

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد- تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd-Tlemcen

كلية التكنولوجيا

Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique et Electronique (GEE)

Filière : Electronique



MASTER INSTRUMENTATION

PROJET DE FIN D'ETUDES

Présenté par : mokadem rania

Intitulé du Sujet

Simulation et optimisation d'une cellule solaire au silicium monocristallin

Soutenu en 2020, devant le jury composé de :

M ^r HAMDOUNE Abdelkader	Professeur	Univ. Tlemcen	Président
M ^r MOLAY KHATIR Nassim	MCB	Univ. Tlemcen	Examineur
M ^{me} KADDOURI Nadera	MCB	Univ. Tlemcen	Encadreur
M ^{elle} BECHLAGHEM Fatima Zahra	Doctorat	Univ. Tlemcen	Co-Encadreur

Année Universitaire 2019-2020

Résumé

Dans ce mémoire nous avons étudiés la cellule solaire a structure PIN à deux dimensions, On a définit une cellule solaire a structure PN avec un ensemble de paramètres physiques (caractéristiques $I(V), V_{co}$, rendement, facteur de forme,...). Ensuite, on a intercalé une couche intrinsèque I entre la couche P et N, pour obtenir une cellule solaire a jonction PIN qu'on a étudié à l'aide du logiciel Atlas-SILVACO pour déterminer l'influence de différentes paramètres : l'épaisseur et dopage de l'émetteur, l'épaisseur de la couche intrinsèque, la couche anti réflexion, sur les paramètres de la cellule surtout le rendement.

ملخص

في هذا العمل نحن ندرس الخلية الشمسية ذات الهيكلة PIN ثنائية الابعاد, و قمنا بتعريف الخلية الشمسية ذات الهيكلة PN بإعداداتها الفيزيائية ($I(V), V_{co}, \eta, FF$). وبعدها, قمنا بدمج طبقة I بين الطبقة P وطبقة N, ومنها تحصلنا على الخلية الشمسية PIN باستخدام برنامج Atlas-SILVACO لتحديد تأثير المعلمات المختلفة : سمك وتنشيط الباعث , سمك طبقة I, الطبقة المضادة للانعكاس, على معلمات الخلية الشمسية وخاصة η .

Summary

In this work we studied the PIN solar cell with a two dimensional, We define a reference PN cell with a set of physical parameters ($I(V), V_{co}, \eta, FF$). then, an intrinsic layer I is inserted between N and P regions, to obtain a PIN solar studied by the help of Atlas-SILVACO to determine the effect of different parameters : the thickness and the doping of the emitter, the thickness of the intrinsic layer, the antireflective layer.

Mots clés

Cellule photovoltaïque, Silicium monocristallin, Structure d'une cellule solaire PIN.

Remerciements

Je remercie et glorifie Allah le tout puissant et miséricordieux pour guider mes pas pour accomplir ce modeste travail et de le mené à terme. Ce dernier, a été effectué au sein de l'université (*AboubakrBelkaid*) de Tlemcen et plus précisément au département de génie électrique et électronique de la faculté de technologie.

Je tiens à remercier vivement nos encadreurs, *Mme KADDOURI Nadera* et *Melle BECHLAGHEM Fatima Zahra*, d'avoir accepté de me guider tous le long de ce travail. Et cela, avec leur grande disponibilité, leur rigueur scientifique et leurs précieux conseils qui m'a permis de travailler dans les meilleures conditions, et ce, depuis le début de la préparation de notre projet.

Je tiens à remercier, aussi, *Mr HAMDOUNE Abdelkader* pour l'honneur, de bien vouloir accepter de présider le jury de notre soutenance.

Les remerciements sont, également, adressés à *Mr MOLAY KHATIR Nassim*. Monsieur, je suis très sensibles à l'honneur que acceptez d'examiner le présent travail que je souhaité est d'un bon niveau,

Par ailleurs, trouverons ici, mon sincère reconnaissance à tous les ingénieurs de laboratoires du département de génie électrique et électronique et à toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet de fin de étude.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

À mes parents, que Dieu les récompense et les garde, qui n'ont jamais cessé de m'aider, de m'encourager et de me soutenir tout au long de mon cursus scolaire et universitaire.

À mes très chers frères, et toute ma famille.

À mes enseignants qui ont intervenu dans mon cursus universitaire et spécialement *Mme kaddouri nadera* et *Melle bechlaghem fatima zahra*: merci pour avoir été mon enseignant un jour.

À tous les amis de ma promotion master électronique instrumentation (2019-2020) sans exception.

Mokadem rania

Table des matières

Résumé	i
Remerciement	ii
Dédicaces	iii
Table des matières	iv
Liste des abréviations	vi
Liste des tableaux	vii
Liste des figures	viii
Introduction générale	1
Bibliographie	3
Etat de l'art Notions préliminaires sur l'énergie solaire	
1- Introduction	4
2- Energie solaire	4
2.1- Rayonnement solaire	4
2.2- La conversion photovoltaïque	5
2.3- Le spectre solaire	5
2.4- L'intensité du rayonnement	7
3- Matériaux photovoltaïques	7
3.1- La bande interdite	7
3.2- Transitions radiatives	8
3.2.1- Transition directe	8
3.2.2- Transition indirecte	8
3.3 - Interaction photon– matière	8
3.3.1- Absorption	8
3.3.2- Recombinaison	8
3.3.2.1- Mécanismes de recombinaisons	9
4- Les composantes de la lumière solaire	10
4.1 - Rayonnement direct	10
4.2- Rayonnement diffus	10
4.3 - Rayonnement réfléchi	10
5-Conclusion	11
Bibliographie	12
Chapitre 1 Etude des différents types de silicium	
1.1-Introduction	14
1. 2- Aperçus sur la structure cristalline et la structure amorphe	14
1.2.1- Etat amorphe	14
1.2.2- Etat cristallisé	14
1.2.2.1- Des monocristaux	14
1.2.2.2- Polycristaux	14
1.3- le Silicium	14
1.3.1- Réduction de la silice	16
1.3.2- Purification du silicium	17
1.4- Différents types de silicium	17
1.4.1- Le silicium amorphe	17

1.4.2- Le silicium cristallin	18
1.4.2.1-Monocristallin	18
1.4.2.2- Polycristallin	18
1.5- Production du silicium cristallin	18
1.5.1-a) Procédé de Czochralski	19
1.5.2-b) Procédés de fabrication du silicium polycristallin (multicristallin)	19
1.6- Préparation des plaquettes de silicium cristallin	20
1.6.1- Orientation et découpage	20
1.6.2- Découpage et polissage	20
1.6.2.1 - Scie diamantée	20
1.6.2.2 - Scie à fil	21
1.6.3- Défauts cristallins dans le Silicium	21
1.7- Silicium matériau de base pour le photovoltaïque	22
1.8- Choix du matériau Silicium	22
1.9- Conclusion	23
Bibliographie	24

Chapitre 2 Les cellules photovoltaïques à base de silicium

1.1-Introduction	26
2.1- La cellule solaire	26
2.1.1- Principe de fonctionnement d'une cellule solaire	26
2.1.1.1-La jonction PN	27
2.1.1.2- La Création de paires électrons/trous	27
2.1.1.3- La Collecte	27
2.2-La Caractérisation électriques	28
2.2.1- La caractéristique courant-tension (I-V)	28
2.2.2- Le photocourant	28
2.2.2.a) Le courant dans la région quasi-neutre N	28
2.2.2.b) Le courant dans la région quasi-neutre P	28
2.2.2.c) Le courant dans la région de déplétion	29
2.2.2.d) Le photocourant total	29
2.3- Le courant d'obscurité	29
2.4- La réponse spectrale	30
2.5- Paramètres d'une cellule solaire	30
2.5.1- Paramètres physiques	30
2.5.2-Paramètres photovoltaïques	30
2.6- Circuit équivalent d'une cellule solaire	31
2.7- Différentes structures de cellules solaires	32
2.7.1-La structure à jonction PN et PIN	32
2.7.1.1- Principe de fonctionnement de la cellule solaire à structure PIN	33
2.7.1.2-Types de structure PIN	33
2.7.2- La structure Schottky	36
2.7.3- La structure MIS	36
2.8- Différentes couches d'une cellule solaire à jonction	37
2.8.1- Texturation de surface	38
2.8.2- Couche antireflet	38
2.8.3- La Couche BSF	38
2.8.4- Les Contacts face avant et arrière	38
2.10- Conclusion	39
Bibliographie	40

Chapitre 3 Simulation d'une cellule solaire au silicium monocristallin	
3.1. Introduction	42
3.2. Simulation numérique d'une cellule solaire à jonction PN au silicium monocristallin	42
3.2.1- Structure simulée	42
3.2.2- Paramètre de la structure simulée (cellule de référence)	43
3.2.2.1- Mesh	44
3.2.2.2-Region	45
3.2.2.3 -Electrodes	45
3.2.2.4- Dopage	45
3.3- Présentation des résultats	46
3.3.1- Caractéristique I(V) de la cellule photovoltaïque a jonction PN	46
3.3.1.1- Courbe de puissance de la cellule PN	47
3.3.1.2- Etude de l'influence de l'intensité lumineuse sur la caractéristique I(V)	48
3.4- Optimisation d'une cellule solaire a simple jonction	48
3.4.1-Etude de la structure PIN	48
3.4.2- Caractéristique I(V) de la cellule solaire en silicium monocristallin a jonction PIN	49
3.4.2.1- Comparaison entre la caractéristique I(V) de la cellule solaire a jonction PN et la cellule solaire a jonction PIN	49
3.4.3- L'effet de l'épaisseur de la couche intrinsèque sur les paramètres de la cellule	50
3.4.3.1- L'effet de l'épaisseur de la couche intrinsèque sur I(V) de la cellule PIN	51
3.4.4-L'effet de la Variation du dopage de l'émetteur	52
3.4.5- L'effet de la variation de l'épaisseur de l'émetteur	52
3.3.6- L'effet de la couche anti réflexion	53
3.4.7- La réponse spectrale	54
3.4.7.1- Comparaison	56
3.5-Conclusion	56
Bibliographie	57
Conclusion générale	58

Liste des abréviations

abréviation	Description
I _{cc}	Courant de court-circuit
V _{co}	Tension du court-ouvert
FF	Facteur de forme
η	Rendement
CAR	Couche antireflet
BSF	Back surface field
E _g	Energie de gap
PV	Panneau photovoltaïque
AM	Air mass
BV	La bande de valence
BC	La bande de conduction
IMT	L'institut de Micro Technologie
μ c-Si	Silicium microcristallin
(e-h)	Electron-hole
Si	Silicium
SiO ₂	La silice
O	L'oxygène

Liste des tableaux

Numéro	Le titre	page
Tableau 1	Bande interdite de quelques semi-conducteurs	7
Tableau 3.1	Paramètres simulés de la cellule solaire à structure solaire PN	43
Tableau 3.2	Paramètres simulés de la couche intrinsèque à structure solaire PIN	49
Tableau 3.3	L'effet de l'épaisseur de la couche intrinsèque sur les paramètres de la cellule PIN	50
Tableau 3.4	L'effet de la couche anti réflexion	53

Liste des figures

Figure 1	L'énergie solaire	Page 4
Figure 2	Spectre solaire hors atmosphère et ou sol	Page 5
Figure 3	Rayonnement solaire et nombre de masse d'air	Page 6
Figure 4	Les bandes d'énergie	Page 7
Figure 5	Processus d'absorption	Page 8
Figure 6	Type de recombinaison	Page 9
Figure 7	Les trois différents rayonnements solaires	Page 10
Figure 1.1	A) structure cristallin, b) structure amorphe	Page 14
Figure 1.2	A) sable, b) quartz	Page 15
Figure 1.3	Production des plaquettes de silicium de qualité électronique	Page 15
Figure 1.4	Représentation schématique du four	Page 16
Figure 1.5	Schéma d'un réacteur CVD pour la production de silicium de qualité électronique à partir SiHCl_3	Page 17
Figure 1.6	Technique de Czochralski	Page 18
Figure 1.7	Fabrication de lingots de Si polycristallin	Page 19
Figure 1.8	Scie diamantée	Page 20
Figure 1.9	Scie à fil	Page 20
Figure 1.10	Le silicium amorphe	Page 21
Figure 1.11	Production mondiale de cellules en MW_C par technologie en 2007	Page 22
Figure 2.1	Principe de fonctionnement d'une cellule solaire	Page 26
Figure 2.2	Jonction PN	Page 27
Figure 2.3	Caractéristique $I=f(V)$ d'une cellule solaire	Page 28
Figure 2.4	Circuit équivalent d'une cellule solaire	Page 31
Figure 2.5	Cellule solaire à structure à jonction PN	Page 32
Figure 2.6	Cellule solaire à structure à jonction PIN	Page 32
Figure 2.7	Cellule solaire à structure MIS	Page 33
Figure 2.8	Structure de la cellule photovoltaïque standard (à gauche). Les insertions (à droite) schématisent les rôles respectifs de la couche antireflet, la texturation et le BSF	Page 34
Figure 2.9	Principe de fonctionnement de la cellule solaire à structure PIN	Page 35
Figure 2.10	Cellules solaires à jonction PIN à silicium amorphe	Page 35
Figure 2.11	Cellule solaire à jonction PIN à silicium microcristallin ($\mu\text{c-Si}$)	Page 36
Figure 2.12	Structure d'une cellule solaire à jonction PIN organique à couche mince	Page 37
Figure 2.13	Cellules solaires PIN sur nanofils Si (à gauche), schéma de la cellule solaire à nanofils de Si (à droite)	Page 37
Figure 3.1	Structure de référence (PN) simulée sous Silvaco/Atlas	Page 43
Figure 3.2	Maillage de structure PN	Page 44
Figure 3.3	Définition des régions dans atlas	Page 45
Figure 3.4	Définition des électrodes dans atlas	Page 45
Figure 3.5	Définition des dopages dans atlas	Page 46

Figure 3.6	Courbe I(V) de la cellule PN sous l'éclairement	Page 47
Figure 3.7	Courbe de puissance de la cellule PN	Page 47
Figure 3.8	Caractéristiques I(V) en fonction de l'intensité lumineuse	Page 48
Figure 3.9	Structure de référence (PIN) avec couche intrinsèque simulée sous Atlas-Silvaco	Page 48
Figure 3.10	Courbe I(V) de la cellule PIN sous l'éclairement	Page 49
Figure 3.11	Les caractéristiques I(V) des cellules PN et PIN	Page 50
Figure 3.12	L'effet de l'épaisseur de la zone intrinsèque sur I(V) de la cellule PIN	Page 51
Figure 3.13	Evolution du (V_{co}, η, FF, J_{cc}) de la cellule PIN en fonction la Variation de l'épaisseur de la zone intrinsèque	Page 51
Figure 3.14	L'effet de la Variation du dopage de l'émetteur sur I(V) de la cellule PIN	Page 52
Figure 3.15	Evolution de η, V_{co}, J_{cc}, FF de la cellule PIN en fonction la Variation de l'épaisseur de l'émetteur	Page 53
Figure 3.16	L'effet de la couche anti réflexion sur les paramètres de la cellules PIN (η, V_{oc}, FF, J_{cc})	Page 54
Figure 3.17	La réponse spectrale de cellule solaire a structure PIN	Page 55
Figure 3.18	La réponse spectrale de cellule solaire a structure PN	Page 55
Figure 3.19	Les réponses spectrales des cellules solaires PN et PIN	Page 56

Introduction générale

Ces dernières années le monde se tourne vers les énergies renouvelables (éolienne, photovoltaïque, hydraulique..) pour couvrir ses besoins énergétiques. Ce sont des énergies inépuisables à l'échelle du temps humain et qui ont beaucoup d'avantages, par exemple l'énergie photovoltaïque. Chaque année, le soleil envoie sur la terre une énergie qui représente 6000 fois l'énergie fournie par les énergies fossiles comme le pétrole, le gaz ...etc [1].

L'électricité photovoltaïque est la transformation de l'énergie solaire en énergie électrique à la moyenne des panneaux solaires (PV) (plusieurs cellules connectent en série ou en parallèles). L'énergie photovoltaïque se base sur l'effet photoélectrique pour créer un courant électrique à partir d'une interaction photon-matière à l'aide d'un dispositif appelé cellule photovoltaïque.

La capacité globale installée des systèmes photovoltaïque (PV), en 2003 par exemple, est de 1809 MW ; plus de 80% de cette capacité a été installée dans les systèmes photovoltaïques résidentiels en réseau électrique [2].

Le matériau le plus utilisé et industrialisé depuis 60ans dans la fabrication de cellules photovoltaïques est le silicium cristallin (80% de la production mondiale). Ce dernier présente en effet de nombreux avantages (abondance sur terre, moins cher, non toxique ...), les cellules produites industriellement atteignent des rendements de conversion de 15% en moyenne. Au laboratoire les meilleurs rendements atteints sont de l'ordre de 25% avec de silicium monocristallin [3].

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur simulation et l'optimisation d'une cellule solaire à base de silicium monocristallin par l'utilisation de logiciel Silvaco. Cette étude est composé de trois chapitre et un état de l'art et il organisé comme suite :

- Premièrement l'état de l'art s'attache à exposer un rappel sur les notions principales de l'énergie photovoltaïque
- Chapitre I nous présentons les notions fondamentales de silicium cristallin et ses différents types.
- Chapitre II exposent le principe de fonctionnement et les caractéristiques principales d'une cellule solaire, a jonction PN notamment la structure PIN.
- Finalement le chapitre III sera consacré à la simulation de la cellule solaire en silicium monocristallin. Une étude approfondie sur l'influence des différents paramètres géométriques (liés à la structure utilisée) et physique sera menée afin de comprendre le fonctionnement de ce type de cellules pour atteindre un rendement maximal.

Introduction générale

Nous nous intéressons à l'optimisation grâce à la simulation par le simulateur numérique Silvaco/Atlas qui peut nous aider à déterminer des paramètres qui peuvent augmenter le rendement d'une cellule solaire.

Bibliographie

- [1] Amaziane, S. Implantation expérimentale de l'MPPT pour un système de génération hybride solaire –éolien, *Thèse de Magister, Université de Batna, 2009.*
- [2] Zorig, A. Modélisation et commande d'un système de production d'énergie photovoltaïque couplé au réseau triphasé, *Mémoire de Master, Université de M'sila.*
- [3] Abdi, Z. Etude comparative par simulation numérique des cellules photovoltaïque à simple jonction à base de silicium, *Mémoire de Master, Université Aboubakr Belkaid, Tlemcen, 2017.*

Etat de l'art

**Notions préliminaires sur l'énergie
solaire**

1 - Introduction :

Le soleil envoie continuellement une énorme quantité d'énergie radiante dans le système solaire, la terre intercepte une toute petite partie de l'énergie solaire rayonnée dans l'espace. Une moyenne de 1367 watts atteint chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère terrestre (pour une distance moyenne terre –soleil de 150 millions de Km), c'est ce que l'on appelle le constante solaire égale 1367W/m^2 [1].

Cette partie présente les bases indispensables à la compréhension du sujet. Nous abordons quelques notions sur la source d'énergie dans le domaine photovoltaïque.

2 - Energie solaire :

C'est l'énergie émise par le soleil sous forme de lumière et de chaleur. C'est une énergie classée parmi les énergies renouvelables car elle est inépuisable, et c'est une énergie propre et non polluante. Il a de nombreuses utilisations, dont la plus importante est sa conversion en électricité.



