



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Université Abdel Hamid Ibn Badis de Mostaganem

Faculté des Sciences Exactes et Informatique

Département de Physique

Domaine : Sciences de la Matière

Filière : Physique

Spécialité : Modélisation et Caractérisation des Matériaux

Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention de Master en Physique

Présenté par :

BENDAHMANE Khayra

Sujet :

« Optimisation des paramètres photovoltaïques, à l'aide de PC1D, de cellules solaires au silicium à émetteur de type N et leur comparaison avec celles de type P. »

Soutenu le 30/05/2016

Devant le jury composé de :

M. Abdellah AIBOUT,	Pr., Université de Mostaganem,	Président.
M ^{me} Wassila RAHAL,	M.C.B., Université de Mostaganem,	Examinatrice.
M. Mohammed BEGHADAD,	M.C.A., Université de Mostaganem,	Encadreur.

Année universitaire : 2015-2016

Table des matières

Introduction générale	
-----------------------------	--

Chapitre I :

L'enseillement

I. Introduction	
I.1.Un bref historique	3
I.2.Le soleil	3
I.3.La constante solaire.....	4
I.4.Le spectre solaire	4
a. Le rayonnement direct.....	5
b. Le rayonnement diffus	5
c. Le rayonnement réfléchi ou l'albédo du sol	5
d. Le rayonnement global.....	5
I.5.La masse d'air (Air Masse en anglais).....	6
I.6.Zone utile du spectre solaire	7

Chapitre II :

Rappels sur la Physique

des semi-conducteurs

II.1.Définition d'un semi-conducteur	9
II.2.Types de semi-conducteurs :.....	9
II.2.1. Semi-conducteurs intrinsèques	9
II.2.2. Semi-conducteurs extrinsèques.....	11
II.2.2.1. Semi-conducteur de type N	11
II.2.2.2. Semi-conducteur de type p	12
II.3.Courant dans les semi-conducteurs	14
II.4.Coefficient d'absorption	16
II.5.Génération et recombinaison des paires électrons-trou	17

II.5.1.Génération	18
II.5.2.Recombinaisons	18
a. Recombinaison direct (inter-bandes)	18
b. Recombinaisons Auger	19
c. Recombination RSH (Read-Shockley-Hall)	19
d. Recombinaisons en surface	19
II.6. Jonction PN à l'équilibre	20
II.7. Jonction PN polarisée	23
1) Polarisation directe	23
2) Polarisation inverse.....	23

Chapitre III :

Physique de la cellule solaire

III.1.La cellule solaire.....	26
III.2.Principe de l'effet photovoltaïque	26
III.3.Choix du matériau	27
III.4.Fabrication d'une cellule solaire.....	27
1. Extraction et purification du silicium.....	27
2. Obtention des lingots de silicium.....	27
3. Obtention des wafers photovoltaïques	28
4. Dopage du silicium.....	28
5. Traitements de surface	28
5.1. La texturisation.....	29
5.2. La couche antireflet	29
5.3. La passivation	30
5.4. Champ électrique dans la zone arrière (BSF)	30
III.5.Caractéristique courant-tension $I (V)$ d'une cellule photovoltaïque	31
III.6.Paramètres essentiels caractérisant une cellule solaire	32
III.6.1.Courant de court-circuit.....	32

III.6.2.Tension de circuit ouvert.....	33
III.6.3.la puissance maximale	33
III.6.4.Facteur de forme.....	33
III.6.5.Rendement de conversion d'énergie	33
III.7.Réponse spectrale.....	34
III.8.Pertes fondamentales limitant le rendement	34
II.9.Influence de la résistance série	35
II.10.Influence de la résistance shunt.....	36

Chapitre IV :

Résultats et discussions

IV.1.Aperçu sur le logiciel PC1D	37
IV.1.1.Les paramètre du dispositif.....	38
IV.1.2.Les paramètre des régions.....	38
IV.1.3.Les paramètre d'excitation.....	39
IV.1.4.Les résultats	39
IV.2.Etude et optimisation par simulation de la cellule solaire	39
IV.2.1.Paramètres de la simulation.....	39
IV.2.2.Effets de l'épaisseur de la base	41
IV.2.2.1.Etude du courant de court-circuit I_{cc}	41
IV.2.2.2.Etude la puissance maximale P_m	41
IV.2.2.3.Etude de la tension de circuit-ouvert V_{co}	42
IV.2.2.4.Etude du facteur de forme FF	42
IV.2.2.5.Etude le rendement η	43
IV.2.3.Effets de la résistivité de la base couplée à celle de son épaisseur	44
IV.2.3.1.Etude du courant de court-circuit I_{cc}	44
IV.2.3.2.Etude de la tension de circuit-ouvert V_{co}	45

IV.2.3.3.Etude du facteur de forme FF	46
IV.2.3.4.Etude du rendement η	47
IV.2.4.Effet de la profondeur de jonction de l'émetteur.....	48
IV.2.4.1.Etude du courant de court-circuit I_{cc}	48
IV.2.4.2.Etude de la tension de circuit-ouvert V_{co}	48
IV.2.4.3.Etude du facteur de forme FF	49
IV.2.4.4.Etude du rendement η	49
IV.3.Résultats de la simulation.....	50
IV.3.1.Caractéristique I(V)	51
IV.3.2.Réponse spectrale	51
IV.3.3.Cellules à émetteurs de types N et P	53
Conclusion générale	55
Bibliographie.....	57

Introduction générale :

Avec l'épuisement progressif des sources d'énergies fossiles (pétrole, gaz, charbon) et des besoins énergétiques toujours croissants, les énergies renouvelables joueront à l'avenir un rôle de plus en plus important dans notre société.

La plus forte croissance parmi les énergies renouvelables, 30% en moyenne par an sur les dix dernières années, est le fait de l'énergie solaire photovoltaïque. La conversion directe du rayonnement solaire en électricité est son principal avantage. Le principal inconvénient de cette source d'énergie était son coût qui commence ces quelques années à être compétitif. Actuellement, cette industrie est donc soutenue par des politiques nationales comme en Allemagne, en Chine, au Japon et aux USA qui permettent à ces pays de réduire leur dépendance énergétique et de respecter plus ou moins leurs engagements concernant les émissions de gaz à effet de serre.

Le matériau principal des cellules photovoltaïques est le silicium. Il est abondant dans la nature, combiné à l'oxygène sous forme d'oxydes (silice, silicates). La réduction de la silice (minerais de quartz) par le carbone (bois, charbon, houille, pétrole) produit un silicium bon marché (22 \$/kg à la fin de 2012) mais d'assez faible pureté (99%).

Les cellules solaires font actuellement l'objet de multiples recherches dans le but de réaliser le meilleur rendement énergétique.

La modélisation d'une cellule solaire est l'outil performant qui nous permettra de lier les caractéristiques de cette cellule avec les propriétés du matériau et la technologie de fabrication afin d'améliorer les performances de la cellule.

L'objectif de ce travail est l'étude par simulation numérique de l'effet de l'épaisseur et du dopage de la base et de la profondeur de la jonction de l'émetteur sur les caractéristiques électriques d'une cellule solaire en silicium par le logiciel de simulation PC1D.

Le mémoire est structuré en quatre chapitres en plus d'une introduction et d'une conclusion générale.

Le premier chapitre, constitue un rappel général sur le gisement solaire, et une explication sur l'absorption du rayonnement solaire par une cellule solaire.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons les notions fondamentales sur les semi-conducteurs ainsi que la jonction PN.

Au sein du troisième chapitre, nous expliquons la physique et tous les paramètres des cellules solaires où nous décrivons en autres le principe de la conversion photovoltaïque .Nous abordent également les étapes principales de leur fabrication.

Le dernier chapitre est consacré à la présentation descriptive et illustrée du simulateur PC1D. On présente aussi dans ce chapitre, les résultats de notre étude sur la cellule à émetteur de type N et dont on essaiera de les interpréter et les comparer avec une cellule de type inverse.

Enfin, nous faisons une conclusion générale sur le sujet et les perspectives attendues.

I. Introduction

I.1. Un bref historique :

La conversion photovoltaïque est la transformation directe de l'énergie solaire en énergie électrique de type continu directement utilisable.

Quelques dates importantes dans l'histoire du photovoltaïque :

-1838: Le physicien français Edmond Becquerel découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide c'est l'effet photovoltaïque.

-1875: Werner Von Siemens exposait devant l'académie des sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs.

-1954: Trois chercheurs américains mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale cherchait des solutions pour alimenter ses satellites.

-1958: Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point, les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.

-1973: La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques.

-1985: la première voiture alimentée par énergie photovoltaïque en Australie.

I.2. Le soleil:

Le Soleil est l'étoile du système solaire. Dans la classification astronomique, c'est une étoile de type naine jaune, composée d'hydrogène (75 % de la masse ou 92 % du volume) et d'hélium (25 % de la masse ou 8 % du volume). Son diamètre est de $1,39.10^9$ m et a une distance moyenne de $1,5.10^{11}$ m de la terre (=1 unité astronomique (1ua)). Vu de la terre, le Soleil fait partie de la galaxie appelée la voie lactée et est situé à environ 30000 années lumière du centre galactique. Autour de lui gravitent la terre (à la vitesse de 30 km/s), huit autres planètes, au moins cinq planètes naines, de très nombreux astéroïdes et comètes et une bande de poussière. Le soleil représente à lui seul 99,86 % de la masse du système solaire ainsi constitué, Jupiter représentant plus des deux tiers du reste. L'énergie solaire transmise par le rayonnement solaire rend possible la vie sur Terre par apport d'énergie lumineuse (lumière) et d'énergie thermique (chaleur), permettant la présence d'eau à l'état liquide et la photosynthèse des végétaux. L'énergie solaire contribue à la désinfection naturelle des eaux de surfaces et à y détruire certaines molécules indésirables. Le rayonnement solaire est aussi responsable des climats et de la plupart des phénomènes météorologiques observés sur la terre.

I.3. La constante solaire :

Le soleil libère de façon continue une énorme quantité d'énergie radiante dans le système solaire, environ $4,5 \times 10^{26}$ J chaque seconde. La terre intercepte une toute petite portion de cette énergie rayonnée dans l'espace. On appelle le flux énergétique reçue par une surface d'unité située au bord externe de l'atmosphère terrestre (pour une distance moyenne terre-soleil de 150 millions de kilomètres), la constante solaire, elle est égale à 1367 W/m^2 (voir plus loin AM0).

La constante solaire est variable autour de l'année puisque la distance terre-soleil est elle-même variable.

I.4. Le spectre solaire :

La figure représente la gamme de rayonnement électromagnétique entourant le spectre visible ainsi que les longueurs d'onde correspondantes.

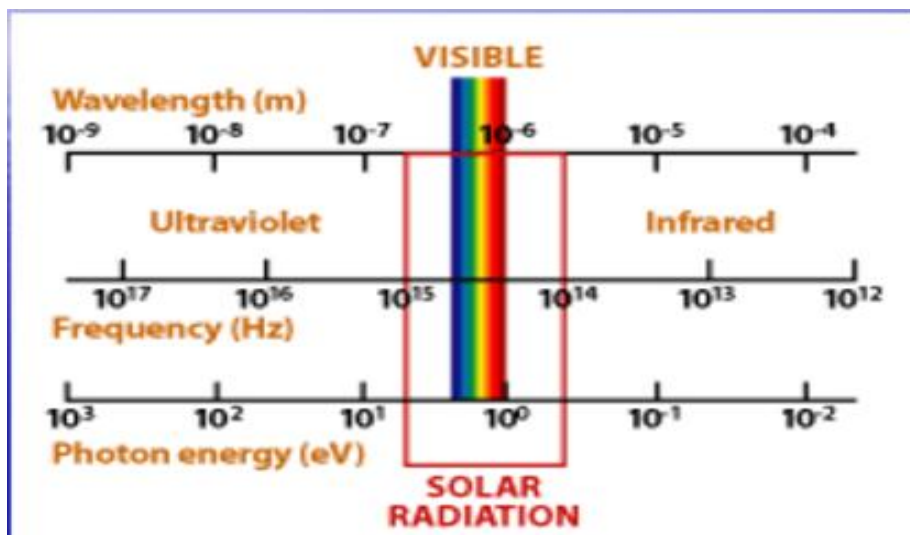


Figure I-1: spectre du rayonnement solaire.

On rappelle la relation permettant de passer de la longueur d'onde λ et de fréquence ν à l'énergie du photon associée (en eV) :

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \Rightarrow E(\text{eV}) = \frac{1,24}{\lambda(\mu\text{m})} \quad (\text{I.1})$$

Avec h : la constante de Planck. ($h = 6,62 \times 10^{-34} \text{ J.s}$)

c : la vitesse de la lumière. ($c = 3 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$)

Donc pour qu'il y ait création de paires électrons-trous, il faut que l'énergie transportée par les photons qui arrivent sur le dispositif soit supérieure ou égale à l'énergie de la bande interdite (gap) du matériau semi conducteur c'est-à-dire $E \geq E_g$. (Voir plus loin chapitre 2)

a. Le rayonnement direct : se définit comme étant le rayonnement provenant directement du soleil. Il est donc nul lorsque le soleil est occulté par les nuages.

b. Le rayonnement diffus : c'est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire global par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages et les aérosols (particules suspendus dans l'atmosphère).

c. Le rayonnement réfléchi ou l'albédo du sol : c'est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige, etc....).

d. Le rayonnement global : est la somme de des trois rayonnements décrits ci-dessus.

