant de saturation génération recombinaison (I_{02}), respectivement. Le dernier terme de l'équation reflète les pertes par résistance shunt, appelé courant de fuite.

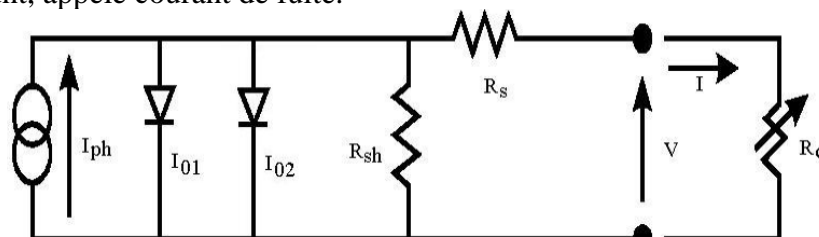


Fig- 2.10-schéma électrique équivalent d'une cellule solaire réelle

2.7. Différentes structures de cellules solaires :

2.7.1. La structure à jonction PN :

La jonction p-n est considérée comme la clé du succès des cellules photovoltaïques. La meilleure solution pour séparer les charges consiste à utiliser un champ électrique qui doit, pour bien faire, apparaître spontanément durant la fabrication des cellules. C'est pourquoi le fonctionnement même des cellules photovoltaïques repose sur l'utilisation de jonctions p-n.

2.7.2. La structure Schottky :

Une photodiode Schottky est constituée d'un substrat de silicium de type n, sur lequel est déposée une couche mince métallique, généralement de l'or. On réalise ainsi une barrière Schottky [18]. Le photocourant de génération est analogue à celui d'une photodiode à jonction P-N. L'avantage de la photodiode Schottky réside dans le fait que la couche métallique, si elle est suffisamment mince (10nm) pour le passage de la lumière, est transparente au rayonnement dans le domaine du proche ultra violet, ce qui n'est pas le cas de la zone frontale des autres types de photodiode. La zone de déplétion est si proche du plan d'incidence que les photons de grande énergie et de courte longueur d'onde peuvent y être absorbés. Les porteurs créés sont rapidement balayés par le champ élevé. Ceci permet au dispositif d'avoir, d'une part une grande sensibilité dans le bleu et le violet, et d'autre part une grande vitesse de réponse. L'inconvénient d'une telle structure est dans La réponse aux grandes longueurs d'ondes du rouge et de l'infrarouge qui est par la grande réflectivité de la couche d'or dans cette partie du spectre [16].

2.7.3. La structure MIS :

Dans ces cellules, un film isolant très mince 0.2 \AA est formé entre le métal et le substrat semiconducteur. L'isolant est obtenu soit par oxydation superficielle du silicium thermiquement ou chimiquement par le (HNO_3) , soit par dépôt de (SiO_2) en atmosphère contrôlée, puisque l'oxyde peut être formé à basses températures et aucun procédé de diffusion n'est impliqué, un rendement de 18% est obtenu par cette structure dans la condition AM1.

2.7.4. La structure à jonction PIN :

Nous venons de voir l'intérêt d'avoir une ZCE suffisamment grande pour que le photocourant soit essentiellement créé dans cette zone [18]. Il est possible de maintenir des niveaux de dopages élevés dans les régions N et P sans réduire l'extension de la zone de déplétion, dont la largeur est dès lors pour l'essentiel déterminé par l'épaisseur d'une couche I qui est intercalée entre les régions N et P. Ce qui nous donne la cellule solaire à structure PIN qui est le but de ce mémoire. Donc on augmente artificiellement l'épaisseur de la ZCE. Les photoporteurs atteignent très vite leur vitesse limite. On obtient ainsi des cellules très rapides. En plus le champ électrique dans la région de déplétion empêche la recombinaison des porteurs, ce qui rend la photodiode un composant très sensible [19].

2.7.5. Structure à avalanche :

Une structure à avalanche est avant tout une structure PIN, à laquelle on applique une polarisation inverse proche (mais inférieure en valeur absolue) à la tension de claquage [18]. Les photoporteurs créés dans la zone de charge d'espace sont alors multipliés par l'effet d'avalanche. Les photopiles à avalanche sont des dispositifs attractifs car ils bénéficient d'un gain interne dû à la multiplication des porteurs générés par l'absorption de la lumière incidente. En effet, lorsque ces porteurs traversent une région où règne un champ électrique élevé ($>10^5$ V/cm), ils peuvent acquérir une énergie suffisante pour ioniser les atomes du réseau cristallin créant ainsi de nouvelles paires électron trou qui immédiatement dissociées, pourront à leur tour créer d'autres paires électron trou, entraînant juste une amplification du photocourant primaire [16].

2.8. Différentes couches d'une cellule solaire à jonction PN :

La cellule photovoltaïque est constituée de plusieurs couches, l'élément de base est la jonction **PN** qui joue le rôle principal dans le dispositif solaire plus quelques couches donnant une structure industrielle standard qui est présentée sur la figure 2.12 :

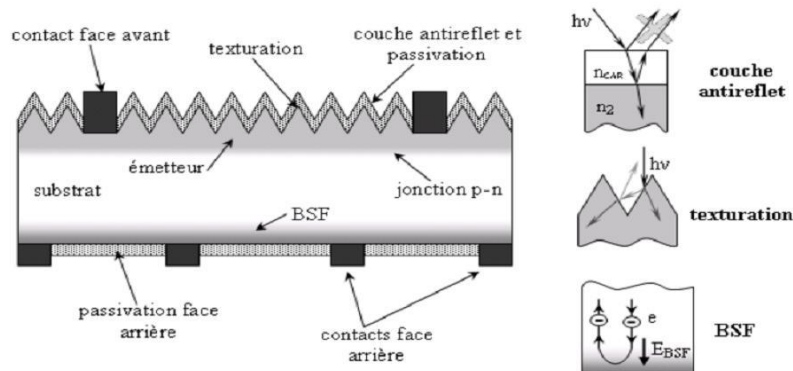


Fig- 2.12- La structure d'une cellule photovoltaïque standard

2.8.1. Texturation de surface :

La texturation du silicium est utilisée pour diminuer la réflectivité de la surface de la cellule. Cette opération vise à développer en surface un relief micrométrique, généralement de forme pyramide (2.12). Un rayon d'incidence normale sera transmis dans la cellule avec un angle de réfraction θ différent de 0° . Le trajet de ce rayon dans le silicium sera donc augmenté d'un facteur $1/\sin\theta$ par rapport, ce qui augmentera la part de photons absorbés par le matériau. Pour finir, la texturation de la surface entraîne un piégeage plus important de la lumière pénétrant dans la cellule.

Sur la face arrière de la cellule, il existe un angle d'incidence critique θ_c à partir duquel le rayon est totalement réfléchi et prolonge son trajet dans le semi-conducteur, augmentant là aussi l'absorption des photons. En appliquant la loi de Descartes, on trouve que cet angle vaut 17° dans le cas du silicium dans l'air.

2.8.2. Couche antireflet :

Pour minimiser la réflexion de la lumière en surface au niveau de la face avant, cette surface est recouverte d'une couche anti-réfléchissante (Anti-Reflective Coatings CAR). Sans cette couche, la cellule solaire agit comme un miroir et reflète jusqu'à 33% de la lumière incidente sur la cellule.

Différentes couches anti réfléchives sont utilisées en photovoltaïque, elles peuvent être isolantes comme le TiO₂, SiO₂, ZnS, MgF₂ et SiN_x ou conductrice comme le ZnO ou l'ITO. La réflectivité dépend de l'indice de réfraction du matériau de l'épaisseur de la couche déposée, de l'angle d'incidence et de l'état de polarisation du rayon incident. Si l'épaisseur de la couche diélectrique est égale à :

$$d_{CAR} = \frac{(2N + 1) \cdot \lambda}{4n_{CAR}} \quad \text{avec } N = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (2.26)$$

On obtiendra l'annulation des faisceaux réfléchis à l'interface air/ CAR et CAR /semi-conducteur. Pour les cellules photovoltaïques à haut rendement, une double CAR est utilisée avec deux diélectriques différents.

2. 8. 3. La Couche BSF (Back Surface Field) :

C'est une couche fortement dopée sur la face arrière de la cellule. Cette zone a le même type de dopage que celui de la base, conduisant à une structure **P-P+**. Ce qui crée une barrière de potentiel sur la face arrière de la cellule pour assurer une passivation. La barrière de potentiel induite par la différence du niveau de dopage entre la base et le BSF tend à confiner les porteurs minoritaires dans la base. Donc le but du champ arrière est de diminuer la vitesse de recombinaison.

2.8. 4. Les Contacts face avant et arrière :

Les contacts métalliques de l'émetteur et du substrat servent à collecter le courant de porteurs photo générés. Les contacts doivent être ohmiques, c'est à dire que la caractéristique (**V**) du contact doit être linéaire. La résistance des contacts est un paramètre très important. La forte résistance des contacts augmente la résistance série de la cellule et baisse le facteur de forme ainsi que le rendement. Les contacts sont généralement réalisés par sérigraphie. Les doigts de sérigraphie possèdent une largeur minimale de 100 µm et une épaisseur de 10 µm à 30 µm permettant de conduire une forte densité de courant. Pour les cellules photovoltaïques à haut rendement, la pulvérisation cathodique ou l'évaporation sous vide sont utilisées.

2.9. Conclusion :

Nous avons décrit dans ce chapitre la cellule solaire, ses différents constituants, ses différents paramètres électriques (rendement, facteur de forme, le courant de court circuit, ...) et les expressions de base qui gouvernent tous les phénomènes physiques internes permettant la génération du photo-courant. Nous avons aussi présenté son circuit équivalent, quelque type de structures.

Chapitre 3 :

La Cellule solaire

A structure PIN

3.1. Introduction :

Le fonctionnement d'une jonction PN forme la plateforme (background) pour les photodétecteurs pour lequel il est important de maximiser l'absorption de la lumière au sein du matériau[18]. Nous venons de voir dans le chapitre précédent, l'intérêt qu'il y a à donner à la zone de charge d'espace de la jonction une valeur suffisante pour que le photocourant soit essentiellement dû à la photogénération des porteurs dans cette zone [14].

Dans ce chapitre on va voir les bases de la polarisation inverse et directe et comment l'incorporation d'une couche intrinsèque I ou faiblement dopée P ou dopée N, améliore considérablement le rendement du dispositif, ceci nous conduit à la structure universelle de base la cellule solaire à structure PIN.

La première diode à jonction PIN a été rapportée en 1962, et était faite en germanium, depuis ; ce type de construction a virtuellement éliminé la jonction standard PN polarisée en inverse. Avec l'introduction de semi-conducteurs comme dispositifs de photodétection, la diode PIN a vu son utilisation augmentée comme photodétecteur. Sa grande surface d'épuisement était idéal pour son utilisation dans ce rôle.

On augmente artificiellement la ZCE en intercalant une région très légèrement dopée (intrinsèque) entre les régions de type n et de type p, la zone de déplétion s'étend sur tout le volume de cette partie du dispositif, comme le montre la figure- 3.1-.

3.2. La structure PIN de base :

La cellule solaire à jonction PIN de base, est illustrée par la figure 3.1. a) :

- La structure consiste en un substrat type n,
- sur lequel une couche intrinsèque légèrement dopée I est épitaxiée [6].
- SiO₂ est ensuite déposée et configurée pour former des fenêtres pour une ultérieure diffusion à haute température d'un dopant de type p.
- La région n peut ensuite être amincie de l'arrière et les contacts métalliques sont placés des deux cotés ; surfaces devant et arrière.
- Les contacts devant sont conçus pour laisser passer la lumière à l'intérieur du dispositif, tandis que celui arrière est planaire, sur toute la surface.
- Un revêtement antireflet sur le devant complète la structure.
- Typiquement l'épaisseur de la région p devra être très petite, comparée avec la région intrinsèque.

- Ce design forme la base de tous les dispositifs semiconducteur unique et binaire, bien que des fois il est mis sens dessus dessous; P-, épitaxie intrinsèque et enfin la diffusion- n.

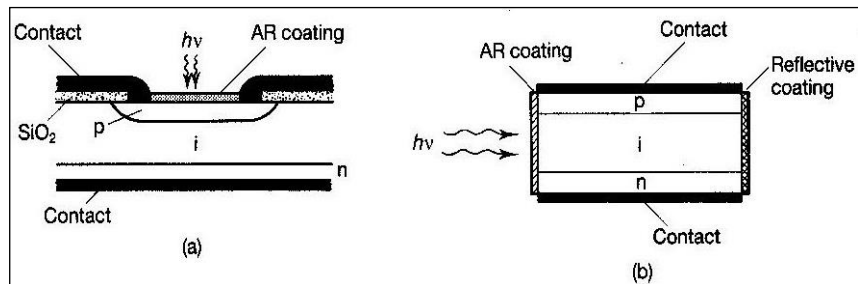


fig -3.1- structure de base d’une cellule solaire pin a) entrée lumière haut b) entrée de coté [6]

La structure PIN admet une entrée latérale (fig-3.1.b-) qui a l’avantage d’éliminer l’absorption non voulue de la région p, en minimisant la perte de lumière. En plaçant un revêtement antireflet du coté droit, un grand volume d’absorption est créé et qui est particulièrement utile pour détecter la longueur d’onde près du gap sans avoir à recourir à de très large régions intrinsèques, et nécessairement un grand voltage appliqué pour la déplétionner complètement.

3.3.Principe de fonctionnement de la cellule solaire à structure PIN :

Le principe de fonctionnement d’une cellule solaire photovoltaïque est illustré sur la figure-3.2-, qui représente le fonctionnement d’une jonction PN où la zone de charge d’espace

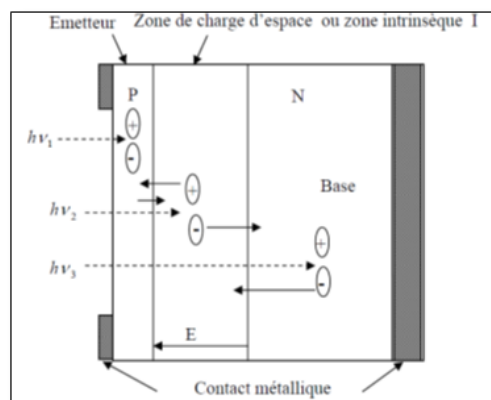


figure-3.2-Principe de fonctionnement d’une cellule solaire à structure PIN [14]

créé est une région intrinsèque. Les photons incidents créent des porteurs dans chacune des régions P, I, N, et leur comportement diffère suivant la région de la jonction où ils sont créés [20].

a) Dans les régions électriquement neutres P et N :

Les photoporteurs minoritaires diffusent, ceux qui atteignent la zone de charge d'espace sont propulsés par le champ électrique, dirigé de la partie chargée positivement à la partie chargée négativement (voir figure-3.2-), vers la région où ils deviennent majoritaires [14]. Il y a donc une séparation des porteurs dans la ZCE vers les régions p et n. Ces photo-porteurs contribuent donc au courant par leur diffusion, ils créent un photocourant de diffusion.

b) Dans la zone de charge d'espace :

Les paires électrons-trous créées par les photons sont dissociées par le champ électrique, l'électron est propulsé vers la région type N et le trou vers la région de type P. Ces porteurs donnent naissance à un photocourant de génération.

3.4. Types de structure PIN :

3.4.1. Selon le dopage de la zone intrinsèque :

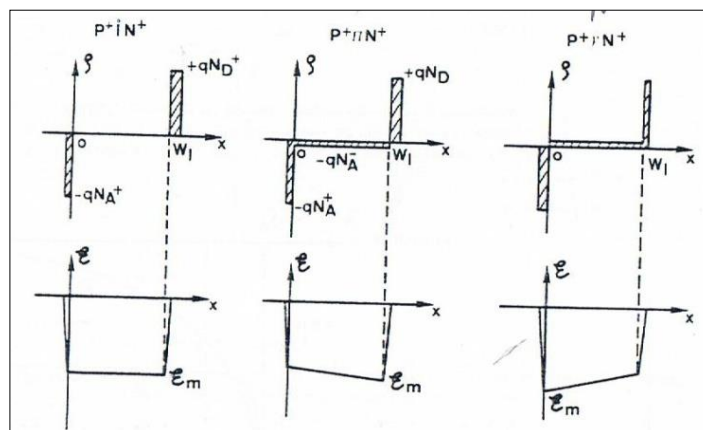


figure-3.3- Possibilités de dopage de la zone intrinsèque

[21]

- Une diode p-i-n idéale (notée P^+IN^+) où P^+ , N^+ sont très dopées, la zone I d'épaisseur w_1 ne contient aucune impureté ionisée. Les zones de charges d'espaces négative (coté P^+) et positive (coté N^+) sont séparées par I.

- Mais réellement une diode p-i-n ne possède jamais une zone I purement intrinsèque de par les procédés technologiques de fabrication de la diode. [21]

Elle est légèrement dopée N (notée $P^+ \nu N^+$ où ν est peu dopé n ou $(P^+ N^- N^+)$). Le champ max ξ_m se situe à la jonction $P^+ \nu$.

Ou légèrement dopée P (notée $P^+ \pi N^+$ où π est peu dopé P $(P^+ P^- N^+)$). Le champ max ξ_m se situe à la jonction πN^+) Si ν (ou π) est pas trop dopée ou très épaisse, elle peut ne pas être totalement désertée quand la diode n'est pas polarisée (on retrouve P+N). Toute fois quand la diode est polarisée en inverse la zone peu dopée est très rapidement vidée de ses porteurs.

3.4.2. Selon la technologie de fabrication :

Concernant des structures monocristallines ou polycristallines elles sont comme le montre la figure-3.1-.

3.4.2.1. Les cellules solaires à jonction PIN à silicium amorphe :

Les premières photopiles solaires de silicium amorphes ont été fabriquées par Carlson et Wronski dans les laboratoires de RCA, (U.S.A) avec un rendement initial 2,4% en 1976 [8]. Cette cellule a eu une structure p-i-n, avec presque 1 μ m d'épaisseur de la couche I et des couche dopées de plusieurs dizaines de nanomètres [17].