Figure 1 - L'énergie solaire

2.1- Rayonnement solaire :

Le soleil rayonne sur la terre une puissance de 16.1015 kWh par an, dans toutes les longueurs d'onde du spectre de la lumière visible. Le rayonnement solaire est un facteur important dans la conversion photovoltaïque. Le rayonnement solaire est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet ($0,2\mu\text{m}$) à l'infrarouge lointain ($2,5\mu\text{m}$). Lorsque ce rayonnement solaire traverse l'atmosphère, et à la suite de phénomènes d'absorption par les molécules des différentes couches de l'atmosphère (le taux de poussière, d'aérosol, de vapeur d'eau, le rayonnement solaire subit une atténuation et une modification de son spectre, et donne un spectre solaire non continu mais qui présente des bandes d'absorption et par conséquent crée une baisse globale de la puissance incidente [2].

2.2- La conversion photovoltaïque :

C'est la conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique avec des matériaux semi-conducteurs. La première cellule photovoltaïque, construite en 1914, avait un rendement 1% : elle était utilisée pour réaliser des posemètres pour la photographie .il a fallu attendre jusqu'à 1954 pour que la production d'électricité par effet photovoltaïque commence à se développer, avec la réalisation d'une première cellule en silicium monocristallin d'un rendement de 6%.ce dernier augmenta rapidement pour atteindre, en laboratoire ,18% aujourd'hui [3].

2.3- Le spectre solaire :

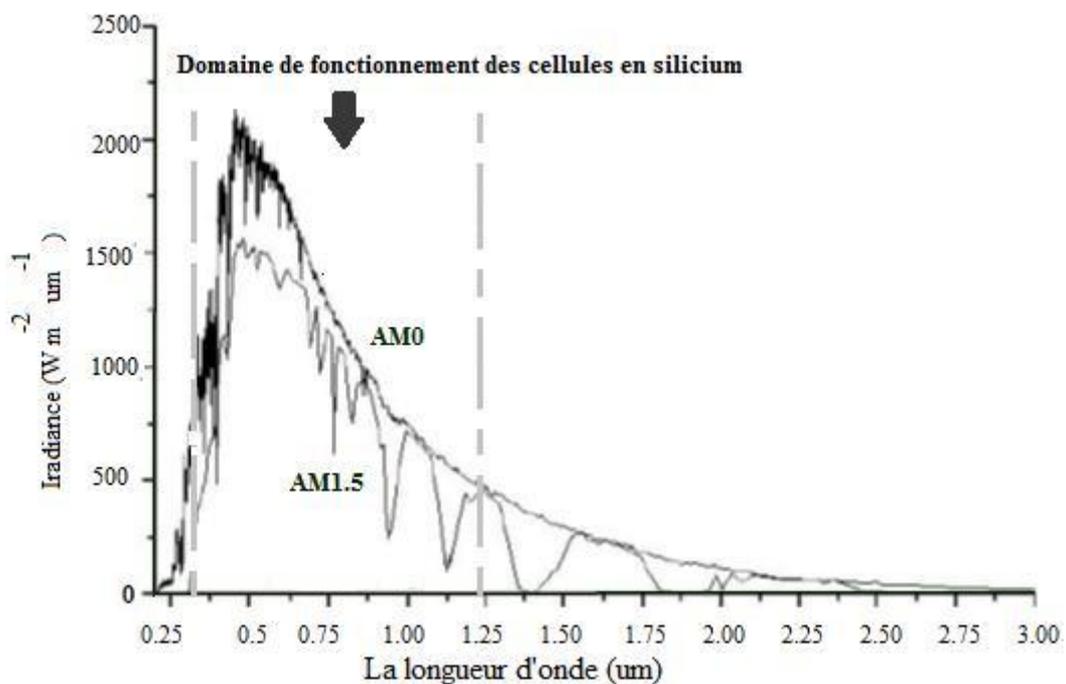


Figure 2 - Représentation graphique des spectres AM0 et AM1.5 d'après [2].

La lumière solaire est composée d'un faisceau lumineux de couleurs différentes, caractérisées par leur gamme de longueur d'onde. Sa décomposition en longueur d'onde donne ce qu'on appelle spectre solaire [4].

Pour pouvoir comparer les performances des cellules solaires seront qualifié au moyen des différents spectres solaires utilisés, la notion d'Air-masse (AM_m) a été créée. Elle évalue la quantité de puissance absorbée par l'atmosphère en fonction de l'angle θ du soleil par rapport au Zénith.

La valeur de la masse d'air dépend de l'altitude et de l'angle d'incidence des rayons lumineux et de la pression. L'intégration de l'irradiance sur la totalité du spectre permet d'obtenir la

puissance P (en W.m^{-2}) fournie par le rayonnement. Pour simplifier on utilise les notations suivantes :

AM₀ : Hors atmosphère (pour applications spatiales). $P \approx 1.36 \text{ kW.m}^{-2}$

AM₁ : Le soleil est au zénith du lieu d'observation (distance minimum à parcourir par les photons à travers l'atmosphère).

AM_{1.5G} : Spectre standard, le soleil est à 48° . $P \approx 1 \text{ kW.m}^{-2}$ [3]. Le «G» représente le rayonnement "Global" incluant rayonnement direct et rayonnement diffusé.

Avec :

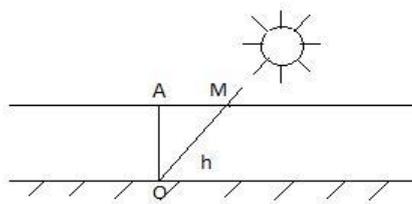


Figure 3 - Rayonnement solaire et nombre de masse d'air.

A l'aide des points O, A et M et cet angle h représentés sur la figure 3, on écrit la longueur du trajet du soleil à travers l'atmosphère :

$$\sin h = \frac{OA}{OM} \Leftrightarrow OM = \frac{OA}{\sin h} \quad (1)$$

Donc Masse d'Air (AM) est :

$$\frac{OM}{OA} = \frac{1}{\sin h} \quad (2)$$

La notion conventionnelle de ce concept est donnée par un nombre sans dimension AMx [7] :

$$x = \frac{1}{\sin h} \quad (3)$$

Le faisceau lumineux est constitué à partir des ondes électromagnétiques qui portent des photons. Les photons, grains de la lumière qui composent ce rayonnement électromagnétique, sont porteurs d'une énergie qui est reliée à leur longueur d'onde par la relation [4] :

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (4)$$

Où :

h : La constante de Planck.

ν : La fréquence.

c : La vitesse de la lumière.

λ : La longueur d'onde.

2.4 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 0.9Kw/m^2 , en raison de l'absorption essentiellement par l'ozone [6].

3 - Matériaux photovoltaïques :

3.1- La bande interdite :

La bande interdite ou énergie de gap, distance entre deux bandes (bande de valence BV et bande de conduction BC).



Figure 4 - Les bandes d'énergie.

Le tableau 1 présente quelques valeurs de bandes interdites de quelques semi-conducteurs.

Semi-conducteur	Eg (eV) à 300K
Si	1.12
Ge	0.66
GaAs	1.42
InP	1.32

Tab 1- bande interdite de quelques semi-conducteurs [8].

La relation reliant la bande interdite et la longueur d'onde est [8] :

$$\lambda(\mu m) = \frac{hc}{Eg(ev)} = \frac{1.24}{Eg(ev)} \quad (5)$$

$\lambda(\mu m)$: La longueur d'onde.

h : La constante de Planck.

c : La vitesse de la lumière.

$Eg(ev)$: L'énergie de gap.

3.2 - Transitions radiatives :

L'émission et la réception dépendent de l'échange d'énergie entre les photons et les électrons.

3.2.1 - Transition directe :

La transition directe l'électron sera transférée d'un niveau d'énergie à un autre sans changer de mouvement.

Les semi-conducteurs à gap direct c'est-à-dire que le maximum de la bande de valence se situe au même vecteur d'onde que le minimum de la bande de conduction [10].

3.2.2 - Transition indirecte :

La transition indirecte l'électron sera transféré d'un niveau d'énergie à un autre avec un changement de quantité de mouvement (trajectoire), cette transition pour les semi-conducteurs à gap indirecte ou le maximum de la bande de valence ne coïncide pas avec le minimum de la bande de conduction.

3.3 - Interaction photon- matière :

3.3.1-absorption :

Lorsqu'un électron absorbe l'énergie du photon, il peut se déplacer de la bande de valence à la bande de conduction.

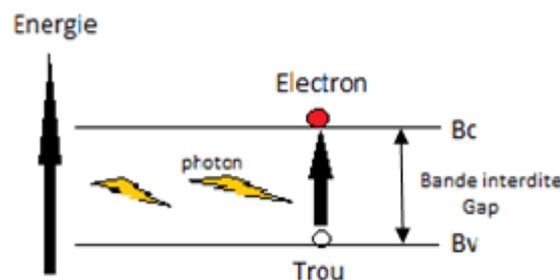


Figure 5- processus d'absorption.

3.3.2 – Recombinaison [11]:

Les électrons qui se déplacent librement à travers le cristal ont tendance à se recombiner avec les trous. Ce phénomène est appelé recombinaison et sa vitesse est proportionnelle au nombre de trous et d'électrons libres existants.

Lorsque la recombinaison se produit, l'électron et le trou cessent d'être des porteurs libres. Au cours de ce phénomène, l'électron transite dans un état d'énergie inférieure. Pour cela, il doit libérer un quantum d'énergie égale à la différence de son origine et son état final. Cette énergie peut être classée en deux façons : radiative et non radiative.

3.3.2.1 - Mécanismes de recombinaisons :

➤ Recombinaison radiative :

Un électron de la bande de conduction se recombine avec un trou dans la bande de valence pour produire l'émission d'un photon dont l'énergie est égale à l'énergie de gap. Étant donné que le gap de silicium est indirect, le mécanisme de la recombinaison radiative est considéré comme négligeable par rapport aux autres mécanismes de recombinaison [12].

➤ Recombinaison assistée par piège :

Aussi appelées recombinaisons Schokley-Read-Hall, elles sont présentes dans les matériaux qui contiennent des défauts (joints de grains, impuretés, etc.). Ces défauts introduisent des états électroniques dans la bande interdite du matériau. Si un électron et un trou sont capturés dans le même piège, ils recombinent. Plus le niveau du piège est proche de la bande de conduction, plus la probabilité de capteur du trou (de l'électron) est faible. Les niveaux de piège les plus recombinants sont ceux situés au milieu de la bande interdite car ils piègent aussi efficacement les électrons que les trous [12].

➤ Recombinaison Auger [13] :

Les recombinaisons Auger sont elle aussi des transferts directs bande à bande d'un porteur. Dans ce cas il peut s'agir d'un électron ou d'un trou. Cependant, au lieu d'être émise sous forme d'un photon, l'énergie est transférée à un autre porteur du même type. Ce dernier se thématise ensuite par émission de phonons.

Ces processus sont présentés dans la figure 6.

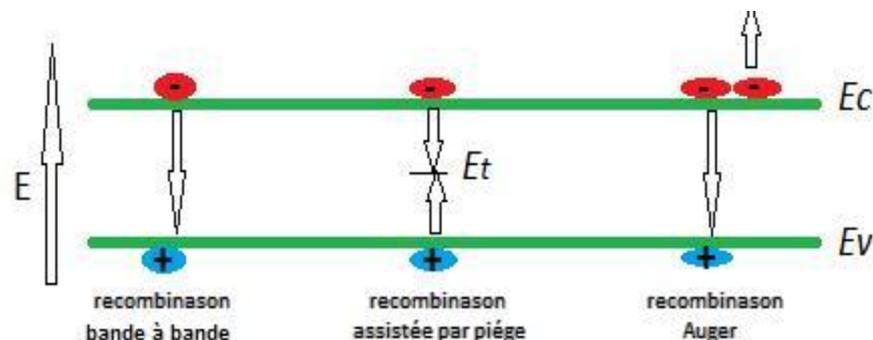


Figure 6 - Type de recombinaison.

➤ Vitesse de recombinaison en surface :

En raison de phénomènes intrinsèques et extrinsèques, la surface du semi-conducteur est le siège d'états spécifiques, appelés états de surface, dont les niveaux d'énergie peuvent se situer dans le gap [14].

Le courant de diffusion qui s'écrit :

$$J_n = \pm D_n \frac{d\Delta n}{dx} \quad (6)$$

On exprime le courant j sous une autre forme :

$$J_n = e\Delta n S \quad (7)$$

$$S = \pm \frac{D_n}{\Delta n} \frac{d\Delta n}{dx} \quad (8)$$

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.

4 - Les composantes de la lumière solaire :

4.1 - Rayonnement direct :

Qui viennent directement du soleil sans entrave sur son chemin (nuage, immeubles ...).

4.2- Rayonnement diffus :

Rayonnement diffus c'est le rayonnement solaire qui provient des réflexions de la collision avec les composants de l'atmosphère ou des nuages.

4.3 - Rayonnement réfléchi:

Ce rayonnement est provoqué par sa réflexion après être entré en collision avec une surface réfléchissante au sol, comme des plans d'eau, etc.

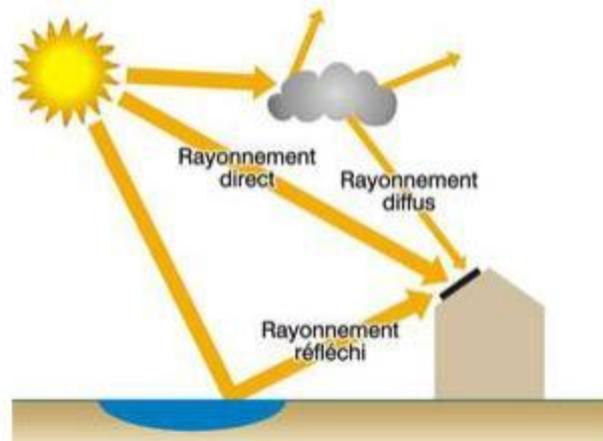


Figure 7 - Les trois différents rayonnements solaires [15].

5 - Conclusion :

Dans cette partie, nous avons présenté les bases indispensables à la compréhension de notre travail. Nous avons rappelé quelques notions préliminaires sur le rayonnement solaire et son application dans le domaine photovoltaïque.

- [1] Djeriouat, Kh. Optimisation du rendement des cellules photovoltaïques à hétérojonction : GaInP/GaAs, *Thèse de Magister ,Université de Tlemcen ,2011.*
- [2] Zorig, A. Modélisation et commande d'un système de production d'énergie photovoltaïque couplé au réseau triphasé, *Mémoire de Master, Université de M'sila.*
- [3] Ngo, C. L'énergie ressources technologies et environnement, *3^{ème} édition, Dunod , Paris ,2008.*
- [4] Desrues, T. Développement de cellules photovoltaïques a hétérojonction silicium et contrats en face arrière, *Thèse Doctorat,Lyon :Insa de Lyon ,2009.*
- [5] Labouret, A. & Viloz, M. Energie solaire photovoltaïque, *Livre 3^{ème} édition, 2006, Dunod, Paris.*
- [6] Chabane, H. Etude D'un Cellule Solaire a Base De Structure Pin, *Thèse de Magister, Université Hadj Lakhdar de Batna,2015.*
- [7] Krim, M. & Debbah, H. Etude par simulation d'un générateur photovoltaïque, *Mémoire de Master, université Badji Mokhtar-Annaba-2018.*
- [8] Marouf, Y. Modélisation des cellules solaires en InGaN en utilisant Atlas Silvaco, *Thèse de Magister, Université Mohamed Khider-Biskra, 2013.*
- [9] Farhaoui, F. & Zaidi, F. Etude et simulation d'une chaine de transmission numérique sur fibre optique haut débit, *Mémoire de master en signaux et systemes,Université Dr.Tahar Molay –Saida,2017.*
- [10] Martinez, B. Etude des propriétés optoélectroniques de nanocristaux colloïdaux à faible bande interdite : application à la détection infrarouge, *Thèse de Doctorat de Sorbonne université ,2019.*
- [11] Bali, A. Etude comparative entre les cellule solaire de type p⁺-AlGaAs /n-GaAs et une autre de type n⁺-AlGaAs/n-GaAs/p-GaAs, *Thèse de Magister,université Mohamed Kheider-Biskra.*
- [12] Kohen, D. Etude des nanofils de silicium et de leur intégration dans des systèmes de récupération d'énergie photovoltaïque, *Mémoire de Master ,université Mohamed Khider,Biskra ,2017.*
- [13] Kalache, S. Etude par simulation numérique d'une cellule solaire en CIGS, *Thèse de Doctorat,Université des frères MENTOURI,Constantine.*
- [14] Belattou, Y.& Zahafi, M. Etude et simulation d'une cellule solaire cœur coquille à base d'une jonction PIN en GaAs, *Mémoire de Master,Université Saad Dahlab de Blida,2018.*

- [15] Marbini, T. Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implantation et en fonction des différentes technologies, *Thèse de Doctorat, Université Paris-Sud, 2014.*

Chapitre 1

Etude des différents types de silicium

1.1 - Introduction :

Le silicium est un matériau largement disponible sur terre, il se présente sous différentes formes. Très utilisé dans l'industrie.

Dans le cadre de ce chapitre, nous menons une étude semi-approfondie sur ce matériau pour mieux comprendre son importance dans l'industrie des cellules photovoltaïques.

1.2 - Aperçus sur la structure cristalline et la structure morphe :

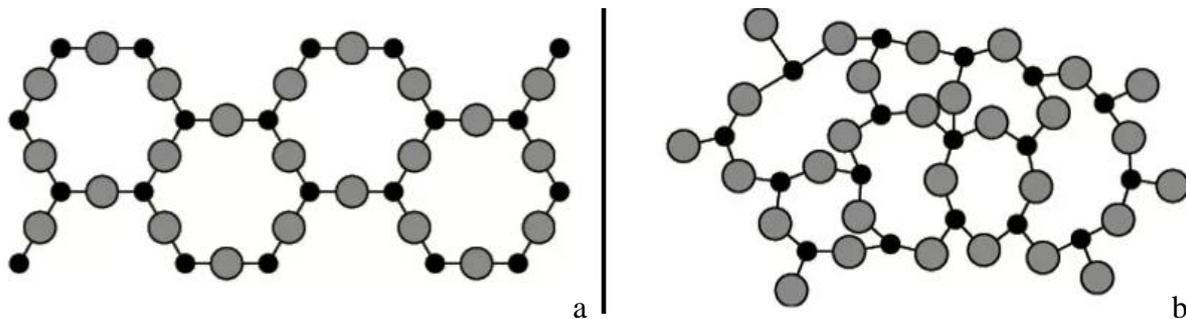


Figure 1.1 - a) Structure cristalline, b) structure amorphe [1].

1.2.1 - Etat amorphe :

L'arrangement des atomes est aléatoire.

1.2.2 - Etat cristallisé :

Les atomes sont disposés d'une façon régulière dans le réseau cristallin dans l'espace.

1.2.2.1- des monocristaux :

Les monocristaux sont utilisés comme modèles simplifiés pour les matériaux polycristallins. Il est possible d'en trouver dans la nature comme par exemple dans le quartz. Dans ce type de cristaux la périodicité est fixe, continue et uniforme dans tout le volume.

1.2.2.2 – polycristaux :

Si la périodicité est locale, le solide est composé d'un ensemble de grains cristallins de taille à peu près uniforme. Le résultat est un ensemble ordonné, ou localement ordonné, des noyaux d'atomes et d'électrons liés entre eux par des forces principalement coulombiennes [2].