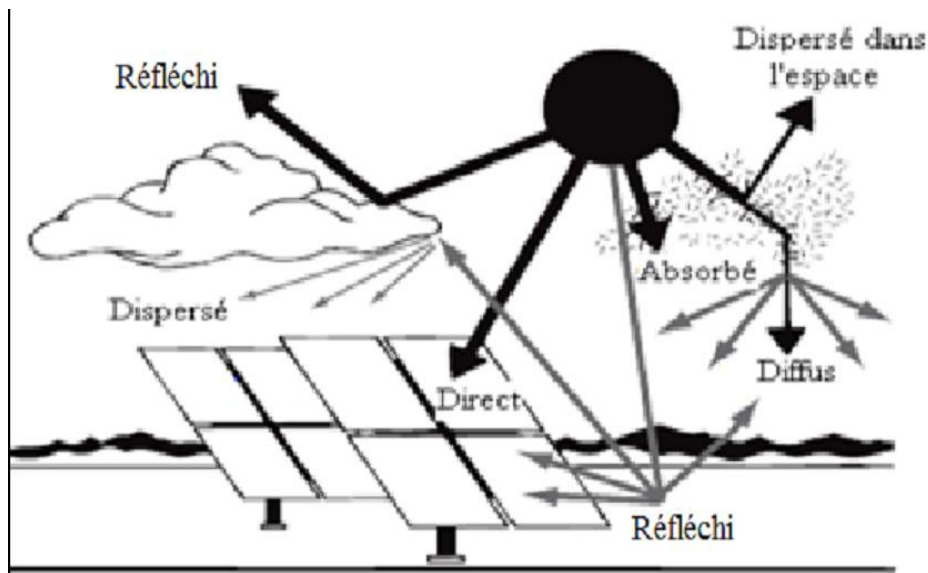


Figure I-2 : Composantes du rayonnement solaire

I.5. La masse d'air (Air Masse en anglais) :

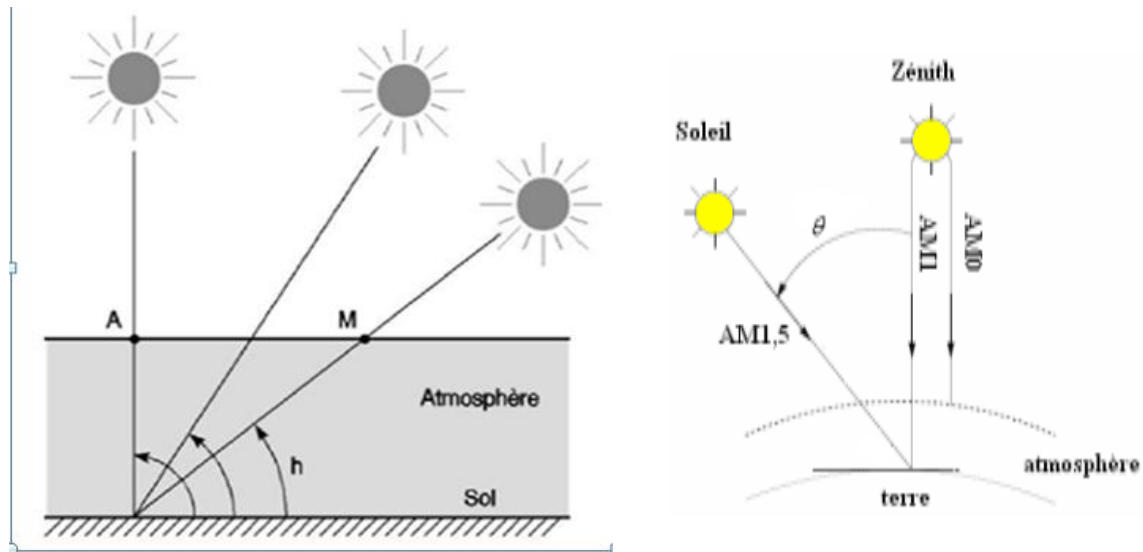


Figure I-3: Définition de la masse d'air.

On appelle masse d'air, notée AM (Air Mass) en anglais, la perte de l'énergie solaire par l'absorption de l'atmosphère qu'elle traverse. Elle est fonction de l'angle entre le soleil et le zénith.

On prend comme unité de référence, l'épaisseur moyenne réduite de l'atmosphère qui est de 7,8 km (dans les conditions normales).

La longueur du trajet rectiligne d'un rayon lumineux incliné d'un angle h par rapport à l'horizontale et θ par rapport à la verticale est donnée géométriquement par :

$$OM = \frac{OA}{\sin h} = \frac{OA}{\cos \theta} \quad (I.2)$$

À une pression P (en mbar) différente de 1013 mbar le nombre d'Air Masse est donnée par l'expression suivante :

$$m = \frac{OM}{OA} = \frac{P}{1013} \cdot \frac{1}{\sin h} \exp\left(-\frac{z}{7,8}\right) \quad (I.3)$$

Le spectre solaire AM_0 correspond à une masse d'air nulle (hors atmosphère) pour un rayonnement arrivant au dessus de la couche atmosphérique à incidence normale, AM_1 pour un soleil vertical à la terre (le soleil est au zénith), et $AM_{1,5}$ pour un rayonnement solaire correspondant à une inclinaison du soleil de 48° par rapport au zénith.

Le nombre "1,5" indique que le parcours de la lumière dans l'atmosphère est 1,5 fois supérieur au parcours le plus court du soleil, c'est-à-dire lorsqu'il est au zénith.

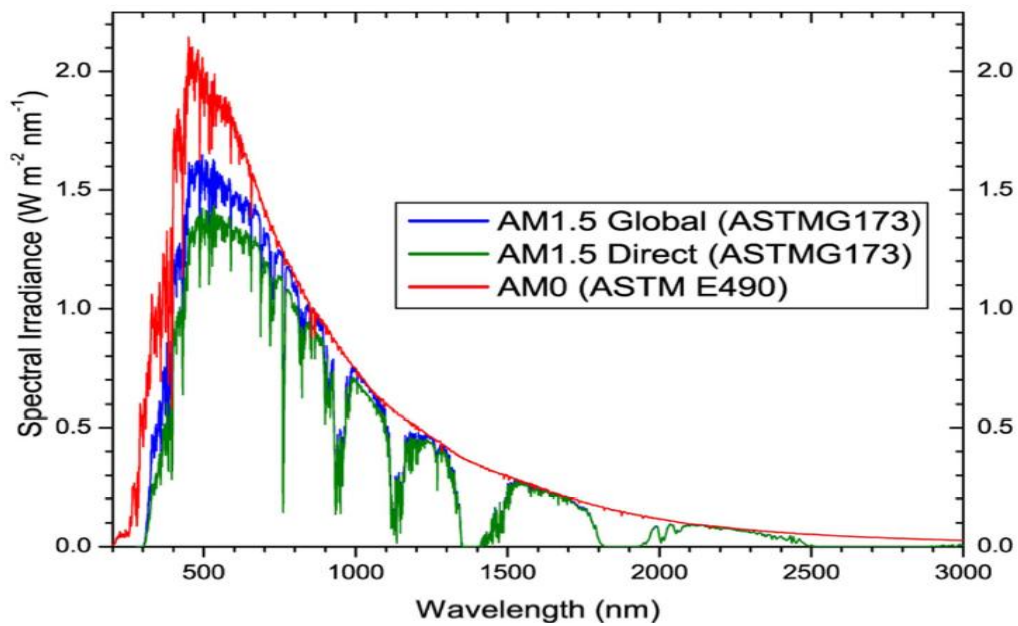


Figure I-4: Représentation graphique des spectres AM_0 et $AM_{1,5}$.

I.6. Zone utile de spectre solaire :

La figure montre que les photons du spectre solaire ne vont pas être tous utilisables pour la génération de paires électrons-trous. Si $E < E_g$ le photon n'est pas absorbé par le semi-conducteur, si $E \geq E_g$, le photon est absorbé. Cette même figure résume ceci sur le spectre de référence en montrant les pourcentages correspondant :

Photons non absorbés (I) environ 20%.

Pertes thermiques (II) environ 32%.

La zone utile pour le silicium est la zone (III) environ 48%.

Irradiance spectrale

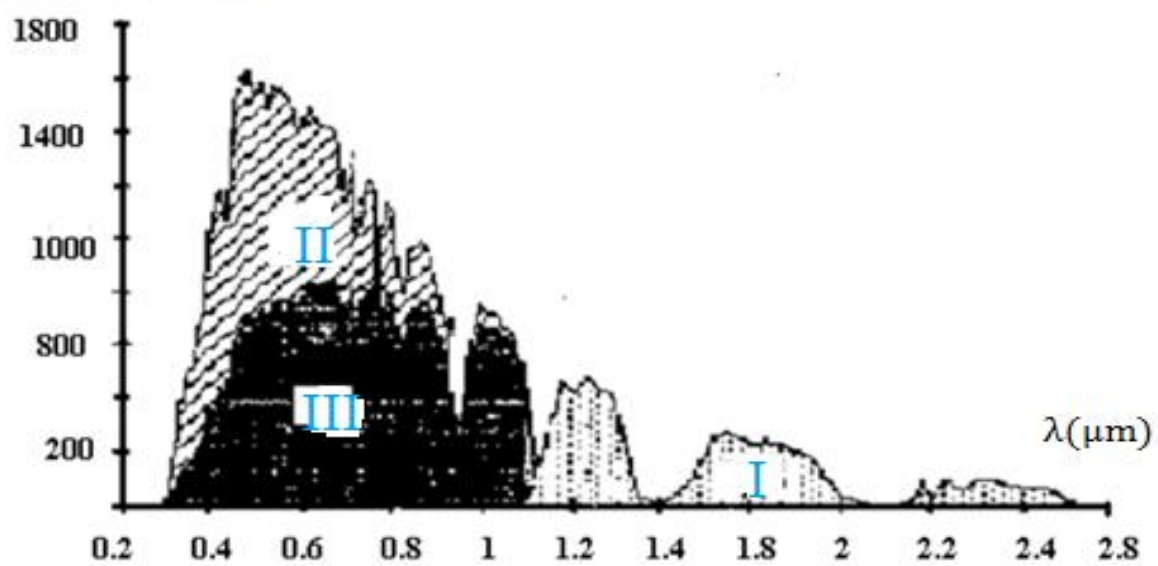


Figure I-5 : zone utile pour le silicium du spectre solaire AM_{1,5}.

II.1. Définition d'un semi-conducteur :

Un semi-conducteur est un matériau où les électrons périphériques se répartissent entre deux bandes d'énergie séparées par un intervalle d'énergie appelé bande interdite (appelée gap) de l'ordre de 1 eV à une température supérieure à 0 °K. Sa conductivité est intermédiaire entre les isolants et les métaux. On peut les classer en :

- Eléments simples : Si - Ge - C ...
- Composés minéraux binaires : GaAs - InSb ...
- Composés ternaires : GaAlAs, ...

II.2. Les types de semi-conducteurs :

II.2.1. Semi-conducteur intrinsèque :

Un semi-conducteur est dit intrinsèque s'il est dépourvu de toute impureté capable de modifier la densité de porteurs. Les électrons de la bande de conduction sont créés par l'excitation thermique d'électrons liés de la bande de valence. On résulte que :

$$n = p = n_i \quad (\text{II. 1}) \quad \text{donc} \quad n p = n_i^2 \quad (\text{II. 2})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} n = N_c \exp \frac{E_F - E_c}{k_B T} \\ p = N_v \exp \frac{E_v - E_F}{k_B T} \end{array} \right. \quad (\text{II. 3}) ; \quad \left\{ \begin{array}{l} N_c = 2 \left(\frac{2\pi m_n^* k_B T}{h^2} \right)^{3/2} \\ N_v = 2 \left(\frac{2\pi m_p^* k_B T}{h^2} \right)^{3/2} \end{array} \right. \quad (\text{II. 4})$$

D'autre part on posant :

$$e\phi_{F_i} = E_F - E_{F_i} \quad (\text{II. 5})$$

Les expressions précédentes deviennent :

$$\left\{ \begin{array}{l} n = n_i \exp \left(\frac{e\phi_{F_i}}{k_B T} \right) \\ p = n_i \exp \left(\frac{-e\phi_{F_i}}{k_B T} \right) \end{array} \right. \quad (\text{II. 6})$$

n_i : est appelée densité de porteurs intrinsèques, c'est une caractéristique du semi-conducteur à une température donnée.

$$n p = N_c N_v \exp \left(-\frac{E_g}{k_B T} \right) \quad (\text{II. 7})$$

$$n_i = (N_c N_v)^{1/2} \exp\left(-\frac{E_g}{2k_B T}\right) \quad (\text{II. 8})$$

Cette densité de porteurs intrinsèques est une fonction exponentielle du gap du matériau et de la température, à la température ambiante, on obtient :

	Si	Ge	GaAs	InP
n_i (cm ⁻³)	10 ¹⁰	2.10 ¹³	3.10 ⁶	3.10 ⁷

Tableau II-1: La densité de porteurs intrinsèques de quelques semi-conducteurs

En remplaçant les densités de porteurs par leurs expressions respectives, l'égalité précédente nous permet de définir le niveau de Fermi pour un semi-conducteur intrinsèque E_{F_i} :

$$n = p \Rightarrow N_c \exp\left(\frac{E_F - E_c}{k_B T}\right) = N_v \exp\left(\frac{E_v - E_F}{k_B T}\right) \quad (\text{II. 9})$$

$$E_{F_i} = \frac{E_c + E_v}{2} + \frac{3}{4} k_B T \ln \frac{N_v}{N_c} \quad (\text{II. 10})$$

Sachant qu'à la température ambiante (300°K), $k_B T$ est très inférieur au gap. Ce niveau se trouve très proche du milieu de la bande interdite :

$$E_{F_i} \approx \frac{E_c + E_v}{2} \quad (\text{II. 11})$$

N_c est la densité effective des électrons dans la bande de conduction.

N_v est la densité effective des trous dans la bande de valence.

m_n^* , m_p^* sont respectivement les masses effectives des électrons et des trous.

E_c , le niveau du bas de la bande de conduction.

E_v , le niveau du haut de la bande de valence.

k_B , la constante de Boltzmann

T , la température absolue du matériau (en °K).

E_F , le niveau de Fermi

II.2.1. Semi-conducteur extrinsèque :

Un semi-conducteur extrinsèque est un semi-conducteur intrinsèque dopé par des impuretés spécifiques. Il existe ainsi deux types de semi-conducteurs extrinsèques : type N et type P.

II.2.2.1. Semi-conducteur de type N:

On obtient un semi-conducteur de type N en dopant le cristal de silicium avec des atomes possédant 5 électrons de valence sur leur couche périphérique. Par exemple, le phosphore appartenant à la 5^{ème} colonne de la classification périodique des éléments. Quatre de ces cinq électrons de valence du phosphore sont mis en commun avec les atomes de silicium voisins pour réaliser des liaisons de covalence. Le 5^{ème} électron inutilisé, est très faiblement lié à l'atome pentavalent. Une très faible énergie suffit pour le libérer et il se retrouve (libre) dans la bande de conduction. L'atome donneur a perdu sa neutralité pour devenir un ion positif fixe.

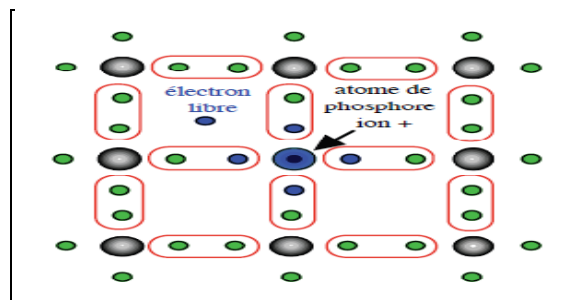


Figure II-1 : libération par de l'électron de l'atome du phosphore.