Le champ électrique est plus élevé proche des contacts P+ et N+, mais le champ appréciable est maintenu dans la majorité de la couche intrinsèque, si cette couche n'est pas trop épaisse ou défectueuse. Cependant, une cellule fonctionne près du point maximum de puissance c.-à-d. sous polarisation directe, et dans cette condition, le champ est réduit tels qu'une région de champ libre virtuelle se développe dans le centre de la couche I. Toute la région de déplétion devient alors plus petite que l'épaisseur de la couche I et le photocourant et en fonction de la tension. Par conséquent, ces structures P+-I-N+ s'appellent typiquement des piles solaires de type de dérive, contrairement au pile solaire cristalline où le photocourant est indépendant de la tension externe (dispositifs de type diffusion). Une Cellule monojonction à structure PIN typique est montrée dans la figure :

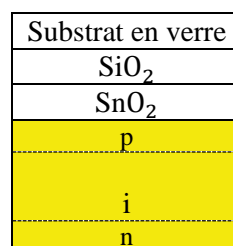


figure-3.4- Cellule PIN monojonction [10]

Lorsque les modules fabriqués avec la structure PIN et un rendement supérieur à 12%, sont exposés des mois au soleil ; leur rendement baisse à moins de 5% du à l'effet de Staebler-Wronski. Mais il est possible d'absorber le spectre plus efficacement et augmenter la stabilité de la cellule en utilisant plusieurs structures PIN avec différent gap des couches I, pour obtenir double (figure-3.5- a)) ou triple structures de jonction (figure-3.5 - b))

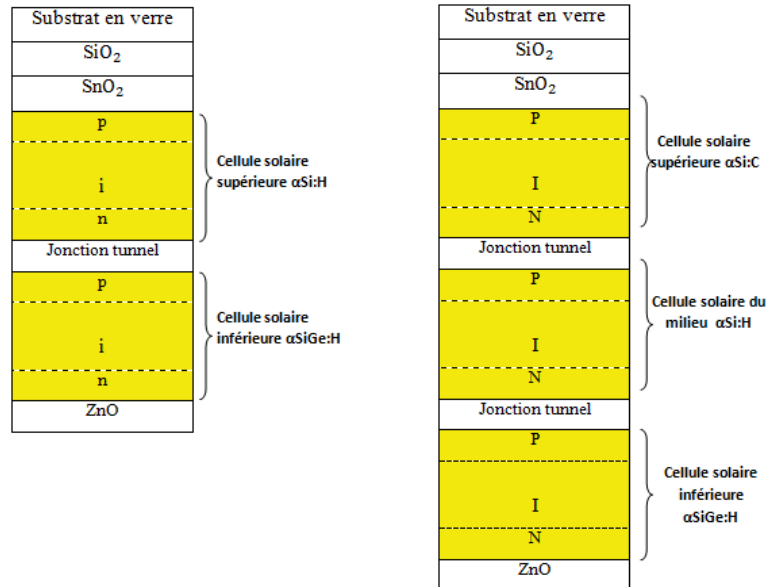


figure-3.5- Cellules solaires à jonction PIN à silicium amorphe

a) double jonction b) triple jonction

Position PIN	Matériau de la cellule	Gap de i	Photons absorbés
Cellule du haut	a-Si	1.8 ev	Photons bleu
Cellule du milieu	a-SiGe (Ge 10-15%)	1.6 ev	Photons vert
Cellule du bas	a-SiGe (Ge 40-50%)	1.4 ev	Photons rouge et IR

Tableau 3.1. Matériaux et gap et ondes absorbées par les structures PIN

La lumière non absorbée est réfléchiée par Ag/ZnO, le réflecteur de l'arrière. Les cellules sont interconnectées par des couches fortement dopées qui forment les jonctions Tunnels.

3.4.2.2. Les cellules solaires à jonction PIN à silicium microcristallin (mc-Si) :

Si les gaz utilisés dans PECVD pour déposer a-Si sont dilués en hydrogène, la couche déposée consiste en des régions de C-Si immergées dans une matrice amorphe. Ce matériau 2 phases est appelé Si microcristallin, ou nanocristallin. Les propriétés physiques (surtout la stabilité sous la lumière) sont similaires à ceux du mono ou poly c-Si voir figure-3.6-

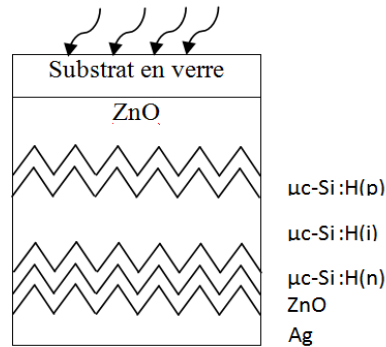


figure-3.6- Cellules solaires à jonction PIN à silicium microcristallin (mc-Si) [10]

Cellules Tandem Hybride:

Nommées cellules micromorphes. C’est Un empilement de mc-Si à faible gap et a-Si à grand gap. L’avantage est que le rendement d’une cellule micromorphe de deux jonctions est 12%, très proche de celui d’une cellule triple a-Si/a-Ge qui est de 13% (2004), ce qui rend ces cellules hybrides micromorphes la rivale de la cellule triple jonctions de a-Si en terme de stabilité et de rendement. La figure-3.7- (a) montre une Cellule individuelle en silicium amorphe (épaisseur du a-Si 180–250 nm). Et La figure-3.7- (b) montre une Cellule « tandem » dans laquelle est ajoutée à la cellule en silicium amorphe (cellule supérieure) la cellule microcristalline (cellule inférieure) typiquement 5 fois plus épaisse.

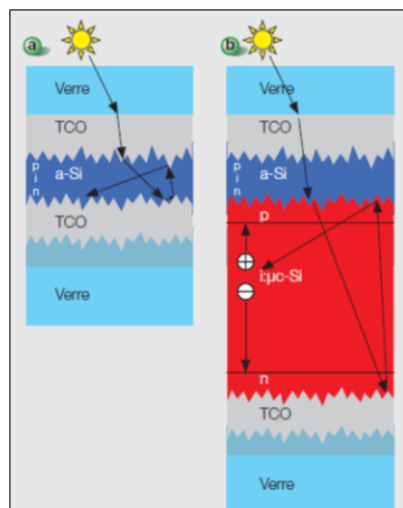


figure-3.7- Structure de la cellule en silicium « couche mince ».

✚ Cellules HIT (hétérojonction avec intrinsic thin layer)

C'est Une autre cellule commerciale à haut rendement, Le c-Si et l'amorphe sont combinés dans cette structure :

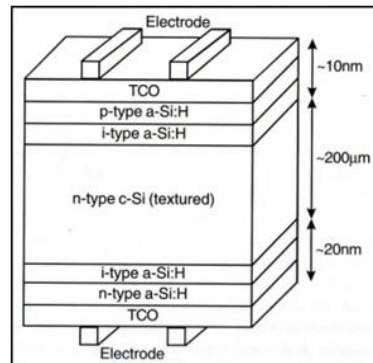


figure-3.8- cellule HIT [10]

Le substrat Si est mis en sandwich entre une couche de p/i type a-Si :H en haut et une couche i /n type a-Si :H en bas. Un oxyde conducteur transparent (TCO) et des électrodes sont des deux cotés de la cellule, avec une épaisseur max du TCO du haut car il est en même temps un anti reflet. Les avantages d'une telle cellule sont :

- ✓ Un haut rendement.
- ✓ Excellente suppression de la recombinaison en surface, qui est la plus importante caractéristique des cellules à haut rendement.
- ✓ Excellente passivation de surface des défauts de surface c-Si par haute qualité de couche intrinsèque a-Si.
- ✓ Procédés à faibles températures (inferieur à 200°C sauf pour la production du substrat). En plus d'une structure symétrique aide à diminuer l'épaisseur de la cellule.
- ✓ Meilleur coefficient de température comparé aux cellules c-Si et ainsi plus grande puissance de sortie à plus grande températures.
- ✓ Temps de l'énergie payback réduit.
- ✓ Cout moindre comparé aux cellules c-Si.

3.4.2.3. Cellules solaires PIN organiques :

Fabriquées de matériaux organiques en couches minces, il y a deux types de cellules organiques ; cellules organiques à petites molécules et les cellules organiques polymères. Le Principe de fonctionnement des cellules organiques est très différents des cellules conventionnelles. Dans les anciennes les porteurs de charges libres sont directement générés tandis que dans l'organique l'absorption du photon est suivi par la création d'excitons d'énergie

de liaison autour de 0.3à 1.0 ev. Mais le champ électrique pour surmonter cette énergie de liaison n'est pas disponible dans les cellules organiques d'où les excitons sont séparés par l'interface de deux couches organiques constituant une hétérojonction.

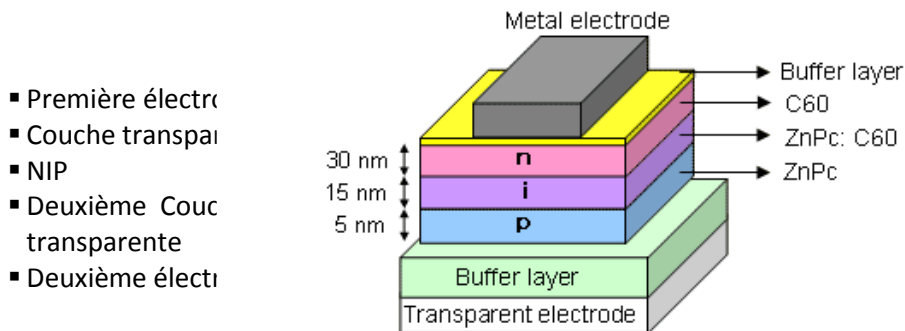


figure-3.9- Structure de type jonction pin organique à couche mince d'une cellule solaire

Les énergies relative de ces deux matériaux ont besoin d'être optimiser pour garder les excitons séparés et éviter la perte d'énergie dans le procédé. Donc une hétérojonction entre deux matériaux très absorbants constitue la cellule de base.

Due à des petites longueurs de diffusions, la région photoactive est seulement une couche étroite de chaque cote de l'hétérojonction. Les cellules doivent être beaucoup plus épaisse que la région active pour éviter la recombinaison dans les contacts métalliques, càd il y a des régions à forte absorption qui ne contribue pas au photocourant. Elles sont remplacées par matériau transparent à large gap donnant la structure typique de la figure-3.9-.

- **Les avantages :**

- ✓ Préparation facile, Cout faible de matériaux, procédés. Procédés à faibles températures
- ✓ Peuvent être préparées sur des feuilles en plastique flexible, idéal pour des systèmes mobiles.
- ✓ La cellule absorbe la lumière dans la région photoactive seulement et atteint un rendement interne très grand.
- ✓ Deuxième caractéristique technologique cruciale est le dopage contrôlé des couches de transport à grande largeur de bande. Tandis que le procédé de dopage est critique pour les cellules inorganiques, les cellules organiques sont généralement préparées sans dopage contrôlé parce que c'est difficile de produire des couches organiques stables et reproductibles.

- **L'inconvénient:**

- Rendement faible comparé aux autres cellules.

3.4.2.4. Cellules PIN sur nanofils de Si :

Les Cellule solaire hybride de type multijonction comportant des nanofils en silicium alignés verticalement pourvus de films minces. Cette invention concerne un procédé à bas coût de formation d'un dispositif photovoltaïque qui est une cellule multijonction nanostructurée haute performance. Les multiples jonctions P-N ou jonctions P-I-N sont jointes de manière contiguë pour former une seule jonction P-N contiguë ou une seule jonction P-I-N contiguë.

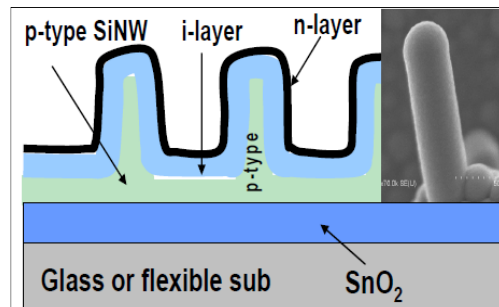


figure-3.10- Cellules PIN sur nanofils de Silicium.

Le dispositif photovoltaïque comporte des nanofils semi-conducteurs alignés verticalement comprenant un matériau semi-conducteur dopé pourvus d'une couche mince de silicium ayant un type de dopage opposé. Cette nouvelle cellule hybride peut fournir un rendement supérieur à des dispositifs photovoltaïques classiques grâce à une combinaison d'une absorbance améliorée des photons, d'une résistance réduite au contact, et des courts trajets de transport dans les nanofils. Des procédés à température ambiante ou des procédés à basses températures tels que des procédés de dépôt chimique en phase vapeur assistés par plasma (PECVD) et électrochimiques peuvent être utilisés pour fabriquer ce dispositif photovoltaïque de manière économique, évolutive et économe en énergie.

3.5. La physique de la jonction PIN :

3.5.1. La jonction PIN à l'équilibre thermique :

Pour une jonction, l'état d'équilibre thermique correspond à une polarisation nulle et un éclairement nul [21]. L'étude de la cellule en absence de polarisation permet de mieux comprendre où se situent les zones de charge d'espace (ZCE) et comment évolue le potentiel électrostatique à travers la cellule. Cela permettra d'écrire les équations fondamentales de la cellule p-i-n liant la barrière de potentiel à la largeur de la zone de charge d'espace [23].

3.5.1.1. La barrière de potentiel :

Envisageons tout d'abord le cas d'une PIN idéale dont la région centrale d'épaisseur w_1 ne contient aucune impureté, le profil de densité de charge $\rho(x)$ est donné par la figure-3.11- e) ainsi qu'une petite comparaison avec celui d'une P+N.

- Le profil du champ électrique $\xi(x)$ se déduit du profil de densité de charge $\rho(x)$ par l'équation

de Poisson :

$$\frac{\partial \xi}{\partial x} = \frac{\rho}{\epsilon_{sc} \epsilon_0} \quad (3.1)$$

Il est trapézoïdal, ξ est constant dans la région I puisque $\rho = 0$, comparativement $\xi(x)$ est triangulaire pour une P+N.

- Le profil du potentiel électrostatique $\varphi(x)$ se déduit du profil $\xi(x)$ par la relation :

$$\xi = - \frac{d\varphi}{dx} \quad (3.2)$$

$\varphi(x)$ est linéaire dans la région I puisque ξ est constant, $\varphi(x)$ parabolique entre $-x_p$ et 0 et entre w_1 et $w_1 + X_N$. Comparativement $\varphi(x)$ est constitué de deux arcs de paraboles ayant leur sommet en $-x_p$ et X_n pour une P+N. La hauteur de la barrière de potentiel est grande pour une PIN que pour une P+N.

- Le profil d'énergie $E(x)$ est linéaire dans I, il est déduit du potentiel électrostatique

- $\varphi(x)$ par la relation : $E_i(x) = -q \varphi(x) \quad (3.3)$

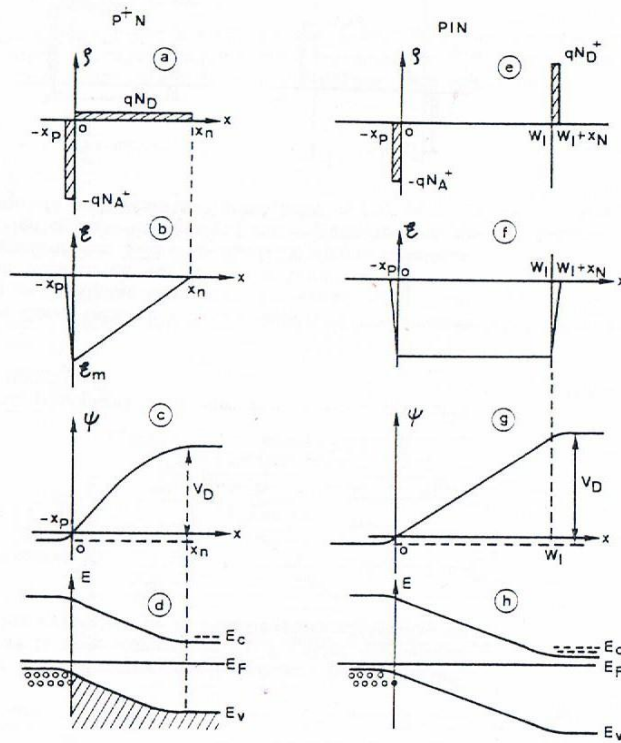


figure-3.11- [45]. a) le profil de densité de charge $\rho(x)$ pour PN e) pour PIN
 b) le profil champ pour jonction PN f) pour une jonction PIN
 c) le profil potentiel électrostatique pour PN g) pour une jonction PIN
 d) diagramme de bandes pour PN h) pour une jonction PIN

Il faut savoir que ces profils se modifient lorsque la région I est soit peu dopée P ou peu dopée N. la figure-3.4, compare les profils $\rho(x)$ et $\xi(x)$ dans les trois cas ;
 On observe une légère variation de ξ dans la région peu dopée, le champ maximum ξ_m se situe à la jonction P-N+ pour une P+P-N+ et à la jonction P+N- pour une P+N-P+.
 Si la région P- (ou N-) est pas trop dopée ou très épaisse, la zone P- (ou N-) peut ne pas être totalement désertée lorsque la diode n'est pas polarisée (on retrouve alors la situation de la P+N).

3.5.1.2. Le comportement en inverse d'une jonction PIN :

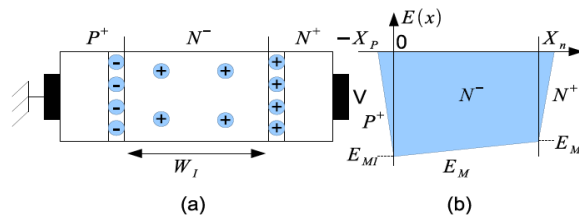


figure-3.12- (a) : Vue en coupe d'une diode semi-infinie PiN sous polarisation inverse, (b) : Profil du champ électrique dans une diode PiN dans les mêmes conditions [25]

- la zone de charge d'espace (ZCE), siège d'un champ électrique, s'élargit de part et d'autre de la jonction métallurgique et entraîne la désertion en porteurs libres à l'intérieur de ses limites. La distribution du champ électrique est alors fonction des concentrations en atomes dopants ionisés dans les régions N et P, le champ électrique étant maximal à la jonction.
- La neutralité globale de la ZCE implique une égalité des charges de chaque côté de la jonction et donc une extension plus importante de la ZCE du côté le moins dopé ; la zone intrinsèque.
- La tension inverse est supportée par la couche N^- et elle est égale à l'intégrale du champ électrique entre $-X_p$ et X_n .

La figure-3.14- montre l'évolution de la tension de claquage en fonction de la concentration de dopants et de l'épaisseur de la zone intrinsèque pour une diode silicium.

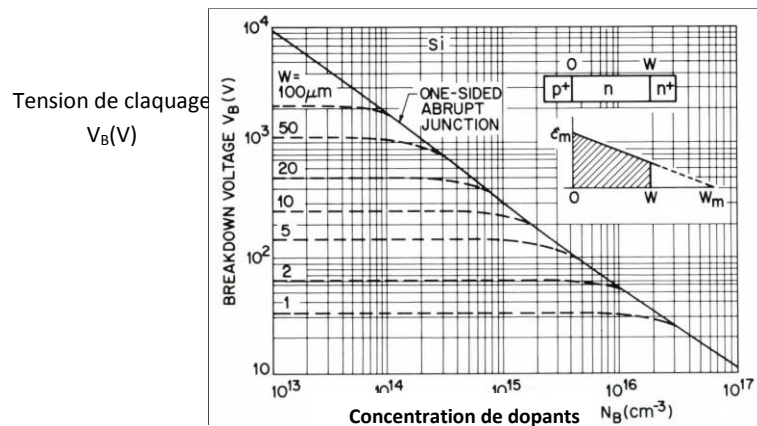


figure-3.13- Tension de claquage en fonction de la concentration de dopants et de l'épaisseur de la zone intrinsèque pour Si [16]

3.5.1.5. Le courant de fuite :

A température ambiante dans un SC à large bande interdite comme le Si, le courant de fuite est due à la génération thermique de paires e-/tr dans les zones désertes.

$$j_R = q U_G W_{ZCE} \tag{3.4}$$

U_G est la vitesse de génération thermique, elle se calcule de la vitesse de recombinaison U_R de SRH :

$$U_G = - U_R = \frac{c N_R}{2} n_i$$

$$\Rightarrow U_G = \frac{n_i}{2 \tau} \text{ tq } \tau = \frac{1}{c N_R} \tag{3.5}$$

L'épaisseur de la ZCE demeure, quelle que soit la polarisation inverse, voisine de l'épaisseur de la zone intrinsèque W_i . En effet, les régions P+ et N+ sont très dopées et les extensions de la ZCE dans ces régions (x_p et x_n) sont très faibles [21]. Enfin le **courant de fuite** est :

$$j_R = q n_i W_i / 2 \tau \tag{3.6}$$

Le courant de fuite est donc important dans une PIN et à, peu près indépendant de la polarisation inverse.