1.3 - Le silicium :

Le silicium est le deuxième élément le plus abondant de la croûte terrestre après l'oxygène(O). Il constitue 26% de son poids. C'est un semi-conducteur à gap indirecte de

1.12eV à la température ambiante. Sa densité intrinsèque des porteurs est de $8.56 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ à la même température [3].

Cependant, il ne se trouve pas à l'état massif, mais sous forme d'oxydes (SiO_2) que l'on trouve notamment dans le sable ou quartz.



Figure 1.2- a) sable, b) quartz [4].

La production de silicium nécessite plusieurs étapes, qui consistent à réduire la silice, sa purification et l'élaboration de lingots ensuite découpées en des plaquettes.

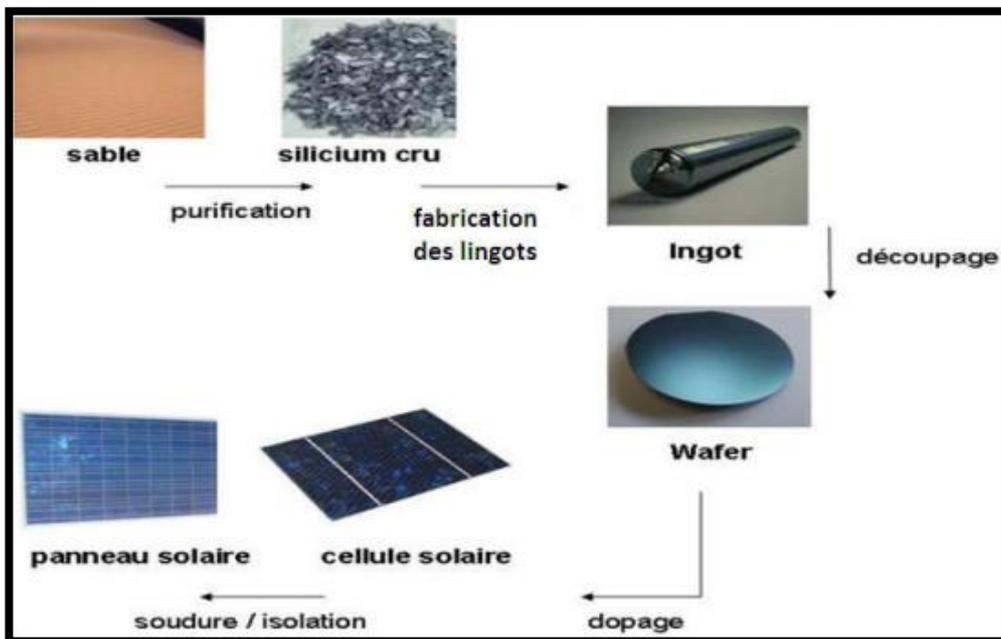


Figure 1.3- production des plaquettes de silicium de qualité électronique [5].

1.3.1 - Réduction de la silice :

La silice (SiO_2) est un élément abondant sur terre. Dans la nature le silice n'existe pas à l'état libre mais sous forme composé. Pour extraire le silicium, nous utilisons le principe de la carboréduction, qui est une méthode de réduction des métaux. Les métaux sont extraits de leurs oxydes en présence de carbone à haute température. Par conséquent, le silicium est extrait de la silice grâce à la réaction chimique globale suivant :

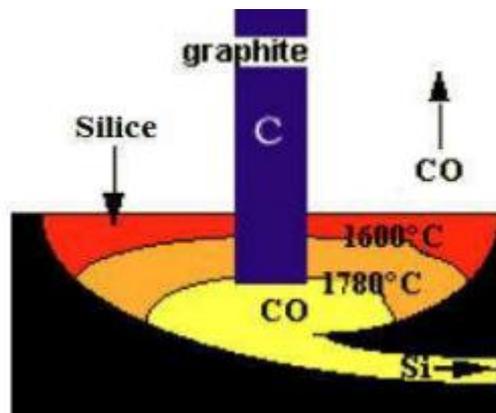


Figure 1.4 - représentation schématique du four [6].

L'énergie nécessaire à la réaction est apportée sous forme d'arc électrique par des électrodes en graphite, à l'intérieur de fours métallurgiques dits fours à arc [7].

En fait la réaction est plus complexe et on peut schématiquement décomposer le four électrique en deux zones : une zone inférieure chaude, où la température dépasse 1900°C , et une zone supérieure plus froide. Dans la zone on a les réactions [8]:



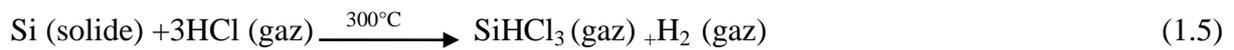
Et dans la zone froide :



On obtient ainsi du silicium sous forme liquide de pureté 98%, ce matériaux a une propriété fondamentale de produire de l'électricité par ce que c'est un semi-conducteur.

1.3.2 Purification du silicium [9]:

Purification du silicium à partir du Trichlorosilane (SiHCl_3) c'est l'opération la plus employée pour obtenir le silicium électronique extra pur. SiHCl_3 est préparé à partir de la technique à température ambiante (300°C).



Ensuite, Trichlorosilane est purifié par distillation, puis réduit par l'hydrogène (H_2). La réaction chimique bilan est la suivant :

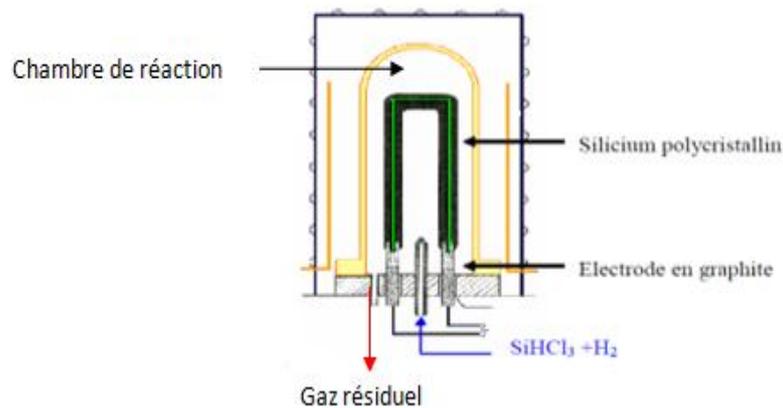
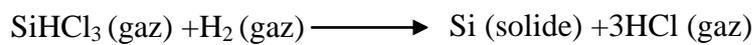


Figure 1.5- Schéma d'un réacteur CVD pour la production de silicium de qualité électronique à partir SiHCl_3 [9].

Au final, le procédé de purification aboutit à l'obtention de lingots de silicium purifiés à 99.9% Lingot [10].

1.4 - Différents types de silicium :

1.4.1 - Le silicium amorphe :

Le silicium amorphe a une structure atomique désordonnée, non cristallisée, vitreuse, mais il possède un coefficient d'absorption de la lumière environ 1000 fois supérieure à silicium cristallin. Une fine couche de $0.3\mu\text{m}$ est donc suffisante pour absorber l'essentiel du spectre visible [15] [16]. Il est obtenu de façon simple par dépôt en phase vapeur sur des substrats économiques tels que le verre, le quartz, la céramique ou l'aluminium. La décomposition en phase vapeur du silane SiH_4 à basse température (200 à 400°C) permet de déposer du silicium

amorphe hydrogéné avec une vitesse avoisinant la dizaine de nanomètre par minute [17].

Cependant, la grande densité de défauts de silicium amorphe (liaisons pendantes, états d'interface, structure multicristalline) limite son rendement de conversion, entre 5 et 6% et des problèmes de stabilité apparaissent rapidement quand on l'expose au soleil et aux intempéries (quelque certaines d'heures) [18].



Figure 1.6 - le silicium amorphe [11].

1.4.2 - Le silicium cristallin :

Le silicium cristallin reste aujourd'hui le matériau le plus utilisé dans l'industrie du photovoltaïque. Les technologies cristallines représentent plus de 90% du marché mondial de modules photovoltaïques.

Selon la technologie employée, ce silicium cristallin peut être :

1.4.2.1-Monocristallin : les photopiles sont formées d'un seul cristal ordonné. Ce matériau est fabriqué en barreaux étirés à partir d'un germe, ou recristallisé à haut température. Historiquement, c'est le premier silicium apparu dans l'industrie du photovoltaïque [11].

1.4.2.2-Polycristallin : ce matériau moins onéreux, est élaboré dans de grands creusets, par la fonte et le refroidissement de blocs de blocs de silicium purifié. C'est le silicium le plus utilisé aujourd'hui. Les cellules sont bleues, avec des reflets « pailletés » suivant l'orientation des cristaux .Leur rendement est le 12 à15% [11].

1.5 - Production du silicium cristallin :

Le silicium cristallin est obtenu par refroidissement lent du silicium fondu. Ce processus se fait dans une atmosphère gazeuse contrôlée pour éviter la réintroduction d'impuretés. Avant solidification, le silicium est dope en incorporant une quantité précise de phosphore ou de bore .la solidification doit se faire progressivement. Le procédé contribue également à la purification du silicium. Les impuretés ont tendance à s'accumuler dans la

région encore liquide. On peut ainsi abaisser le niveau du liquide restant ou de la dernière pièce durcie. En effet, la cristallisation a lieu dans le cadre de l'industrie électronique. La partie abaissée peut être utilisée comme matière première pour l'industrie des cellules solaires [12].

1.5.1 - Procédé de Czochralski :

Le silicium est placé dans un creuset en quartz et le liquide est conservé à l'aide d'éléments chauffants, lorsque la surface est à la température limite de solidification, des graines monocristallines y sont immergées. Le silicium se solidifie sur ce germe dans la même direction cristalline, les germes sont lentement tirés vers le haut, avec un mouvement de rotation, sans contrôle précis de la température et de la vitesse, la vitesse de tirage est de l'ordre de 4cm /h [12].

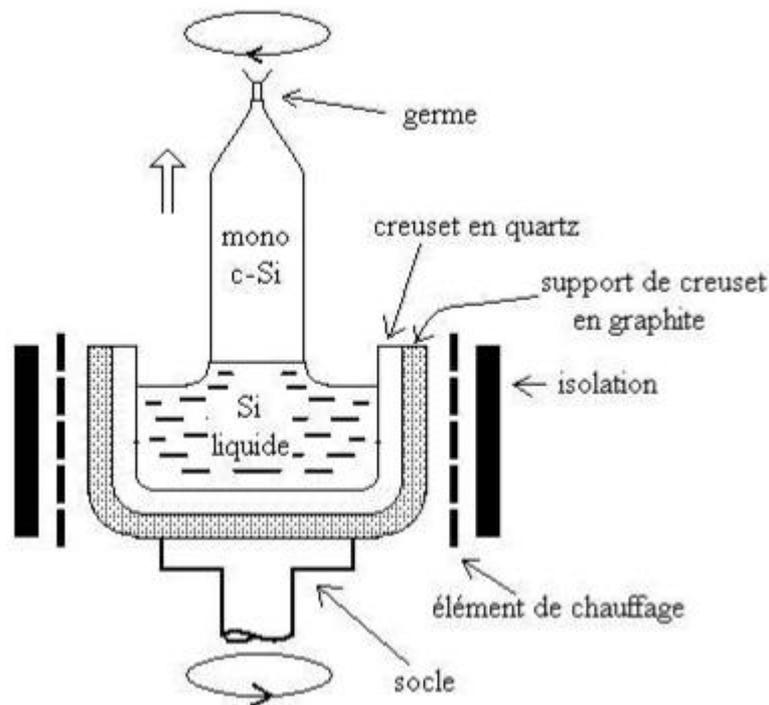


Figure 1.7- technique de Czochralski [12].

1.5.2 - procédés de fabrication du silicium polycristallin (multicristallin) [12]:

Si on se contente de silicium polycristallin, une méthode possible consiste à utiliser un four semblable à celui, ci-dessus, mais avec un creuset de forme parallélépipédique (souvent à base carrée). On refroidit le creuset par la base, par exemple en le faisant descendre progressivement hors de l'élément chauffant, comme indiqué à la figure ci-dessous.

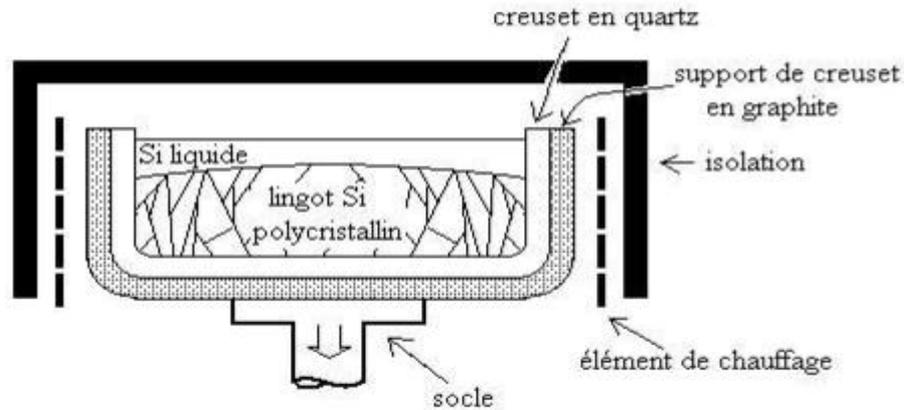


Figure 1.8- fabrication de lingots de Si polycristallin [12].

1.6 - Préparation des plaquettes de silicium cristallin :

1.6.1 - Orientation et découpage :

Les blocs de silicium mono ou poly-cristallin doivent être découpés en tranches de 200 à 500 microns d'épaisseur. Si le bloc a été réalisé par la méthode de Czochralski, on obtient ainsi des disques. Ceux qui sont destinés à la fabrication de cellules solaires sont souvent découpés pour obtenir une forme plus carrée (mais avec des angles arrondis, résultat d'un compromis entre le désir de ne pas avoir trop de chutes et celui de pouvoir disposer les cellules côte à côte sans perdre de place). On peut aussi fabriquer des cellules rondes, quitte à la découpe après fabrication [13].

1.6.2 - Découpage et polissage :

1.6.2.1 - Scie diamantée :

Elle est surtout utilisée pour la découpe de silicium monocristallin. Le cristal, découpé à la scie diamantée fournit des plaquettes circulaires de 8 à 15cm de diamètre et de 4 à 500 μ m d'épaisseur. Mais le trait de scie du même ordre de grandeur, entraîne des pertes de matière (près 50%) [13].

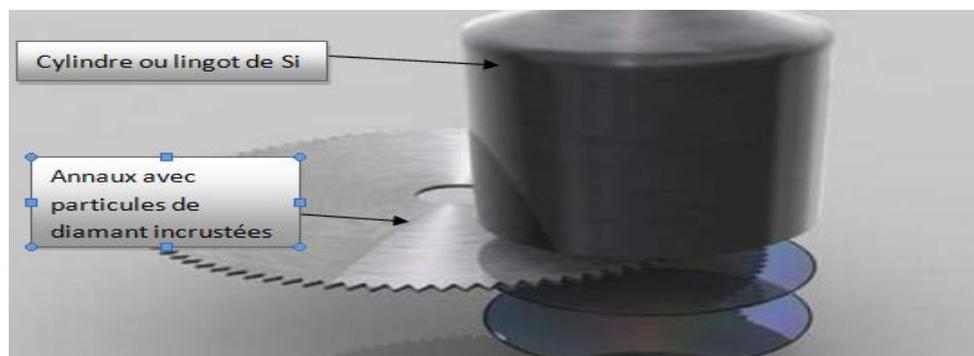


Figure 1.9- Scie diamantée [11].

1.6.2.2 - Scie à fil :

Les fils organisés en nappes servent de véhicule à un mélange abrasif déposé en continu, rôdent et découpent le lingot de silicium en "tranches" fines de $300\mu\text{m}$ d'épaisseur. Le fil est un fil d'acier d'environ $180\mu\text{m}$ de diamètre et de $150\mu\text{m}$ de longueur. Il est progressé à une vitesse de 10cm/s et est enroulé de façon à pouvoir découper jusqu'à 400 substrats en même temps [13].

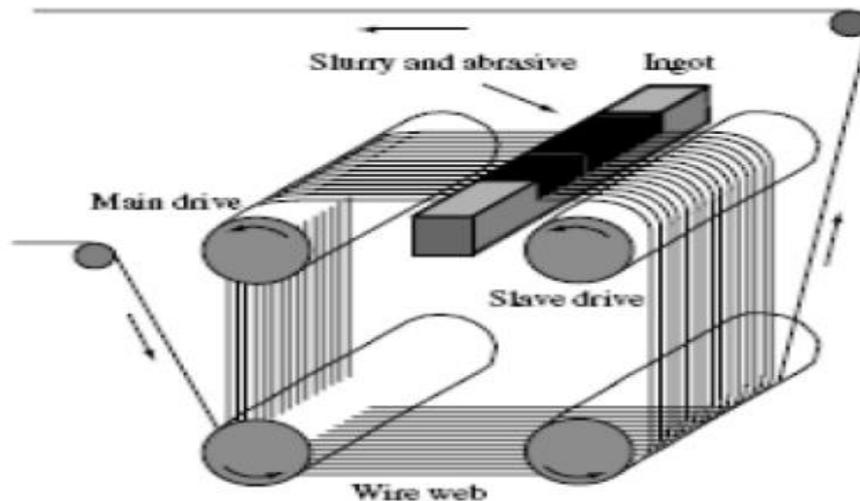


Figure 1.10- scie à fil [2].

La découpe se fait grâce à la pulvérisation d'un lubrifiant chargé de grains durs de SiC de 10 à $20\mu\text{m}$. La perte de matière est importante, car le "trait de scie" a une largeur d'environ $200\mu\text{m}$. Le gain obtenu en réduisant l'épaisseur des substrats est donc limité [13].

1.6.3 - Défauts cristallins dans le Silicium :

Le cristal parfait ne se rencontre jamais dans la nature. Les cristaux présentent plusieurs types de défauts (dislocations, défauts d'empilement, macles...etc.), Et ces défauts peuvent avoir une influence sur le rendement, les défauts les plus importants sont les défauts linéaires dans les cristaux sont appelés dislocations. Ce sont aussi les défauts dans la structure locale du cristal qui sont généralement dues à la présence de certaines impuretés.

Les dislocations contribuent à la dégradation des durées de vie des porteurs minoritaires, mais il faut noter que des dislocations ont été observées sur des couches minces de CuInSe_2 ayant servi de matériaux de base des dispositifs présentant des rendements de conversion photovoltaïque supérieure à 10% [14].

1.7 - Silicium matériau de base pour le photovoltaïque :

Le silicium le matériau de base pour le photovoltaïque et le plus utilisé dans l'industrie photovoltaïque et présente sous différentes formes figure 1.11, les plus répandues étant le silicium monocristallin, multicristallin et le silicium amorphe.