Si tous les atomes donneurs sont ionisés, la densité des électrons est alors :

$$n = N_d \quad (\text{II. 12})$$

D'autre part, puisque $np = n_i^2$ la densité de trous est donnée par :

$$p = \frac{n_i^2}{N_d} \quad (\text{II. 13})$$

Les électrons sont les porteurs majoritaires et les trous, les porteurs minoritaires.

Le niveau Fermi E_{F_n} :

Dans la mesure où les densités de porteurs sont données par les expressions :

$$n = N_d = N_C e^{-(E_c - E_{F_n})/k_B T} \quad (\text{II. 14})$$

Donc, l'expression du niveau Fermi est donnée par rapport au niveau E_c :

$$E_{F_n} = E_c - k_B T \ln\left(\frac{N_c}{N_d}\right) \quad (\text{II. 15}).$$

En tenant compte de la position du niveau de Fermi intrinsèque, cette relation devient alors:

$$E_{F_n} = E_{F_i} + k_B T \ln\left(\frac{N_d}{n_i}\right) \quad (\text{II. 16}).$$

II.2.2.2. Semi-conducteur de type P:

On obtient un semi-conducteur dopé P en injectant dans le silicium des atomes de la 3^{ème} colonne comme le bore qui possède trois électrons périphériques. Il manque un électron à l'atome trivalent de bore pour réaliser les liaisons covalentes avec les quatre atomes de silicium qui l'entourent. En fait, les électrons participant aux liaisons sont indiscernables les uns des autres. Tout se passe alors comme si un des atomes voisins de silicium avait cédé un électron à l'atome trivalent de bore, créant ainsi un trou dans le cristal de silicium. L'atome de bore qui capte un électron d'un atome de silicium voisin est appelé atome accepteur, il a perdu sa neutralité pour devenir un ion négatif fixe.

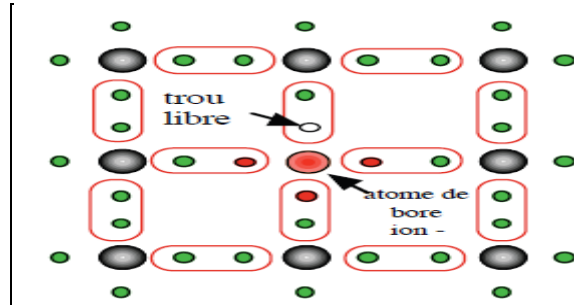


Figure II-2 : silicium dopé au bore, libération d'un trou

Si tous les atomes accepteurs sont ionisés, la densité des trous est alors:

$$p = N_a \quad (\text{II. 17})$$

D'autre part, puisque $n p = n_i^2$, la densité de trous est donnée par:

$$n = \frac{n_i^2}{N_a} \quad (\text{II. 18})$$

Les trous sont les porteurs majoritaires et les électrons, les porteurs minoritaires.

Le niveau Fermi E_{Fp} :

Dans la mesure où les densités de porteurs sont données par les expressions :

$$p = N_a = N_v e^{-(E_v - E_{Fp})/k_B T} \quad (II. 19)$$

Donc, l'expression du niveau Fermi par rapport à E_v est donnée par :

$$E_{Fp} = E_v + k_B T \ln\left(\frac{N_v}{N_a}\right) \quad (II. 20)$$

En tenant de la position du niveau de Fermi intrinsèque, cette relation devient alors :

$$E_{Fp} = E_{Fi} - k_B T \ln\left(\frac{N_a}{n_i}\right) \quad (II. 21)$$

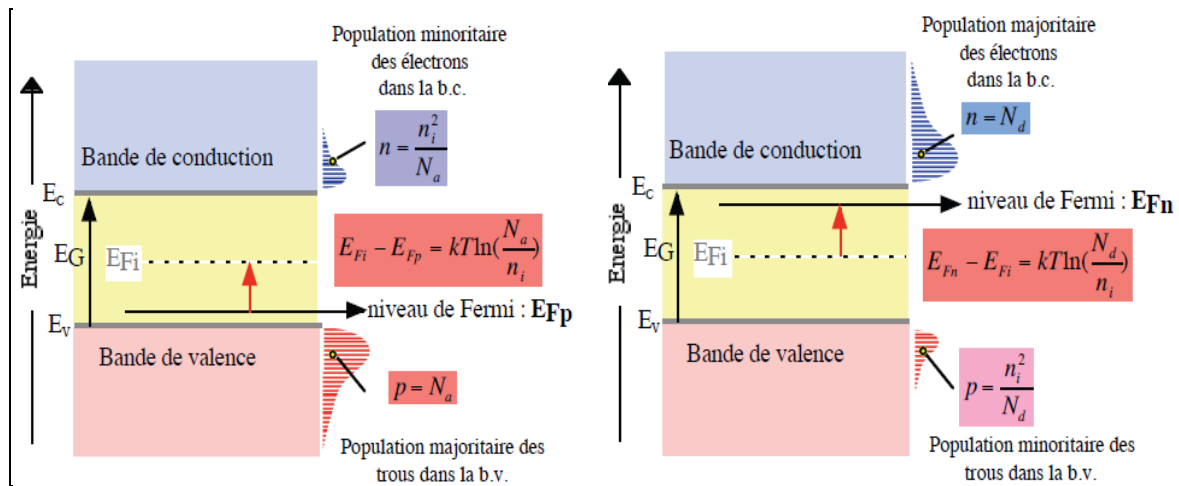


Figure II-3 : Position du niveau de Fermi dans les deux types de semi-conducteur.

II.3. Courant dans les semi-conducteurs:

Sous l'effet d'un champ électrique \vec{E} , il y aura un déplacement des porteurs de charge donc un courant de conduction \vec{J}_c donné par la loi d'ohm $\vec{J} = \sigma \vec{E}$ (II. 22)

où σ est conductivité du semi-conducteur (égale à l'inverse de la résistivité ρ) et est donnée par la relation :

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = q (n \mu_n + p \mu_p) \quad (II. 23)$$

exemple :

	Si	Ge	Gap	GaAs	GaSb	InP	InAs	InSb
μ_n	1350	3600	300	8000	5000	4500	30000	80000
μ_p	480	1800	150	300	1000	100	450	450

Tableau II-2 la mobilité des électrons et des trous de quelques semi- conducteur.

Pour les électrons : $\vec{J}_n = nq\mu_n\vec{E}$ avec μ_n , la mobilité des électrons.

Pour les trous : $\vec{J}_p = pq\mu_p\vec{E}$ avec μ_p , la mobilité des trous

q est la valeur de la charge d'électron.

Ainsi le courant total de conduction : $\vec{J}_c = \vec{J}_n + \vec{J}_p = q(n\mu_n + p\mu_p)\vec{E}$ (II. 24)

Sous l'effet d'un gradient de concentration, il y aura un courant de diffusion \vec{J}_D selon la loi de Fick :

Pour les électrons : $\vec{J}_{Dn} = q D_n \text{grad } n$ où D_n est le coefficient de diffusion des électrons.

Pour les trous : $\vec{J}_{Dp} = -qD_p \text{grad } p$ où D_p est le coefficient de diffusion des électrons.

Ainsi le courant total de diffusion est:

$$\vec{J}_D = q(D_n \text{grad } n - D_p \text{grad } p) \quad (\text{II. 25})$$

Selon les relations ci-dessus, les courants totaux des électrons et des trous s'écrivent alors :

$$\begin{cases} \vec{J}_n = q n \mu_n \vec{E} + q D_n \text{grad } n \\ \vec{J}_p = q p \mu_p \vec{E} - q D_p \text{grad } p \end{cases} \quad (\text{II-26})$$

Si on considère le modèle de type linéaire (à une dimension selon x avec \vec{i} comme vecteur unitaire), les deux équations deviennent alors :

$$\begin{cases} \vec{J}_n(x) = q n(x)\mu_n \vec{E}(x) + qD_n \frac{dn(x)}{dx} \vec{i} \\ \vec{J}_p(x) = q p(x)\mu_p \vec{E}(x) - qD_p \frac{dp(x)}{dx} \vec{i} \end{cases} \quad (\text{II. 27})$$

Pour un semi-conducteur non dégénéré, ce qui est souvent le cas des cellules solaires, les mobilités de porteurs sont liées à leurs coefficients de diffusion par la relation d'Einstein :

$$D_{n,p} = \frac{K_B T}{q} \mu_{n,p} \quad (\text{II. 28})$$

Le champ électrostatique est un gradient du potentiel électrostatique V : ($\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}}V$), selon x , il est donné par:

$$E(x) = -\frac{dV(x)}{dx} \quad (\text{II. 29})$$

Hors équilibre, la conservation du nombre de particules permet d'écrire les équations de continuité des électrons et des trous sous la forme.

$$\begin{cases} \frac{\partial n}{\partial t} = G_n - R_n + \frac{1}{q} \text{div } \vec{J}_n \\ \frac{\partial p}{\partial t} = G_p - R_p - \frac{1}{q} \text{div } \vec{J}_p \end{cases} \quad (\text{II. 30})$$

G_n, G_p est le taux de génération des électrons et des trous.

R_n, R_p est le taux de recombinaison des électrons et des trous

L'étude d'un dispositif à semi-conducteur consiste à résoudre ce système d'équations, avec celui des équations de courants (II-26)

Ainsi que l'équation de Poisson ($\text{div } \vec{E} = \rho/\epsilon$)

$$\text{div } \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon} = \frac{q(p - n + N_d - N_a)}{\epsilon} \quad (\text{II.31})$$

ρ est la charge d'espace et ϵ est la permittivité du semi-conducteur ($\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$) avec ϵ_0 , la permittivité du vide et ϵ_r la permittivité relative du semi-conducteur (pour Si, $\epsilon_r=11,7$).

En régime permanent : $\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{\partial p}{\partial t} = 0$

II.4. Coefficient d'absorption :

Soit Φ_i le flux de photons incidents, le flux à une profondeur x à l'intérieur du semi-conducteur est donné par la loi Beer-Lambert:

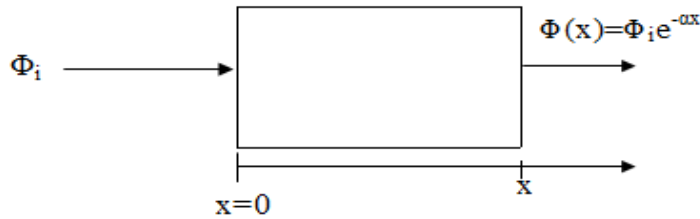


Figure II-4 : La loi de Beer-Lambert

$$\Phi(x) = \Phi_i \exp(-\alpha \cdot x) \quad (\text{II. 32})$$

Avec α le coefficient d'absorption du semi-conducteur qui dépend du matériau et de la longueur d'onde de l'énergie incidente, il s'exprime en cm^{-1} .

L'indice d'absorption est lié directement au coefficient d'extinction k du matériau par la relation suivante :

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad (\text{II. 33})$$

L'absorption des photons diminue avec l'accroissement des longueurs d'ondes. Elle est nulle pour des énergies des photons inférieures au gap du semi-conducteur.

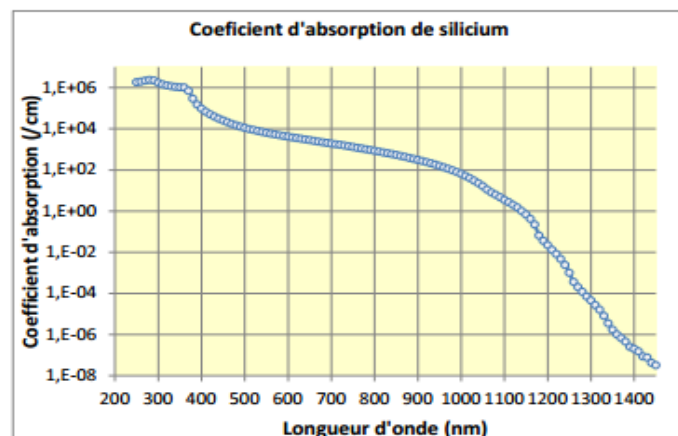


Figure II-5: Le coefficient d'absorption du silicium en fonction de la longueur d'onde

La profondeur d'absorption moyenne (cm) des photons en fonction de leurs longueurs d'onde est l'inverse du coefficient d'absorption et dont la figure est représentée ci-dessous.

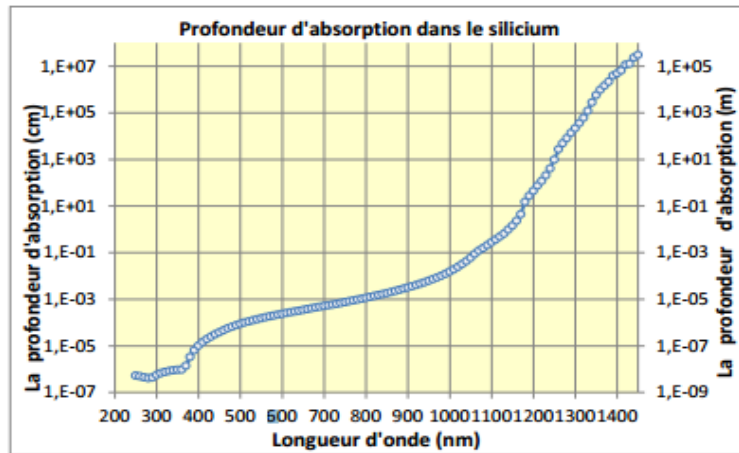


Figure II-6 : La profondeur d'absorption dans le silicium en fonction de la longueur d'onde. On remarque qu'il faut beaucoup plus d'épaisseur de matériau pour les photons d'énergie plus petites que ceux d'énergie plus grandes, d'où le choix d'un émetteur beaucoup plus mince que la base.

II.5 Génération et recombinaison des paires électron-trou:

Lorsque l'électron descend de la bande de conduction vers la bande de valence, le semi-conducteur restitue l'énergie sous forme de chaleur ou émet un photon qui possède une énergie égale à E_g .

En sens inverse, un photon qui possède une énergie supérieure ou égale à E_g a le pouvoir de générer une paire électron-trou.

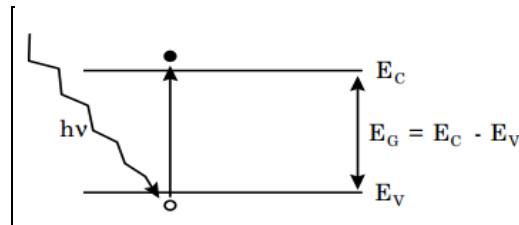


Figure II-7 : création d'une paire électron-trou par photon.

II.5.1 Génération :

La génération G est la création des porteurs dans le semi-conducteur, elle est caractérisée par un paramètre qui mesure le nombre de porteurs créés par unité de volume et par unité de temps ($cm^{-3} \cdot s^{-1}$)

La génération peut être due à l'agitation thermique ou d'une excitation du semi-conducteur par une source extérieure (optique, électrique...).