3.5.1.4. La capacité de zone déserte :

Considérons donc une diode p-i-n avec une zone intrinsèque ayant un dopage résiduel N_d de type N- de l'ordre de 10^{13}cm^{-3} , la diode est alors dite P+N-N+. Les zones terminales possèdent quant à elles des dopages de l'ordre de 10^{19}cm^{-3} [23].

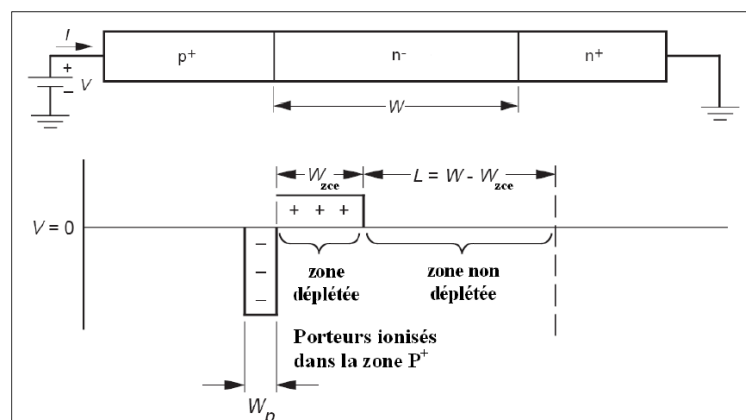


figure-3.14- Zones déplétées dans la diode à l'équilibre thermodynamique [23]

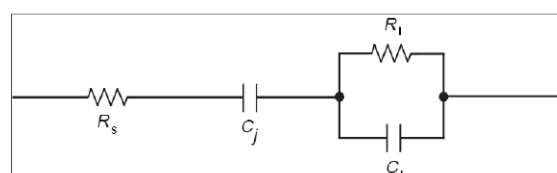


figure-3.15- schéma équivalent de la diode PIN à l'équilibre

En l'absence de polarisation, une zone déplétée de porteurs se crée à la jonction la plus Dissymétrique, dans notre cas à la jonction P⁺-N⁻. Cette zone de charge d'espace s'étend très largement dans la zone centrale de la diode du fait de sa très faible concentration en atomes dopants afin de conserver la neutralité électrique du semiconducteurs (figure-3.14-). La zone centrale de la diode peut alors se décomposer en deux sous-ensembles :

1. Une zone déplétée de porteurs (de largeur W_{zce}) présente une résistance très élevée de plusieurs M et est équivalente à un condensateur plan d'équation:

$$C_J = \varepsilon \frac{A}{W_{zce}} \tag{3.7}$$

2. Une zone non déplétée mais de grande résistivité, de largeur $L = W - W_{zce}$, quant à elle, est équivalente à une résistance et une capacité parallèle. Ces éléments peuvent s'écrire de la manière suivante :

$$C_1 = \varepsilon \frac{A}{W - W_{zce}} \tag{3.8}$$

$$R_1 = \frac{1}{q\mu_n N_d} \frac{W - W_{zce}}{A} \tag{3.9}$$

En plus de ces éléments, une résistance série s'ajoute au schéma équivalent de la diode. Elle est définie comme la somme des résistances des deux contacts ohmiques et des résistances des zones P^+ et N^+ .

- Lorsqu'une tension inverse est appliquée à la jonction, la largeur de la zone déplétée augmente et par conséquent la capacité de jonction C_J diminue.

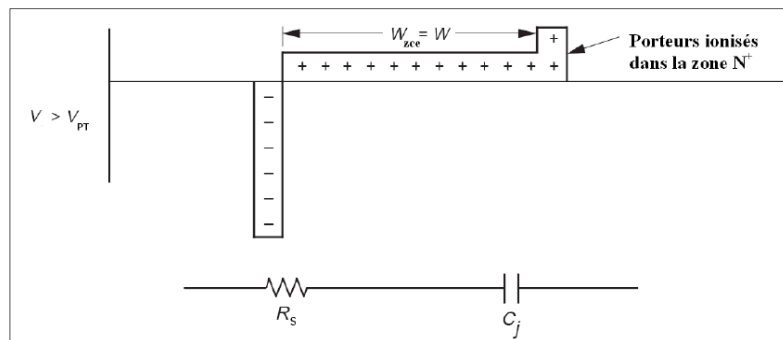


figure-3.16- Zones déplétées dans la diode pour une tension inverse appliquée supérieure à la tension de perçage et schéma équivalent correspondant.

3.5.1.5. La tension d'Avalanche :

L'avalanche d'une jonction polarisée en inverse se produit lorsque chaque porteur traversant la ZCE crée une paire électron trou, ce qui conduit à la condition [21],[25] :

$$\int_{ZCE} \alpha [\xi(x)] dx = 1 \tag{3.10}$$

En négligeant la contribution des zones P⁺ et N⁺ très fines, $EM1 = EM2 = \xi_I$ (dû au faible dopage de cette couche). La tension d'Avalanche BV pour la PIN est

$$BV = \xi_I W_I \tag{3.11}$$

Lorsque le dopage de la région I croit, la tension d'Avalanche BV reste constante tant que la zone I est totalement désertée.

3.5.2. Le comportement en direct :

Comme pour une diode PN, la circulation d'un courant direct dans une PIN est rendu possible par la recombinaison des porteurs injectés [45]. La jonction PIN a aussi deux régimes de fonctionnement :

3.5.2.1. Bas niveau :

Il y a deux jonctions injectantes: la jonction P⁺I qui donne lieu à une chute de tension V_{P+} , la jonction N⁺I qui donne lieu à une chute de tension V_{N+} , La tension directe est alors [21] :

$$V_{appl} = V_{P+} + V_i + V_{N+} \tag{3.12}$$

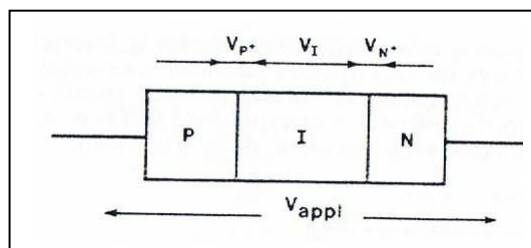


figure-3.17- Les tension de la jonction PIN

Les deux jonctions se comportent chacune comme une jonction p-n traditionnelle. La diode se comporte alors comme une jonction p-n avec une tension de claquage élevée. La diode agit comme un redresseur traditionnel. La zone intrinsèque de la diode agit quant à elle comme un court circuit. La chute de tension à ses bornes est nulle. La loi de variation du courant en fonction de la tension appliquée à la diode est la même que pour une jonction p-n. Dans le cas d'une diode p-i-n, le facteur d'idéalité N est proche de 2 du fait des deux jonctions. J_F courant de recombinaison dans I :

$$J_F = \int_0^{W_I} q U(x) dx \tag{3.13}$$

Par définition
$$U(x) = (n(x) - n_0) / \tau_a \tag{3.14}$$

Tq : $n(x)$ profil de concentration des électrons dans I
 n_0 concentration d'équilibre $n_0 = n_i$
 τ_a durée de vie ambipolaire $\tau_a = \tau_{n0} + \tau_{p0}$ avec : $\tau_{n0} = \frac{1}{c_n N_R}$ et $\tau_{p0} = \frac{1}{c_p N_R}$

$n(x)$ étant $\forall x$ très supérieur à $n_0 = n_i$ on a $U(x) = n(x) / \tau_a$

Le calcul de j nous conduit donc à établir le profil des porteurs dans I, ce qui va nous amener à distinguer entre diodes PIN courtes (fig3.18a) et longues (fig3.18 b).

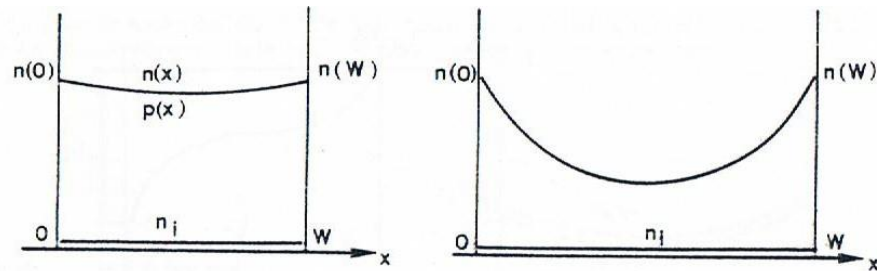


figure-3.18

- a : diodes PIN courtes : $W/2 \ll L_a$

- b : diodes PIN longues $W/2 \gg L_a$

$n(x) = p(x) = cste$

$n(x)$ et $p(x)$ non cst

3.5.2.2. Profils $n(x)$ et $p(x)$ dans la zone I :

On a injection des trous en $x=0$ par la jonction P^+I , et d'électrons en $x= W$ par la jonction IN^+ . Ces porteurs diffusent dans I, y dérivent dans le champ électrique ξ et s'y recombinent.

$$j_n = q Dn \frac{dn}{dx} + q \mu_n \xi(x) n(x) \tag{3.15}$$

$$j_p = - q Dp \frac{dp}{dx} + q \mu_p \xi(x) p(x) \tag{3.16}$$

En raison des recombinaisons, le courant de trous décroît lorsque x croît et le courant d'électrons croît ; les équations de conservation permettent d'écrire :

$$-\frac{dj_p}{dx} = \frac{dj_n}{dx} = qU = q \frac{n(x)}{\tau_a} \tag{3.17}$$

On suppose que la région I est quasi neutre $\Rightarrow n(x) = p(x) \quad \forall x \tag{3.18}$

La dérivation des équations (3.17), (3.18), et remplaçant

$$\frac{dj_n}{dx} \text{ par } q \frac{n(x)}{\tau_a} \quad \text{et} \quad \frac{dj_p}{dx} \text{ par } -q \frac{n(x)}{\tau_a}$$

Multiplions la première équation par D_P et la seconde par D_N et retranchons, en tenant compte de

(3.18), on arrive à :

$$\frac{d^2n}{dx^2} = \frac{n(x)}{L_a^2} \tag{3.19}$$

Tel que : $L_a^2 = D_a \tau_a$ et $D_a = 2 \frac{D_n D_p}{D_n + D_p}$

Les conditions aux limites sont :

$$n(0) = p(0) = p_0 e^{\frac{qV_{P+}}{kT}} = n_i e^{\frac{qV_{P+}}{kT}} \tag{3.20}$$

$$n(W) = n_0 e^{\frac{qV_{N+}}{kT}} = n_i e^{\frac{qV_{N+}}{kT}} \tag{3.21}$$

On suppose que la structure est parfaitement symétrique $V_{p+} = V_{n+}$

$$n(0) = p(0) = n(w) = p(w)$$

$$n(x) = p(x) = n(0) \frac{\text{ch}\left(\frac{x-w/2}{L_a}\right)}{\text{ch}\left(\frac{W}{L_a}\right)}$$

3.5.2.3. Calcul de la caractéristique J(V) :

- Hypothèse de la diode courte entraine quel que soit :

$$n(x) = n(0) = n_i e^{\left(\frac{qV_{P+}}{kT}\right)}$$

- Hypothèse diode symétrique entraine :

$$V_{p+} = \frac{(V_{appl} - V_I)}{2}$$

d'où :

$J_f = q n_i W_i / 2 \tau_a = q n_i W_i / \tau_a [e^{q(V_{appl} - V_I) / 2KT}]$

(3.22)

- ◆ C'est la même relation que pour une diode PN en remplaçant l'épaisseur de la ZCE par celle de la région I et en tenant compte de la chute de tension V_I dans la zone I.

3.5.2.4. Calcul de V_I :

Même hypothèses : diode courte entraîne $n(x)$ sensiblement constant. La composante de diffusion est négligeable ; par suite :

$$J_F = J_{F\text{cond}} = q (\mu_n + \mu_p) n \xi \quad \text{de la relation (3.20):}$$

$$\xi = \frac{w_I}{\tau_a} \frac{1}{(\mu_n + \mu_p)}$$

$$V_I = \xi w_I = \frac{W_I^2}{\tau_a} \frac{1}{(\mu_n + \mu_p)} \quad (3.23)$$

On voit que la chute de tension V_I est indépendante du courant et par suite la résistance équivalente est proportionnelle à $1/I_F$ [22], [21].

$$RI = V_I / I_F \propto 1/I_F$$

On peut donc moduler la résistance de la diode en direct en ajustant le courant, donc une PIN en directe est pour les applications « atténuateurs variables » et « modulation en hyperfréquence ». Les densités d'électrons et de trous étant identiques dans la base pour conserver la condition de neutralité électrique, le champ électrique y est donc quasiment nul, seul le mécanisme de diffusion met les porteurs en mouvement.

Considérons uniquement les trous qui sont les porteurs les plus lents, l'équation de diffusion des trous à une dimension (voir l'annexe) s'écrit :

$$J_p = -qD_p \frac{\partial p_x}{\partial x} \quad (3.24)$$

Dans cette approximation, on considère la densité de courant J_p indépendante de x . Le gradient $\frac{\partial p_x}{\partial x}$ est abrupte à l'interface P – I, une analyse plus exacte demanderait la représentation analytique de $p(x)$. Cependant, nous utiliserons comme approximation le gradient moyen de la densité de trous à travers la zone intrinsèque :

$$\frac{\partial p_x}{\partial x} = -\frac{p_0}{W_i} \quad (3.25)$$

Où p_0 est la densité de trous à la jonction P – I et W_i l'épaisseur de la zone intrinsèque. Au niveau de la jonction, le courant de diffusion est pratiquement identique au courant de conduction. Il est alors possible d'écrire :

$$J_p = qp_0v_p \approx qD_p \frac{p_0}{W_i} \quad (3.26)$$

3.5.2.5. Le temps de transit des trous:

Il est défini par $T_p = W_i/v_p$. Le temps de transit des trous à travers la zone intrinsèque est donc :

$$T_p = \frac{W_i^2}{D_p} \quad (3.27)$$

Ainsi, la caractéristique statique I-V de la jonction ne peut plus être utilisée pour des fréquences pour lesquelles la période est comparable à T_p . Dans le cas d'une diode silicium, le coefficient de diffusion des trous dans la base est de $13\text{cm}^2/\text{s}$.

3.5.2.6. Equation de diffusion ambipolaire :

En fonctionnement direct, nous supposons que l'hypothèse de la neutralité de la charge est vérifiée. La concentration des électrons et des trous dans la zone intrinsèque est donc supposée égale ($n = p$). Ainsi, on peut écrire à partir des équations de continuité et des courants d'électrons et de trous l'équation de transport ambipolaire des porteurs qui régit la diffusion de porteurs dans la zone intrinsèque [12]. En supposant également que les électrons et les trous diffusent ensemble, les taux de recombinaisons des électrons et des trous sont donc les mêmes.

L'équation de diffusion ambipolaire s'écrit (voir l'annexe : Equation de diffusion ambipolaire) :

$$\frac{\partial^2 P(x,t)}{\partial x^2} = \frac{P(x,t)}{L_a^2} + \frac{1}{D_a} \frac{\partial P(x,t)}{\partial t} \quad (3.28)$$

où $P(x, t)$ est la densité d'électrons et de trous, L_a longueur de diffusion ambipolaire et D_a le coefficient de diffusion ambipolaire.

$$D_a = \frac{2D_n D_p}{D_n + D_p} \quad (3.29)$$

$$L_a = \sqrt{D_a \tau_a} \quad (3.30)$$

En considérant uniquement les recombinaisons de type SRH (Shockley-Read-Hall) dans la zone intrinsèque et l'égalité des électrons et trous dans cette zone, la durée de vie des porteurs dans la zone I s'écrit :

$$\tau_a = \tau_n + \tau_p \quad (3.31)$$

En tenant toujours compte de l'égalité de concentration des deux types de porteurs, les expressions des courants d'électrons et de trous deviennent :

$$J_n = \frac{b}{1+b} J_T + q D_a \frac{\partial P(x,t)}{\partial x} \quad (3.32)$$

$$J_p = \frac{1}{1+b} J_T - q D_a \frac{\partial P(x,t)}{\partial x} \quad (3.33)$$

Où J_T est la densité totale de courant dans la diode et b le ratio des mobilités d'électrons et de trous.

$$b = \frac{\mu_n}{\mu_p} \quad (3.34)$$

3.6. Caractéristique de la cellule solaire à structure PIN :

3.6.1. Caractéristique I(V) En obscurité :

La cellule solaire à structure PIN en absence de lumière est celle d'une diode PIN, la caractéristique courant tension est donnée par l'équation :

$$J_f = q n_i W_i / \tau_a [e^{q(V_{app} - V_i) / 2KT}] \quad (3.35)$$

3.6.2. Caractéristique I(V) d'une cellule PIN illuminée:

Le courant est dans la charge est : $I = I_{ph} - I_f(V)$

$$\Rightarrow I = I_{ph} - q n_i W_i / \tau_a [e^{q(V_{app} - V_i) / 2KT}] \quad (3.36)$$

3.7. Les avantages des jonction PIN :

La structure de jonction PIN est destinée à supporter une tension inverse élevée [25]. En conséquence, elle présente une barrière de potentiel plus importante que la diode Schottky et que la diode p-n. La figure-3.19- illustre ce phénomène [23]. La différence fondamentale entre la diode PIN et Schottky réside dans le fait que le fonctionnement fait appel aux porteurs

majoritaires dans la diode SCHOTTKY, alors que ce sont les deux types de porteurs majoritaires et minoritaires qui interviennent dans la diode PIN [23].

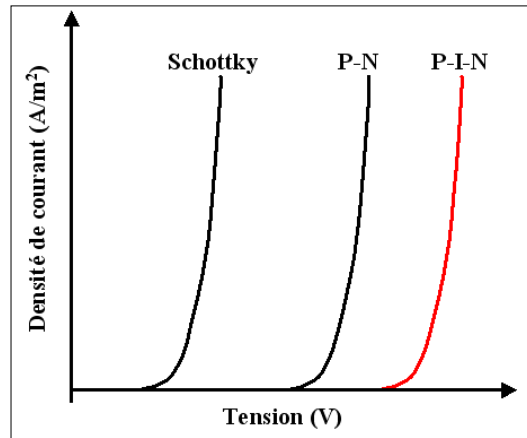


Figure-3.19- La barrière de potentiel dans les diodes PN, PIN, schottky

3.8. Conclusion :

On a pu constater dans ce chapitre, la composition d'une cellule solaire PIN, ce qui la diffère d'une jonction PN, les courant qui circulent dans cette structure ; le courant de fuite qui est important dans une PIN grâce à l'épaisseur de la zone intrinsèque et le champ constant dans toute la zone intrinsèque, ainsi qu'une barrière de potentiel importante du fait de l'existence de deux jonctions. Les avantages des cellules solaires à structure PIN ont vu un développement étendu surtout en amorphe, et aujourd'hui dans les structures nanofils.