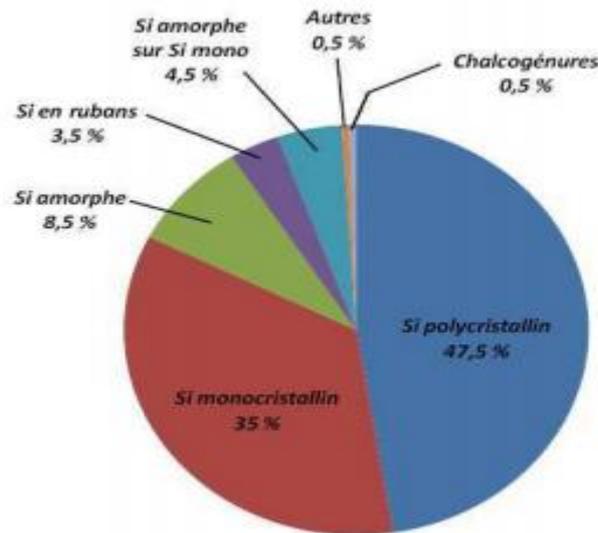


Figure 1.11- production mondiale de cellules en MW_C par technologie en 2007 [19].

Le silicium est un matériau extrêmement abondant à la surface du globe et non toxique, de plus, grâce au développement de l'industrie microélectronique, les propriétés de ce semi-conducteur et ses processus de transformation sont assez bien connus : un oxyde naturel (SiO₂) présentant d'excellentes propriétés électroniques et il peut se doper facilement avec le phosphore ou le bore.

1.8 - Choix du matériau Silicium :

L'utilisation du silicium pour la fabrication de modules photovoltaïques se justifie par la maîtrise de sa technologie, son abondance sur la terre, assurant au final un bon rendement de conversion électrique [2].

Certains des avantages du silicium :

- Le silicium est l'élément le plus abondant après l'oxygène dans la croûte terrestre.
- Très grande pureté (monocristallin).
- Facilement extrait à partir de sable.
- Il n'est pas toxique comme certains semi-conducteurs.
- Il possède un oxyde naturel SiO₂ présentant d'excellentes propriétés électroniques.

1.9 - Conclusion :

Au cours de ce chapitre, nous avons étudié le matériau de base avec lequel nous allons réaliser notre structure.

- [1] <https://cristauxdesilicium.wixsite.com/tpe-le-silicium/solide-cristallin-solide-amorphe>
- [2] Z.Abdi, "Etude comparative par simulation numérique des cellules photovoltaïques à simple jonction à base de silicium", *Mémoire de Master, Université Aboubakr Belkaid, Tlemcen, 2017.*
- [3] A.Mekemeche, "Modélisation à deux dimensions des propriétés physiques de cellules solaires au silicium à base de substrat de type n. Etude de quelques cas particuliers de cellules innovantes", *Thèse de Doctorat, Université Mostaganem, 2017.*
- [4] Rennée Janssen, domaine pub, *commons, wikimedia.org*
- [5] S.Brigand, "les principes de l'énergie solaire photovoltaïque", *complément technique Mars/Avril 2008, www.éditionsdumoniteur.com*
- [6] A.Bahloul & R.Lakehale, "Réalisation d'un système de pilotage d'un simulateur solaire : mesures I-V et extraction des paramètres", *Mémoire de Master, Université de Tlemcen, 2011.*
- [7] M.Guerboub & M.Lechheb, "Matériaux pour l'énergie photovoltaïque", *Mémoire de Master, université Sidi mohamed ben abdellah-FES, 2015.*
- [8] Dossier photovoltaïque reflets de la physique, rédacteur en chef invité : Bernard Equer, décembre 2007, WWW.sfpnet.fr
- [9] systèmes photovoltaïques : fabrication et impact environnemental. HESPUL. Synthèse réalisée par Cécile Miquel sous la direction de Bruno Gaiddon. *Juillet 2019.*
- [10] la fabrication des cellules photovoltaïques, *WWW.HALOU.COM*
- [11] la fabrication des cellules photovoltaïques. *Le panneau solaire .net*
- [12] <http://perso.uclouvain.be/emest.matagne/SOLAIRE/SEM13/S13P11.HTM>
- [13] http://uved.univ-perp.fr/module5/co/1-substratu_silicium.html
- [14] *R.Stratton, Phys.Rev.125(1962)67*
- [15] F.Bougenna, "Modélisation et optimisation d'une cellule solaire tandem a-Si:H/a-SiGe", *Thèse de Magister, Université Mohamed Boudiaf, Oran, 2009.*
- [16] K.Amira, "Elaboration de nouvelles phases du silicium en couche mince", *Thèse de Magister, Université Mantouri de Constantine, 2008.*
- [17] A.Bencherat, "Etude de transfert des films minces de silicium monocristallin dans la réalisation de cellules solaires à faible budget thermique", *Mémoire de Master, Université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen, 2012.*

- [18] S.Oussidhoum, "Etude comparative des performances des cellules solaires à jonctions simple et multiple", *Thèse de Magister ,Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2015.*
- [19] *la lettre du solaire, Cythélia, Avril 2008, vol.8, n°4.*

Chapitre 2

Les cellules photovoltaïques à base de silicium

2.1 - Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons étudier théoriquement les cellules photovoltaïques à base de silicium. En présentons leurs principe de fonctionnement, leurs grandeurs physique et électrique qui caractérise les cellules solaires.

2.2 - Cellule photovoltaïque :

La cellule solaire c'est un composant électronique qui transforme directement la lumière en électricité, sa structure est réalisée par un semi-conducteur (silicium) à jonction PN.

2.2.1 - Principe de fonctionnement d'une cellule solaire :

Sous éclairement les paires électrons-trous photo-générées dans la zone de charge d'espace (ZCE) sont instantanément séparées par le champ électrique y régnant (figure 2). Les trous charges positives se voient accélérés vers la zone P, les électrons charges négatives, vers la zone N. Trous et électrons deviennent alors majoritaires : c'est le photocourant de génération. Parallèlement, les porteurs minoritaires, trous générés du coté N et électrons générés cotés P, créent un gradient de concentration et diffusent dans le matériau. S'ils atteignent la ZCE sans se recombiner, le champ électrique leur fait traverser la zone de déplétion afin d'atteindre la région où ils deviennent majoritaires : c'est le photocourant de diffusion. La présence de contact ohmique assure la collecte des porteurs d'où la création d'un courant photogéné I_{ph} [1].

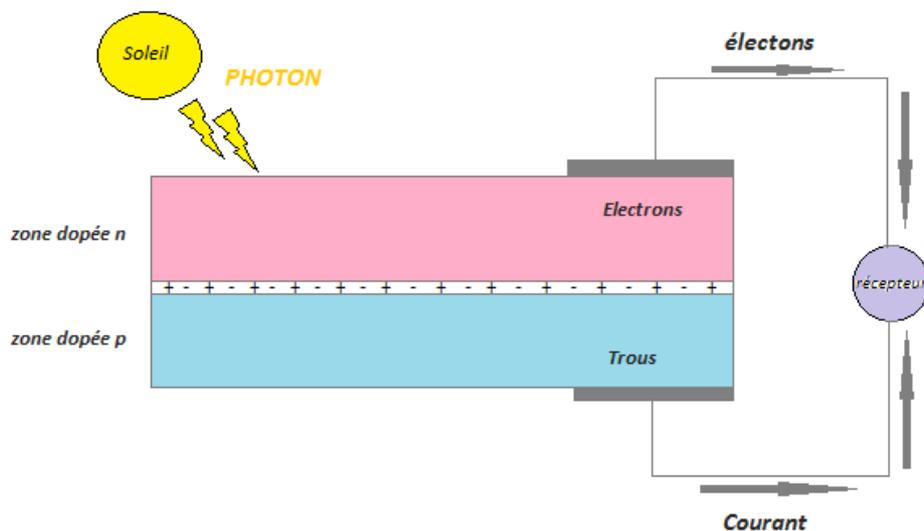


Figure 2.1- Principe de fonctionnement d'une cellule solaire.

2.2.1.1 - Jonction PN :

La jonction PN se compose de deux cristaux semi-conducteurs adjacents, dont l'un est de type N riche en électrons, et la deuxième région du type P est riche en trous. Lorsque les deux régions connectées ensemble au niveau de la zone de contact appelée la zone de charges d'espace (ZCE), les charges négatives partent de N et se joignent aux trous de la région P.

Il ne reste donc plus que les ions présents dans cette zone (ZCE) qui vont créer un champ électrique interne à la jonction et empêcher les charges libres restantes dans chaque région de traverser la jonction pour se recombiner.

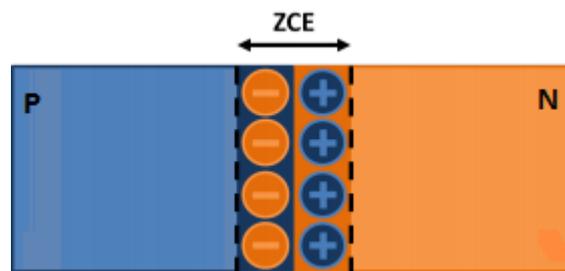


Figure 2.2 - Jonction PN

2.2.1.2 - La création des paires électrons/trous :

Les paires électrons-trous générées près de la zone de déplétion vont être séparées par l'influence du champ électrique, la création des porteurs de charge qu'il faut collecter pour créer un courant électrique en réalisant les contacts avant et arrière.

Ce courant photovoltaïque est directement proportionnel à l'intensité de l'éclairement et est dirigé de la région N notamment la région P, il est noté I_{ph} [1].

2.2.1.3 - La collecte :

Dans les régions électriquement neutres « n » et « p », 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 au courant par leur diffusion, il se crée un courant de diffusion. Dans la zone de charge d'espace, les paires (e-h) créées par les photons sont dissociées par le champ électrique. Ces porteurs donnent naissance à un photocourant de génération [2].

2.2 - La Caractérisation électriques :

2.2.1 - La caractéristique courant-tension (I-V) :

Une cellule solaire est caractériser par sa caractéristique courant –tension, décrivant le fonctionnement de la cellule solaire, la figure 3 représente la caractéristiques I(V) :

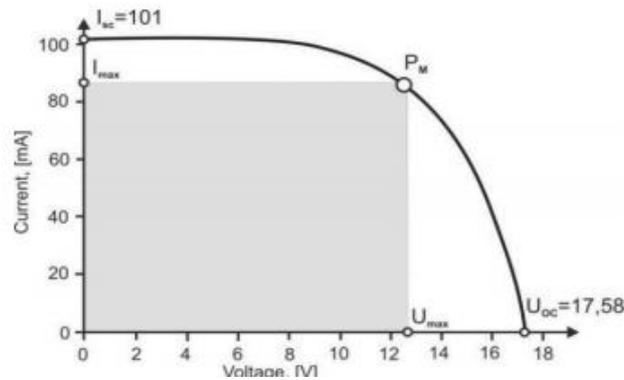


Figure 2.3 - Caractéristique $I=f(V)$ d'une cellule solaire [5].

2.2.2 - Le photocourant :

2.2.2 - a) Le courant dans la région quasi-neutre N [3]:

La densité de courant des trous est

$$J_p = q p \mu_p E - q D_p \frac{d\Delta p}{dx} \quad (2.1)$$

$$E=0$$

$$J_p = -q D_p \frac{d\Delta p}{dx} \quad (2.2)$$

Avec :

$$\Delta p = p_n - p_{n0} \quad (2.3)$$

L'équation de continuité est :

$$\frac{1}{q} \frac{dJ_p}{dx} - \frac{\Delta p}{\tau_p} + G = 0 \quad (2.4)$$

2.2.2 - b) Le courant dans la région quasi-neutre P :

L'équation de la densité de courant des électrons est donnée par :

$$J_n = q n \mu_n E + q D_n \frac{d\Delta n}{dx} \quad (2.5)$$

La densité de courant des électrons devient uniquement du courant de diffusion puisque le champ électrique est nul dans cette zone

$$J_n = qD_n \frac{d\Delta n}{dx} \quad (2.6)$$

Avec $\Delta n = n_p - n_{p0}$

L'équation de continuité est :

$$\frac{1}{q} \frac{dJ_n}{dx} - \frac{\Delta n}{\tau_n} + G = 0 \quad (2.7)$$

2.2.2 - c) Le courant dans la région de déplétion [4]:

Cette zone est le siège d'un courant de génération. Le champ électrique étant assez élevé, nous admettons que les porteurs générés dans cette région se trouvent entraînés hors de cette zone, avant qu'ils ne puissent se recombiner.

En admettant que chaque photon absorbé crée une paire électron-trou, la densité du courant produite dans cette zone est égale au nombre de photons absorbés :

$$J_{dr} = qF(1 - R)\exp(-ax_j)[1 - \exp(-aw)] \quad (2.8)$$

2.2.2 - d) Le photocourant total :

La densité totale du courant d'éclairement en court-circuit, est la somme des trois régions [4] :

$$J_E(\lambda) = J_p(\lambda) + J_n(\lambda) + J_{dr}(\lambda) \quad (2.9)$$

2.3 - Le courant d'obscurité :

Du fait que la cellule solaire dans l'obscurité est une jonction polarisée en directe, les porteurs de la charge majoritaires ayant des énergies suffisantes peuvent franchir la barrière de potentiel et diffusent d'une zone à l'autre et se recombinent [6].

2.4- La réponse spectrale :

La réponse spectrale d'une cellule photovoltaïque est le rapport entre le courant généré par la cellule et la puissance lumineuse incident, en fonction des différentes longueurs d'onde formant le rayonnement incident. La réponse spectrale RS est donnée par la relation :

$$RS = \frac{q\lambda}{hc} EQE \quad (2.10)$$

EQE représente le rendement quantique externe de la cellule, c'est-à-dire le rapport du nombre de porteurs générés sur le nombre de photon incidents. Pour une longueur d'onde donné, le rendement quantique externe est égal à 1 si chaque photon génère un électron. Si l'on prend en compte la réflectivité de la surface de la cellule photovoltaïque, on détermine son rendement quantique interne EQE [7].

2.5 - Paramètres d'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 diffusion, le coefficient d'absorption et le coefficient de réflexion [8].

2.5.2 - Paramètres photovoltaïques :

a-Courant de court-circuit I_{cc} :

Il définit la quantité des paires électron-trou créées G et qui traversent la jonction sans recombinaison entre les longueurs de diffusion des électrons et trous (L_n et L_p) respectivement [9].

$$I_{ph} = q \cdot G \cdot (L_n + L_p) \quad (2.11)$$

b-Tension de circuit ouvert V_{CO} :

C'est la tension pour laquelle, à l'obscurité ($I=0$) fournit un courant égal au courant de court-circuit I_{cc} . Elle est obtenue à partir de l'équation suivante :

$$V_{CO} = \frac{k \cdot T}{q} \ln \left(\frac{I_{cc}}{I_0} + 1 \right) \quad (2.12)$$

c-la puissance maximale P_m :

$$P_m = V_m \times I_m \quad (2.13)$$

d-facteur de forme FF :

Il définit l'efficacité de la cellule solaire, il est obtenu comme suit :

$$FF = \frac{V_m \cdot I_m}{V_{CO} \cdot I_{CC}} \quad (2.14)$$

e-Le rendement η :

C'est le rapport de la puissance maximale générée et de la puissance du rayonnement solaire incident [9].

$$H = FF \cdot \frac{V_{co.Icc}}{P_o} = \frac{I_m.V_m}{P_o} \quad (2.15)$$

2.6 - Circuit équivalent d'une cellule solaire :

L'utilisation des circuits équivalents est convenable pour simuler les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque [10].

Ce circuit équivalent d'une cellule solaire se compose d'un générateur de courant, deux résistances (résistance série et résistance shunt) et une diode en parallèle avec le générateur. Ainsi il est représenté par la figure ci-dessous.

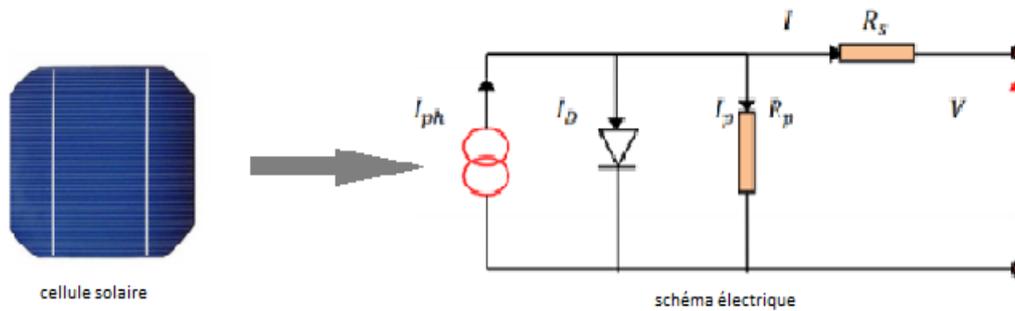


Figure 2.4 - Circuit équivalent d'une cellule solaire.

Selon le schéma de la figure 2.4 on peut écrire :

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{V+R_s I}{N_s A K T}} - 1 \right) - \frac{V+R_s I}{R_p} \quad (2.16)$$

Où I_0 est le courant de saturation, K est la constante de Boltzmann ($1,381 \cdot 10^{-23} \text{J/K}$), T est la température effective des cellules en Kelvin (K), A est le facteur d'idéalité de la jonction ($1 < A < 3$), V est la tension aux bornes de cette même cellule, I est le courant fourni par la cellule lorsqu'elle fonctionne en générateur, I_{ph} est le photocourant de la cellule dépendant de l'éclairement et de la température ou bien courant de (court-circuit), R_p est la résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction, R_s est la résistance série représentant les diverses résistances de contacts et connexions [11].

Dans le cas idéal : $I_p \approx 0$ (R_p élevé) et $R_s \approx 0$, la caractéristique $I(V)$ devient [12] :

$$I(V) = I_{ph} \left(e^{\frac{V}{N_s A K T}} - 1 \right) \quad (2.17)$$

2.7 - Différentes structures de cellules solaires :

2.7.1- La structure à jonction PN et à jonction PIN :

- **La structure à jonction PN :**

La jonction p-n c'est la base 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 jonction p-n [8].

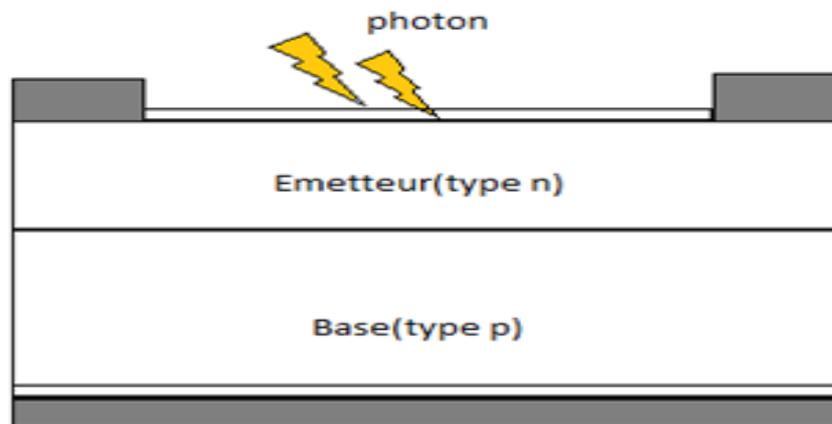


Figure 2.5 - Cellule solaire à structure à jonction PN.