II.5.2 Recombinaison :

La recombinaison est le processus inverse de la génération, elle est caractérisée par un paramètre R ($\text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$) propre au matériau. Quant aux recombinaisons, elles sont de plusieurs types :

a. Recombinaison directe (inter-bandes) :

L'excès de l'énergie de l'électron recombiné est cédé sous forme optique. Le processus est important dans les semi-conducteurs à gap direct (ex: GaAs). Le taux de recombinaison est donné par :

$$R = K(np - n_i^2) \quad (\text{II. 34})$$

K est une constante de proportionnalité, pour le silicium, on a $k=9.5 \times 10^{-5} \text{cm}^3/\text{s}$

Dans un matériau dopé et en régime de faible injection, on suppose constante la densité de porteurs majoritaires et on écrit le taux de recombinaison des porteurs minoritaires sous la forme :

-Pour le semi-conducteur de type P : $R_n = \frac{\Delta n}{\tau_n}$

-Pour le semi-conducteur de type N : $R_p = \frac{\Delta p}{\tau_p}$

τ_n et τ_p sont les durées de vie des électrons et des trous minoritaires respectivement.

b. Recombinaisons Auger:

La recombinaison Auger se produit lorsque l'énergie de l'électron qui se recombine dans la bande de valence est transférée sous forme d'énergie cinétique à un autre électron libre. Cette énergie se libère sous forme de phonons. Ce type de recombinaison se produit surtout dans les régions fortement dopées. Le taux de recombinaison est alors donné par :

$$(R_r)_{\text{Auger}} = (C_n n + C_p p)(pn - n_i^2) \quad (\text{II. 35})$$

Avec C_n et C_p sont les probabilités de capture des électrons et des trous.

Leur valeur sont respectivement : $C_n=2.2 \times 10^{-31} \text{cm}^6/\text{s}$, $C_p=9.9 \times 10^{-32} \text{cm}^6/\text{s}$

c. Recombinaisons RSH (Read-Schokley-Hall):

Pour un matériau moins dopé, les défauts et les pièges situés à des niveaux profonds (dans la bande interdite) limitent la durée de vie. Elles sont prépondérantes dans les semi-conducteurs à gap indirect (ex : Silicium).

Le taux de recombinaison est donné par:

$$(R_r)_{RSH} = \frac{C_n C_p N_R (np - n_i^2)}{C_n (n + n_i e^{-(E_i - E_R)/kT}) + C_p (p + n_i e^{(E_i - E_R)/kT})} \quad (\text{II. 36})$$

N_R est la concentration des centres recombinants d'énergie E_R ,

E_i , le niveau d'énergie intrinsèque de Fermi,

C_n, C_p sont les probabilités de capture des électrons et des trous par ces centres recombinants,

n , la concentration des électrons,

p , la concentration des trous.

d. Recombinaisons en surface :

La surface du semi-conducteur est perturbée à cause des traitements mécaniques et chimiques qu'elle subit. La recombinaison au niveau de la surface est plus importante que celle du volume donnant naissance à un courant de diffusion. Par exemple, dans le cas d'un semi-conducteur de type n, où une de ses surfaces est en $x=0$, on a, en cette position :

$$D_p \frac{\delta \Delta p}{\delta x} (x = 0) = S \Delta p \quad (\text{II. 37})$$

S , est la vitesse de recombinaison en surface des trous.

D_p , est le coefficient de diffusion des trous.

Δp , est la variation de la concentration des trous par rapport à l'équilibre.

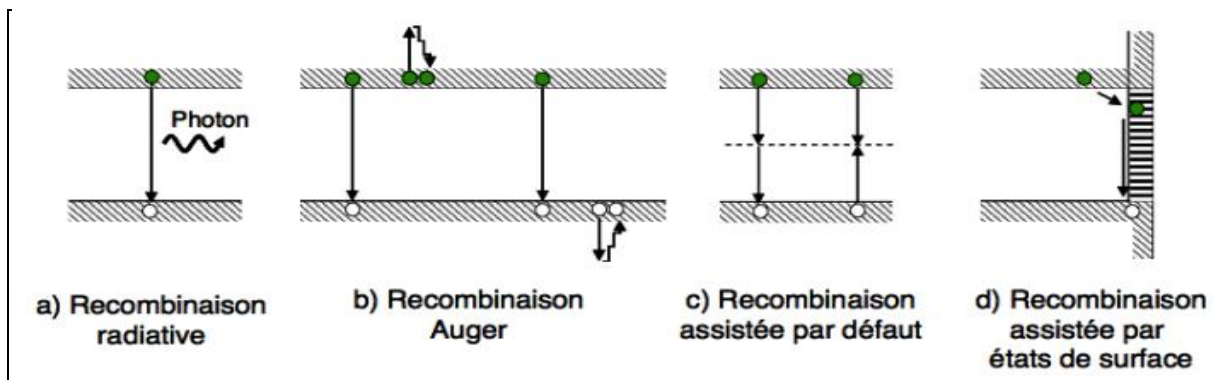


Figure II-7: Représentation des différents mécanismes de recombinaisons.

II.6. La jonction PN à l'équilibre:

L'une des structures de base très utilisée pour fabriquer une cellule solaire est la jonction PN. Une jonction PN est la juxtaposition de deux régions de types différents d'un même monocristal de semi-conducteur.

Lorsque le contact est réalisé, les électrons de la région N, où ils sont majoritaires, vont diffuser vers la région P où ils sont minoritaires.

De même, les trous de la région P vont se déplacer par diffusion vers la région N. Le départ de ces électrons et de ces trous va provoquer l'apparition, de part et d'autre de la jonction, de deux zones non neutres l'une comprenant des impuretés ionisées positivement (zone N) et l'autre comprenant des impuretés ionisées négativement (zone P).

La présence de ces charges positives et négatives donne naissance à un champ électrique interne dont le sens est tel qu'il s'oppose à la diffusion des porteurs majoritaires.

À l'équilibre, tout se passe comme si deux courants identiques et opposés se superposaient, donnant un courant résultant nul : l'un est provoqué par la diffusion de gradients de concentration et l'autre de conduction dû à la présence du champ électrique.

La zone comprenant des charges non compensées est dite zone de charge d'espace (ZCE) ou zone désertée (ou de déplétion).

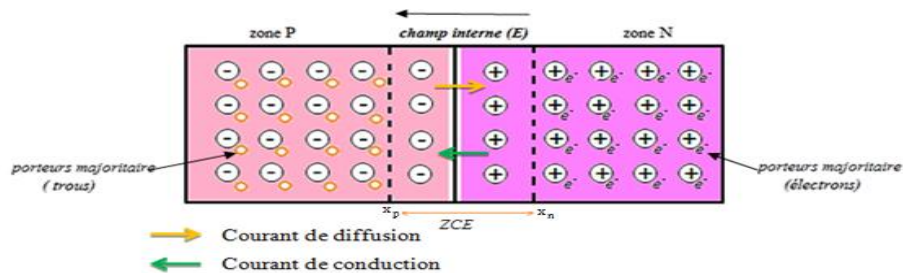


Figure II-8: Etat d'équilibre d'une jonction PN.

La charge d'espace dans chacune des régions de la jonction est calculée en tenant compte de toutes les charges qui existent en un point du semi-conducteur, c'est-à-dire d'une part des charges mobiles que sont les électrons et les trous, et d'autre part des charges fixes qui peuvent être localisées sur des donneurs ou accepteurs ionisés ou sur des centres profonds.

En un point d'abscisse x , la densité de charge d'espace est donnée par :

$$\rho(x) = q(p(x) - n(x) + N_a^+(x) - N_d^-(x)) \quad (\text{II. 38})$$

$N_D^+(x)$ Et $N_A^-(x)$ représentent respectivement les densités des centres donneurs et accepteurs.

Pour $x \geq x_n$ et $x \leq x_p \rightarrow \rho(x)$ (II. 39)

Pour $x_p < x < 0 \rightarrow \rho(x) = -qN_a$ (II. 40)

Pour $0 < x < x_n \rightarrow \rho(x) = qN_d$ (II. 41)

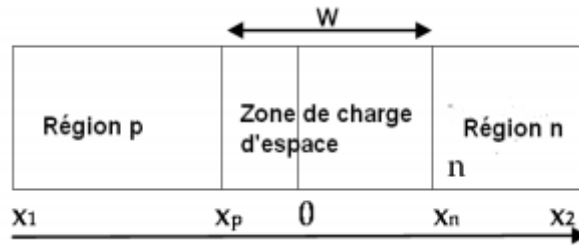


Figure II-9: paramètre géométrique de la jonction PN

À une dimension, le champ électrique traversant la jonction est donné selon l'équation de poisson

($\text{div } \vec{E} = \rho/\epsilon$) :

Pour $x_p \leq x \leq 0$ $E = -\frac{qN_a}{\epsilon}(x - x_p)$ (II. 42)

Pour $0 \leq x \leq x_n$ $E = \frac{qN_d}{\epsilon}(x - x_n)$ (II. 43)

Pour $x_p \leq x \leq 0$ $V = \frac{qN_a}{2\epsilon}(x - x_p)^2 + V_p$ (II. 44)

Pour $0 \leq x \leq x_n$ $V = -\frac{qN_d}{2\epsilon}(x - x_n)^2 + V_n$ (II. 45)

Où :

$$\begin{cases} x_n = \left(\frac{2\epsilon kT}{q^2 N_d}\right)^{\frac{1}{2}} \left[\frac{1}{1 + \frac{N_d}{N_a}} \ln \left(\frac{N_a N_d}{n_i^2}\right) \right]^{\frac{1}{2}} \\ x_p = -\left(\frac{2\epsilon kT}{q^2 N_a}\right)^{\frac{1}{2}} \left[\frac{1}{1 + \frac{N_a}{N_d}} \ln \frac{N_d N_a}{n_i^2} \right]^{\frac{1}{2}} \end{cases} \quad (II. 46)$$

La largeur de la ZCE est : $w = x_n - x_p$ (II. 47)

La tension de diffusion est : $V_d = V_n - V_p = \frac{q}{2\epsilon}(N_d w_n^2 + N_a w_p^2)$ (II. 48)

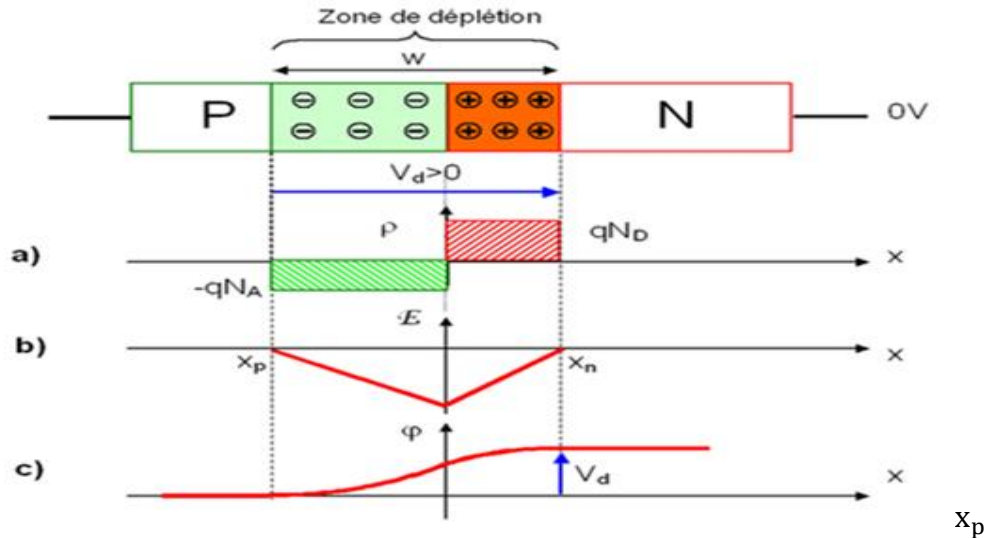


Figure II-10: Jonction PN à l'équilibre : a) distribution des impuretés ionisées ; b) distribution du champ électrique ; c) variation du potentiel.

II.6.1. La jonction PN polarisée:

La polarisation d'une jonction PN consiste à imposer une différence de potentiel entre les régions N et P. On distingue alors deux types de polarisation :

- Polarisation directe,
- Polarisation inverse.

1) Polarisation directe ($V_n - V_p < 0$): On parle de polarisation directe lorsque le potentiel du côté P est supérieur à celui du côté N. Une polarisation directe abaisse la barrière de potentiel, ce qui favorise la diffusion des porteurs majoritaires de chaque région vers l'autre et donc donner naissance à un courant direct (de diffusion).

2) Polarisation inverse ($V_n - V_p > 0$): le potentiel est plus faible du côté P que du côté N. Il y a dans ce cas injection de porteurs minoritaires de chaque côté (injection de trous côté N et d'électrons côté P). Elle élève la barrière de potentiel et peut annuler le courant de diffusion, il reste alors le seul courant inverse (ou courant de saturation I_s) :

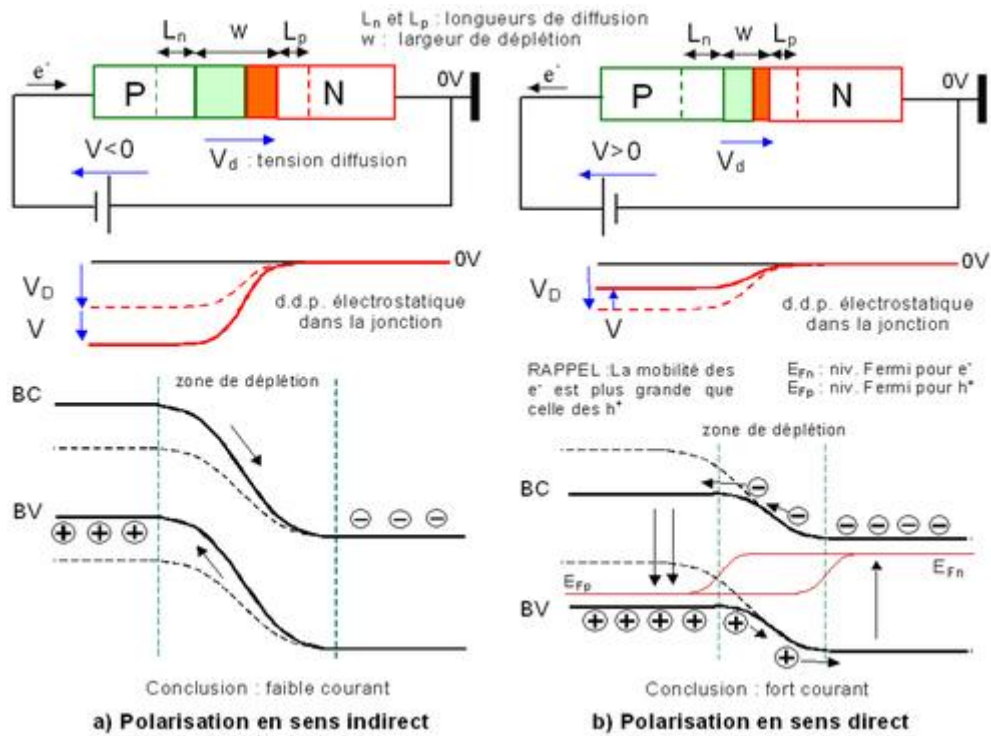


Figure II-11: polarisation d'une jonction PN.