Chapitre 4 :

Simulation et résultats

4.1. Introduction :

L'étude du comportement réel des cellules solaires, nécessite une description détaillée du dispositif à simuler et des matériaux utilisés dans sa réalisation. La sélection du type de matériau approprié et sa composition ainsi que ses propriétés électriques et physiques sont très importantes et influent directement sur le rendement des cellules. Les matériaux les plus souvent utilisés sont les semi-conducteurs dont le plus courant est le Si par rapport autres matériaux binaires, ternaires qui présentent des rendements plus importants mais souvent théoriques et ne sort pas issus des laboratoires, parce qu'ils doivent être mesurés par des expériences précises et coûteuses. L'utilisation de logiciels spécifiques tel que ATLAS Silvaco, permettent des centaines de combinaisons de paramètres avant la fabrication réelle du dispositif. ATLAS TCAD (Technology Computer Aided Design) Silvaco, fourni un moyen rapide, consistant et pas cher pour la conception des cellules solaires. L'utilisation de ce logiciel pour simuler une cellule solaire à structure PIN est le but principal de ce mémoire.

4.2. Présentation d'Atlas :

L'outil de simulation ATLAS qui est utilisé pour notre simulation est spécialement conçu pour la modélisation 2D et 3D de composants basés sur la physique des semi conducteurs, en incluant les propriétés électriques, optiques et thermiques. Il possède une bibliothèque regroupant des matériaux prédéfinis comme il permet à l'utilisateur de définir d'autres matériaux propre à leur choix la figure 4.1 montre les entrées et sorties de ce logiciel.

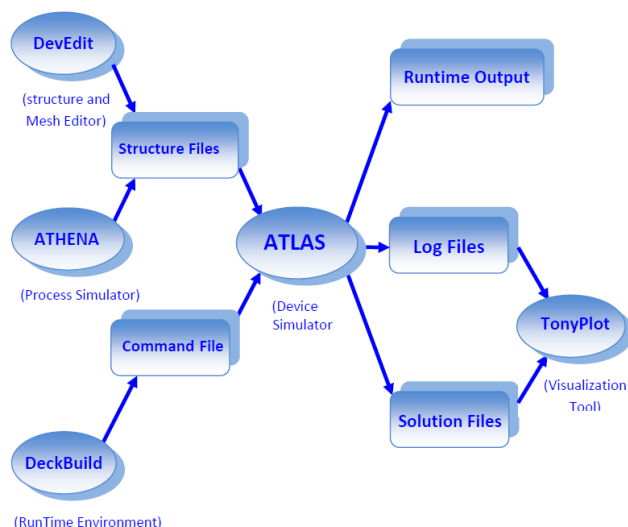


Figure -4.1- Entrées et sorties d'Atlas

4.3. Les commandes d'Atlas :

La programmation avec Atlas nécessite l'utilisation d'un ensemble de commandes propre à sa logique dans l'ordre montré dans la Figure 4.2. Il existe cinq groupes de commandes. Si l'ordre n'est pas respecté, un message d'erreur apparaît et le programme ne s'exécute pas d'une façon correcte.

<i>Group</i>		<i>Statements</i>
1. Structure Specification	————	MESH REGION ELECTRODE DOPING
2. Material Models Specification	————	MATERIAL MODELS CONTACT INTERFACE
3. Numerical Method Selection	————	METHOD
4. Solution Specification	————	LOG SOLVE LOAD SAVE
5. Results Analysis	————	EXTRACT TONYPLOT

Figure-4.2- Groupe de Commandes Silvaco ATLAS [26]

4.4. Spécification de la structure :

4.4.1. Présentation de la structure :

Notre structure est une cellule solaire mono jonction à base de Si, c'est une cellule solaire à jonction PN (cellule type) tirée de la bibliographie [27] (figure -4.3-) qu'on va par la suite lui intégrer une couche intrinsèque I d'épaisseur W_i , afin d'obtenir une cellule solaire à jonction PIN, après on va varier l'épaisseur de la couche I pour voir son effet sur les paramètres de la cellule (caractéristique I(V), rendement, ...). Nous avons exécuté dans ATLAS un fichier de simulation de la cellule conventionnelle à base de silicium cristallin avec la structure matérielle suivante :

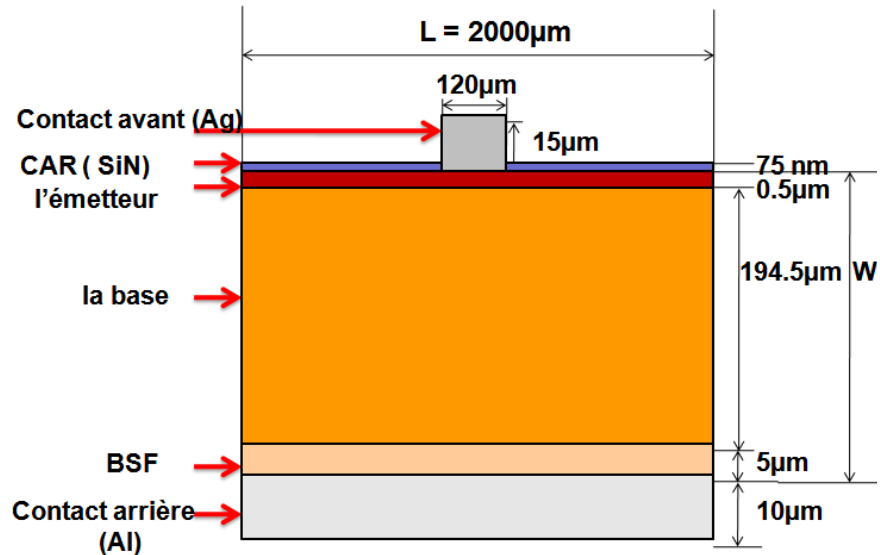


Fig-4.3-Structure de la cellule solaire à jonction PN conventionnelle en silicium [27].

La création d'une telle structure dans Atlas silvaco, se fait en utilisant le groupe de Commandes dans l'ordre comme suit :

4.4.1.1. Mesh : c'est une commande qui produit un maillage qui est une série de lignes horizontales et verticales espacées entre elles (la Figure 4.4) . L'élément de maille utilisé est le triangle.

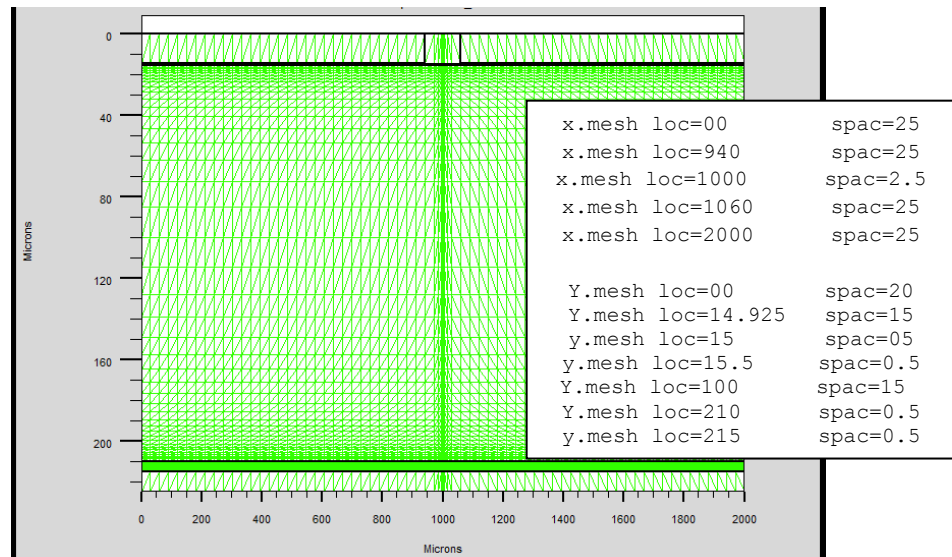


Fig-4.4-Définition du maillage avec Atlas

4.4.1.2. **Region :** c'est une instruction qui définit une région dans une structure, les différentes régions dans notre structure sont illustrées par la figure (Fig-4. 5-).

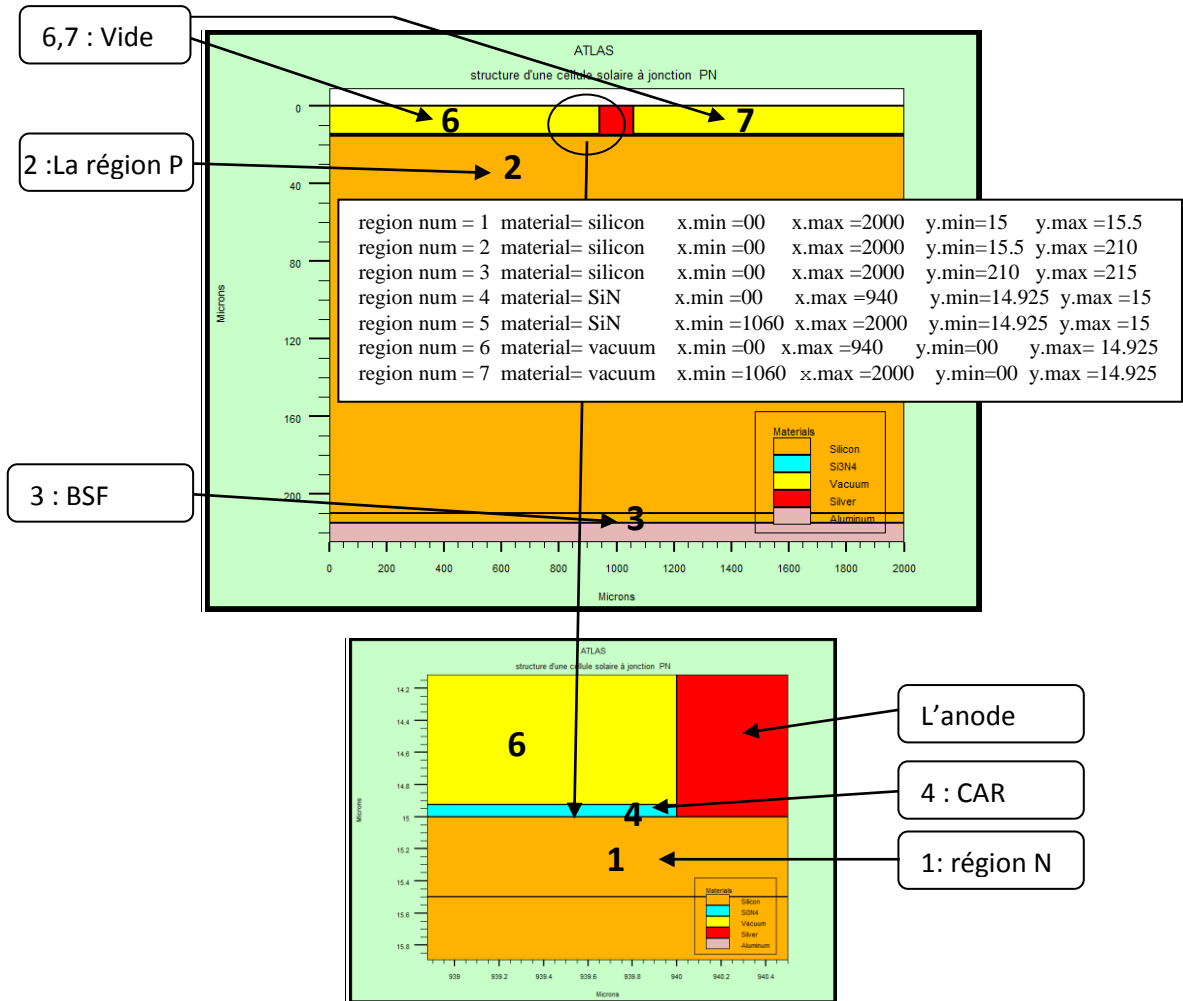


Fig-4. 5- Définition des régions avec ATLAS

4.4.1.3. **Electrodes:** Elle indique l'endroit et les noms des électrodes dans une structure (Fig-4.6-).

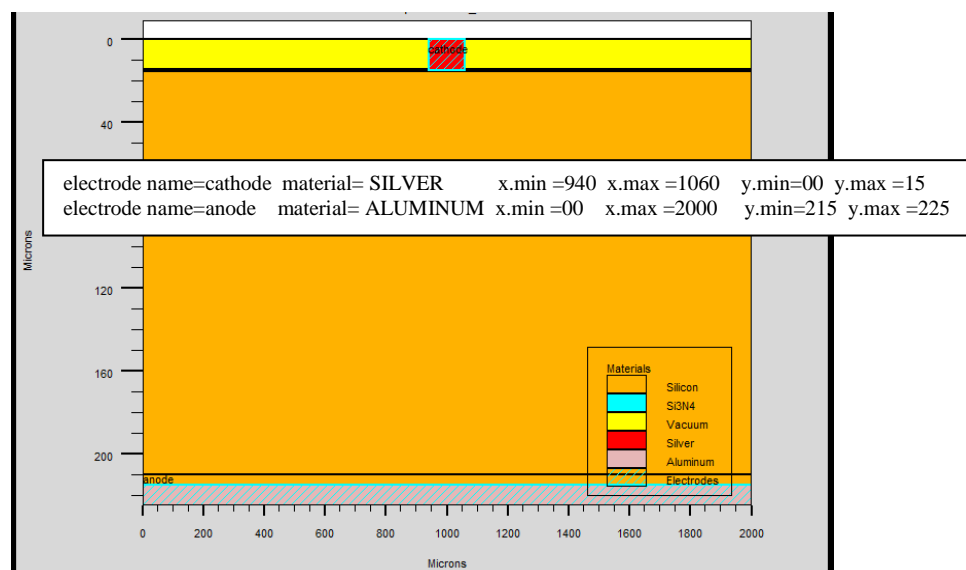


Fig-4.6- Electrodes Réalisées

4.4.1.4. Doping : Cette commande indique le type et le profil de dopage (Fig-4.7-).

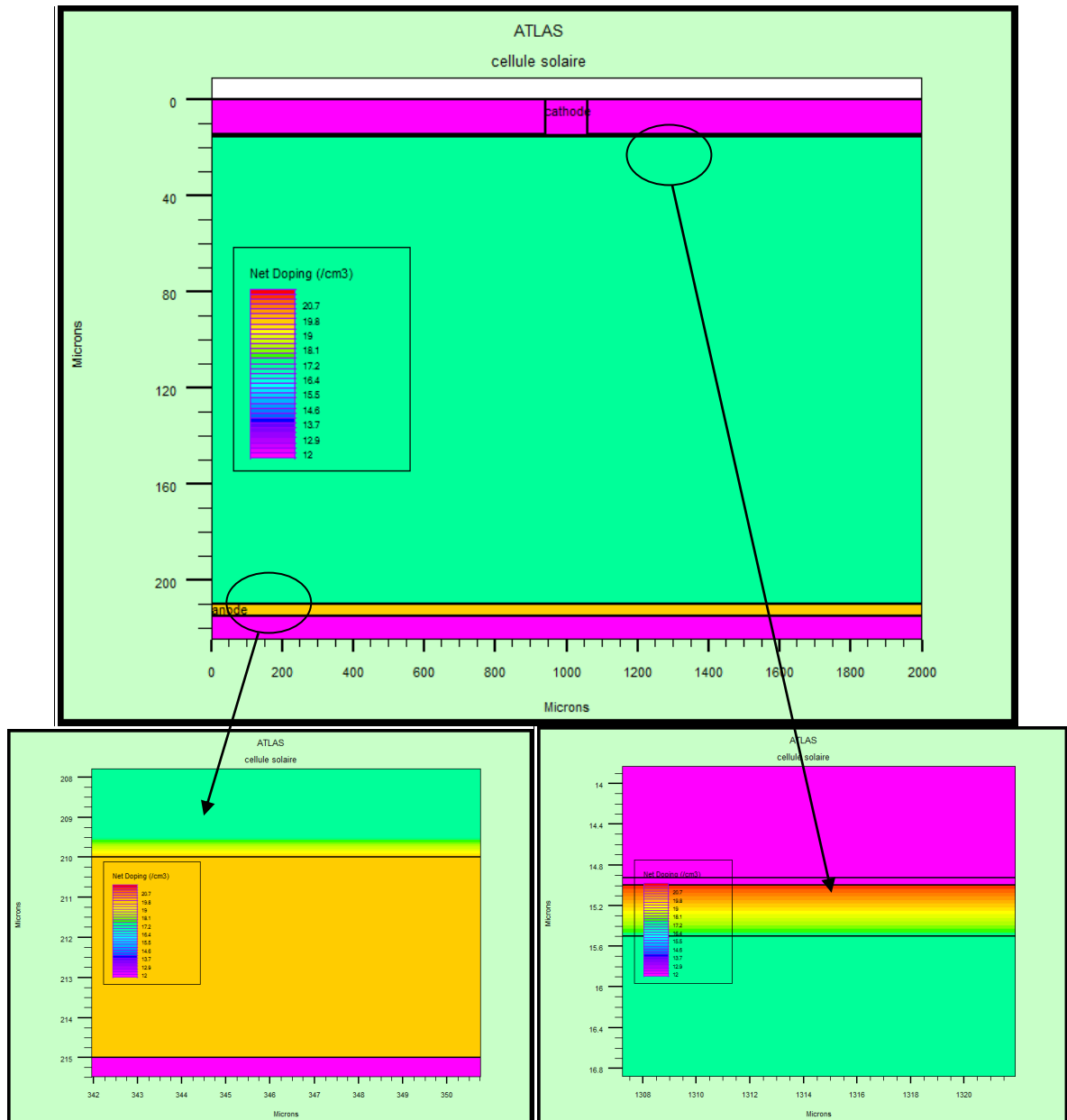


Fig-4.7- Dopage effectué de la structure

4.4.2. Spécification des modèles des matériaux :

4.4.2.1. **Material** : cette commande associe des paramètres physiques aux matériaux utilisés dans la simulation par exemple : affinité électronique, énergie de gap, la fonction de la densité des états, les vitesses de saturation, les durées de vie des porteurs minoritaires, etc....Le logiciel a des paramètres de matériaux définis par défaut pour les semi-conducteurs standards comme pour le silicium.

Ces paramètres sont résumés dans le tableau (tab-4.1-) suivant :

Paramètres	Valeurs
Bande interdite E_g (eV)	1,08
Permittivité relative ϵ_r	11.8
Affinité électronique χ_e (eV)	4.17
Densité d'états des électrons N_c (cm^{-3})	$2.8 \cdot 10^{19}$
Densité d'états des trous N_v (cm^{-3})	$1.04 \cdot 10^{19}$
Thermal voltage v	0.025852
Vitesse de saturation des électrons et trous V_{satn}, V_{satp} (m/s)	$1.03 \cdot 10^7$
TAUN0, TAUP0 (s)	$1.0 \cdot 10^{-7}$
Longueur d'ondes λ (μm)	0.0103 - 2.0

Tab-4.1- Paramètres de simulation du silicium à 300 K.