- **La structure à jonction PIN :**

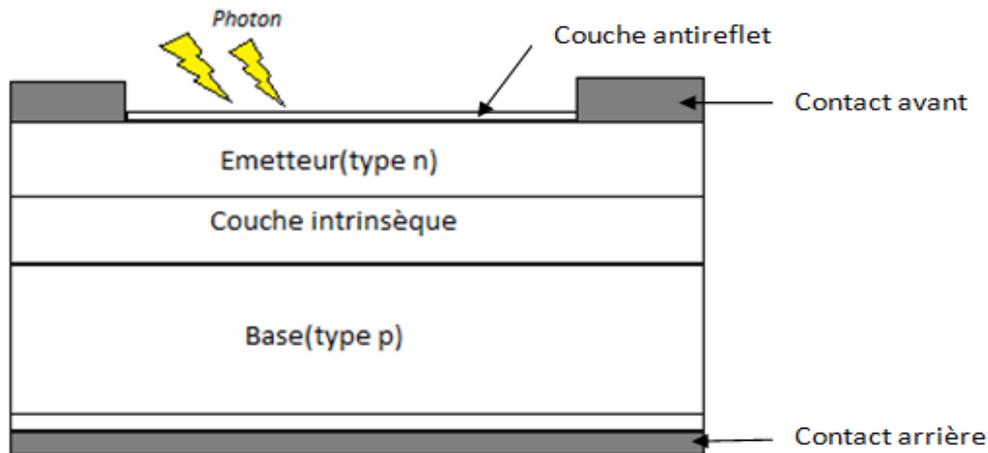


Figure 2.6 - Cellule solaire à structure à jonction PIN.

La structure consiste en un substrat type N, sur lequel une couche intrinsèque légèrement dopée I est épitaxiée. 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 côtés,

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 semi-conducteurs unique et binaire, bien que des fois il est mis sens dessus ; P-, épitaxie intrinsèque et enfin la diffusion -n [18].

2.7.1.1- Principe de fonctionnement de la cellule solaire à structure PIN :

Lorsque le photon d'énergie est supérieure au gap du silicium, il atteint la zone intrinsèque, une fois absorbé, il crée une paire « électron-trou ». En séparant cette paire « électron-trou », le courant électrique est généré, vers les deux électrodes opposés de la intrinsèque. L'électron et le trou créés dans la zone intrinsèque doivent traverser la couche p et les couches n avant d'atteindre les bornes de la cellule solaire.

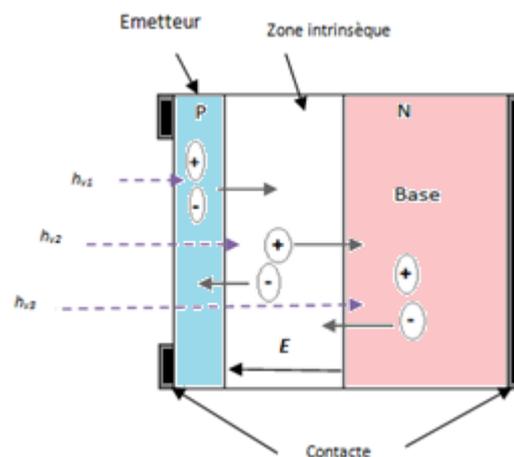


Figure 2.7- Principe de fonctionnement de la cellule solaire à structure PIN.

2.7.1.2-Types de structure PIN :

- **Selon le dopage de la zone intrinsèque :**

Une diode p-i-n idéale (notée $P^+ IN^+$) ou 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 [8].

- **Selon la technologie de fabrication :**

a-cellules solaires à jonction PIN à silicium amorphe :

le silicium amorphe est étudié depuis les années 70 et connue pendant longtemps son application principal dans les cellules présentes dans les calculatrice, destinées à rallonger la

durée de vie des piles [22]. le champ électrique est plus élevé proche des contacts P^+ et N^+ , mais le champ appréciable et 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. Tout 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 $P^+ IN^+$ s'appellent typiquement des piles solaires de type de dérivé [8].

Lorsque les modules fabriqués avec la structure PIN et un rendement supérieure à 12% sont exposés des moins au soleil ; leur rendement baisse à moins de 5% du à effet de Staebler-Wronski. Mais il est possible d'absorber le spectre plus efficacement et augmente la stabilité de la cellule en utilisant plusieurs structures PIN avec différente gap des couches I, pour obtenir double ou triple structures de jonction figure 2.8 [8].

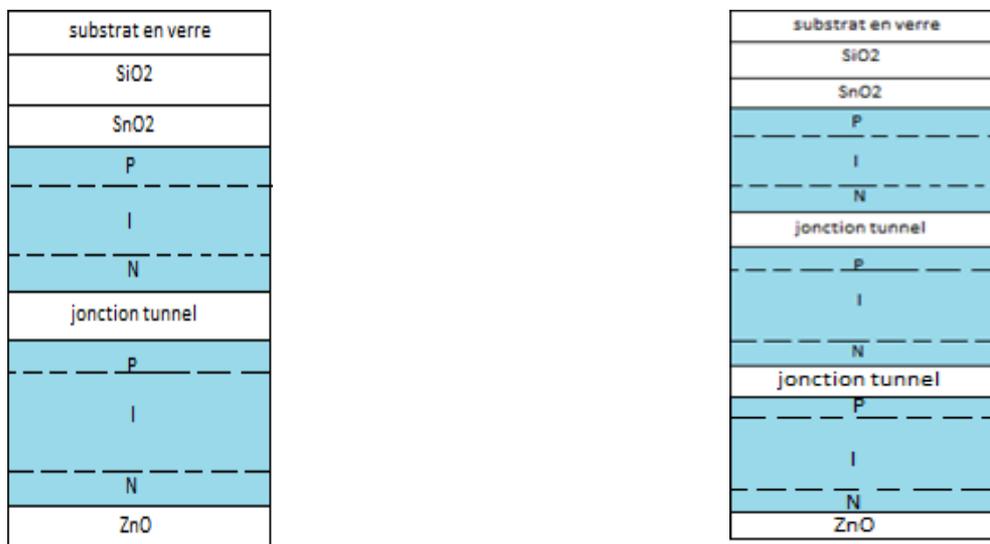


Figure 2.8- cellules solaires à jonction PIN à silicium amorphe.

b- cellules solaires à jonction PIN à silicium microcristallin ($\mu\text{-Si}$) :

Le silicium microcristallin ($\mu\text{-Si} : \text{H}$) a été introduit, dans les années 1990, par l'institut de Micro Technologie (IMT) de l'université de Neuchâtel. Il est déposé par des méthodes similaires de dissociation du (SiH_4) assisté par plasma(PECVD) ou par une résistance chauffant (HWCVD) [23].

A ce jour, la cellule P-i-N à simple jonction présente la meilleur rendement a été réalisée par l'institut de Micro Technologie (IMT) de l'université de Neuchâtel [23].

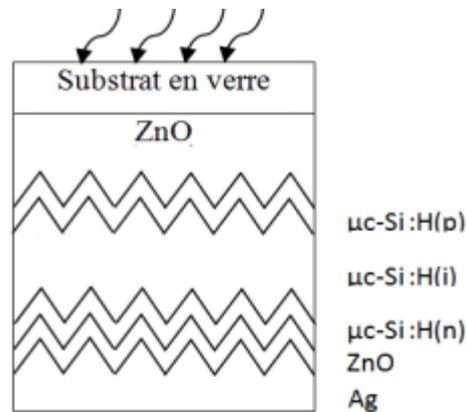


Figure 2.9- cellule solaire à jonction PIN à silicium microcristallin ($\mu\text{c-Si}$) [8].

c- cellules solaires PIN organiques :

Il y a deux types des cellules organiques : les cellules solaires organiques polymère et cellules organiques moléculaire. La cellule organique est une nouvelle technologie basée sur les colorants et leurs propriétés physiques, notamment optiques. Cette cellule bénéficie du faible coût des semi-conducteurs organiques et de la simplification potentielle du processus de fabrication.

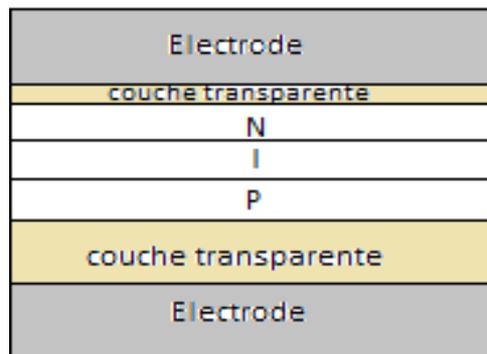


Figure 2.10- structure d'une cellule solaire à jonction PIN organique à couche mince.

d- cellules solaires PIN sur nanofils Si :

La cellule solaire hybride de type multijonction comportant des nanofils en silicium alignés verticalement pourvus de films minces. Cette innovation concerne un procédé à bas coût de formation d'un dispositif photovoltaïque qui est une cellule multijonction nanostructurée haut performance. Les multiples jonctions PN ou jonction PIN sont jointes de manière contiguë pour former une seule jonction PN contiguë ou une seule jonction PIN contiguë [8].

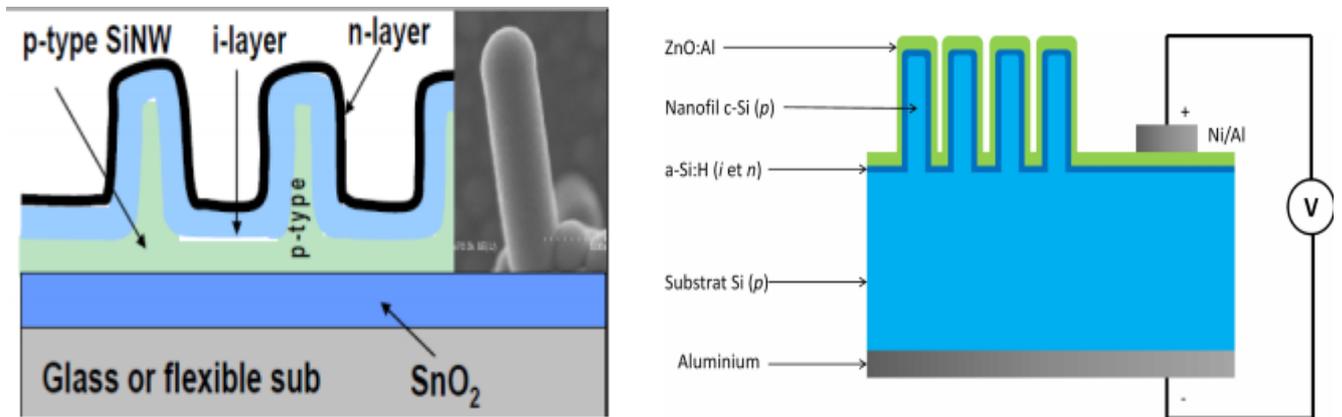


Figure 2.11 - cellules solaires PIN sur nanofils Si (à gauche), schéma de la cellule solaire à nanofils de Si (à droite) [8.19].

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. La 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 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 court 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 [13].

2.7.3 - La structure MIS :

La structure métal-isolant-semi-conducteur est constituée de trois couches : le substrat semi-conducteurs sur lequel on a déposé une couche isolante sur laquelle on a déposé une électrode métallique, l'isolant est le SiO_2 , c'est un diélectrique transparent et anti réfléchissant [14].

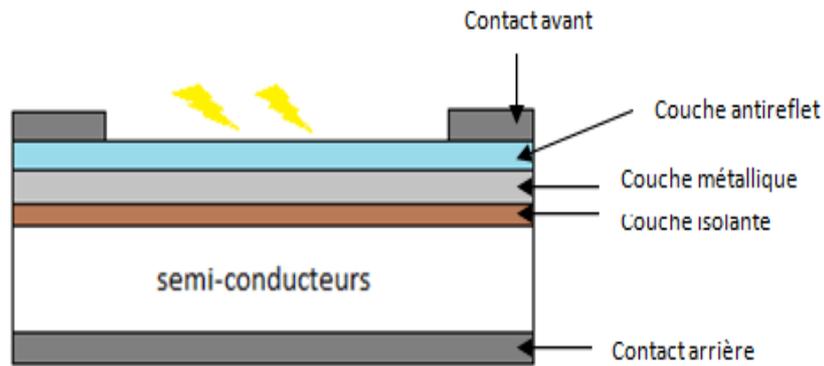


Figure 2.12- cellule solaire à structure MIS.

2.8 - Différentes couches d'une cellule solaire à jonction :

La cellule solaire composé une jonction PN c'est sa base, il se compose également de plusieurs autres couches qui aident à améliorer son travail, comme le montre la figure suivante :

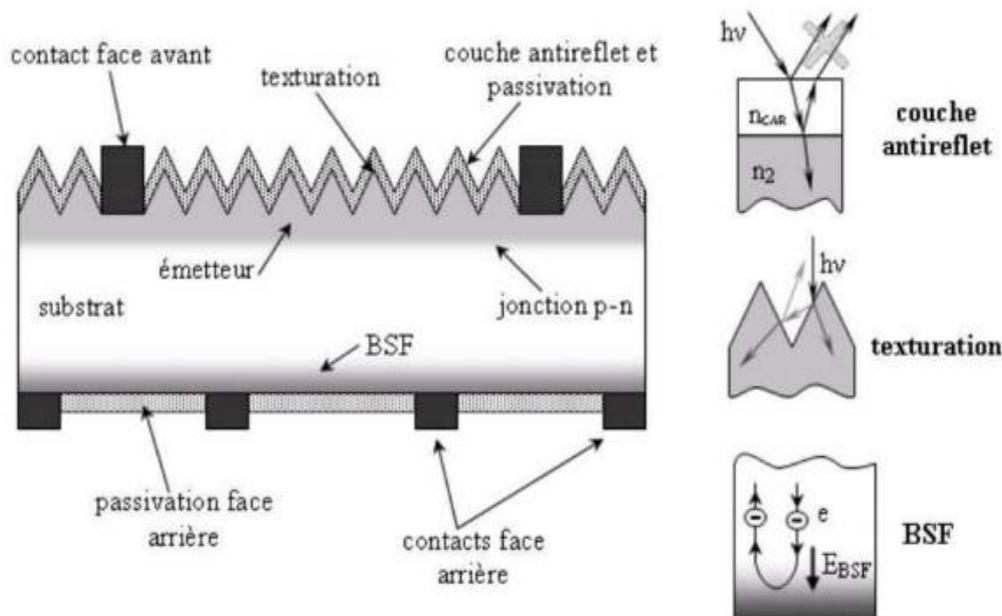


Figure 2.13 - Structure de la cellule photovoltaïque standard (à gauche). Les insertions (à droite) schématisent les rôles respectifs de la couche antireflet, la texturation et le BSF [21].

2.8.1- Texturation de surface :

La réflexion est à l'origine de pertes importantes pour la cellule. La texturation 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 pyramidale. Le relief crée permet d'augmenter la surface et induit des réflexions multiples sur les facettes des

pyramides. La texturation assure ainsi le piégeage d'un maximum de la lumière réduisant les pertes liées à la réflectivité. Différents procédés sont utilisés pour réaliser la texturation : attaques chimiques de la surface (KOH, NaOH, acides), texturation mécanique, plasma ou laser. Ces méthodes peuvent faire passer la réflectivité effective de 39% à moins de 10% [15].

2.8.2 - Couche antireflet [16] :

Pour minimiser la réflexion de la lumière, une couche antireflet (CAR) est utilisée. Le principe d'action des couches antireflet est basé sur l'interférence des faisceaux lumineux dans les couches diélectriques minces. Si l'épaisseur de la couche diélectrique est égale à :

$$d_{CAR} = \frac{(2.N+1).\lambda}{4.n_{car}}, \quad N=0, 1, 2, 3 \dots \quad (2.18)$$

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 couche antireflet est utilisée.

Différentes CAR sont utilisées en photovoltaïque : TiO₂, SiO₂, ZnS, MgF₂, SiN_x, etc.

2.8.3 - La couche BSF :

Le champ électrique arrière (BSF : Back Surface Field) consiste à créer une barrière de potentiel (par exemple, jonction p⁺-p) sur la face arrière de la cellule pour assurer une passivation. La barrière de potentiel induite par la différence de niveau de dopage entre la base et le BSF tend à confiner les porteurs minoritaires dans la base. Ceux-ci sont tenus à l'écart de la face arrière qui est caractérisée par une vitesse de recombinaison très élevée [17].

2.8.4 - Les contacts face avant et arrière :

Les contacts métalliques à l'émetteur et au substrat servent à collecter le courant de porteurs photon générés. Les contacts doivent être ohmiques, c'est-à-dire que la caractéristique I=f(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 et le rendement [17].

2.9- Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons décrit la cellule solaire avec ses différents paramètres électriques (courant de circuit ouvert, tension de circuit ouvert, rendement, facteur de forme). Nous avons aussi présenté son circuit équivalent, Tout en détaillons la structure PIN.

- [1] A.Zorig, "Modélisation et commande d'un système de production d'énergie photovoltaïque couplé au réseau triphasé", *Mémoire de Master, Université de M'sila*.
- [2] Kh.Djeriouat, "Optimisation du rendement des cellules photovoltaïques à hétérojonctions :GaInP/GaAs", *Thèse de Magister, université Abou Baker Belkaid, Tlemcen*.
- [3] z.benjellouli "CONTRIBUTION A LA MODELISATION D'UNE CELLULE SOLAIRE.
- [4] A. Mahfoud, "Modélisation des cellules solaires tandem à couches minces et à haut rendement", *Thèse de Doctorat, Université Setif-1, 2015*.
- [5] [http://www.researchgate.net/publication/289642017\(monocrystalline silicon solar cells applied in photovoltaic system\)](http://www.researchgate.net/publication/289642017(monocrystalline_silicon_solar_cells_applied_in_photovoltaic_system)).
- [6] B.Lakehal, "Etude des propriétés électriques d'une photopile à base d'une structure Schottky", *Thèse de Magister, Université de Batna, 2009*.
- [7] L.Zighed, "Réalisation des couches antireflets dans les cellules solaires à couche minces", *Thèse Magister, université Tlemcen, 2005*.
- [8] H.Chabane, "Etude D'un Cellule Solaire à Base De Structure Pin", *Thèse de Magister, Université Hadj Lakhdar de Batna, 2015*.
- [9] W.C.benmoussa, S.Amara et A.zerga (étude comparative des modèles de la caractéristique courant-tension d'une cellule solaire au silicium monocristallin).
- [10] K.Kety, K.A.Amou, K.Sagna, K.Tpe, Y.Lare et K.Napo, "modélisation et simulation d'un générateur photovoltaïque :cas du module polycristallin Ecoline LX-260P installé au dispensaire de sévagan(Tago)", *Université de Lomé*.
- [11] A.Bahri, "Modélisation et simulation d'un générateur photovoltaïque sous Matlab/Simulink", *Etude pratique site Oued Nechou à Ghardaïa, Université de Ghardaïa*.
- [12] A.Benahmed & M.Temimi, "Etude des propriétés électriques des cellules photovoltaïques organiques", *université Abou-Bekr Belkaid, Tlemcen, 2011*.
- [13] A..Ahmaha & A.Silla "Etude et modélisation des paramètres électriques d'une cellule photovoltaïque", *Mémoire Master Académique UNIVERSITE KASDI MER BAH OUARGLA*.
- [14] M.A.Boudehedj, "Etude des propriétés structurales et électriques des cellules Tandem III-V (multicouches :InGaP/GaAs) par simulation TCAD_SILVACO", *mémoire de Master, université Abdelhamid ibn Badis-Mostaganem, 2015*.