En utilisant les équations de continuité et de courant, en régime de faible injection, les équations se simplifient davantage

Considérons les électrons dans la région P et les trous dans la région Non a :

$$\begin{cases} \frac{\partial n}{\partial t} = -\frac{1}{q} \frac{\partial j_n(x)}{\partial x} - \frac{n - n_p}{\tau_n} \\ \frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q} \frac{\partial j_p(x)}{\partial x} - \frac{p - p_n}{\tau_p} \end{cases} \quad (\text{II. 49})$$

On prend en considération le courant le courant de diffusion des électrons et des trous, ces relations deviennent :

$$\begin{cases} \frac{\partial n}{\partial t} = D_n \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} - \frac{n - n_p}{\tau_n} \\ \frac{\partial p}{\partial t} = D_p \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - \frac{p - p_n}{\tau_p} \end{cases} \quad (\text{II. 50})$$

Si la polarisation de la jonction est constante, le régime est stationnaire de sorte que $\frac{\partial n,p}{\partial t} = 0$

Alors on obtient :

$$\begin{cases} \frac{d^2 n}{dx^2} - \frac{\Delta n}{L_n^2} = 0 \\ \frac{d^2 p}{dx^2} - \frac{\Delta p}{L_p^2} = 0 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} \Delta n = n - n_p \\ \Delta p = p - p_n \end{cases} \rightarrow \begin{cases} L_n = \sqrt{D_n \tau_n} \\ L_p = \sqrt{D_p \tau_p} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} J_n = q D_n \frac{dn}{dx} \\ J_p = q D_p \frac{dp}{dx} \end{cases} \quad (\text{II.51})$$

$$J = J_n + J_p$$

L_n, L_p sont respectivement les longueurs de diffusion des électrons et des trous.

Sachant La solution de l'équation est de la forme générale :

$$\begin{cases} n - n_p = A \exp\left(\frac{-x}{L_n}\right) + B \exp\left(\frac{x}{L_n}\right) \\ p - p_n = A \exp\left(\frac{-x}{L_p}\right) + B \exp\left(\frac{x}{L_p}\right) \end{cases} \quad (\text{II.52})$$

Les constantes A et B sont déterminées par les conditions aux limites.

La distribution d'électrons dans la région de type p, et par suit la distribution de trous dans la région de type n sont données par :

$$\begin{cases} n - n_p = \frac{n_p}{\sinh\left(\frac{d_p}{L_n}\right)} \left(\exp\left(\frac{qv}{k_B T}\right) - 1 \right) \sinh\left(\frac{x - x'_c}{L_n}\right) \\ p - p_n = \frac{p_n}{\sinh\left(\frac{d_n}{L_p}\right)} \exp\left(\frac{qv}{k_B T}\right) \left(\exp\left(\frac{qv}{k_B T}\right) - 1 \right) \sinh\left(\frac{x_c - x}{L_p}\right) \end{cases} \quad (\text{II.53})$$

où :

$d_n = x_c - x_n$ et $d_p = x_p - x'_c$ Représentent les longueurs des régions neutres de type N et de type P respectivement.

Les densités de courant d'électrons et de trous que nous avons calculées sont relatives à des régions différentes de la jonction. Le courant total traversant la jonction est la somme des courants d'électrons et de trous en un même point. Pour calculer ce courant supposons dans un premier temps que la zone de charge d'espace n'est le siège d'aucun mécanisme de génération-recombinaison. Les courants J_n et J_p sont alors constants à la traversée de cette zone et on peut écrire les égalités

$$J_n(x_p) = J_n(x_n)$$

$$J_p(x_n) = J_p(x_p)$$

on considère le courant de conduction est constant on a :

$$J = J_n(x_p) + J_p(x_p) = J_n(x_n) + J_p(x_n) = J_n(x_p) + J_p(x_n) \quad (\text{II.54})$$

En faisant $x = x_n$ dans les expressions de $J_p(x)$, et $x = x_p$ dans les expressions de $J_n(x)$ on obtient :

$$J = J_s (e^{\frac{qV}{k_B T}} - 1) \quad (\text{II. 55})$$

Avec :

$$J_s = \frac{qn_i^2 D_p}{N_d L_p \text{th}\left(\frac{d_n}{L_p}\right)} + \frac{qn_i^2 D_n}{N_a L_n \text{th}\left(\frac{d_p}{L_n}\right)} \quad (\text{II. 56}) \text{ Courant de saturation de la diode.}$$

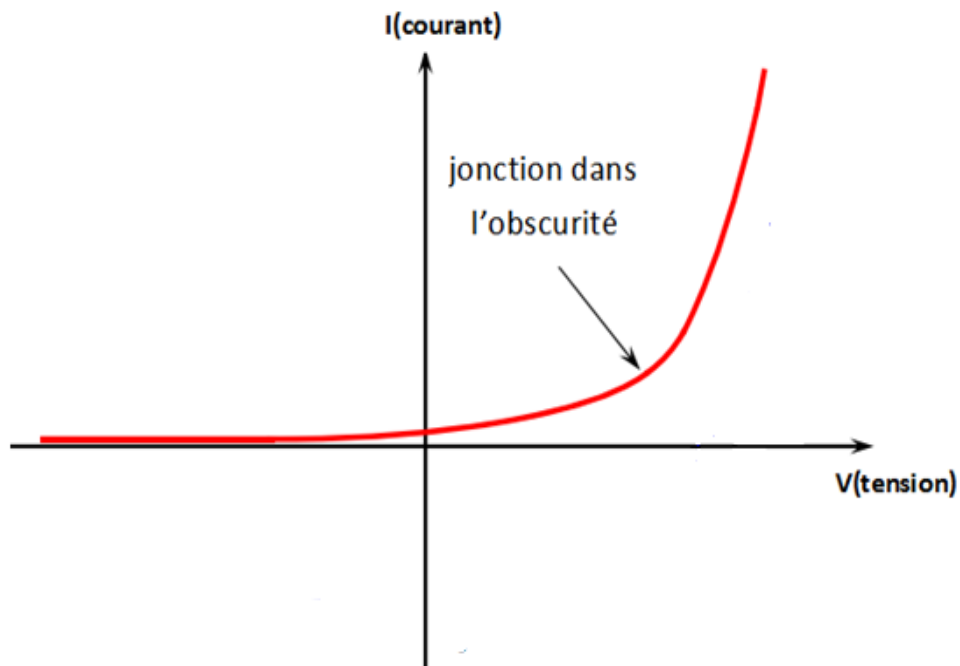


Figure II-12 : La caractéristique $I(V)$ de la jonction PN sous obscurité

III.1.La cellule solaire:

La cellule photovoltaïque est l'élément de base dans la conversion du rayonnement solaire. Il convient d'analyser la pénétration dans le matériau du faisceau incident de lumière et comment il est absorbé dans l'épaisseur de la cellule en fonction de la longueur d'onde des photons incidents du spectre solaire.

III.2.Principe de l'effet photovoltaïque

Le but des cellules photovoltaïques est de convertir l'énergie lumineuse provenant du soleil en énergie électrique. Ceci se fait en trois étapes :

- Absorption des photons de la lumière solaire,
- Conversion de l'énergie reçue par les photons en énergie électrique (particules électriques libres); ce qui correspond à la création de paires électron-trou dans le matériau semi-conducteur,
- Collection des particules dans un circuit électrique externe.

Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électron-trou créées est nécessaire. C'est le cas de la jonction PN vu au chapitre précédent qui est la structure de base d'une cellule solaire.

Les photons incidents créent des paires électron-trou les 3 différentes zones de la cellule : dans les zones neutres N et P et dans la zone de charge d'espace ZCE (figure III-).

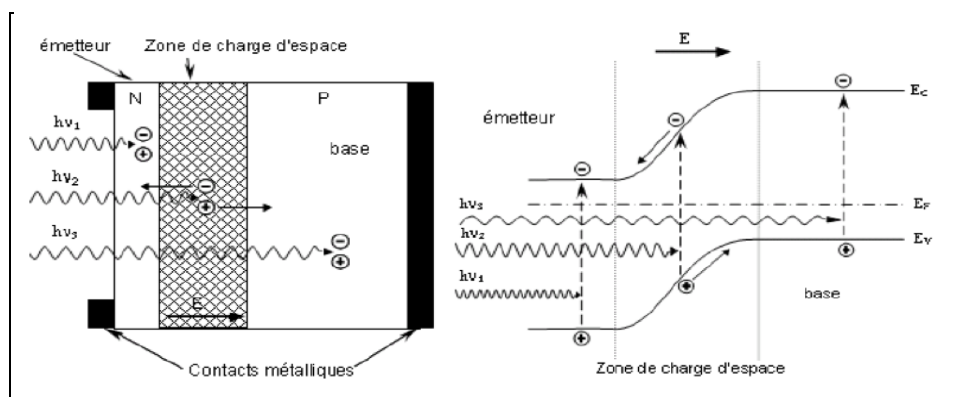


Figure III-1 : schémas du principe de fonctionnement d'une cellule solaire.

Les schémas de principe de fonctionnement d'une cellule solaire sont représentés sur la (figure III-1). Une cellule solaire standard en silicium est constituée d'un substrat de type P (appelé base dont les porteurs de charge majoritaires sont les trous) et d'une zone en face avant fortement dopée N⁺ appelée émetteur où les porteurs majoritaires sont les électrons.

La jonction de ces deux zones va entraîner la création de la zone de charge d'espace (ZCE) où les porteurs sont séparés par la création d'un champ électrique. Les charges positives (trous) minoritaires dans l'émetteur, si elles arrivent au bord de la ZCE, sont entraînées par le champ électrique E puis se retrouvent dans la base où elles sont majoritaires. Le phénomène inverse se produit pour les électrons, minoritaires dans la base. Enfin, les contacts métalliques permettent la collecte des charges vers le circuit extérieur : ils se présentent sous forme de grille sur la face avant, et généralement pleine plaque sur la face arrière.

III.3 Choix du matériau :

Le matériau à choisir doit être capable d'absorber le maximum d'énergie solaire (la partie la plus intense du spectre solaire) afin de libérer des électrons qui deviennent alors des porteurs de charge électrique mobiles laissant derrière eux des vacances ; des trous ; qui à leur tour, peuvent se déplacer dans le matériau. Le matériau qui vient le premier à l'esprit est le matériau semi-conducteur car il a une bande interdite convenable au spectre solaire (1-1,5 eV).

III.4. Fabrication d'une cellule solaire :

1. Extraction et purification du silicium :

Il nous faut une purification chimique pour obtenir du silicium métallurgique pour cela de nombreux procédés ont été développés par les différents producteurs mondiaux de silicium. Au final, le procédé de purification aboutit à l'obtention de lingots de silicium purifiés à 99.99 %

2. Obtention des lingots de silicium :

Une fois l'étape de purification terminée, vient l'étape de cristallisation du silicium liquide. Le produit issu de cette étape est un lingot de silicium à l'état solide. Il existe deux grandes méthodes de cristallisation. La première permet d'obtenir du silicium poly-cristallin (composé de plusieurs cristaux (grains)). La deuxième permet d'obtenir du silicium monocristallin (composé d'un seul cristal)

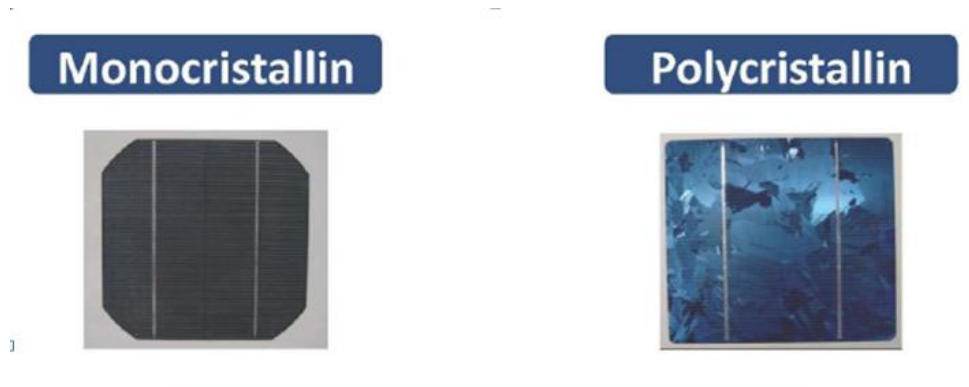


Figure III-2 : Les deux types de cellules

3. Obtention des wafers photovoltaïques :

Les lingots cylindriques (silicium monocristallin) ou parallélépipédiques (silicium poly-cristallin) de silicium obtenus à l'issue de l'étape de solidification sont ensuite sciés en fines plaques de l'ordre de 300 micromètres d'épaisseur qui sont appelées « wafers » (en anglais, "wafer" signifie "galette"). La coupe des lingots est effectuée par une scie à fil.

Compte-tenu de la faible épaisseur des tranches à découper (300 μm), le principal problème du sciage est la perte de découpe. Afin de minimiser ces pertes, la solution technique retenue est la scie à fil. En effet, la perte de découpe typique des scies à fil est de 200 μm à 240 μm , ce qui représente plus de 50% de perte.

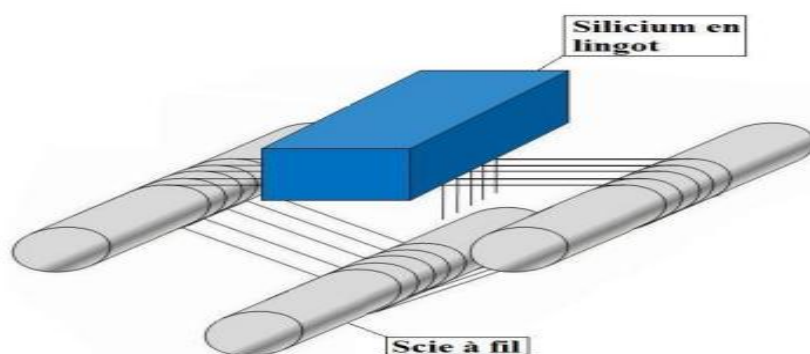


Figure III-3 : Une scie à fil

4. Dopage du silicium :

Après nettoyage par une solution chimique, les échantillons de silicium obtenus à l'issue de l'étape de sciage sont alors introduits dans un réacteur de croissance dans lequel va se dérouler l'étape de dopage (par diffusion thermique, par implantation ionique ou par épitaxie).