4.4.2.2. Models : Cette instruction permet de faire appel aux modèles physiques existants dans le logiciel. Les modèles physiques se répartissent en cinq catégories: la mobilité, recombinaison, statistiques des transporteurs, l'ionisation d'impact, et de tunnels. L'instruction est en générale comme suit :

models srh auger conmob fldmob

tel que SRH : modèles de recombinaison Shockley Read Hall, auger .

4.4.2.3. Beam : Cette commande est importante pour des cellules solaires car c'est elle qui définit une source de lumière et ajuste sa localisation, orientation et intensité. Le spectre de la lumière peut être décrit dans tous les détails nécessaires. Polarisation, réflectivité et lancer le tracé de rayons.

4.4.3. Sélection de la méthode numérique :

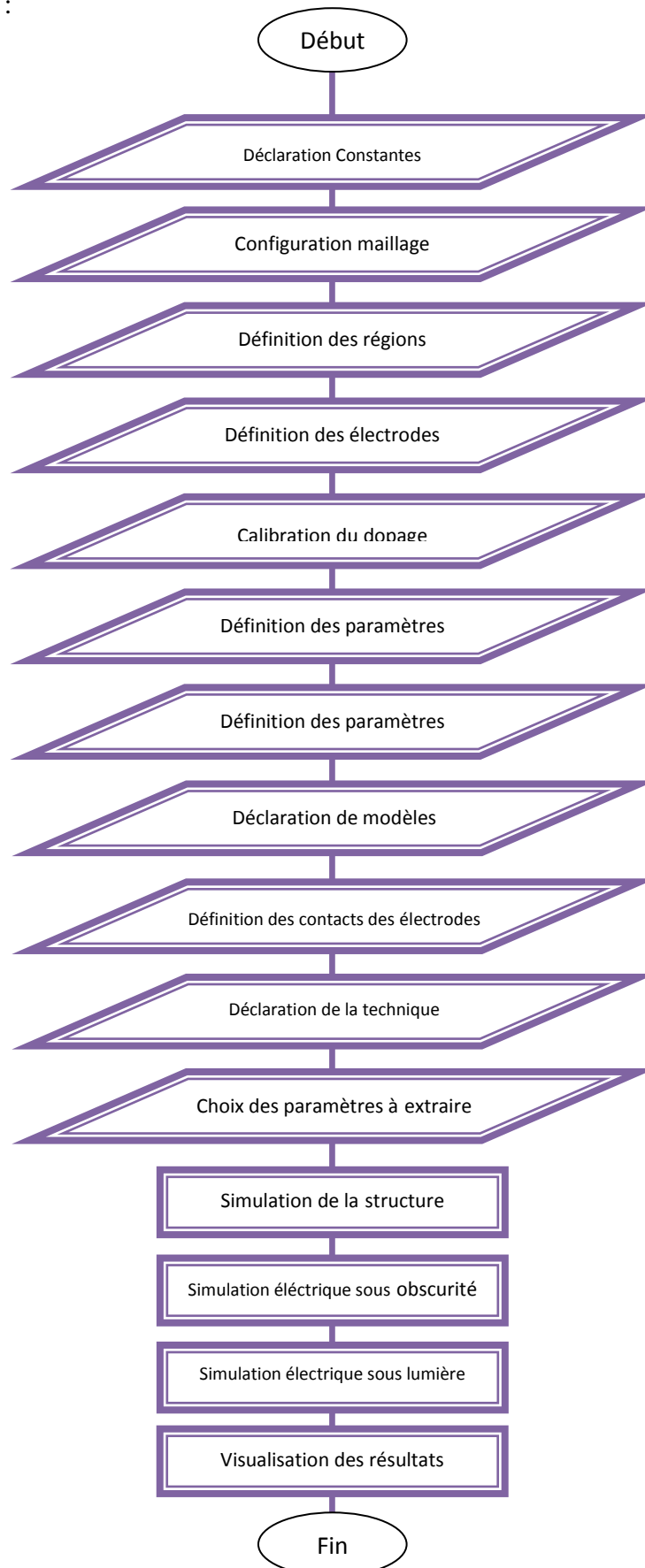
Nous avons utilisée la méthode de NEWTON, qui est une méthode de résolution numérique de la totalité du système d'équations en un seul bloc. Elle est utilisée dans le cas de la convergence quadratique afin d'améliorer la vitesse de simulation. L'instruction s'écrit : **method Newton trap**

4.4.4. Spécification des solutions :

Trois commandes sont utilisée dans ce but ; **Log, Solve, Load and save.**

4.5. Etapes de simulation :

L'exécution du programme écrit et exécuté dans ATLAS SILVACO est comme le montre la figure suivante :



4.6. Présentation des résultats :

Les paramètres de la cellule de référence utilisée sont dans le tableau 4.2 suivant :

PARAMETRES	VALEURS
Epaisseur de la cellule	W = 200 μ m
Largeur de la cellule	L = 2000 μ m
Epaisseur de l'émetteur	0.5 μ m
Dopage de l'émetteur	2*10 ²¹ cm ³
Profil du dopage p	Erfc+gauss
Epaisseur de la base	194.5 μ m
Dopage de la base	5*10 ¹⁷ cm ³
Profil du dopage p	Uniforme
Epaisseur de la BSF	5 μ m
Dopage de la BSF	5*10 ¹⁹ cm ³
Epaisseur de la couche antireflet SiN	75nm
Indice de réfraction	2.05
Epaisseur du contacte avant (Ag)	15 μ m
Largeur du doigt	120 μ m
Epaisseur du contacte arrière (Al)	10 μ m
Largeur du contacte arrière (Al)	2000 μ m
Vitesse de recombinaison en face avant	10 ³ cm/s
Vitesse de recombinaison en face arrière	10 ⁵ cm/s
Modèle utilisé	Models srh auger conmob fldmob

Tab-4.2- paramètres de la cellule de référence utilisés [27]

4.6.1. Courbe I(V) type de la cellule PN:

La caractéristique courant-tension en obscurité et avec simulation de l'éclairage de la cellule solaire PN conventionnelle simulée est comme le montre la courbe de la Figure-4.8 tandis que la figure-4.9 représente sa courbe de puissance :

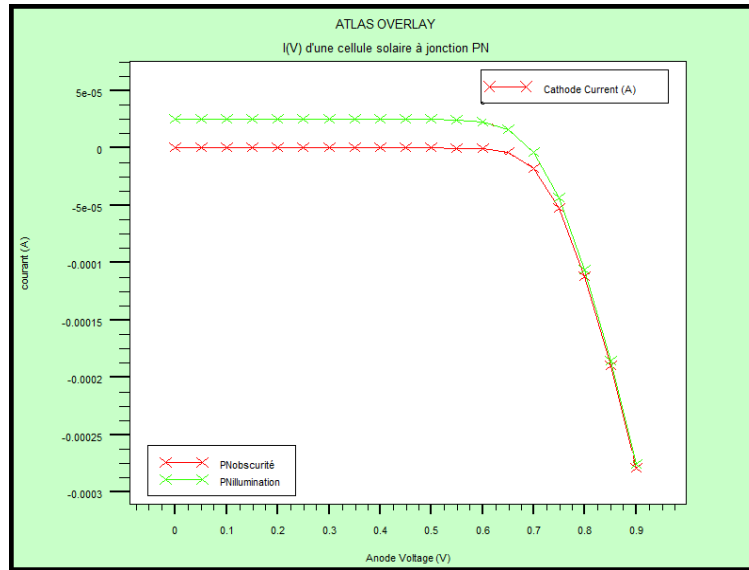


Fig-4.8-Caractéristique I(V) de la cellule solaire conventionnelle PN

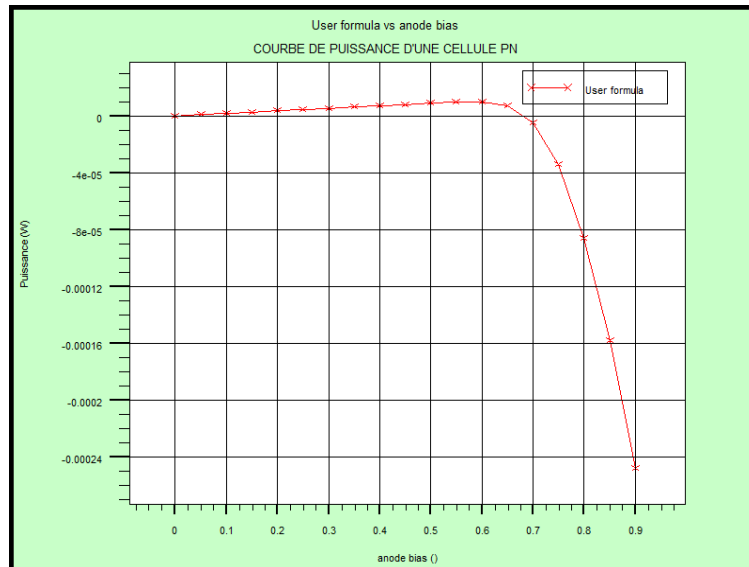


Fig-4.9. Courbe de puissance de la cellule PN

Les résultats de simulation sont résumés dans le tableau suivant :

Paramètres	Résultats de référence	Résultats de simulation avec ATLAS	Unités
I _{cc}	25.32	24.957	mA / cm ²
V _{oc}	0.64	0.69	V
I _{max}	24.54	22.89	mA / cm ²
V _{max}	0.56	0.6	V
P _{max}	0.01374	0.01373	W/ cm ²
FF	0.83	0.7966	
η	13.74	13.7349	%

Tab-4.3 Paramètres simulés d'une cellule conventionnelle

La fonction $I(v)$ est une exponentiel gaussienne sa forme proche de celle d'un rectangle. Du tableau on voit bien que les courants I_{cc} sont légèrement différents et presque le même rendement. L'intensité électrique maximale est égale $I_{cc} = 24.957 \text{ mA/cm}^2$ et la tension maximale est égale $V_{co} = 0.6 \text{ V}$.

4.6.1.1. Courbe de puissance de la cellule PN:

On a pu obtenir la caractéristique $P = f(V)$ (figure-4.9), qui met en évidence le point de fonctionnement, à puissance maximale pour certaines conditions d'éclairement. La puissance $P = I.V$ est nulle en court-circuit et en circuit-ouvert. Elle passe par un maximum quand on parcourt la caractéristique I-V de $P_m = V_m \cdot I_m$.

4.6.1.2. I(V) en fonction de l'intensité lumineuse :

En faisant varier l'intensité lumineuse on a obtenu les courbes suivantes :

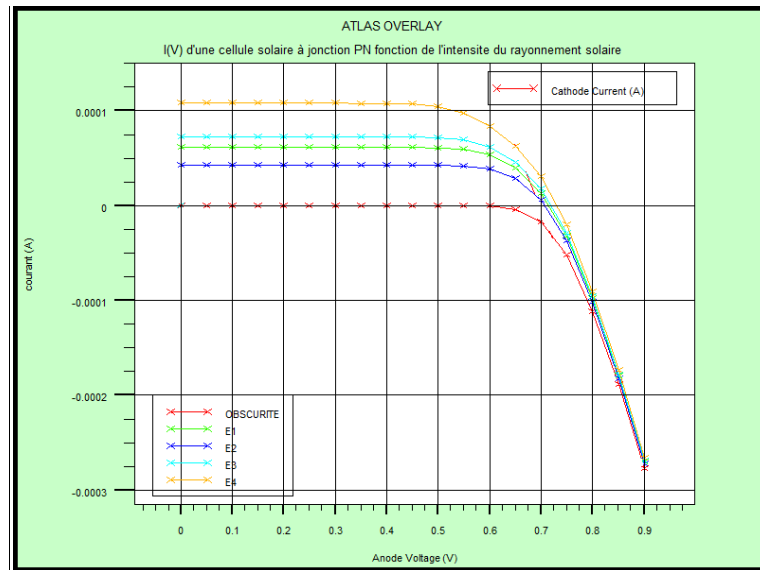


Fig-4.10. Caractéristique I(V) de la cellule en fonction de l'intensité lumineuse

Dans la partie gauche des caractéristiques, le courant est directement proportionnel au rayonnement à ces niveaux d'éclairage. La tension par contre n'est pas très dégradée lorsque la lumière baisse ; dans une cellule en si-monocristallin, la résistance parasite shunt reste assez élevée, la cellule peut fournir une tension correcte même à petit éclairage.

4.6.2. Courbe I(V) type de la cellule PIN:

On reprend la structure de la cellule PN conventionnelle, et on intercale une couche intrinsèque I légèrement dopée N avec 10^{13}cm^{-3} et d'épaisseur initiale $W_i = 0.1 \mu\text{m}$, entre la région N et la région P, on obtient ainsi une cellule solaire à structure PIN (figure4.11).

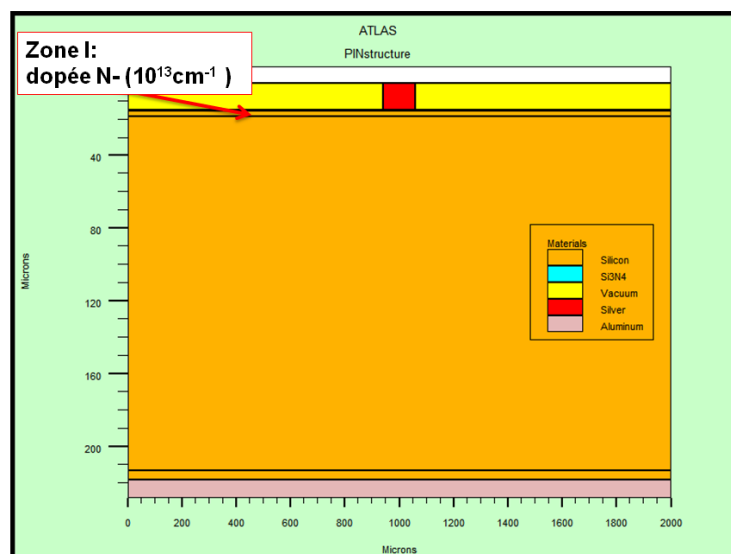


Fig-4.11. La structure de la cellule PIN

On fait varier l'épaisseur W_i et on obtient la caractéristique $I(V)$ comme suit (figure4.12), la courbe de puissance est donnée par la figure 4.1 3.

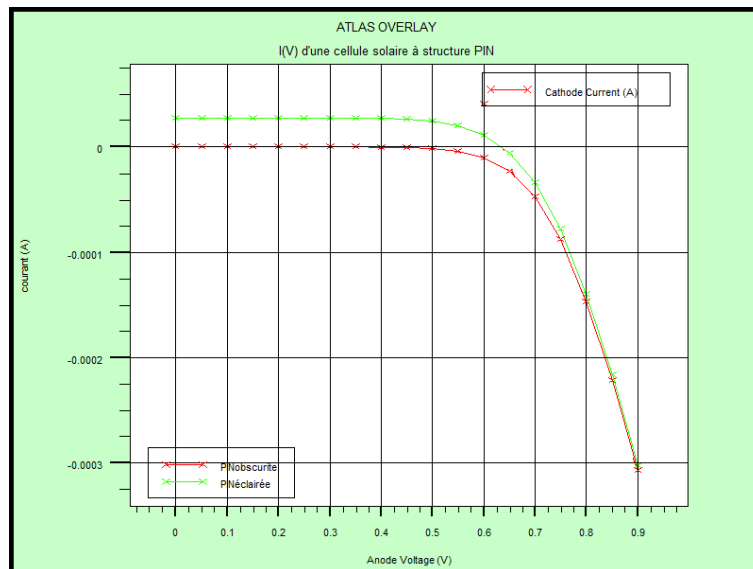


Fig-4.12. Caractéristique $I(V)$ de la cellule PIN en fonction de l'intensité lumineuse

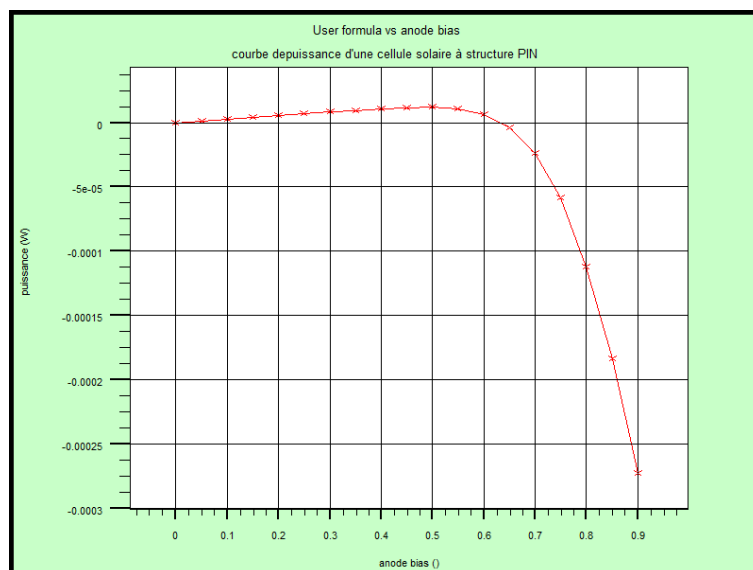


Fig-4.13. Courbe de puissance de la cellule PIN en fonction de l'intensité lumineuse

Les paramètres simulés sont dans le tableau Tab-4.4 :

Paramètres	Résultats de référence	Résultats de simulation de simulation de la cellule PN	Résultats de simulation de la cellule PIN	Unités
I _{cc}	25.32	24.957	44.2404	mA / cm ²
V _{oc}	0.64	0.69	0.7123	V
I _{max}	24.54	22.89	27.5544	mA / cm ²
V _{max}	0.56	0.6	0.4999	V
P _{max}	0.01374	0.01373	0.01377	W/ cm ²
FF	0.83	0.7966	0.437196	
η	13.74	13.7349	13.7771	%

Tab-4.4 Paramètres simulés de la cellule à structure PIN

On remarque que l'introduction d'une couche intrinsèque a fait augmenter le I_{cc} et le rendement. En faisant augmenter la zone I, on augmente la zone de charge d'espace et le photocourant est essentiellement dû à la photogénération des porteurs dans cette zone, de plus les porteurs générés ont plus de chance d'arriver aux contacts pour être collectés avant qu'ils se recombinent, d'où l'augmentation du photocourant.

4.6.2.1. Effet de l'irradiance sur la caractéristique I(V) de la cellule solaire PIN :

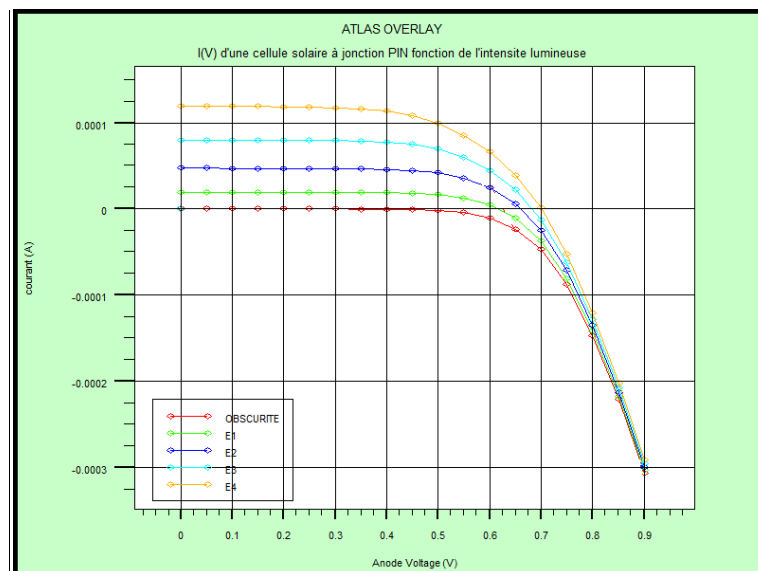


Fig-4.14. Caractéristique I(V) de la cellule PIN en fonction de l'intensité lumineuse

Les courants de court circuit sont plus importants pour une cellule PIN. La tension de circuit ouvert n'en dépend pas et n'est fonction que de la qualité du matériau et du type de jonction considérée.