- [15] P.Papet''nouveaux concepts pour la réalisation des cellules photovoltaïques à contacts interdigités sur substrats minces en silicium *crystallin*''*Thèse Doctorat, institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2007*
- [16] GHENNOU''Etude comparative des paramètres physiques des matériaux photovoltaïques à base de silicium monocristallin et polycristallin'', *Thèse de Magister en physique énergétique et matériaux, Tlemcen*
- [17] N.Oleksiy, ''Simulation, Fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrière interdigités, *Thèse de Doctorat, 2005*
- [18] Y.Belattou&M.Zahafi, ''Etude et simulation d'une cellule solaire cœur coquille à base d'une jonction PIN en GaAs'', *Mémoire de Master, Université Saad Dahlab de Blida, 2018*
- [19] D.Kohen''Etude des nanofils de silicium et de leur intégration dans des systèmes de récupération d'énergie photovoltaïque'', *Thèse de doctorat, université Grenoble, 2006*
- [20] M.Bouafia&L.Deblaoui, ''Modélisation et simulation d'une cellule solaire à couche minces à base de diséléniure de cuivre, d'indium et de gallium (CIGS), *Master professionnel, Université Kasdi Marbah-Ourglia, 2012*
- [21] G.Poulain, 'procédés laser pour la réalisation des cellules photovoltaïques en silicium à haut rendement'', *Thèse de Doctorat, INSA de Lyon, 2012*
- [22] L.Bailly, ''cellules photovoltaïques organiques souples à grande surface'', *Thèse de Doctorat, Université Bordeaux, 2010*
- [23] A.Sévak, ''Du transfert de films minces de silicium monocristallin vers un procédé cellule à faible budget thermique'', *Thèse de Doctorat, INSA de Lyon, 2008*

Chapitre 3

**Simulation d'une cellule solaire
au silicium monocristallin**

3.1-Introduction :

L'optimisation du rendement des cellules solaires photovoltaïques, dépend de plusieurs paramètres. Ces paramètres, sont liés souvent à la qualité du matériau, à la vitesse de recombinaison aussi à la géométrie de la structure, plus précisément sur :

- L'épaisseur de la couche intrinsèque
- L'épaisseur de l'émetteur
- Les niveaux de dopage de l'émetteur
- la couche anti réflexion

Nous avons étudié l'influence de ces différents paramètres cités auparavant sur les performances d'une cellule solaire simple à jonction PN en suite sur une cellule solaire ou on a ajouté une couche intermédiaire entre l'émetteur et le substrat (cellule solaire à jonction PIN).

Pour étudier l'influence d'un paramètre donné, on varie sa valeur tout en fixant toutes les autres et pour chaque variation de ce paramètre donné, on génère la caractéristique de sortie courant-tension $I(V)$, sous illumination AM1.5, afin d'extraire, la tension en circuit ouvert V_{co} , la densité de courant de court-circuit J_{cc} , le facteur de forme FF et le rendement de conversion η de la cellule.

Dans le cadre de cette mémoire, nous avons utilisé la simulation numérique par le logiciel atlas de silvaco a deux dimensions, qui permet la simulation électrique, optique, en plus d'une résolution bien précise des défauts au niveau des interfaces grâce à la méthode des éléments finis [1].

Nous présenterons d'abord la structure géométrique à étudier, ensuite nous interprétons les résultats.

3.2- le solaire à jonction PN au silicium monocristallin :

3.2.1- Structure simulée :

La simulation numérique de la structure photovoltaïque étudiée a été effectuée par l'utilisation de logiciel Silvaco/Atlas. Les paramètres sont choisis de façon à être plus proches de ceux des cellules technologiquement réalisables.

La figure 3.1 représente la structure de la cellule solaire au silicium monocristallin à jonction PN et démontre les différentes couches de la structure. Les paramètres physiques et géométriques utilisés dans la simulation sont présentés sur le tableau 3.1.

Chapitre 3 : Simulation d'une cellule solaire au silicium monocristallin

Dans une deuxième partie, nous allons intégrer une couche intrinsèque entre l'émetteur et la base, pour étudier l'effet de la variation de cette couche sur les performances de la cellule solaire.

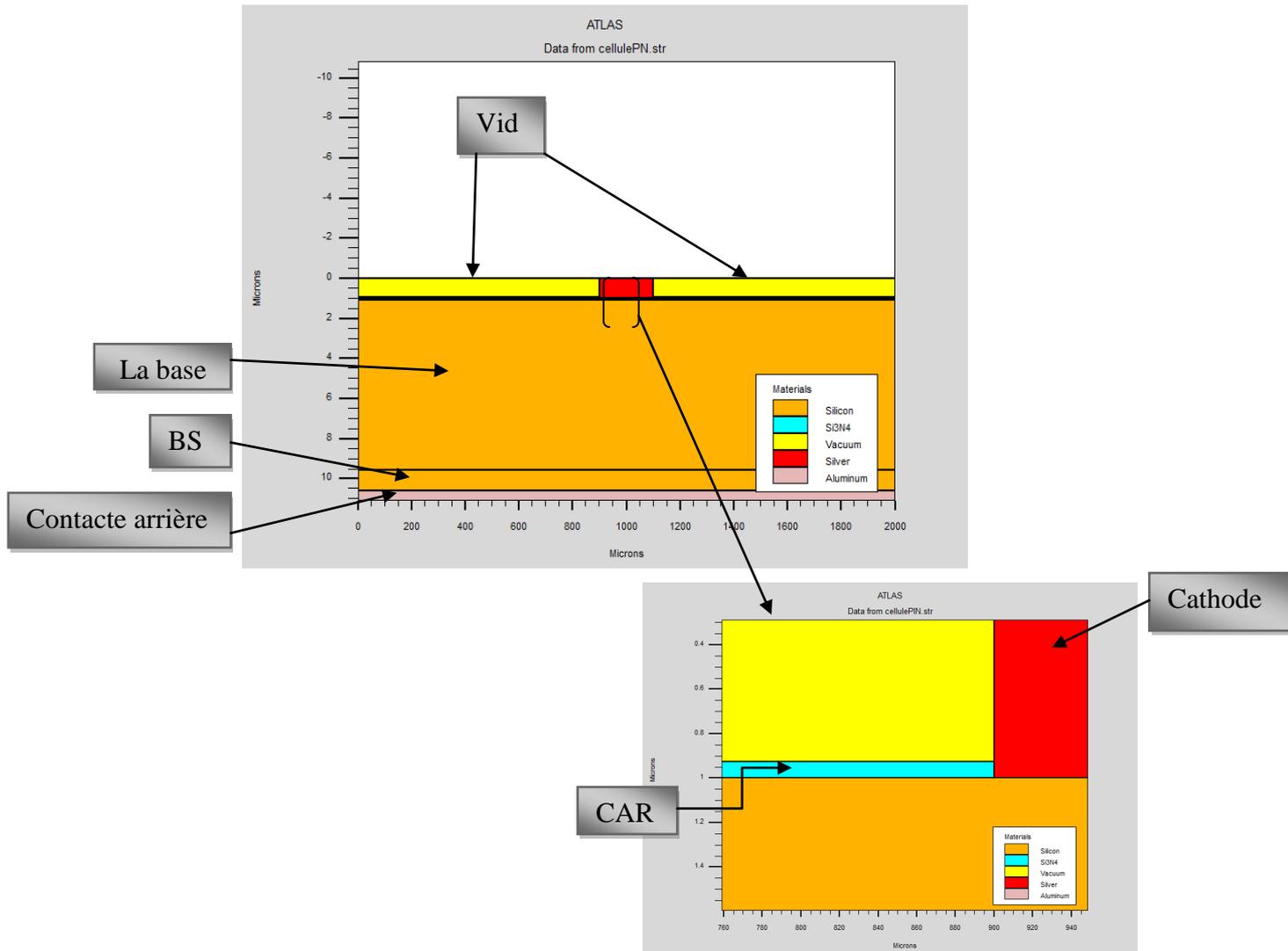


Figure 3.1- Structure de référence (PN) simulée sous Silvaco/Atlas.

3.2.2- Paramètre de la structure simulée (cellule de référence) :

Les paramètres physiques et géométriques utilisés dans la simulation sont donnés sur le tableau 3.1.

Substrat	
Largeur de la structure μm	2000 μm
Epaisseur μm	11.09
Dopage cm^{-3}	$N_D = 10^{19} \cdot \text{cm}^{-3}$
Profil du dopage	Uniforme
Vitesse de recombinaison en face avant	$S_{\text{FAV}} = 10^2 \text{cm/s}$

Chapitre 3 : Simulation d'une cellule solaire au silicium monocristallin

Vitesse de Recombinaison face arrière	$S_{\text{FAR}} = 10^2 \text{ cm/s}$
Durée de vie des porteurs minoritaires	$\text{Tau}0 = 1 \text{ ms}$
Epaisseur de la couche antireflet	$e_{\text{ARC}} = 0,075 \mu\text{m}$
Indice de réfraction	$n = 2.05$
Réflectivité arrière	90%
Emetteur	
Epaisseur	$0.1 \mu\text{m}$
Dopage	$N_{\text{D}} = 10^{22} \text{ cm}^{-3}$
Vitesse de recombinaison au contact	$S_{\text{e}} = 5 * 10^6 \text{ cm/s}$; $S_{\text{h}} = 5 * 10^6 \text{ cm/s}$
Profil du dopage	Uniform
BSF	
Epaisseur	$1 \mu\text{m}$
Dopage	$N_{\text{A}} = 5 * 10^{19} \text{ cm}^{-3}$
Profil du dopage	Uniform
Vitesse de recombinaison au contact	$S_{\text{e}} = 5 * 10^6 \text{ cm/s}$; $S_{\text{h}} = 5 * 10^6 \text{ cm/s}$

Tableau 3.1- Paramètre de la structure simulée (cellule de référence).

La réalisation de cette structure sous l'espace atlas de silvaco est obtenue en identifiant le maillage(Mesh), les régions, les électrodes et les niveaux de dopage.

3.2.2.1- Mesh :

Le maillage joue un rôle important pour l'obtention de bonnes simulations. Celui-ci doit être fait avec la plus grande attention pour garantir la fiabilité des résultats, c'est une série de lignes horizontales et verticales, dans notre étude, le maillage utilisé est à deux dimensions, par conséquent, seuls les paramètres x et y sont défini [2].

Le maillage de la structure PN créé dans ATLAS est illustré dans la figure 3.2.

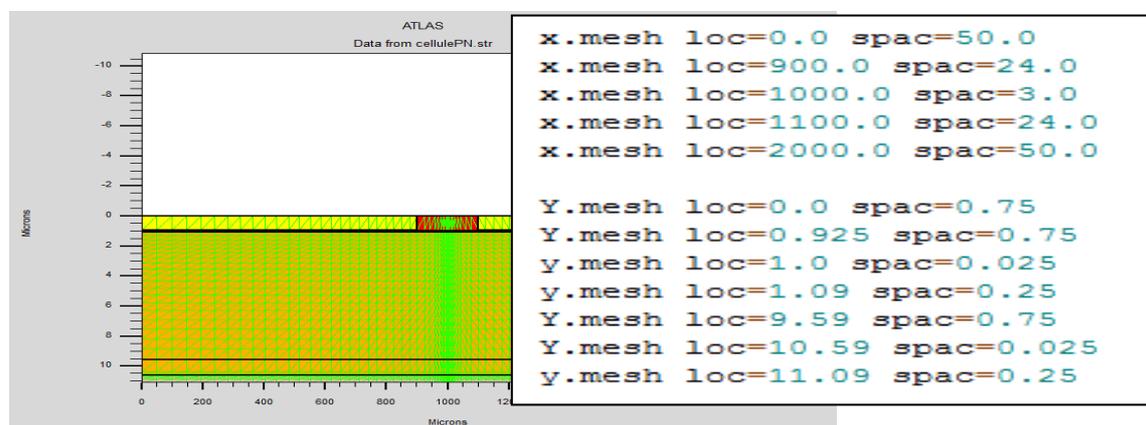


Figure 3.2 - Maillage de structure PN.

Chapitre 3 : Simulation d'une cellule solaire au silicium monocristallin

3.2.2.2-Region :

Indique l'endroit des matériaux dans une maille [3].

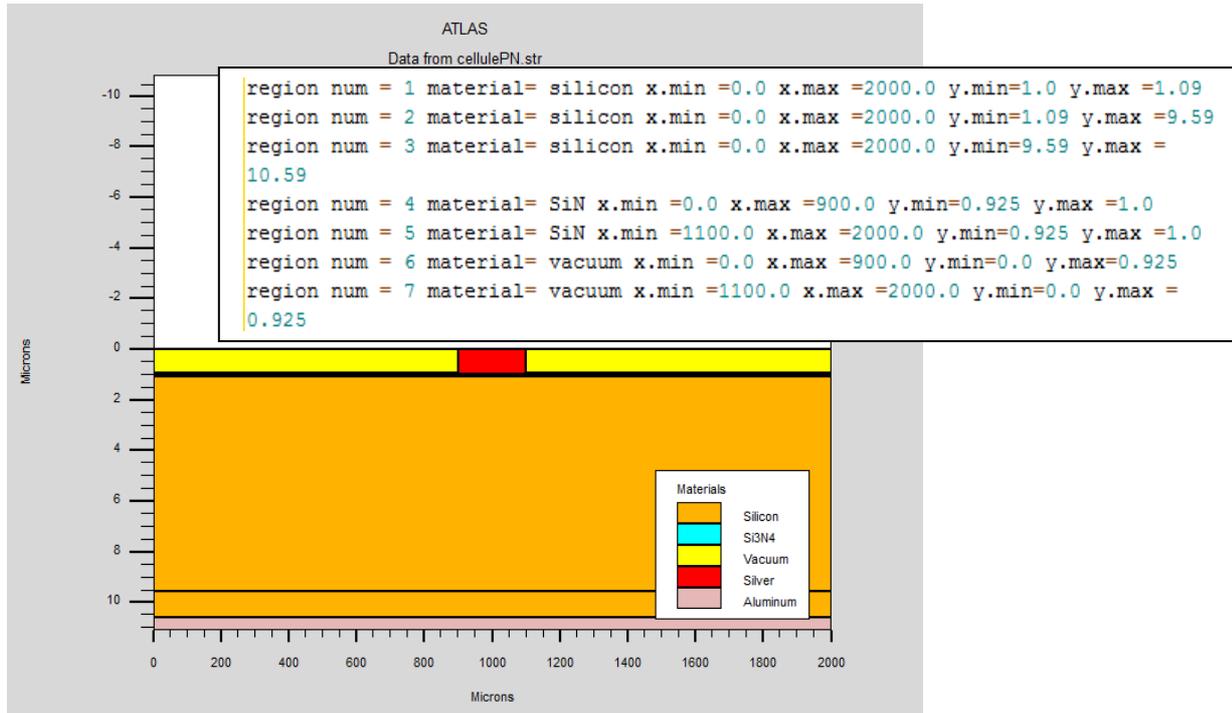


Figure 3.3 - Définition des régions dans atlas.

3.2.2.3 -Electrodes :

Indique l'endroit et les noms des électrodes dans une maille précédemment définie [3].

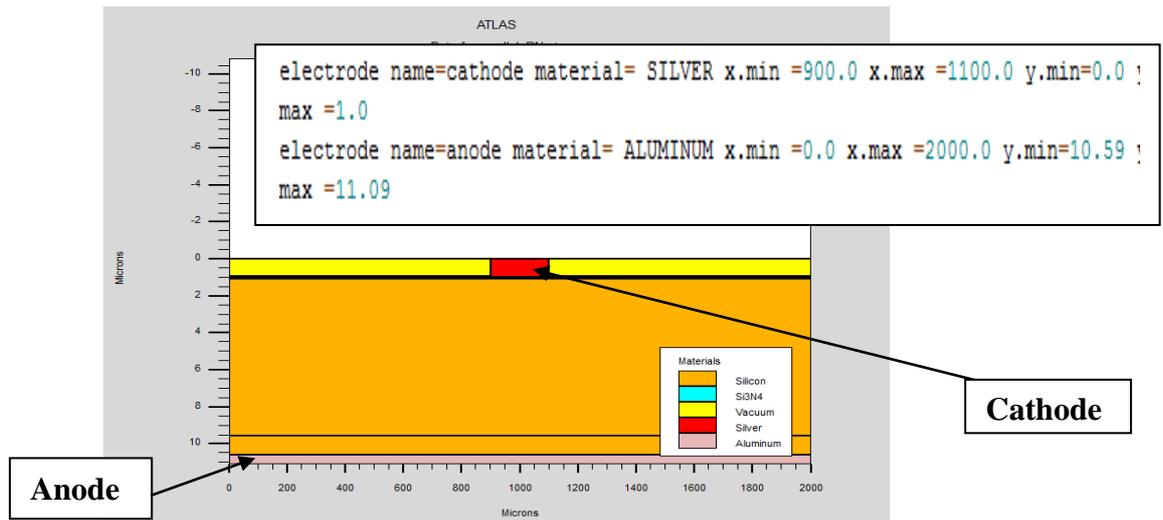


Figure 3.4 - Définition des électrodes dans atlas.

3.2.2.4 - Dopage :

Le dernier aspect de la construction de la structure est le dopage. Le dopage peut être de type n ou p, aussi la distribution peut être uniforme, gaussien, etc [4].

La figure 3.5 définit les types et les niveaux de dopage.

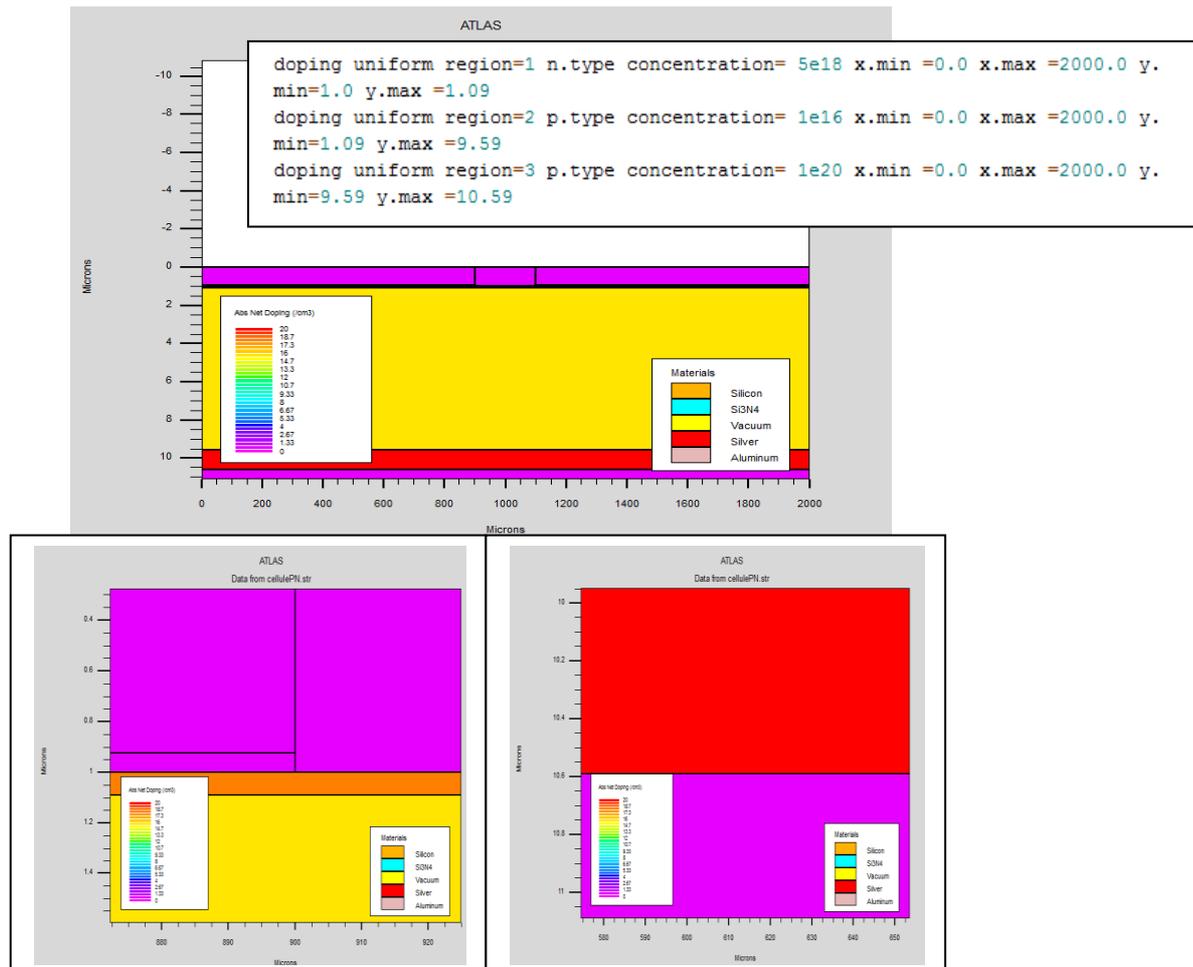


Figure 3.5 - Définition des dopages dans atlas.