5. Traitements de surface :

5.1 La texturisation : (après nettoyage de la surface)

La texturisation 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 créé permet d'augmenter la surface et induit des réflexions multiples sur les facettes des pyramides. La texturisation assure ainsi le piégeage d'un maximum de lumière réduisant les pertes liées à la réflectivité.

Différents procédés sont utilisés pour réaliser la texturisation :

- Attaques chimiques basiques de la surface (KOH ou NaOH).
- Texturisation mécanique, plasma ou laser.

Ces méthodes peuvent faire passer la réflectivité effective de 40 % à moins de 10% en général.

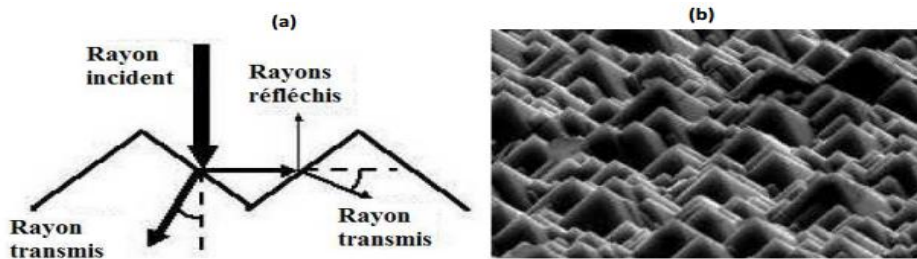


Figure III-4 : a) Trajectoire d'un rayon lumineux arrivant sur une surface texturée ; b) Plaque de silicium après texturisation.

5.2 La couche antireflet :

La texturisation de la surface de la cellule permet de limiter les réflexions de la face avant. Pour réduire encore plus la réflexion, une couche antireflet (CAR) est rajoutée. L'indice (n_{CAR}) et l'épaisseur (d_{CAR}) de cette couche sont ajustés en fonction des indices de matériau en présence et de la longueur d'onde du rayonnement incident, l'objectif étant de minimiser au maximum le coefficient de réflexion de la cellule en créant des interférences destructives de la réflexion.

$$n_{CAR} = \sqrt{n_0 n_{Si}} \quad (III.1)$$

$$d_{CAR} = \frac{(2p+1)\lambda}{4 n_{CAR}} \quad (III.2)$$

5.3. La passivation :

La surface des cellules est une source de recombinaison importante à cause des nombreux défauts cristallins présents liés à la discontinuité du cristal.

La passivation consiste à améliorer la qualité électronique en surface et par conséquent en volume du substrat, en neutralisant les sites néfastes actifs. Des matériaux tels que le nitrure du silicium SiN_x , l'oxyde du silicium SiO_2 permettent de passiver une grande partie de ces défauts.

5.4. Champ électrique dans la zone arrière (BSF) :

Afin de collecter les paires électron-trous créées par les radiations de grandes longueurs d'onde du spectre solaire, on réalise un champ électrique par transition abrupte de dopage, sur la face arrière de la cellule solaire, dans la zone même du contact ohmique. Ce champ électrique arrière s'appelle BSF en anglais (Back Surface Field). Les porteurs excédentaires ainsi créés au voisinage de cette zone, au lieu de s'y recombinaison, sont repoussés vers la région de charge d'espace de la jonction. Ils participent au photo-courant dans la mesure où la longueur de diffusion de ses porteurs de charge est plus importante que l'épaisseur totale de la couche de base de la cellule.

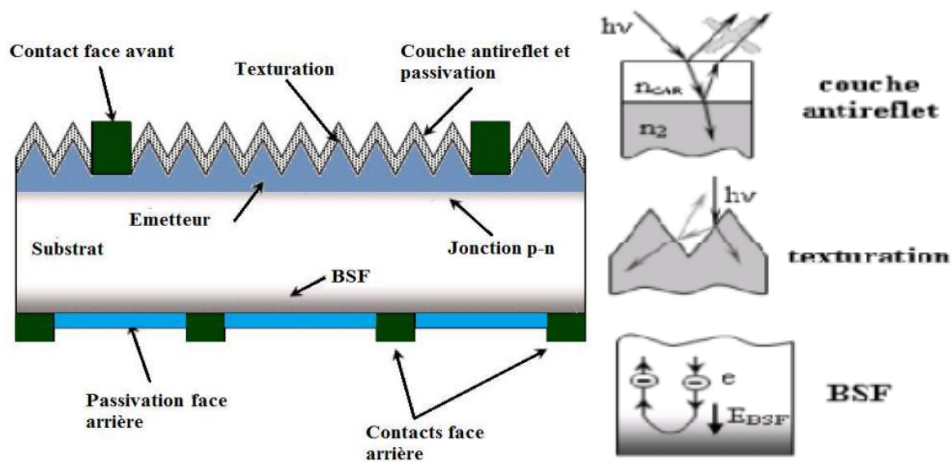


Figure III-5 : Compositions d'une cellule photovoltaïque



Silicium purifié Lingot Wafer Cellule Module Systèmes

Figure III-6 : Etapes principales de fabrication de cellule solaires

III.5 Caractéristique courant-tension $J(V)$ d'une cellule photovoltaïque :

Le courant délivré sur une charge par une cellule photovoltaïque éclairée s'écrit :

$$J(V) = J_{\text{obsc}}(V) - J_{\text{ph}} \quad (\text{III. 3})$$

Avec J_{ph} : Courant photo-généré et J_{obsc} : Courant à l'obscurité.

La caractéristique idéale $J(V)$ de la cellule contient deux composantes, la première est la caractéristique sous obscurité, la seconde étant le photo-courant :

$$J(V) = J_s \left(e^{\frac{qV}{k_B T}} - 1 \right) - J_{\text{ph}} \quad (\text{III. 4}) \quad (\text{Modèle à une diode})$$

Avec :

V : Tension aux bornes de la jonction,

J_s : Courant de saturation de la jonction,

$q = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$, la charge élémentaire d'un électron,

$K_B = 8.62 \times 10^{-5} \text{ eV} \cdot \text{K}^{-1}$, la constante de Boltzmann,

T : la température en degrés Kelvin.

Si on considère le courant de génération-recombinaison dans la ZCE, la caractéristique $J(V)$ devienne :

$$J(V) = J_{s1} \left(e^{\frac{qV}{k_B T}} - 1 \right) + J_{s2} \left(e^{\frac{qV}{2k_B T}} - 1 \right) - J_{\text{ph}} \quad (\text{III. 5}) \quad (\text{Modèle à deux diodes})$$

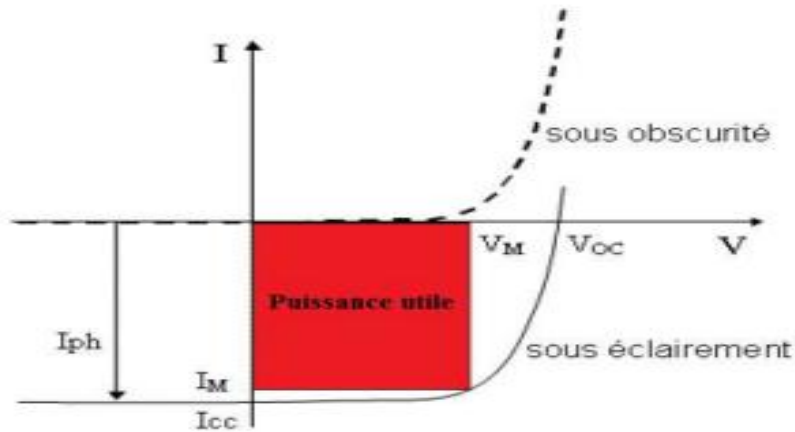


Figure III-7: Caractéristiques I(V) à l'obscurité et sous éclaircissement d'une cellule photovoltaïque

Si on tient compte des résistances série et parallèle (shunt), on aura la caractéristique réelle de la cellule (Figure III-8) et alors :

$$J = \left[J_{s1} \left(\exp \left(\frac{q(V - JR_s)}{k_B T} \right) - 1 \right) + J_{s2} \left(\exp \left(\frac{q(V - JR_s)}{2k_B T} \right) - 1 \right) \right] + \frac{V - JR_s}{R_{sh}} - J_{ph} \quad (\text{III. 6})$$

R_s : est la résistance série,



R_{sh} : est la résistance parallèle (shunt).

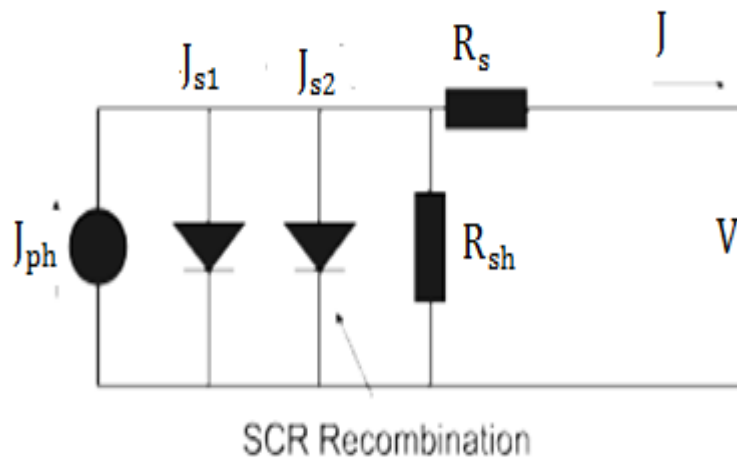


Figure III-8: Schéma électrique équivalent d'une photopile réelle.

III.6. Paramètres essentiels caractérisant une cellule solaire :

III.6.1. Courant de court-circuit:

Si les deux électrodes sont en court-circuit à travers un ampèremètre, les électrons drainés par le champ interne de la jonction vont donner naissance à un « courant de court-circuit» J_{cc} qui

correspond au photo-courant J_{ph} généré par le rayonnement. Pour une distribution spectrale donnée, ce photo-courant est proportionnel à l'irradiance du rayonnement incident et à la surface active de captation (front de la cellule) :

$$J_{CC} = J_{Ph}$$

III.6.2. Tension de circuit ouvert :

Si la cellule est laissée en circuit ouvert, les porteurs générés par le rayonnement et séparés par le champ interne vont s'accumuler de part et d'autre de la jonction, induisant une auto-polarisation de la jonction dans le sens passant. Cette auto-polarisation induit un courant de diode dans le sens direct égal et opposé au photo-courant. La tension alors mesurée aux bornes des électrodes est appelée tension de circuit ouvert V_{co} . C'est la tension qu'il faudrait appliquer à la diode dans le sens passant pour générer un courant égal au photo-courant (courant nul), elle est donnée par la relation:

$$V_{co} = \left(\frac{k_B T}{q} \right) \ln \left[\left(\frac{J_{CC}}{J_S} \right) + 1 \right] \quad (III.7)$$

III.6.3 La puissance maximale :

Le point de fonctionnement est imposé par la résistance de charge et non par la cellule elle-même. Un choix judicieux de la résistance de charge permettra donc d'obtenir la puissance maximale, soit :

$$P_m = I_m \cdot V_m \quad (III.8)$$

Avec: V_m : la tension correspondante à la puissance maximale fournie et I_m : le courant correspondant à la puissance maximale fournie.

III.6.4 Facteur de forme :

Le facteur de forme représente l'efficacité de la cellule ou encore, il peut nous renseigner sur le vieillissement de la cellule. C'est le rapport entre la puissance maximale débitée ($P_m = I_m \cdot V_m$) et la puissance idéale ($V_{co} \times I_{CC}$), on le note par:

$$FF = \frac{P_{maximale}}{P_{idéale}} = \frac{I_m \cdot V_m}{J_{CC} \cdot V_{co}} \quad (III.9)$$

III.6.5 Rendement de conversion d'énergie :

Le rendement de conversion d'énergie est le rapport de la puissance générée et de la puissance du rayonnement solaire incident P_{inc} . (100 mW/cm² AM1,5). On appelle rendement maximal, le rapport entre la puissance maximale et la puissance P_{inc} :

$$\eta = \frac{P_{maximale}}{P_{inc}} = \frac{FF \cdot J_{CC} \cdot V_{co}}{P_{inc}} \quad (III.10)$$

III-7 Réponse spectrale :

Elle est appelée aussi le rendement quantique interne(RQI) ou de collecte interne, elle est donnée par :

$$R_{si} = \frac{J_{ph}(\lambda)}{q\Phi_i(\lambda)[1 - R(\lambda)]} \quad (III. 11)$$

Si on ne prend pas compte la réflexion, on parle du rendement quantique externe(RQE). Il est donnée par :

$$R_{se} = \frac{J_{ph}(\lambda)}{q\Phi_i(\lambda)} \quad (III. 12)$$

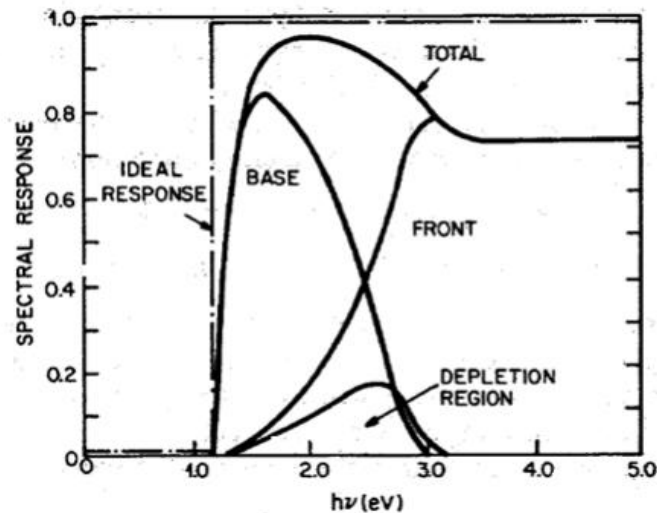


Figure III-9 : Exemple de courbes de réponse spectrale

III.8. Pertes fondamentales limitant le rendement :

En pratique, la conversion photovoltaïque n'est pas totale. Différentes pertes viennent influencer le rendement d'une cellule solaire. Les principaux facteurs de pertes sont les suivants:

- Absorption incomplète des photons,
- Excès d'énergie par rapport au gap,
- Ombrage de la surface active par les grilles de collecte,
- Rendement de collecte,
- Pertes optiques (Réflexion : couches antireflet, texturation de la surface).