4.6.2.2. Comparaison entre I(V) des cellules PN et PIN :

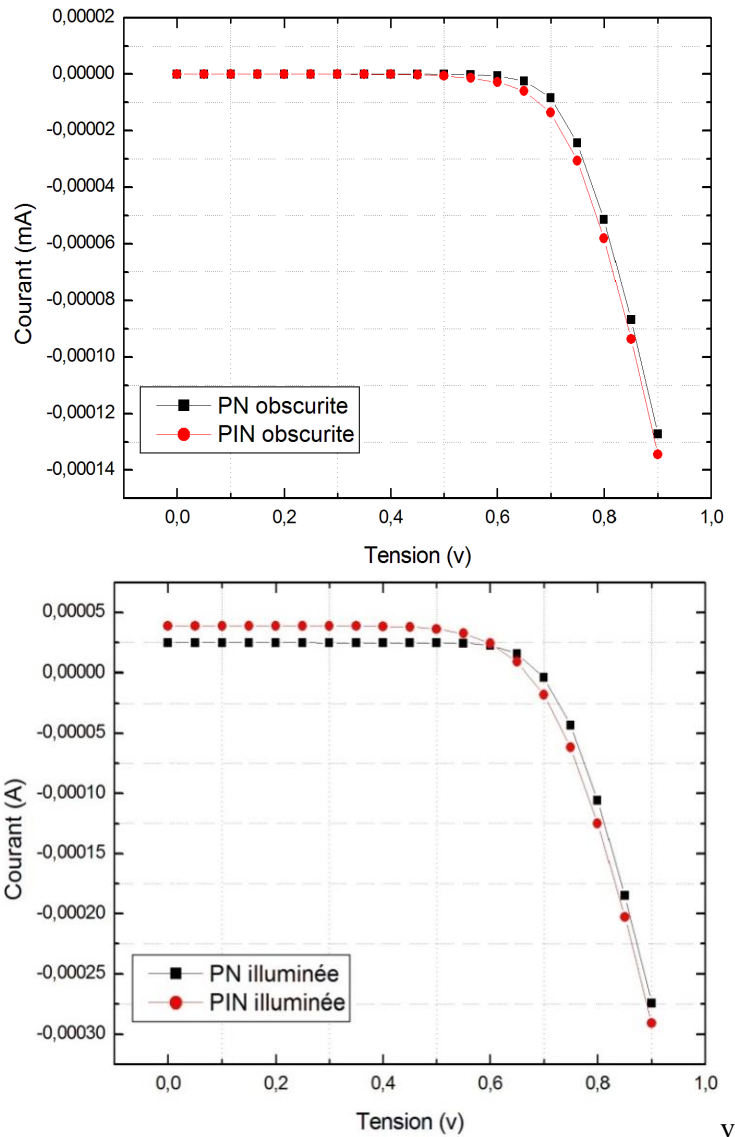


Fig-4.15. Comparaison des I(V) des cellules PN et PIN a- en obscurité b- en illumination

✚ De la courbe I(V) d’Obscurité :

En obscurité la cellule solaire se comporte comme une simple diode ; avant la tension de seuil les courants sont identiques est nul, la diode PN a une tension de seuil supérieure à celle d’une diode PIN, d’où le décalage de déclenchement de travail des deux diodes, après c’est des courbes exponentielles de variation courant –tension.

✚ De la courbe I(V) en illumination :

Pour les deux cellules PN et PIN; dans la partie gauche des caractéristiques, le courant est directement proportionnel au rayonnement à ces niveaux d’éclairement. Le courant de court circuit est plus important pour une cellule PIN que pour une cellule PN. Par contre pour La tension autour

de V_{co} il y a une légère variation avec la variation de la lumière. La tension de circuit ouvert n'en dépend pas et n'est fonction que de la qualité du matériau et du type de jonction considérée.

Dans la cellule à jonction PN simulée la tension de seuil est entre 0.6V et 0.7V par contre pour la cellule à structure PIN simulée elle est entre 0.5V et 0.6V.

4.6.3. L'effet de l'épaisseur de la zone intrinsèque :

4.6.3.1. L'effet de l'épaisseur de la zone intrinsèque sur le rendement de la cellule PIN :

Nous avons varié l'épaisseur W_i (μm) de la zone intrinsèque puis nous avons relevé les différents paramètres de la cellule PIN. Les valeurs sont résumées dans le tableau suivant :

Paramètres	Cellule solaire à jonction PN	L'épaisseur W_i (μm)					
	$W_i=0\mu\text{m}$	0,1	0,5	1	3	5	10
I_{cc} (mA/cm^2)	24.957	44.2404	44.7104	45.1661	46.0706	46.146	44.7604
V_{oc} (v)	0.69	0.7123	0.711811	0.710429	0.704558	0.697435	0.676313
I_{max} (mA/cm^2)	22.89	27.5544	27.7997	27.9936	28.073	27.5187	28.1454
V_{max} (v)	0.6	0.4999	0.4999	0.5	0.5	0.4999	0.4499
P_{max} (w)	0.01373	0.01377	0.0138997	0.0139968e	0.0140365	0.013759	0.0126653
FF	0.7966	0.437196	0.436749	0.43621	0.432432	0.4275	0.418383
η	13.7349	13.7771	13.8997	13.9968	14.0365	13.759	12.6653

Tab-4.5 L'effet de l'épaisseur de la zone intrinsèque sur les paramètres de la cellule PIN

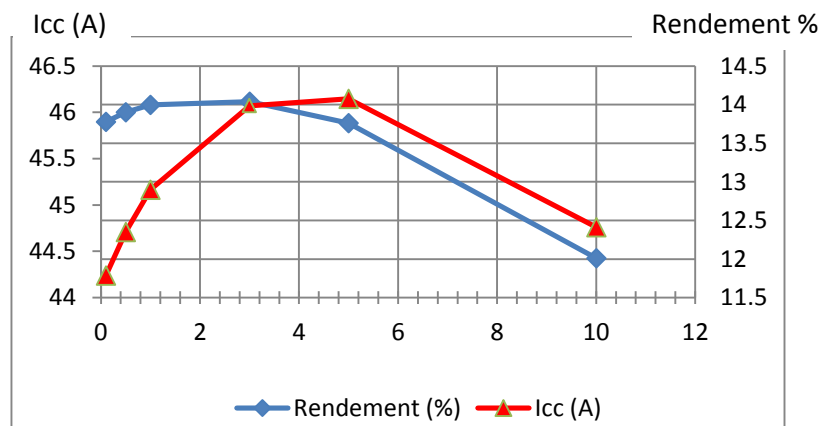


Fig-4.16. L'effet de l'épaisseur de la zone intrinsèque a- sur le rendement, b- sur le

4.6.3.2. L'effet de l'épaisseur de la zone intrinsèque sur I(V) de la cellule PIN :

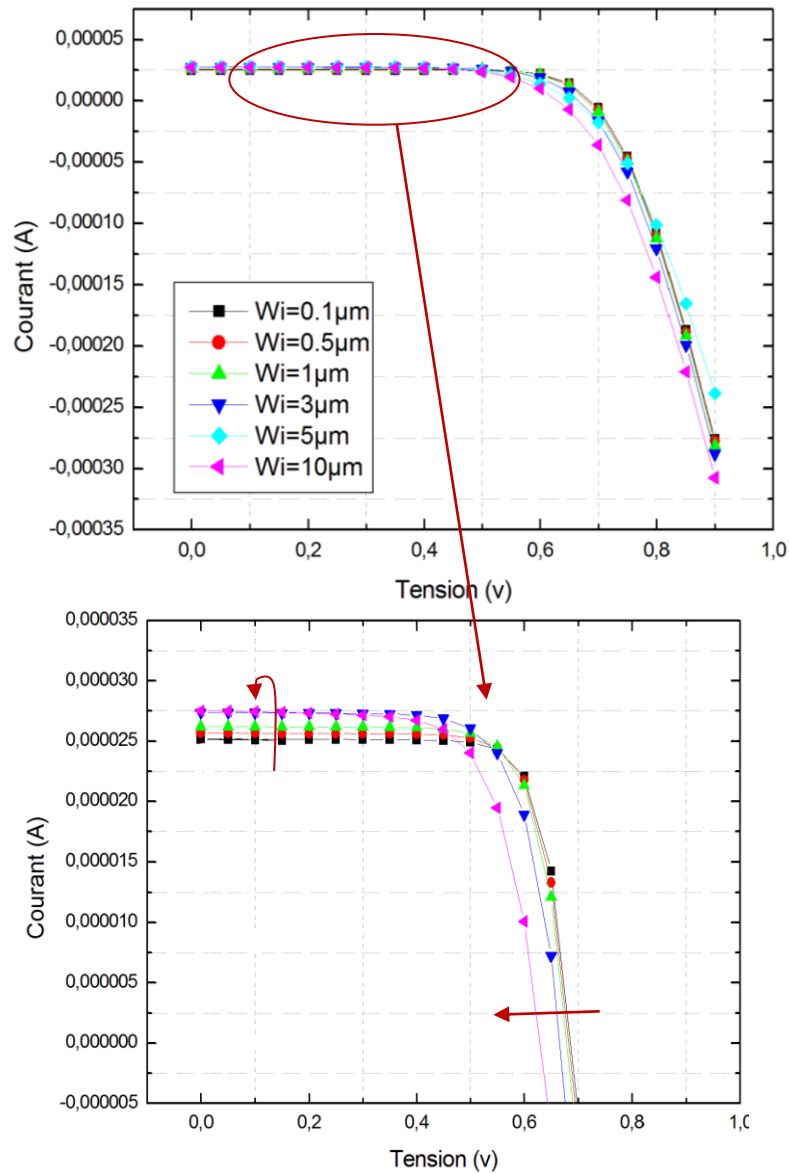


Fig-4.17. L'effet de l'épaisseur de la zone intrinsèque la caractéristique I(V) de la cellule

Le courant de court circuit croit avec l'augmentation de l'épaisseur W_i de la zone intrinsèque. En effet dès l'intégration d'une couche intrinsèque de $0.1\mu\text{m}$ le I_{cc} augmente de **44.0934 mA/cm^2** pour une cellule à jonction PN ($W_i = 0\mu\text{m}$) à **24.957 mA/cm^2** . La zone intrinsèque prolonge la zone de charge d'espace de la cellule et donc augmente l'absorption des photons et la rapidité de la collecte du photocourant et donc l'augmentation de la densité du photocourant jusqu'à une valeur crête de **46.146 mA/cm^2** pour une épaisseur maximale

$W_i = 5\mu\text{m}$ puis diminue pour les valeurs supérieures à cette épaisseur. La zone de charge d'espace est limitée par la longueur de diffusion des porteurs.

Le rendement est directement proportionnel au photocourant, l'augmentation de W_i entraîne l'augmentation du I_{cc} et du rendement mais arrivant à l'épaisseur $3\mu\text{m}$ le rendement commence à diminuer, tandis que le courant I_{cc} continue d'augmenter jusqu'à W_i de $5\mu\text{m}$. Le rendement diminue parce que V_{co} et I_{cc} commencent à diminuer à causes des pertes dues à la recombinaison des porteurs. L'épaisseur qui a donné le plus grand rendement est $3\mu\text{m}$.

4.6.4. L'effet de l'émetteur sur les paramètres de la cellule PIN :

4.6.4. 1. L'effet de la Variation du dopage de l'émetteur :

Cette fois on fait varier le dopage de l'émetteur N_a de 10^{18} cm^{-3} à 10^{20} cm^{-3} : On choisit maintenant $W_i = 3\mu\text{m}$, pour une épaisseur totale de $203 \mu\text{m}$ de la cellule.

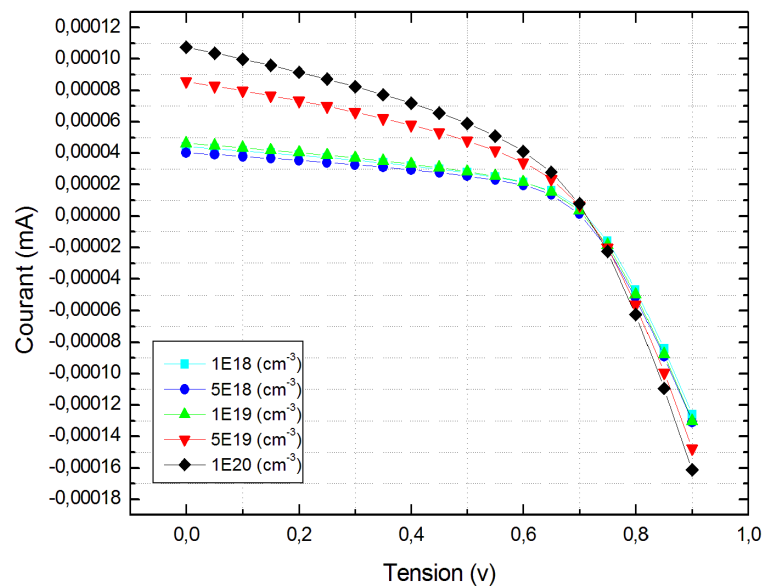


Fig-4.18. L'effet du dopage de l'émetteur sur la caractéristique I(V) de la cellule PIN

De la figure 4.18 et la figure 4.19-a ; on constate que plus le dopage de l'émetteur croit plus le courant de court circuit I_{cc} croit, tandis que la tension en circuit ouvert V_{co} décroît. Entre la valeur de dopage de $1\text{E}18 \text{ cm}^{-3}$ et la valeur $1\text{E}19 \text{ cm}^{-3}$ une légère la variation de I_{cc} et V_{co} est observée. Mais à partir du dopage de $5\text{E}19 \text{ cm}^{-3}$ elle est considérable pour le I_{cc} .

4.6.4.2. L'effet de la Variation de l'épaisseur de l'émetteur :

On a varié l'épaisseur de l'émetteur **de** de 0.1µm, 0.3µm et 0.5µm.

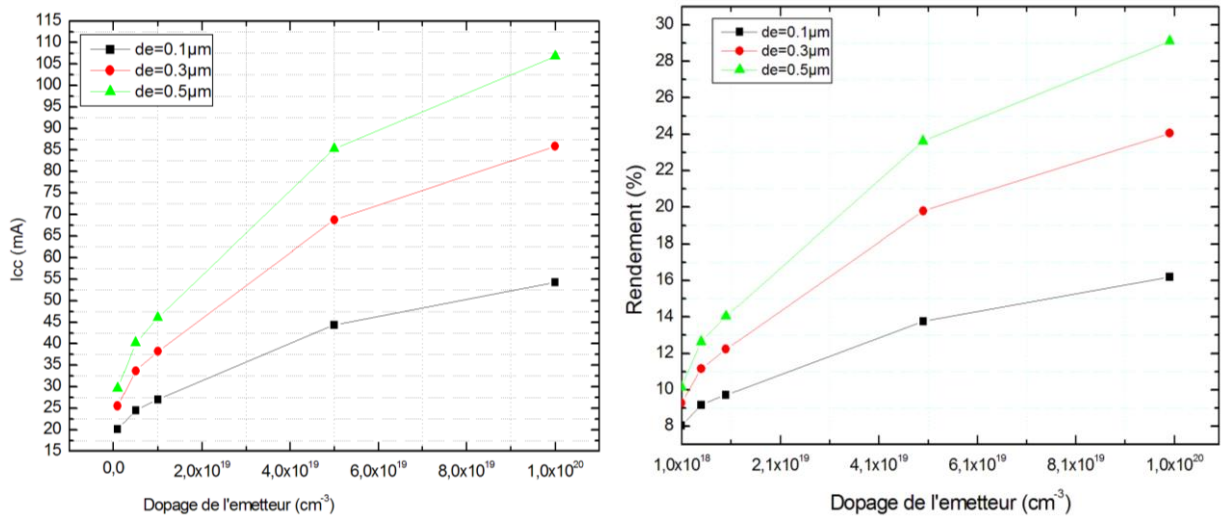


Fig-4.19. L'effet du dopage de l'émetteur sur : **a-** le I_{cc} de la cellule PIN **b-** le rendement de la cellule PIN

On s'aperçoit sur la figure -4.19 b- que le rendement varie légèrement d'une manière croissante avec l'augmentation de l'épaisseur de l'émetteur et le dopage :

- Pour une épaisseur d'émetteur **de=0.1µm**, le rendement maximal est de **16,19%** pour le dopage **10²⁰ cm⁻³**.
- Pour **de=0.3µm** le rendement maximal est de **24,05%** pour le dopage **10²⁰ cm⁻³**.
- Finalement pour **de=0.5µm**, le rendement commence à une valeur égale à **10.14 %** correspondant à un dopage de **10¹⁸ cm⁻³** et à partir de **5 10¹⁹ cm⁻³** le rendement monte jusqu'à **23.62%** pour un I_{cc} de **85.25mA**. Le rendement maximal est de **29.11%** pour un I_{cc} de **106.834mA**.

Le dopage adéquat choisi pour améliorer notre cellule PIN est **5 10¹⁹ cm⁻³** pour **de=0.5µm** (qui est déjà l'épaisseur utilisée) qui donne un I_{cc} de **85.25mA** et un rendement de **23.62%**. La structure PIN permet d'utiliser un niveau de dopage assez élevé de l'émetteur sans avoir de dégradation du rendement de la cellule.

Quand on augmente le dopage, et l'épaisseur de l'émetteur, on diminue sensiblement la résistance série, ce qui augmente le courant.