3.3- Présentation des résultats :

3.3.1- Caractéristique I(V) de la cellule photovoltaïque a jonction PN :

La figure 3.6 présente la caractéristique I(V) sous l'éclairement pour la cellule au silicium monocristallin.

La cellule photovoltaïque est caractérisée par une courbe courant-tension (I-V) représentant l'ensemble des configurations électriques que peut prendre la cellule. Deux grandeurs physiques définissent cette courbe [2] :

Chapitre 3 : Simulation d'une cellule solaire au silicium monocristallin

- Sa tension à vide : V_{co} . Cette valeur représenterait la tension générée par une cellule éclairée non raccordée.
- Son courant court-circuit: I_{cc} . Cette valeur représenterait le courant généré par une cellule éclairée raccordée à elle-même.

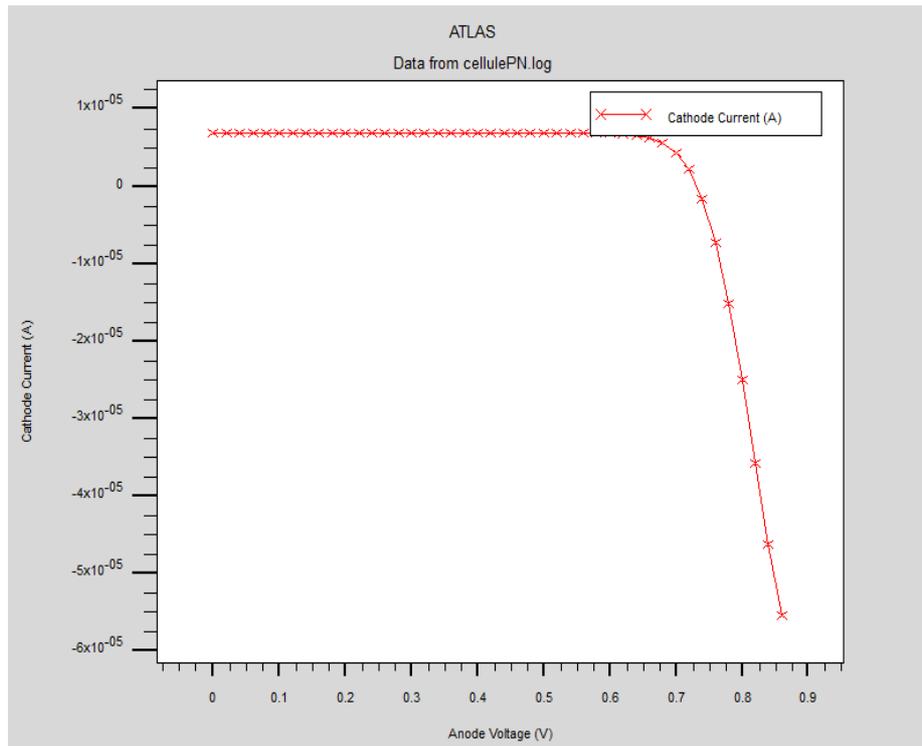


Figure 3.6 - Courbe I(V) de la cellule PN sous l'éclairement.

3.3.1.1- Courbe de puissance de la cellule PN :

La figure 3.7 présente la caractéristique P(V) sous l'éclairement pour la cellule solaire étudiée.

- Son point de puissance maximal: MPP (en anglais : *maximal power point*) obtenu pour une tension et un courant optimaux : V_{opt} , I_{opt} (parfois appelés aussi V_{mpp} , I_{mpp}) [2].

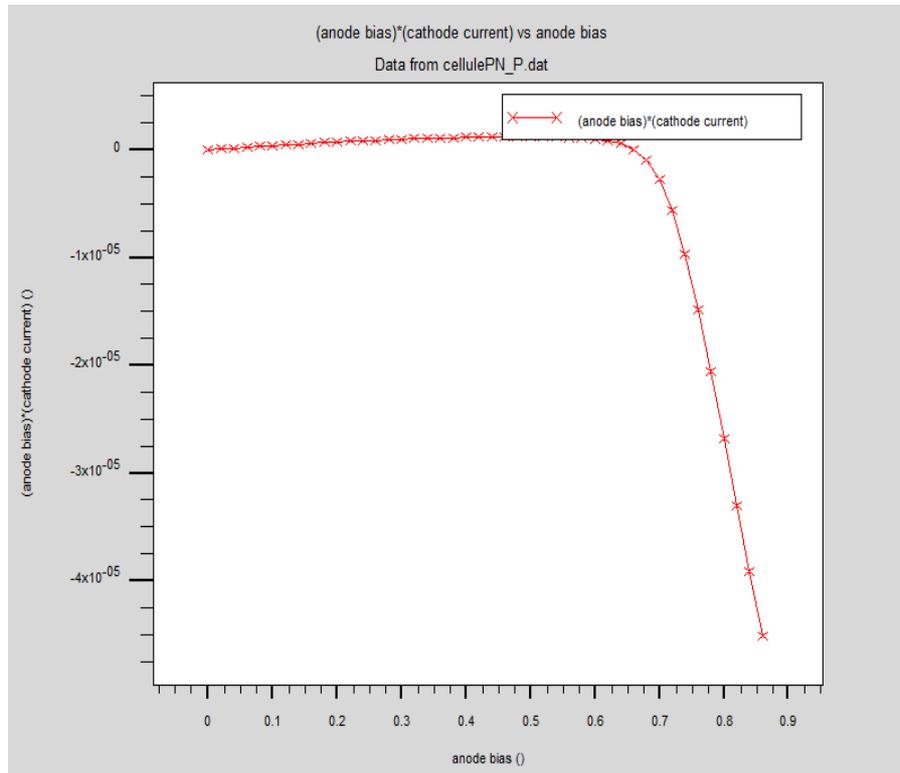


Figure 3.7 - Courbe de puissance de la cellule PN.

3.3.1.2- Etude de l'influence de l'intensité lumineuse sur la caractéristique I(V) :

On a varié la valeur de l'intensité lumineuse : obscurité ($b=0$), $b=1e-1$, $b=1e-2$, $b=1$.

Avec b :beam

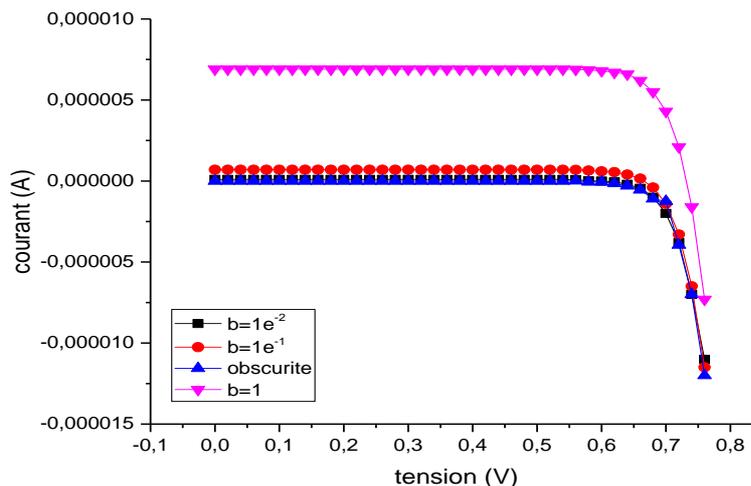


Figure 3.8 - caractéristiques I(V) en fonction de l'intensité lumineuse.

Interprétation des résultats

Les courants de court-circuit sont plus importants plus 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.

3.4.2- Caractéristique I(V) de la cellule solaire en silicium monocristallin a jonction PIN :

La figure 3.10 présente la caractéristique I(V) sous l'éclairement pour la cellule PIN.

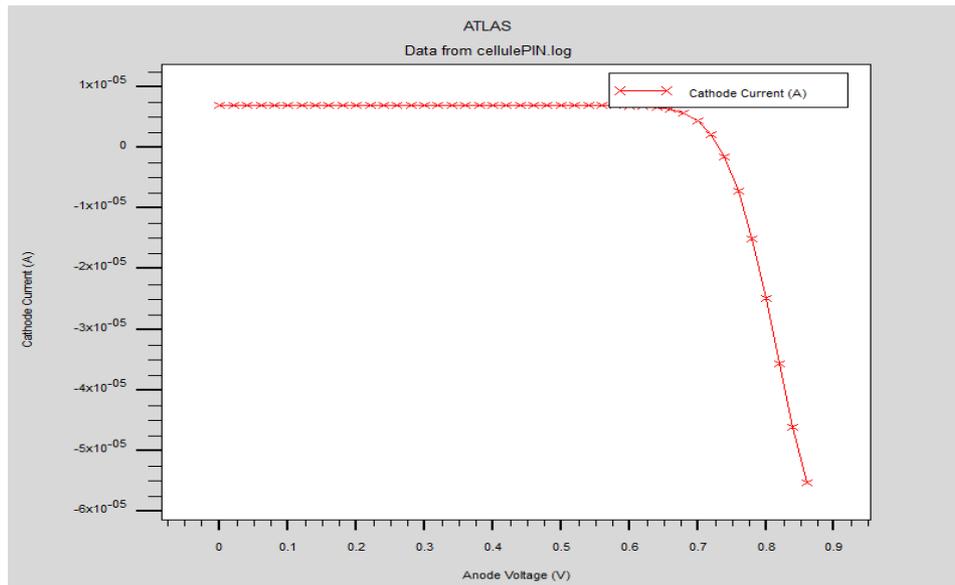


Figure 3.10 - Courbe I(V) de la cellule PIN sous l'éclairement.

3.4.2.1- Comparaison entre la caractéristique I(V) de la cellule solaire a jonction PN et la cellule solaire a jonction PIN :

On présente dans la figure 3.11 les caractéristiques I(V) des cellules PN et PIN, respectivement, obtenues par ATLAS de silvaco.

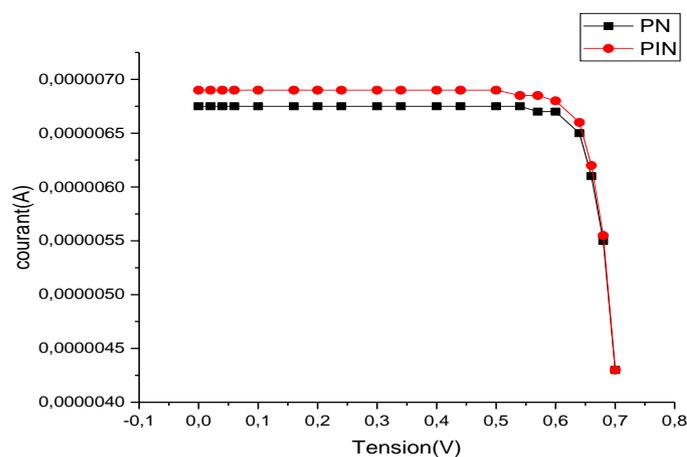


Figure 3.11 - les caractéristiques I(V) des cellules PN et PIN.

Chapitre 3 : Simulation d'une cellule solaire au silicium monocristallin

Interprétation des résultats

Nous constatons dans le cas de cellule solaire a jonction PIN une certaine amélioration du courant photonique et par conséquence et une amélioration du rendement électrique (un rendement de **20.97%**).

3.4.3 - L'effet de l'épaisseur de la couche intrinsèque sur les paramètres de la cellule :

Nous avons varié la valeur de l'épaisseur de la couche intrinsèque tout ont fixons les autres dimensions de la structure, et les résultantes des différentes paramètres de la cellule PIN sont résumées dans le tableau 3.3:

a (µm)	Voc(mV)	Jcc(mA/cm ²)	Vm	Pm	Im	FF(%)	Eff(%)
0.09	0.7322	34.0546	0.6399	4.1738	32.6083	83.6951	20.8693
0.1	0.7322	34.0577	0.64	4.1744	32.6427	83.6987	20.87
0.3	0.7321	34.1136	0.63	4.1823	32.6742	83.71	20.91
0.5	0.7320	34.1692	0.64	4.1851	32.6962	83.6516	20.9256
1	0.7318	34.2893	0.6399	4.1912	32.7441	83.5071	20.95
2	0.7313	34.4611	0.63	4.19	32.76	83.6987	20.9720
3.5	0.7304	34.6083	0.64	4.1850	32.6959	83.7724	20.9254
4	0.7301	34.6388	0.64	4.1796	32.6532	82.6250	20.8980
5.5	0.7292	34.6977	0.6399	4.1890	32.4924	82.1795	20.795

Tableau 3.3 - L'effet de l'épaisseur de la couche intrinsèque sur les paramètres de la cellule PIN.

3.4.3.1 - L'effet de l'épaisseur de la couche intrinsèque sur I(V) de la cellule PIN :

Maintenant, nous fixons tous les paramètres de la cellule et nous ne faisons varier que l'épaisseur de la zone intrinsèque pour différentes valeurs.

La figure 3.12 montre L'effet de l'épaisseur de la zone intrinsèque sur I(V) de notre cellule PIN.

Chapitre 3 : Simulation d'une cellule solaire au silicium monocristallin

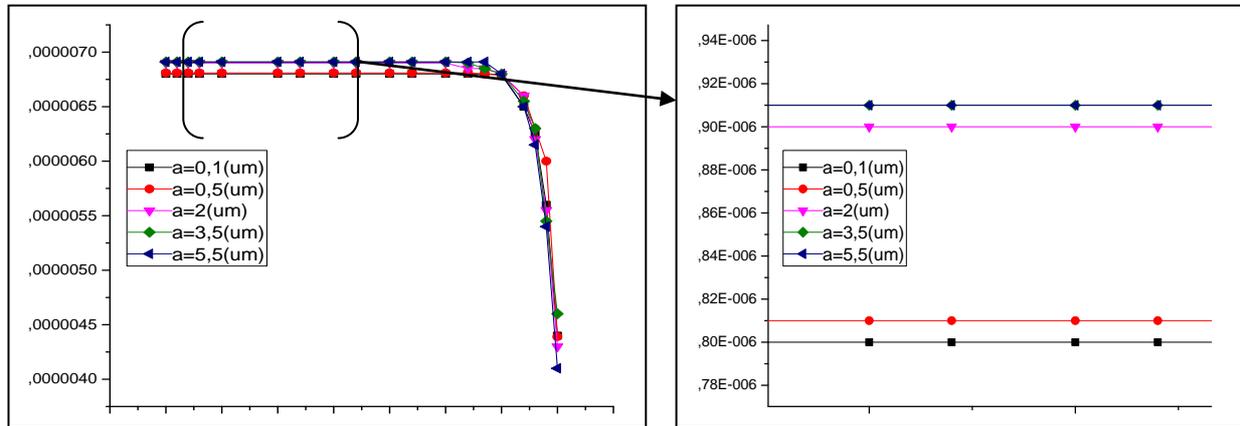


Figure 3.12 - L'effet de l'épaisseur de la zone intrinsèque sur I(V) de la cellule PIN.

Interprétation des résultats

Ces résultats sont pris pour cinq valeurs différentes de la couche intrinsèque. Nous remarquons que le courant de court-circuit croît avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche intrinsèque.

- L'effet de l'épaisseur de la couche intrinsèque sur (V_{co} , η , FF, J_{cc}) :

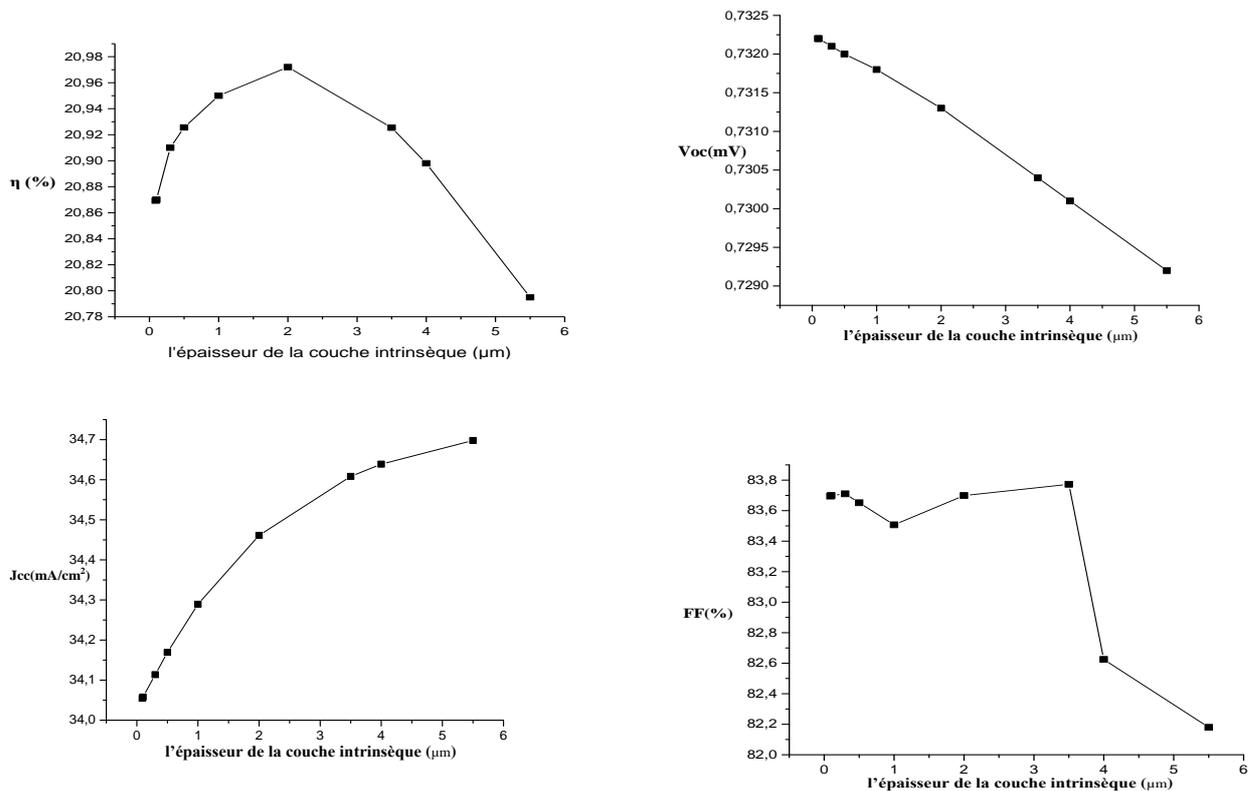


Figure 3.13 – Evolution du (V_{co} , η ,FF, J_{cc})de la cellule PIN en fonction la Variation de l'épaisseur de la zone intrinsèque.