- La résistance série dépend du taux de dopage des zones neutres et de la résistance de contact.

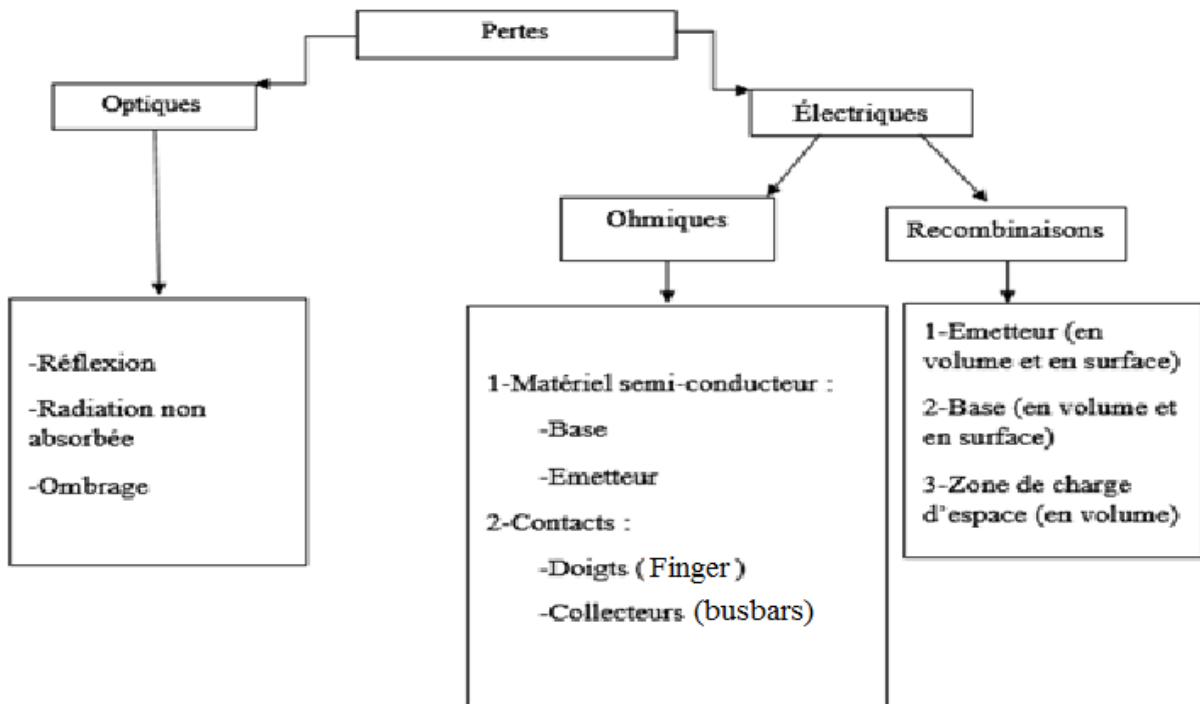


Figure III-10 : Organigramme des pertes limitant le rendement de la conversion photovoltaïque.

III.9. Influence de la résistance série :

La résistance série caractérise les pertes par effet Joule de la résistance propre du semi-conducteur et les pertes à travers les grilles de collecte et les mauvais contacts ohmiques de la cellule. Les contacts semi conducteur-électrodes à résistance élevée abaissent appréciablement la tension et le courant de sortie, ce qui va limiter le rendement de conversion

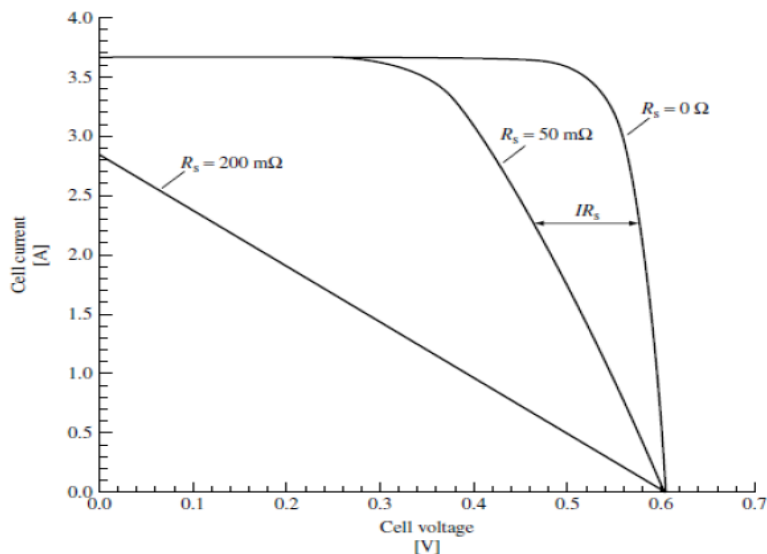


Figure III-11 : influence de la résistance série sur la caractéristique J(V).

III.10. Influence de la résistance shunt :

La résistance parallèle (ou shunt) caractérise les pertes par recombinaison des porteurs dues aux défauts structuraux du matériau dans les régions N et P et de la zone de charge d'espace.

L'existence de fissures de défauts de structure complexe devient le siège de phénomène physique assimilable aussi à une résistance parallèle R_{sh} . l'ordre de grandeur de la résistance parallèle pour une cellule en Si : $R_{sh} = 10^2$ à $10^4 \Omega$.

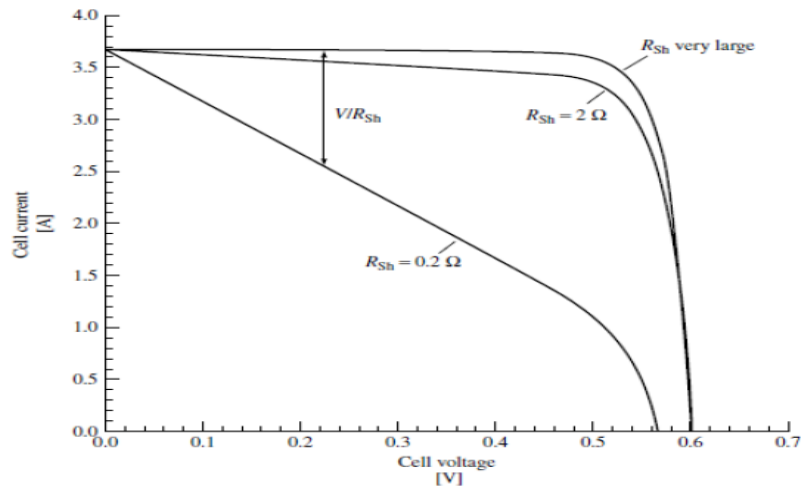


Figure III-12 : influence de la résistance shunt sur la caractéristique J(V).

IV.1. Aperçu sur le logiciel PC1D :

Le logiciel de simulation numérique des cellules solaires PC1D est largement utilisé dans le domaine photovoltaïque. Il a une grande réputation au sein du milieu de la recherche sur l'énergie solaire. Il a été développé à l'université « New South Wales of Sydney » en Australie qui est l'une des pionnières dans la spécialité. Son succès est basé sur sa vitesse d'exécution, son interface utilisatrice et ses mises à jour continues (la dernière en date étant la version 5.9). On peut simuler une structure photovoltaïque en introduisant ses paramètres (géométrie, dopages, paramètres électriques et optiques, etc...), en choisissant l'excitation et enfin en exécutant le programme pour l'obtention des résultats.

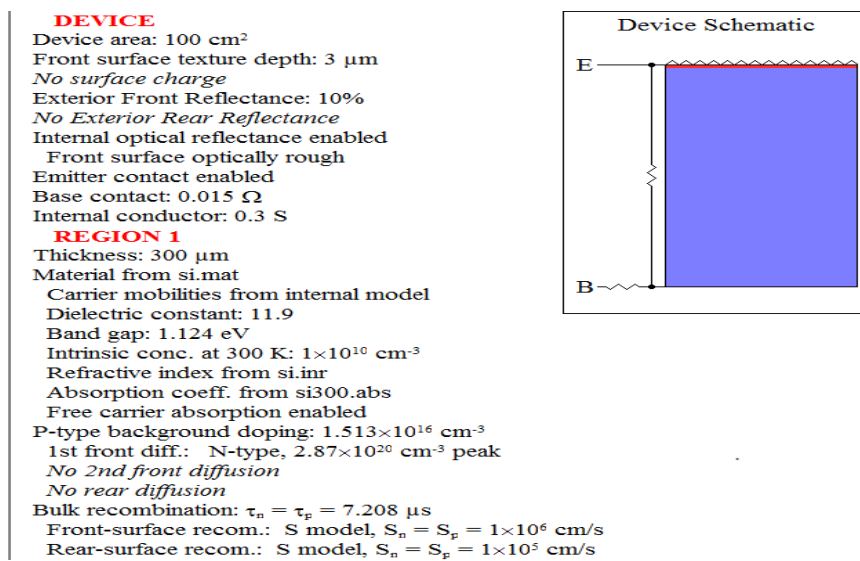


Figure IV -1 : Fenêtre du logiciel PC1D

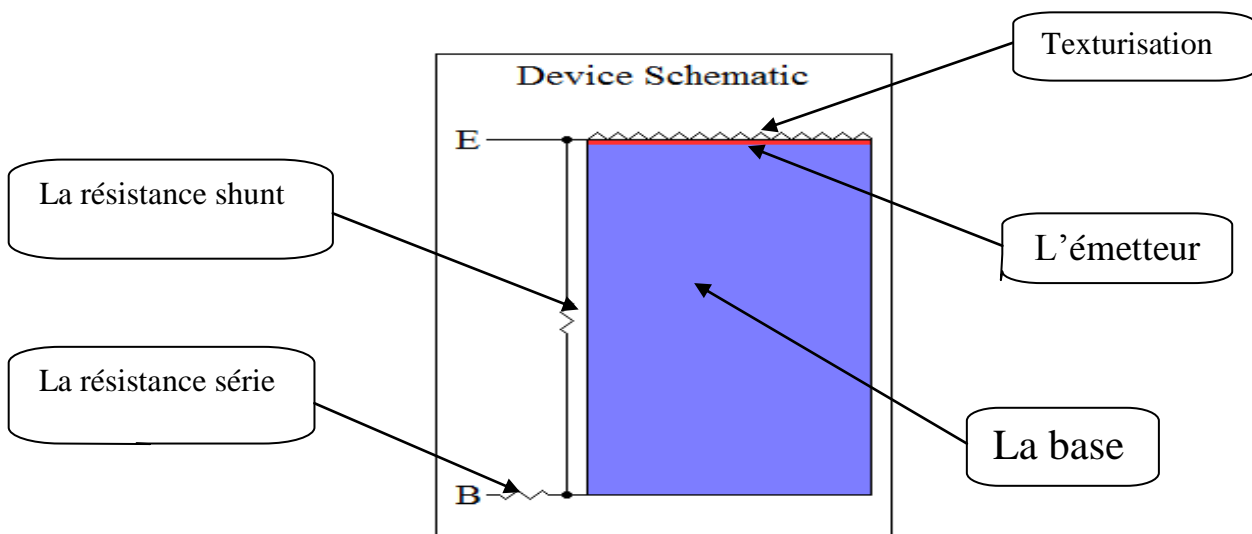


Figure IV-2 :-Schéma global du dispositif d'une cellule solaire.

Le logiciel se compose de quatre parties. Les trois premières sont consacrées à la programmation où il faut introduire les paramètres du dispositif, des régions et de l'excitation. La quatrième partie concerne les résultats de la simulation.

IV.1.1. Les paramètre du dispositif :

- La surface du dispositif,
- La texturisation,
- La densité de charge surfacique si elle existe,
- La réflectance externe,
- La réflectance interne,
- Les résistances séries internes,
- Les conductances shunt internes.

DEVICE

Device area: 100 cm²

Front surface texture depth: 3 μm

No surface charge

Exterior Front Reflectance: 10%

No Exterior Rear Reflectance

Internal optical reflectance enabled

Front surface optically rough

Emitter contact enabled

Base contact: 0.015 Ω

Internal conductor: 0.3 S

IV.1.2. Les paramètre des régions :

On peut introduire plusieurs régions (jusqu'à 5) selon la forme et les propriétés de la structure. Ces paramètres de région sont les suivants:

- L'épaisseur du matériau,
- Le matériau utilisé : les paramètres qui le décrivent sont stockés dans des fichiers d'extension (*.mat). Ils sont fournis avec le logiciel pour les matériaux les plus utilisés comme le silicium, le germanium et l'arséniure de gallium. Les paramètres placés dans ce fichier sont : les mobilités, la constante diélectrique (permittivité électrique), l'énergie du gap (eV), l'indice de réfraction, la concentration intrinsèque des porteurs (cm⁻³), le coefficient d'absorption optique (cm⁻¹) et l'absorption des porteurs libres,
- Le type et la concentration du dopage,
- Les durées de vie des porteurs,
- Les vitesses de recombinaison dans chaque région.

IV.1.3. Les paramètres d'excitation :

Le logiciel contient deux fichiers intégrés :

- le fichier « One-Sun.exc » (intensité globale de tout le spectre d'un seul soleil) permet de simuler différentes caractéristiques (courant/tension-puissance/tension, etc...)
- le fichier « Scan-qe.exc » (intensité de chaque longueur du spectre) pour la simulation de la réponse spectrale,
- le mode d'excitation : il y a trois modes d'excitation (en équilibre, stationnaire et transitoire),
- la température,
- le circuit collecteur (résistance, tension),
- l'éclairement (intensité, fichier d'air masse généralement AM1, 5G)

IV.1.4. Les résultats :

Les résultats que nous pouvons visualiser en utilisant le fichier d'excitation « OneSun.exc » sont :

- La valeur du courant de court-circuit,
- La valeur de la tension en circuit-ouvert,
- La valeur de la puissance maximale, et par conséquent le rendement énergétique du dispositif lorsqu'il s'agit de cellules solaires.

IV.2. Etude et optimisation par simulation de la cellule solaire :

IV.2.1. Paramètres de la simulation :

Sur le tableau ci-dessous, sont présentés les paramètres de la cellule solaire conventionnelle au silicium et dont nous avons utilisé ceux de PC1D par défaut

Paramètres	Valeurs par défaut dans PC1D
La surface de la cellule solaire	100 cm ²
La texturisation	-Angle de la pyramide : 54°74, -Epaisseur de la pyramide : 3 μm
L'épaisseur de la base (de la cellule)	300 μm
Le dopage de la base de type P	1,513x10 ¹⁶ cm ⁻³
Le dopage de l'émetteur de type N (par diffusion thermique : fonction erreur complémentaire)	Pic du dopage : 2,87x10 ²⁰ cm ⁻³
La durée de vie des électrons τ_n et la durée de vie des trous τ_p	7,208 μs
La vitesse de recombinaison des électrons S_n et la vitesse de recombinaison des trous S_p dans l'émetteur	10 ⁶ cm/s
La vitesse de recombinaison des électrons S_n et la vitesse de recombinaison des trous S_p dans la base	10 ⁵ cm/s

Tableau IV-1 : Les différents paramètres de simulation de la cellule étudiée.