4.6.5. L'effet de la température :

La température est un paramètre important dans le comportement des photopiles, près de 80% est perdu sous forme de chaleur. On fixe cette fois l'épaisseur de la cellule solaire PIN à **3 μm** et l'épaisseur de l'émetteur **de=0.5μm** et de dopage de **510¹⁹cm⁻³**, les résultats sont regroupés dans le tableau 4.6 :

Paramètres	Température (°K)				
	250	275	300	325	350
I _{cc} (mA/cm ²)	102.206	93.1713	85.2569	78.2205	71.8759
V _{oc} (v)	0.79319	0.752162	0.708298	0.664149	0.619613
FF	0.394054	0.39323	0.391165	0.390367	0.388225
η(%)	31.9455	27.5575	23.6214	20.2796	17.2897

Tab-4.6- L'effet de la Température sur les paramètres de la cellule PIN

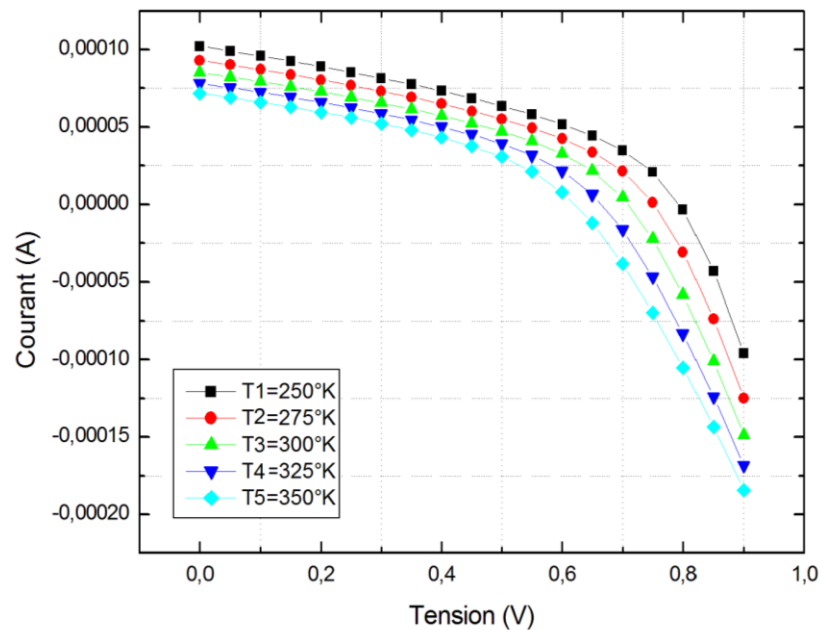


Fig-4.20. L'effet de la température sur I(V)

De ces résultats pour 5 températures différentes, quand la température augmente, on observe une légère décroissance du courant de court circuit et une décroissance importante de la tension de circuit ouvert de la cellule solaire due à la diminution de la valeur du gap. Cette baisse de I_{cc} est nettement moins importante que la baisse de tension. Le V_{co} diminue de 0.04 v par palier de 25°K. L'augmentation de température se traduit au total par une baisse relative de la puissance disponible et donc du rendement, par exemple de **300°K** à **350°K** le rendement passe de **23.6214%** à **17.2897%**, ce qui est comme même remarquable.

4.6.6. L'effet de la couche anti réflexion :

Une partie seulement des photons pénètre dans la cellule photovoltaïque l'autre est reflétée par la surface. Cette perte du rayonnement incident est minimisée avec la recouverte de la surface d'une couche anti-réfléchissante (Anti-Reflective Coatings **CAR**). Différentes couches anti réfléchissantes sont utilisées en photovoltaïque, elles peuvent être isolantes comme le TiO₂, SiO₂, ZnS, MgF₂ et SiN_x ou conductrice comme le ZnO ou l'ITO. Aujourd'hui plusieurs couches anti-réfléchissantes sont utilisées pour améliorer la détection d'une large bande de lumière.

On a fait varier la nature de cette couche (SiN, SiO₂, ITO) puis voir son effet sur notre cellule puis on l'a carrément enlevé de la structure pour mieux voir son effet les résultats sont résumés dans le tableau (Tab-4.7) et représenté par la figure (Fig-4.21) :

Paramètres	CAR			Sans CAR
	SiN	SiO ₂	ITO	
I _{cc} (mA/cm ²)	85.6786	86.4825	84.2597	76.4395
V _{oc} (v)	0.712587	0.712927	0.711973	0.708647
FF	0.392854	0.3926	0.393251	0.396032
η(%)	23.9851	24.2068	23.5914	21.4525

Tab-4.7- L'effet de la nature de la couche anti-réfléchissante sur les paramètres de la cellule PIN

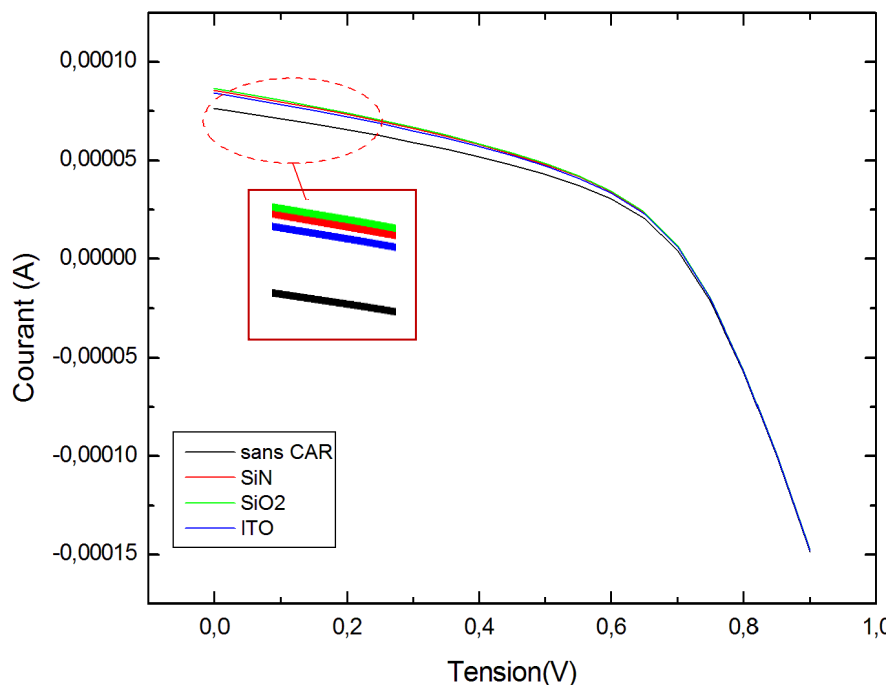


Fig-4.21. L'effet de la CAR sur I(V)

Sans couche anti-réfléchissante, la cellule solaire agit comme un miroir et reflète la lumière incidente sur la cellule et le courant de court circuit comme le rendement diminue. Cette couche réduit les pertes de réflexion. On remarque que le l'ITO, le SiN et le SiO₂ influencent le I_{cc} et le rendement d'une façon différente car chaque'un d'eux a ses propres propriétés tel que l'indice de réfraction . Le SiO₂ donne les meilleurs résultats puis le SiN puis l'ITO en dernier.

Maintenant voyons l'effet de l'épaisseur **d_{CAR}(nm)** de cette couche anti réfléchissante en SiN, les résultats sont dans le tableau Tab-4.8 :

Paramètres	CAR en SiN d'épaisseur d _{CAR} (nm)				
	50	75	100	125	150
I _{cc} (mA/cm ²)	85.8455	85.6786	85.5253	85.384	85.2533
V _{oc} (v)	0.712655	0.712587	0.712526	0.712469	0.712416
FF	0.392793	0.392854	0.392909	0.392961	0.393009
η(%)	24.0304	23.9851	23.9435	23.9052	23.8697

Tab-4.8- L'effet de l'épaisseur de la couche anti-réfléchissante sur les paramètres de la cellule PIN

On peut déduire que plus l'épaisseur de la CAR est petite plus la réflexion est grande car plus le courant I_{cc} est grand et la V_{co} et le rendement. Le rendement maximal pour **d_{CAR} = 50nm** est estimé à **24.0304%** pour un **I_{cc} = 85.8455mA** et un V_{co} de 0.712655V.

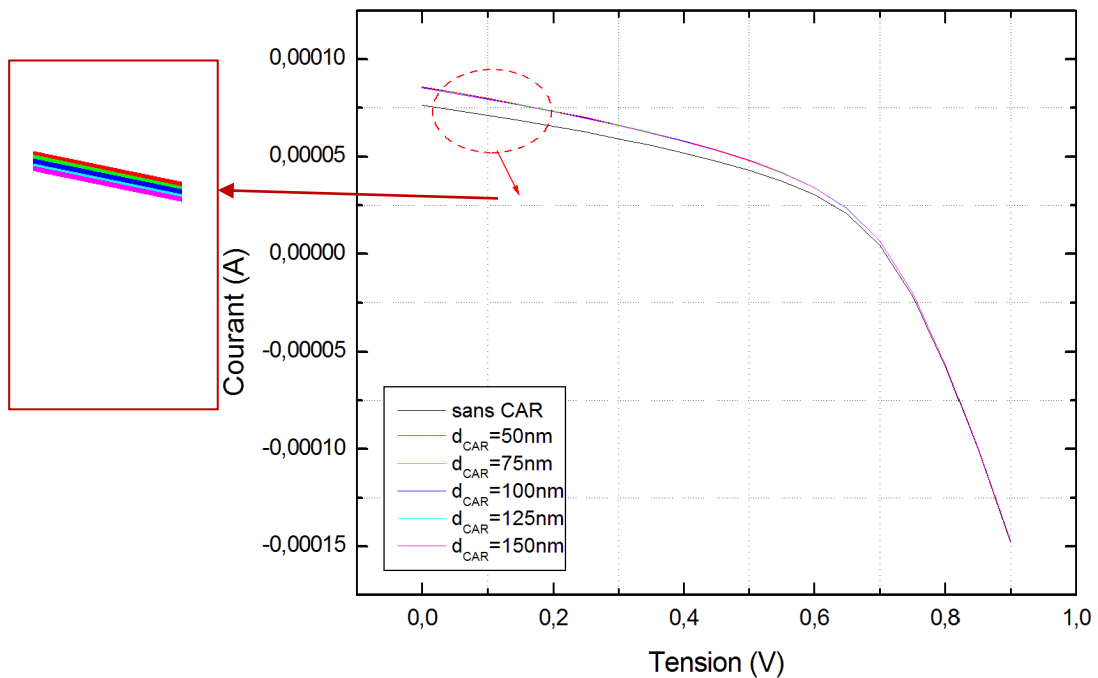


Fig-4.22. L'effet de l'épaisseur de la CAR sur I(V)

4.6.7. La réponse spectrale :

La réponse spectrale **RS** est le rapport entre le courant de court-circuit généré par la cellule et la puissance lumineuse incidente, en fonction des différentes longueurs d'onde formant le rayonnement incident.

4.6.7.1. La réponse spectrale en fonction de l'épaisseur de la zone I :

Les courbes de réponses spectrales de la cellule solaire à structure PIN pour différentes valeurs d'épaisseur de la zone intrinsèque sont données par les figures ci-dessous :

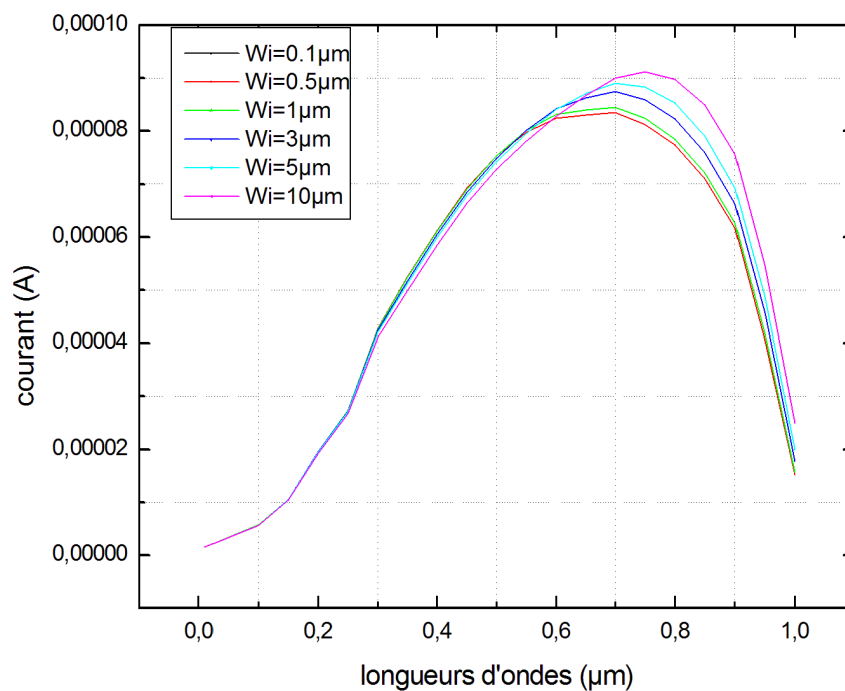


Fig-4.23. La réponse spectrale de la cellule PIN pour $W_i=0.1\mu\text{m}$, $0.5\mu\text{m}$, $1\mu\text{m}$, $5\mu\text{m}$, $10\mu\text{m}$.

- De la figure 4.26 on peut distinguer qu'entre des longueurs d'ondes entre $0\mu\text{m}$ et à peu près $0.4\mu\text{m}$ la réponse est faible et elle est presque la même pour les différentes épaisseurs W_i .
- Le courant augmente et à partir de $0.6\mu\text{m}$ il passe par un maximum puis à partir de $0.8\mu\text{m}$ diminue.
- Lorsque l'épaisseur de la zone intrinsèque augmente, la réponse est décalée vers la droite c'est-à-dire vers des longueurs d'ondes plus grandes avec une augmentation du courant maximal.

4.6.7.2. Comparaison : La réponse spectrale de la cellule solaire à jonction PN simulée et la cellule à structure PIN, sont données par les figures -4.24 et -4.25:

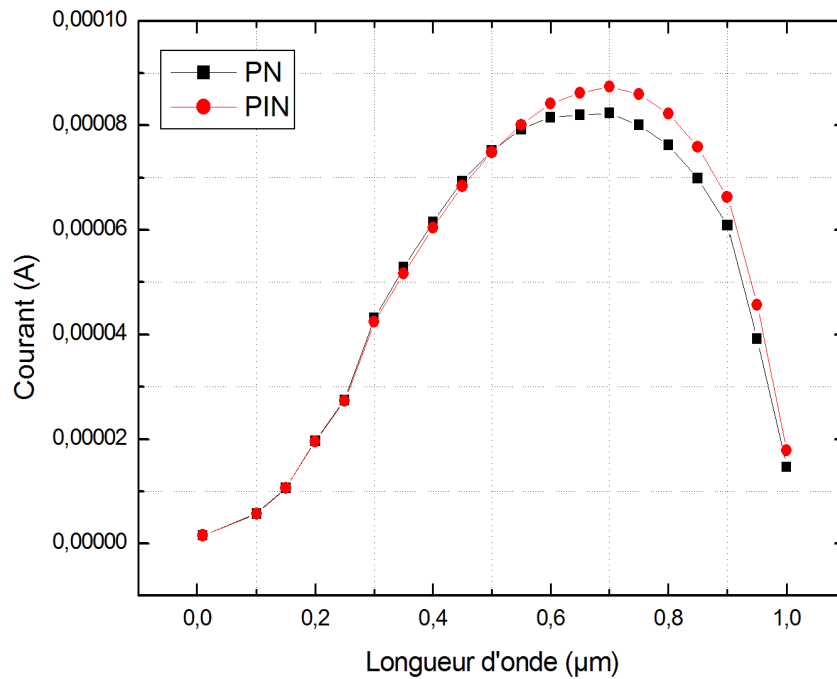


Fig-4.24. Les réponses spectrales des cellules PN et PIN

On peut voir des deux courbes des réponses spectrales des cellules solaires à jonction PN simulée et à structure PIN, qu'il y a une réponse pour les longueurs d'ondes entre 0.4µm et 1µm, avec des longueurs d'ondes plus grandes pour la cellule solaire à jonction PIN et un courant nettement plus grand à partir de 0.6µm.

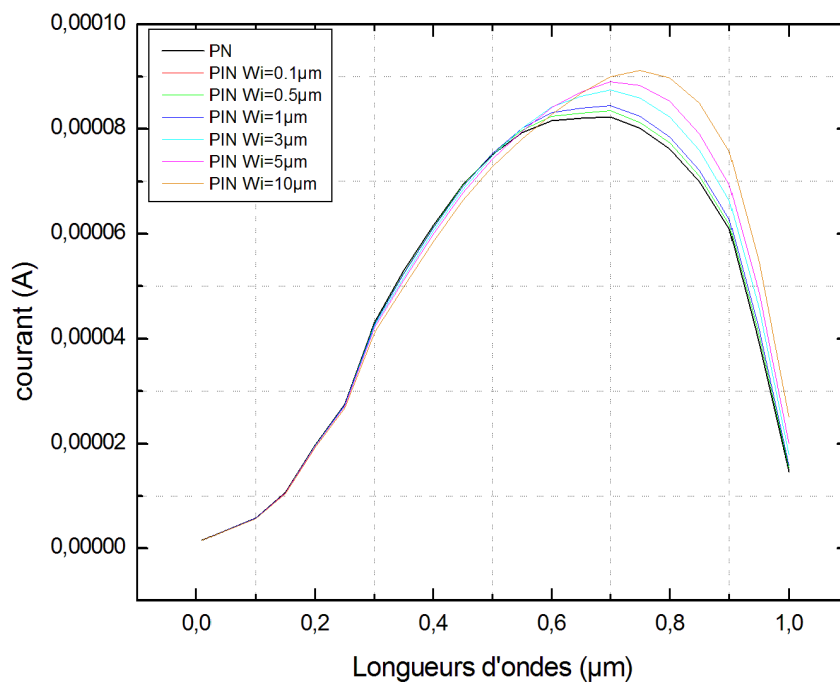


Fig-4.25. Les réponses spectrales des cellules PN et PIN(différentes Wi)

4.7. Conclusion :

En résumé, la simulation du comportement d'une cellule solaire à base de silicium monocristallin sous Atlas Silvaco nous a indiqué que le comportement des cellules solaires PIN est étroitement lié à la température, l'éclairement de fonctionnement, au dopage de l'émetteur et à l'épaisseur de la couche intrinsèque. Le photocourant d'une cellule solaire PIN est plus important que celui d'une cellule solaire PN grâce à cette couche I.

Conclusion générale

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à l'étude d'une cellule solaire à base d'une structure PIN en silicium cristallin.

Dans un premier temps, nous avons présenté des notions de base sur l'énergie solaire et les matériaux photovoltaïques, ainsi que les mécanismes physiques impliqués lors de l'interaction rayonnement matière.

Dans le deuxième chapitre, nous avons exposés les cellules solaires en présentant leurs constituants de base, leur principe de fonctionnement, leurs caractéristiques électriques et leurs paramètres les plus influents.

La cellule solaire à base d'une structure PIN a été présentée dans le troisième chapitre où on expose son principe de fonctionnement, sa caractéristique courant-tension et les paramètres qui gouvernent son fonctionnement.

Le quatrième et dernier chapitre, du présent travail, aborde la simulation numérique du comportement de la cellule solaire de structure PIN à base de silicium monocristallin. Les résultats obtenus sont présentés, commentés et comparés aux valeurs expérimentales tirées de la littérature.

Ce travail de simulation a été réalisé à l'aide d'Atlas TCAD, l'un des modules du logiciel de simulation de dispositifs électroniques SILVACO. Nous avons déterminé, dans une première étape, la caractéristique courant-tension d'une cellule à base d'une structure PN et tiré les paramètres importants qui reflètent ses performances de fonctionnement (V_{co} , I_{cc} , FF, ...). Ensuite, on a intercalé une couche intrinsèque 'I' entre l'émetteur et la base, de la cellule précédente, pour obtenir la cellule PIN qui est la cellule visée par notre étude.

Pour aboutir à la structure PIN idéale, on a fait varier plusieurs paramètres à savoir : l'intensité de la lumière, le dopage de l'émetteur, la température et l'épaisseur de la zone intrinsèque ainsi que l'épaisseur de la couche antireflet, afin d'accéder aux valeurs optimales de la structure PIN. Les résultats obtenus montrent que le photo-courant et le rendement dans la cellule à structure PIN sont plus importants que ceux d'une cellule à jonction PN, et que les différents paramètres technologiques (épaisseur zone intrinsèque, nature et épaisseur couche antireflet, dopage), et environnementaux (éclairage, température) jouent un rôle important. Il

est donc primordial de bien choisir les valeurs optimales pour obtenir la cellule solaire la plus performante.