Interprétation des résultats

Nous remarquons que le rendement Augmente jusqu'à une valeur maximal (**20.97%**) pour une épaisseur de la zone intrinsèque (**2 μm**), alors on constat que qu'une couche intrinsèque mince est idéal pour optimiser le rendement électrique de la cellule solaire.

On remarque aussi le V_{co} diminue avec l'augmentation de la couche intrinsèque.

3.4.4 - L'effet de la Variation du dopage de l'émetteur :

La figure 3.14 représente l'effet de la variation du dopage de l'émetteur sur la caractéristique I(V) de la cellule PIN pour une épaisseur d'émetteur (0,09μm). Ce résultat confirme que le dopage influe sur l'allure de la caractéristique I-V :

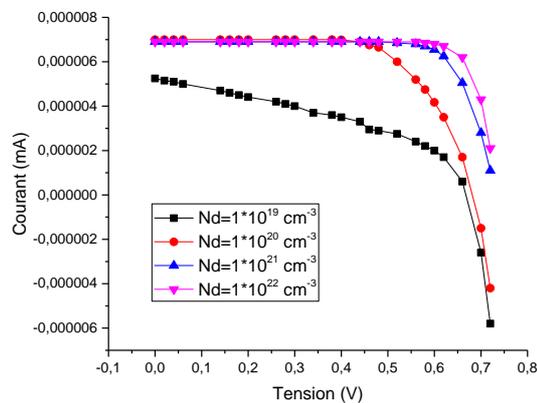
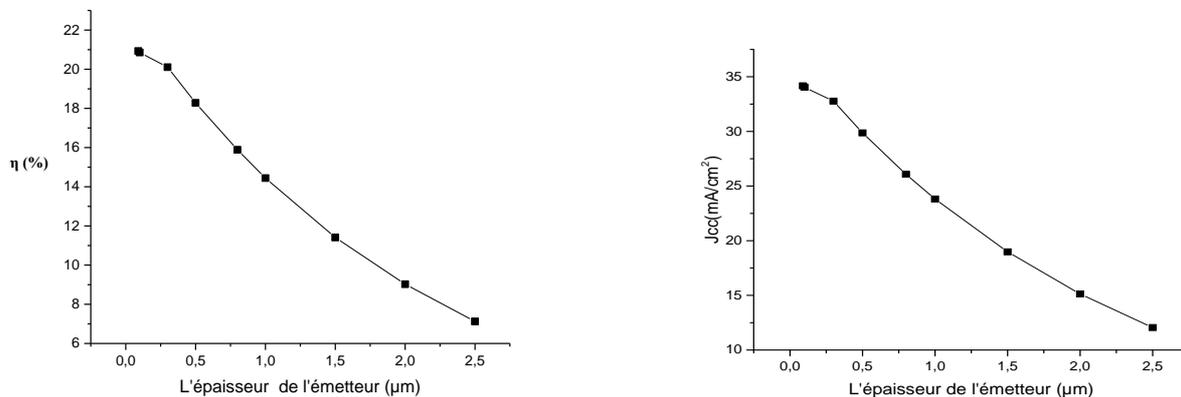


Figure 3.14 - L'effet de la Variation du dopage de l'émetteur sur I(V) de la cellule PIN.

3.4.5 - L'effet de la variation de l'épaisseur de l'émetteur :

Pour étudier l'influence de l'épaisseur de l'émetteur, nous avons fixé le dopage et toutes les données de la cellule et nous avons varié juste l'épaisseur de l'émetteur pour plusieurs valeurs, et les résultats obtenus sont illustrés sous la figure 3.15.



Chapitre 3 : Simulation d'une cellule solaire au silicium monocristallin

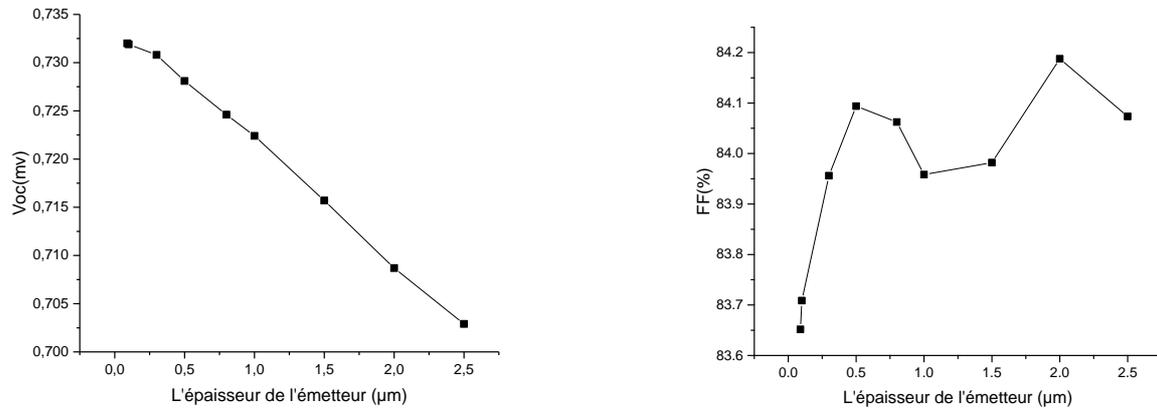


Figure 3.15 - Evolution de η , V_{oc} , J_{cc} , FF de la cellule PIN en fonction la Variation de l'épaisseur de l'émetteur.

Interprétation des résultats

Comme on peut le voir sur la figure 3.15, l'augmentation de l'épaisseur de l'émetteur entraîne la décroissance de rendement et la tension de circuit ouvert et par suite la densité de court-circuit. L'explication de ce résultat est que la couche d'émetteur doit faire passer toute l'intensité de la lumière qu'elle a la base ce qui reçoit empêche ce passage lorsqu'elle sera épaisse.

3.3.6 - L'effet de la couche anti réflexion :

Nous avons réalisé des structure solaire sans et avec différents couche antireflet. Ou nous avons constaté que la présence d'une couche antireflet influe nettement sur le rendement d'une cellule solaire. Aussi le type de matériau a aussi une certaine influence.

	Voc (mV)	Icc (A)	Jcc (mA/cm ²)	FF(%)	η (%)
Sans couche antireflet	0.7255	5.2*10-6	28.1094	83.1302	16.5485
CAR (SiO2)	0.7305	5.8116*10-6	33.5486	83.2164	20.39505
CAR (SiN)	0.7313	5.9743*10-6	34.4611	83.6987	20.9720
DCAR (SiN+SiO2)	0.7278	5.3005*10-6	30.5744	83.1952	18.5141

Tableau 3.4 - L'effet de la couche anti réflexion.

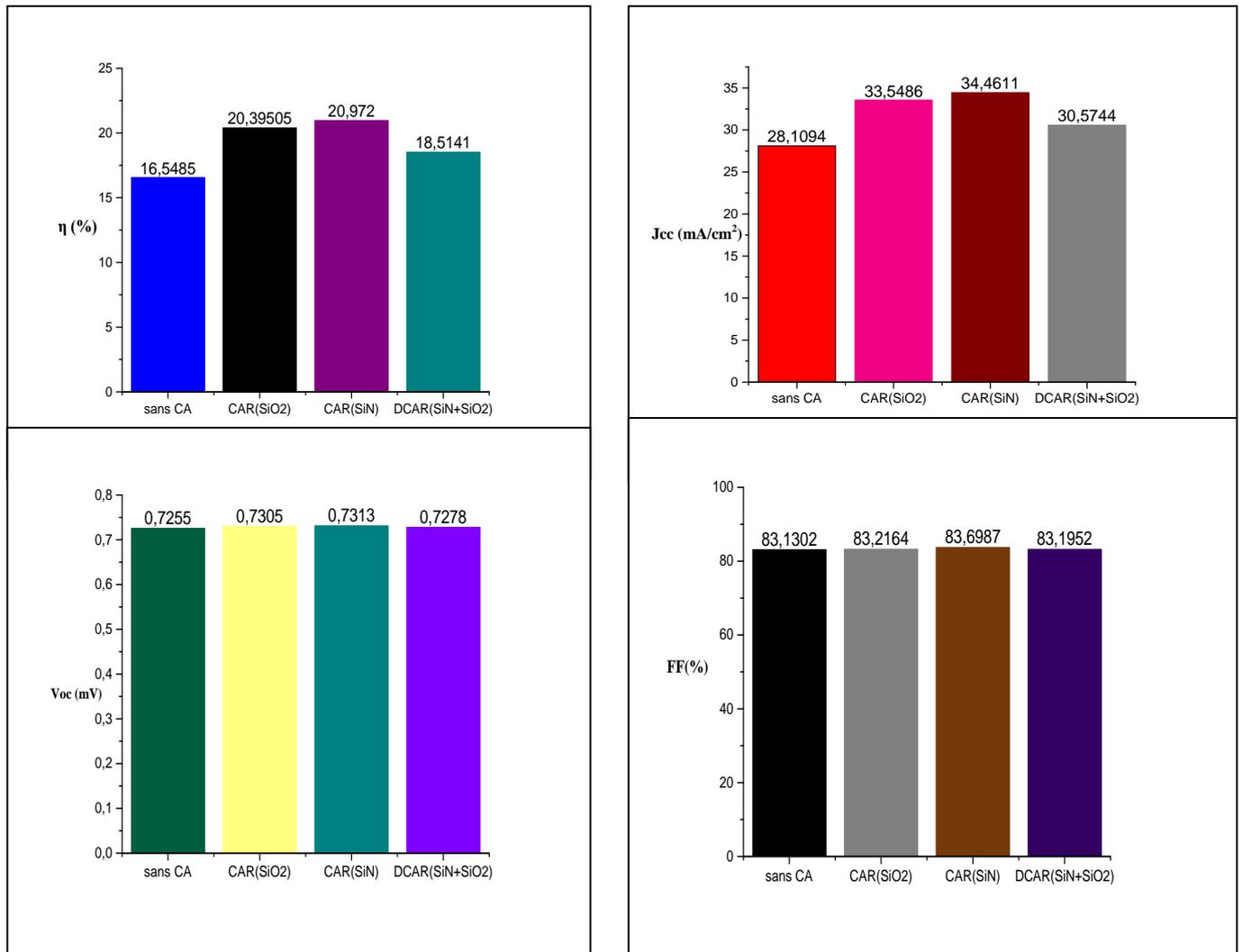


Figure 3.16 - L'effet de la couche anti réflexion sur les paramètres de la cellules PIN (η, V_{oc}, FF, J_{cc}).

Interprétation des résultats

On remarque que le matériau le plus approprié pour obtenir un meilleur rendement est (SiN), ce qui est démontré par les résultats de simulation, puis le SiO₂ puis le DCAR (SiN+SiO₂) en dernier. Le nitrure de silicium SiN est plus efficace que l'oxyde de silicium.

3.4.7 - 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 [1].

Chapitre 3 : Simulation d'une cellule solaire au silicium monocristallin

La figure 3.17 suivante présente la réponse spectrale de la cellule photovoltaïque à structure PIN.

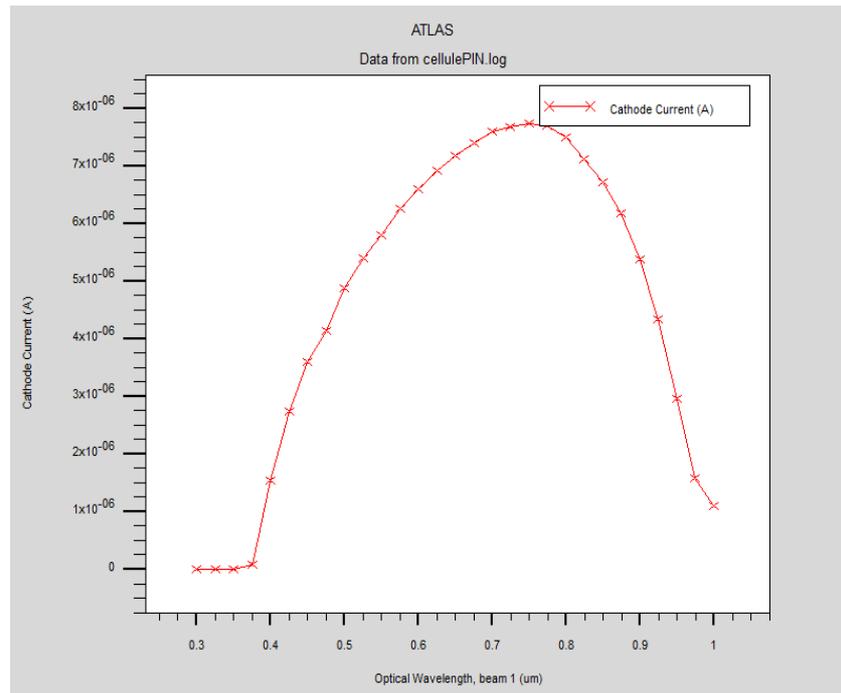


Figure 3.17 - La réponse spectrale de cellule solaire a structure PIN.

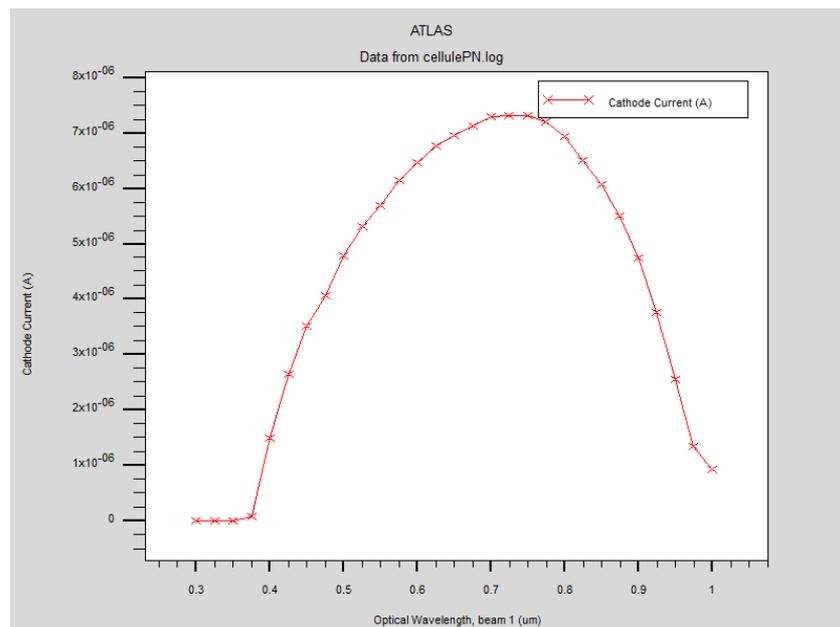


Figure 3.18 - La réponse spectrale de cellule solaire a structure PN.

3.4.7.1 - Comparaison :

La figure 3.19 représente la réponse spectrale de la cellule PN et PIN simulée et nous avons également fait une petite comparaison entre les deux cellules.

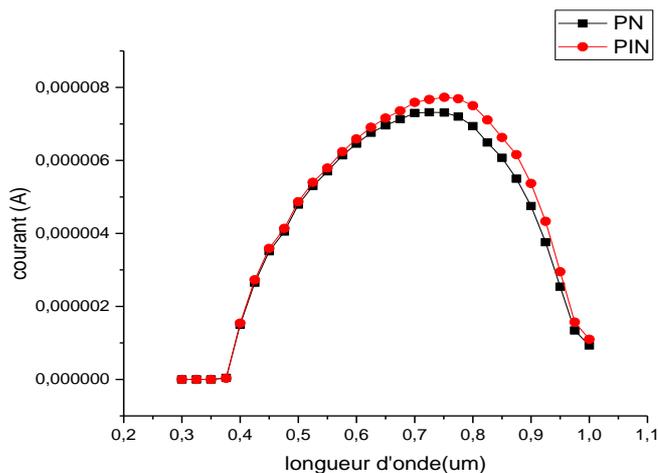


Figure 3.19 - Les réponses spectrales des cellules solaires PN et PIN.

Selon le graphe, les deux courbes des réponses spectrales des cellules solaires à structure PN et PIN, qu'il y a une réponse pour les longueurs d'ondes entre **0.5µm** 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 **0.8µm**.

3.5-Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons essayé d'optimiser les paramètres de la cellule solaire a jonction PN en ajoutons une couche intermédiaire entre l'émetteur et la base en utilisant le logiciel SILVACO. Nous avons étudié l'effet des paramètres géométriques : la variation de l'épaisseur de la couche intrinsèque et la variation de l'épaisseur et dopage de l'émetteur, aussi l'effet de la couche antireflet sur les caractéristiques de la cellule solaire à l'aide de la simulation numérique en deux dimensions 2D.

Premièrement, l'étude a permis de démontrer l'importance de choix de l'épaisseur de la couche intrinsèque "I".

Finalement, la simulation réalisée dans ce chapitre montre que le rôle de l'émetteur est très important dans la fabrication des cellules solaires, pour cela une bonne optimisation de l'épaisseur et du dopage sont nécessaire.

- [1] <https://energieplus-lesite.be/theories/photovoltaique6/caracteristiques-electriques-des-cellules-et-des-modules-photovoltaiques/>
- [2] M.Nasseredine, "Simulation, modélisation et caractérisation électrique des transistors HEMT's à base de composés III-V niturés, Thèse Doctorat, *université Djillali LIABES De Sidi Bel Abbes*.
- [3] I.Taibi, "Modélisation et simulation des cellules solaires à base des matériaux organiques, Application à la structure P3HT : PCBM", *Thèse de Doctorat, Université Djillali Liabes, Sidi Bel Abbes, 2018*.
- [4] M.Dilmi, "ETUDE DES PERFORMANCES DE LA CELLULE InGaP/GaAs/Ge PAR SIMULATION, *université Mohamed Boudhiaf de M'sila*.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce travail, Nous nous sommes fixés pour le but d'optimisation d'une cellule solaire au silicium monocristallin à simple jonction PN. La simulation d'une cellule solaire au silicium monocristallin, nécessite tout d'abord une étude théorique bien détaillée de la cellule solaire elle-même en suite de logiciel de simulation Atlas de Silvaco, comme outil de travail

Premièrement nous avons donné un état de l'Art sur les notions préliminaire sur l'énergie solaire, ensuite nous avons étudié les différents types de silicium, et les cellules solaires à base de silicium, leurs principes de fonctionnement, les caractéristiques électriques. Dans une deuxième partie de chapitre nous avons présenté la cellule solaire à structure PIN, leur principe de fonctionnement et leurs types des cellules.

Sur le dernier chapitre, nous avons exposé et commenté les résultats obtenus par la simulation.

Ce travail de simulation a été réalisé à l'aide d'Atlas de Silvaco. Nous avons déterminé, premièrement, la caractéristique courant-tension d'une cellule solaire à base d'une jonction PN et ces paramètres (V_{co} , J_{sc} , FF, η).

Ensuite, pour l'optimisation on a intercalé une couche intrinsèque "I" entre la couche de l'émetteur et la base, avec la quelle nous avons obtenu un rendement maximum.