Pour conclure, on peut suggérer :

- Sur le plan théorique : Aborder une étude qui tient compte de l'effet des recombinaisons sur le contact arrière qui ont un impact important sur les performances des cellules solaires cristallines en silicium.
- Sur le plan expérimental : Il est fort souhaitable de faire l'extension de cette étude aux matériaux pérovskites dont le prix de fabrication est cinq fois moins cher que le silicium, très durables sous exposition à la lumière et de rendement remarquable.

Bibliographie

BIBLIOGRAPHIE

- [01] fr.wikipedia.org/wiki/Ressources_et_consommation_%C3%A9nerg%C3%A9tiques_mondiales.
- [02] Pepin Magloire, Tchouate Heteu « Les certificats verts et énergies renouvelables », UCL presse universitaire de Louvain, 2004.
- [03] Cristian Schittich « construire en verre », presse polytechnique et universitaire romandes.
- [04] A.Goetzberger, V.U.Hoffmann « photovoltaic solar energy generation » Springer Series in optical sciences, 2005.
- [05] http://fr.wikipedia.org/wiki/Cellule_photovolt%C3%A9.
- [06] « Composants Semi-Conducteurs De Puissance », DUT GEii1 – 2ème année Module MC-ET2, Université Joseph Fourier.
- [07] Hatem Garrab, « Chapitre I, caractérisation des diodes PIN en commutation » thèse de, contribution à la modélisation électrothermique de la cellule de commutation Mos-Diode.
- [08] Bouguenna Ibrahim Farouk, « Modélisation et Optimisation d'une Cellule Solaire Tandem a-Si:H/a-SiGe » Thèse de Magister, Université d'Oran Mohamed Boudiaf, 2009.
- [09] S. Michael, « Silvaco Atlas As A Solar Cell Modeling Tool », Department of Electrical and Computer Engineering, US Naval Postgraduate School, United States Marine Corps.
- [10] P. Jayarama Reddy « Science and technology of photovoltaics », BS publications, Second édition. CRC Press, 2010.
- [11] Yacine Marouf « Modélisation des cellules solaires en InGaN en utilisant Atlas Silvaco » Magister en Electronique, Option Signaux et communications, Université Mohamed Khider, Biskra 2013.
- [12] Dr. A. Benhaya, cours « Eléments de Physique et Technologie des Dispositifs semi-conducteurs » 4ème Année Ingénieur en Electronique : Option Instrumentation Tec 594, 2010/2011.
- [13] Alain Ricaud « Convertisseurs photovoltaïques » novembre 2007.
- [14] Henry Mathieu Hervé Fanet, « Physique des semiconducteurs et des composants électroniques », 6ème édition Dunod.
- [15] <http://www.photovoltaique.info/Capter-l-energie-du-soleil.html> Dernière mise à jour : 2 août 2012.
- [16] Sze « semi conductor devices ».
- [17] Bernard Grehan, « Cours de physique des semiconducteurs », Eyrolles, 1987.
- [18] Aib Samia « Modelisation D'un Photodetecteur Dans Une Chaîne De Transmission Par Fibre Optique », Application Aux Composants Optohyperfréquences, Université Mentouri Constantine.
- [19] Bouafia Mounir Deblaoui Laid, « Modélisation et simulation d'une cellule solaire en couche mince à base de diséléniure de Cuivre, d'Indium et de Gallium « CIGS » », Master professionnel, Université Kasdi Merbah–Ouargla, 2011/2012.
- [20] Benloucif Nirsine, « Potentialités de films de silicium polycristallin LPCVD destinés à l'étude d'une cellule solaire multicouches », Doctorat en Sciences En Electronique, Option : Semi-conducteurs et systèmes électroniques, Université des frères Mentouri Constantine.
- [21] René Castagné « dispositifs et circuits integrs SC » 1987.
- [22] www.polytech-lille.fr/cours-atome-circuit-integre/bip/bip242.htm .
- [23] Emmanuel Gatard « Analyse des phénomènes physiques dans les diodes p-i-n : Contribution à la modélisation électrothermique pour les applications de puissance RF et hyperfréquences », Thèse pour obtenir le grade de Docteur De L'université De Limoges, Discipline : Electronique des Hautes Fréquences et Optoélectronique, Ecole Doctorale Science – Technologie – Sant, 4 Décembre 2006.
- [24] Fortis Konstantinos « Modeling and simulation of a dual-junction CIGS solar cell using Silvaco ATLAS », Monterey, California. Naval Postgraduate School, 2012-12.
- [25] Runhua Huang, « Conception, suivi de fabrication et caractérisation électrique de composants haute tension en SiC », docteur, école doctorale : électronique électrotechnique automatique, formation doctorale : génie électrique, l'institut national des sciences appliquées de Lyon, 2011.
- [26] Manuel de Silvaco ATLAS.
- [27] Wilfried Favre « Silicium de type n pour cellules à hétérojonctions caractérisations et modélisations », université paris sud 11, thèse de doctorat en physique, 2011.
- [28] Helali Kamelia, « modélisation d'une cellule photovoltaïque, étude comparative », magister en electrotechnique, machines électriques, Université Mouloud Mammeri Tizi –Ouzou, 2012.
- [29] Kaghouché Bessem, « Etude Par Tcad-Silvaco d'une Structure Mos Pour La Réalisation De Capteurs Isfet : Parametres Technologiques Et Electriques », Magister En Electronique, Microelectronique , Université Mentouri – Constantine, 17 Mai 2010.
- [30] Bendjellouli Zakaria « Contribution à la modélisation d'une cellule solaire », Magistère en Micro-électronique-photovoltaïque, Université De Bechar, 2009.
- [31] H Chenoufi « Optimisation du procédé technologique de réalisation d'une cellule solaire par la technique de diffusion ». Mémoire de magistère, Université de Batna, 2005.

- [32] Benzeghda Sabah, «Etude d'un photodetecteur PIN en Germanium et en alliage SiGe», thèse de Magister, Université de Constantine.
- [33] R_zvan NEGRU «Conception et modélisation de pixels de photodetection, Photodiodes PIN en silicium amorphe en vue de leurs utilisations comme detecteurs de particules», Thèse de Doctorat, (LPICM) Ecole polytechnique France, 2008.
- [34] Meziani Zahra « Modélisation De Modules, Photovoltaïques », Magister Microélectronique, Université De Batna, 2012.
- [35] Mohamed Ouled Salem « Analyse, Modélisation et Simulation des Pertes dans un Module Photovoltaïque à Base de Silicium Monocristallin», Magister En Physique Energétique Et Matériaux, Université Abou Bakr Belkaid-Tlemcen, Unité De Recherche Matériaux Et Energies Renouvelables, 2010.
- [36] Souici Fatma-Zohra « Modélisation d'une cellule solaire en couche mince à base de Cuivre Indium Sélénium(CuInSe2) »Magister en Physique, Option : Physique Energétique, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2009.
- [37] Céline Ternon, Delphine Constantin, Anne Kaminski, Lionel Claudon, Fabien Volpi, Quentin Raffhay, Ahmad Bsiesy, « Mise en place d'un TP de simulation, élaboration et caractérisation d'une cellule photovoltaïque de première génération », (a) Grenoble-INP Grenoble (b) Centre Interuniversitaire de Microélectronique et Nanotechnologies (CIME Nanotech), Grenoble.
- [38] Jérôme BOCH & Jean-Marc GALLIERE TP SILVACO VWF Interactive Tools, polytech Montpellier ISIM.
- [39] Chapitre Iv Simulation des effets des irradiations par electrons a l'aide du simulateur de dispositifs ATLAS.
- [40] Amal Nadri, « Modélisation de la microstructure des grains dans le silicium multicristallin pour le photovoltaïque », doctorat en materiaux, mécanique, génie civil, Electrochimie, Laboratoire SIMaP-EPM dans l'École Doctorale Ingénierie, Matériaux, Mécanique, Environnement, Energétiques, Procédés de l'Université de grenoble, 2012.
- [41] Djaadi Soumaia, « Caractérisation d'une cellule photovoltaïque de silicium polycristallin » Mémoire MASTER en physique, spécialité : rayonnement, spectroscopie et optoélectronique, 27/06/2012, Université Kasdi Merbah Ouargla 2012.
- [42] Chenming Calvin Hu « Modern semiconductor devices for integrated circuits» pearson, 2010
- [43] David wood « Optoelectronic Sc Devices » edition; prentice hall international series in optoelectronics 1994.
- [44] Benzeghda Sabah , «Etude d'un photodetecteur PIN en Germanium et en alliage SiGe», magister en électronique, Université de Constantine.
- [45] Jacques Spicher « Photorécepteurs 1,3 1,55 obtenue par intégration monolithique de photodiode pin et de transistors hemt », thèse de doctorat en science technique, école polytechnique de Lausanne, 1996.
- [46] Christopher G. SHEA, « A Silicon p-i-n Detector for a Hybrid CMOS Imaging System», master of sciences in microelectronic engineering, Department of electrical and microelectronic engineering, College of engineering, Rochester institute of technology, Rochester, New York February 2012.
- [47] François Cerf, « Composants optoélectroniques », édition Hermes sciences, paris 2000.
- [48] B. Tudor, G. Brezeanu, Ia. Badila2, M.L. Locatelli3, J.P. Cbante3, 9. Millan4, Ph. Godignon4, A. Lebedev, N.S. Savkina « An accurate method 017 6h-sic pin structures p using c-v chaipacte», Université Barcelone, Spain, Petersburg, Russia. 1998 IEEE.
- [49] R L. Thomas S, M. Morgenstern, S. B. Bayne « Silvaco Modeling Of A 10kv Sic P-I-N Diode», Army Research Lab U.S.A.2004 IEEE.
- [50] Michael H. Tsutagawa and Sherif Michael « Triple junction ingap/gaas/ge solar cell optimization: the design parameters for a 36.2% efficient space cell using silvaco atlas modeling & simulation», naval postgraduate school department of electrical and computer engineering / space systems academic group monterey, ca 93943.
- [51] Changwoo Lee, Harry Efstathiadis, James E. Raynolds, « Two-dimensional computer modeling of single junction a-si:h solar cells», Energy and Environmental Applications Center (E2TAC) College of Nanoscale Science and Engineering. University at Albany, New York.
- [52] A. Ould Mohamed Yahya 1, A. Ould Mahmoud I et I. Youm, «Etude et modélisation d'un générateur photovoltaïque », Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°3 (2008) 473 – 4832,3 ;1 Centre de Recherche Appliquée aux Energies Renouvelables 'CRAER', Université de Nouakchott, Mauritanie ;2 Laboratoire des Semi-conducteurs et d'Energie Solaire, 'LASES', Faculté des Sciences et Techniques, Université Cheikh Anta DIOP, Dakar, Sénégal ;3 Centre d'Etudes et de Recherches sur les Energies Renouvelables 'CERER', B.P. 476, Dakar, Sénégal (reçu le 19 Juillet 2008 – accepté le 30 Septembre 2008).
- [53] D. Zaouk, Y. Zaatari, A. Khoury, C. Llinares, J.-P. Charles, J. Bechara et M. Ajaka «Caractérisations électriques et optiques des cellules solaires de NAPS de structure Si (PIN) »,2001 IEEE.

- [54] H.J. Kima,b and B.D. Choia, « Student Paper Effect of infrared filter on the electrical characteristics of silicon-based PIN photo-detectors », School of Information and Communication Engineering, Sungkyunkwan university, Republic of Korea, b Yield Enhancement Team, Memory Division, Samsung Electronics Co. San#16 Banwol-Dong, Hwasung-City, Gyeonggi-Do, 445-701, Republic of Korea ISDRS, December 7-9, College Park, MD, USA, 2011.
- [55] M. Yamazaki, H. Kobayashi, S. Shinohara, «Fonvard Transient Behavior of PIN and Super Junction Diodes», Origin Electric Co.Japan. International Symposium on Power Semiconductor Devices & ICs, Kitakyushu P-9.2004.
- [56] A. Mouhoub, « Procédés Technologiques Alternatifs de Réalisation des Photopiles Solaires au Silicium Cristallin », Laboratoire des Cellules Photovoltaïques, Unité de Développement de la Technologie du Silicium, Alger-gare, Algérie] Rev. Energ. Ren. Vol. 4 p.11-22, 2001.
- [57] M. Kameda, S. Sakai, M. Isomura, K. Sayama, Y. Hishikawa, S. Matsumi, H. Haku, K. Wakisaka, M. Tanaka, S. Kiyama, S. Tsuda and S. Nakano, «Efficiency evaluation of a-Si and c-Si solar cells for outdoor use», New Materials Research Center, Sanyo Electric Co. Japan
- [58] Isabelle Huynen, «A Four-Port Scattering Matrix Formalism for p-i-n Traveling-Wave Photodetectors», Member, IEEE, and André Vander Vorst, Fellow, IEEE transactions on microwave theory and techniques, vol. 48,june 2000.
- [59] Ebrahim Abiri, Mohammad Reza salehi, Shahamat Kohan and Mohammadsadegh Mirzazadeh, Second Pacific-Asia Conference on Circuits, Communications and System (PACCS) Multi-Application PIN Diode, Department ofElectrical and Electronics Engineering, Shiraz University of Technology,Shiraz,Iran, 2010.
- [60] Sangwook Park, Eunchel Cho, Xiaojing Hao, Gavin Conibeer and Martin A. Green, «Study of Silicon Quantum Dot p-n or p-i-n Junction Devices on c-Si Substrate», ARC Photovoltaics Centre of Excellence, University of New South Wales, Australia, Applied Technology Research Department, Hyundai Heavy Industry, Korea 2008 IEEE.
- [61] Warsuzarina Mat Jubadi 1, Siti Norafzaniza Mohammad Noor 2, «Simulations of Variable I-Layer Thickness Effects on Silicon PIN Diode I-V Characteristics», Department of Electronic Engineering, Faculty of Electrical and Electronic Engineering, University Tun Hussein Onn Malaysia (UTHM), Johor, Malaysia 2010 IEEE.
- [62] <http://www.edfenr.com/energie-solaire-photovoltaïque.html>. le leader du solaire photovoltaïque en toitures.
- [63] http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_solaire
- [64] <http://www.africatopsuccess.com/2014/09/18/energie-solaire-la-plus-grande-centrale-dafrique-sera-ghaneeenne/>
- [65] <http://www.photovoltaïque.info/Capter-l-energie-du-soleil.html> Dernière mise à jour : 2 août 2012.
- [66] <http://www.photovoltaïque.info/Les-types-de-modules.html>.
- [67] http://www.allaboutcircuits.com/vol_3/chpt_3/12.html.
- [68] <http://www.abcelectronique.com/divers/dossiers/photodetecteurs>.
- [69] www.polytech-lille.fr/cours-atome-circuit-integre/bip/bip242.htm.
- [70] <http://fr.wikiversity.org/wiki/>
- [71] Diode pin Wikipedia.
- [72] http://www.aist.go.jp/aist_e/latest_research/2005/20050302/20050302.html.

Annexe

Annexe : Equation de diffusion ambipolaire

Afin de démontrer l'équation de diffusion ambipolaire, considérons les équations des courants d'électrons et des trous (équations (5.1) et (5.2)) dans un semiconducteur ainsi que les équations de continuité à une dimension (équations (5.3) et (5.4)).

- Les équations de transport des électrons et trous

$$J_n(x, t) = q\mu_n n(x, t)E(x, t) + qD_n \frac{\partial n(x, t)}{\partial x} \quad (5.1)$$

$$J_p(x, t) = q\mu_p p(x, t)E(x, t) - qD_p \frac{\partial p(x, t)}{\partial x} \quad (5.2)$$

- Les équations de transport des électrons et trous

$$\frac{\partial n(x, t)}{\partial x} = +\frac{1}{q} \frac{\partial J_n(x, t)}{\partial x} - R_{SRH} \quad (5.3)$$

$$\frac{\partial p(x, t)}{\partial x} = -\frac{1}{q} \frac{\partial J_p(x, t)}{\partial x} - R_{SRH} \quad (5.4)$$

A partir des équations de continuité et des courants dans le semiconducteur, il est possible d'écrire les relations suivantes :

$$\frac{\partial n(x, t)}{\partial t} = \mu_n E(x, t) \frac{\partial n(x, t)}{\partial x} + \mu_n n(x, t) \frac{\partial E(x, t)}{\partial x} + D_n \frac{\partial^2 n(x, t)}{\partial x^2} - R_{SRH} \quad (5.5)$$

$$\frac{\partial p(x, t)}{\partial t} = -\mu_p E(x, t) \frac{\partial p(x, t)}{\partial x} - \mu_p p(x, t) \frac{\partial E(x, t)}{\partial x} + D_p \frac{\partial^2 p(x, t)}{\partial x^2} - R_{SRH} \quad (5.6)$$

La neutralité électrique de la charge dans le barreau de semiconducteur impose

$$N_D(x) - N_A(x) = n(x, t) - p(x, t)$$

Si l'on considère un semiconducteur très faiblement dopé de type N ou P en condition de forte injection, la neutralité électrique impose $n(x, t) \approx p(x, t)$.

le taux de recombinaison SRH est alors le même pour les électrons et les trous, il s'écrit :

$$R_{SRH} = \frac{n(x, t)}{\tau_n + \tau_p} = \frac{n(x, t)}{\tau_a}$$

Où $\tau_n + \tau_p$ est défini comme étant la durée de vie ambipolaire.

En multipliant l'équation(5.5) par p_p et l'équation (5.6)par p_n et en combinant les deux équations, on obtient alors l'équation suivante :

$$(\mu_n + \mu_p) \frac{\partial n(x, t)}{\partial t} = (D_n \mu_p + D_p \mu_n) \frac{\partial^2 p(x, t)}{\partial x^2} - (\mu_n + \mu_p) \frac{n(x, t)}{\tau_a} \quad (5.8)$$

Cette relation peut se simplifier et en utilisant la relation d'Einstein ($D = V_{th}$) s'écrire sous la forme :

$$\frac{\partial n(x, t)}{\partial t} = \frac{2D_n D_p}{D_n + D_p} \frac{\partial^2 p(x, t)}{\partial x^2} - \frac{n(x, t)}{\tau_a} \quad (5.9)$$

$D_a = \frac{2D_n D_p}{D_n + D_p}$ est la constante de diffusion ambipolaire. L'équation obtenue est appelée équation de diffusion ambipolaire. Elle régit la distribution des porteurs dans un semiconducteur faiblement dopé en régime de forte injection. En réarrangeant l'expression obtenue, l'équation de diffusion peut se mettre sous une forme plus connue.

$$\frac{\partial^2 n(x, t)}{\partial x^2} = \frac{n(x, t)}{D_a \tau_a + D_p} + \frac{1}{D_a} \frac{\partial n(x, t)}{\partial t} \quad (5.10)$$

Cette équation est applicable à la zone intrinsèque de la diode p-i-n en vue de la mise en équation du fonctionnement de la diode en régime de polarisation directe en condition de forte injection