Dans ce travail, on varie quelques paramètres parmi les plus importants de cette cellule afin d'optimiser ses caractéristiques que sont le courant de court-circuit I_{cc} , la tension de circuit ouvert V_{co} , la puissance au point de fonctionnement maximal P_m , le facteur de forme FF et finalement son rendement énergétique η .

Les paramètres à varier choisis sont : l'épaisseur et la résistivité de la base, la profondeur de jonction de l'émetteur.

IV.2.2 Effets de l'épaisseur de la base :

IV.2.2.1 Etude du courant de court-circuit I_{cc} :

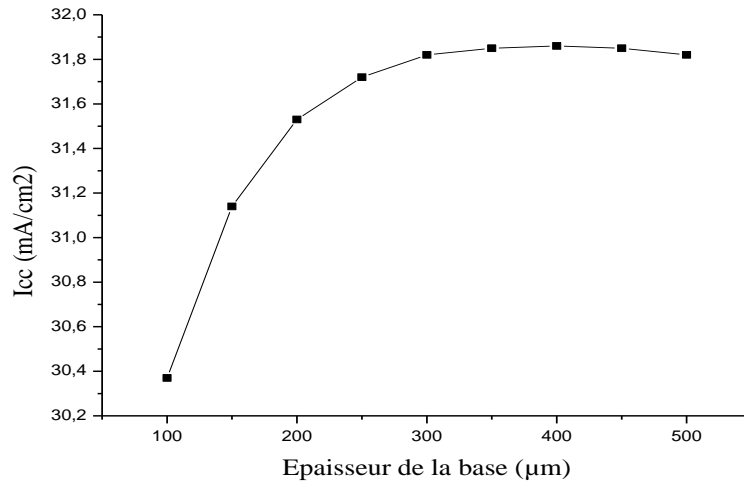


Figure IV-3: Variation du courant de court-circuit en fonction de l'épaisseur de la base.

Lorsqu'on fait varier l'épaisseur de la base, on constate que le courant de court-circuit croît jusqu'à une valeur optimale $31,85 \text{ mA/cm}^2$ pour une épaisseur d'environ $350 \mu\text{m}$ puis commence à décroître légèrement.

IV.2.2.2. Etude la puissance maximale P_m :

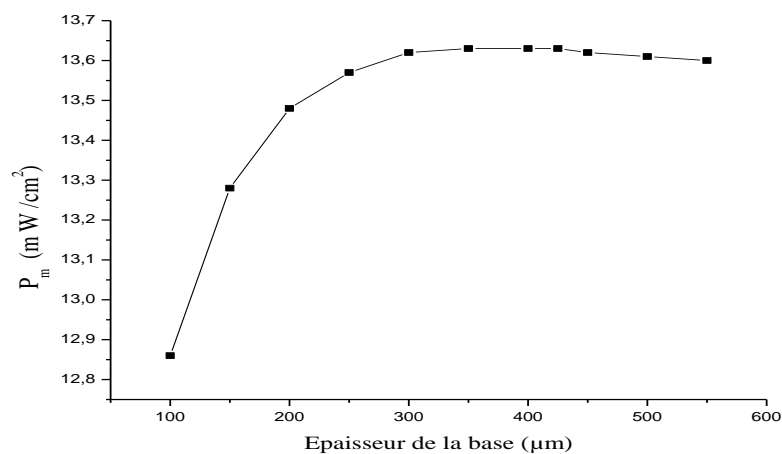


Figure IV-4 : Variation de la puissance maximale en fonction de l'épaisseur de la base.

Pour la puissance au point de fonctionnement maximal, on remarque à peu près la même forme de variation que celle du courant de court-circuit. Un accroissement jusqu'à une puissance de $13,63 \text{ mW/cm}^2$ est suivi d'une légère baisse à partir de l'épaisseur de $350 \mu\text{m}$. Cette valeur optimale de la puissance au point de fonctionnement maximal nous donne directement le rendement optimal qui est dans ce cas de $13,63 \%$.

IV.2.2.3. Etude de la tension de circuit ouvert V_{co} :

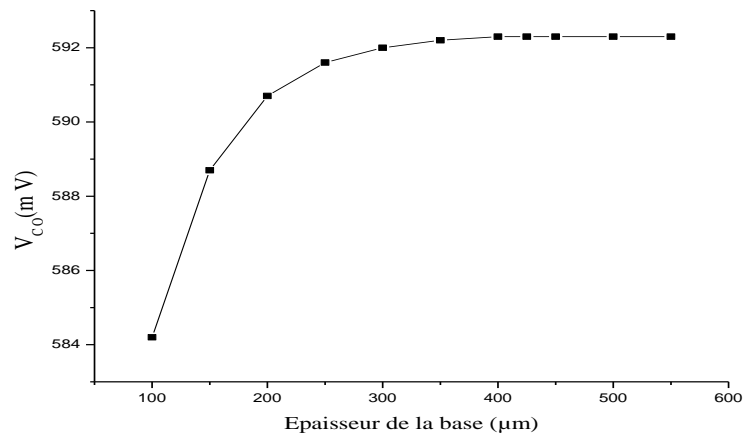


Figure IV-5: Variations de la tension de circuit-ouvert en fonction de l'épaisseur de la base.

On remarque avec l'augmentation de l'épaisseur de la base, on a augmentation de la tension de circuit-ouvert jusqu'à la valeur $350 \mu\text{m}$, juste après on constate une saturation de la tension à la valeur 592 mV .

IV.2.2.4 Etude du facteur de forme FF:

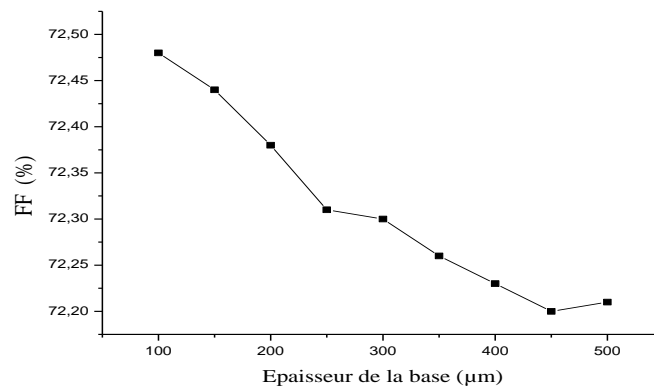


Figure IV-6: variations du facteur de forme en fonction de l'épaisseur de la base.

Comme on le distingue clairement sur la figure ci-dessus, le facteur de forme diminue lorsque l'épaisseur de la base augmente, ce qui est donc néfaste pour la cellule.

IV.2.2.5 Etude le rendement η :

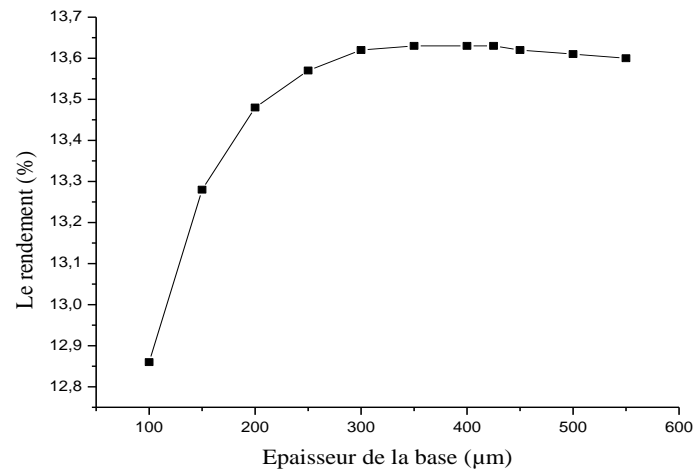


Figure IV-7:Variation du rendement en fonction de l'épaisseur de la base.

Quant au rendement de la cellule, il est optimal aux alentours de l'épaisseur de 350 μm

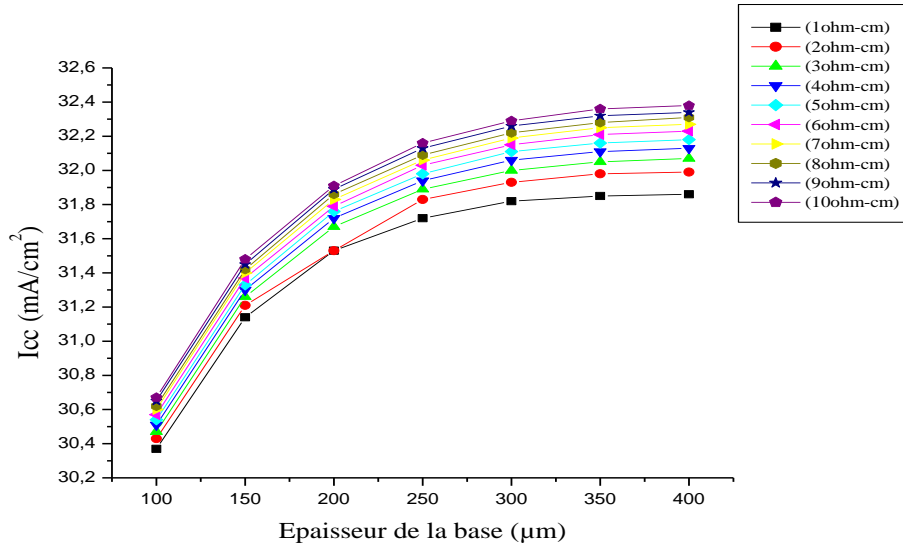
Interprétation :

Pour être sûr que le spectre solaire soit absorbé jusqu'au gap du silicium ($E_g=1,12$ eV correspondant à la longueur d'onde de 1,1 μm), nous avons besoin de 1 mm d'épaisseur qui représente en moyenne l'inverse du coefficient d'absorption du silicium à son gap (FigureII-5). Mais lorsque l'épaisseur est de cet ordre (1mm), les porteurs photo-générés auront à parcourir des distances plus grandes que leurs longueurs de diffusion qui sont au moins 3 fois plus petites que l'épaisseur. C'est pour cela que lorsqu'on augmente l'épaisseur, elle n'aura aucun effet bénéfique sur le rendement puisque la collecte des porteurs se dégrade.

Par ailleurs, lorsque l'épaisseur est trop petite, le spectre solaire ne sera pas absorbé jusqu'à l'énergie du gap (par exemple : pour une épaisseur de 10 μm , le spectre solaire ne sera absorbé qu'à la longueur d'onde de 0,8 μm et par conséquent toute la gamme des longueurs entre 0,8 et 1,1 passera à travers), ce qui sera néfaste pour le rendement quoique l'épaisseur soit de l'ordre de la longueur de diffusion des porteurs et que la probabilité de collecte soit maximale.

IV.2.3 Effets de la résistivité de la base couplée à celle de son épaisseur :

IV.2.3.1 Etude du courant de court-circuit I_{cc} :



FigureIV-8: Variations du courant de court-circuit en fonction de l'épaisseur pour différentes résistivités de la base.

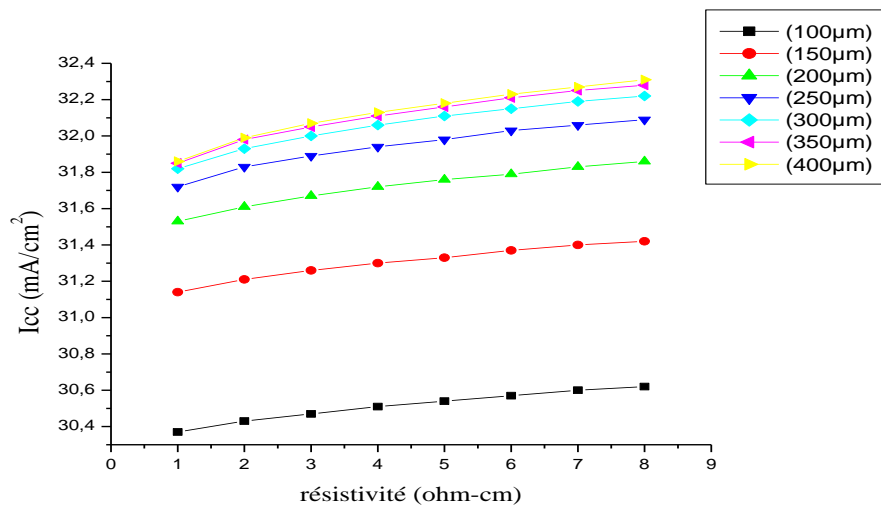


Figure IV-9: Variations du courant de court-circuit en fonction de la résistivité pour différentes épaisseurs de la base.

Le courant de court-circuit croit suivant l'augmentation de l'épaisseur et de la résistivité de la base jusqu'à une valeur de saturation de 32,3 mA/cm² pour une épaisseur de 350 μm .

IV.2.3.2. Etude de la tension de circuit ouvert V_{CO} :

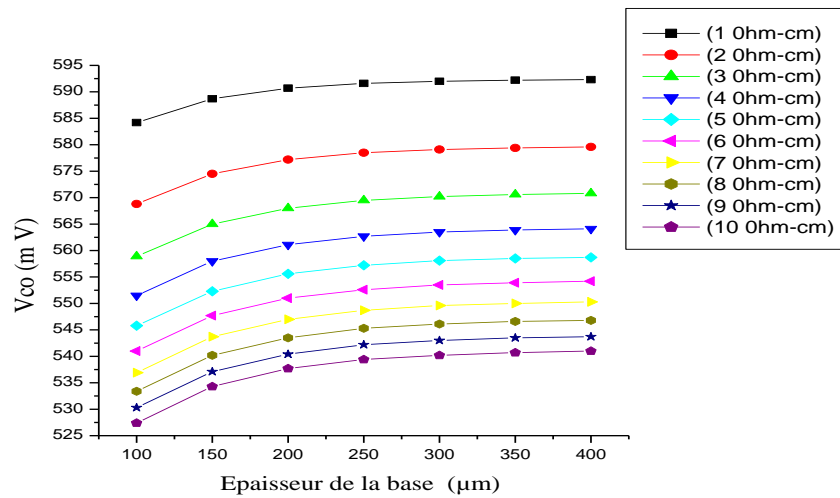


Figure IV-10: Variations de la tension de circuit-ouvert en fonction de l'épaisseur pour différentes de résistivités de la base.

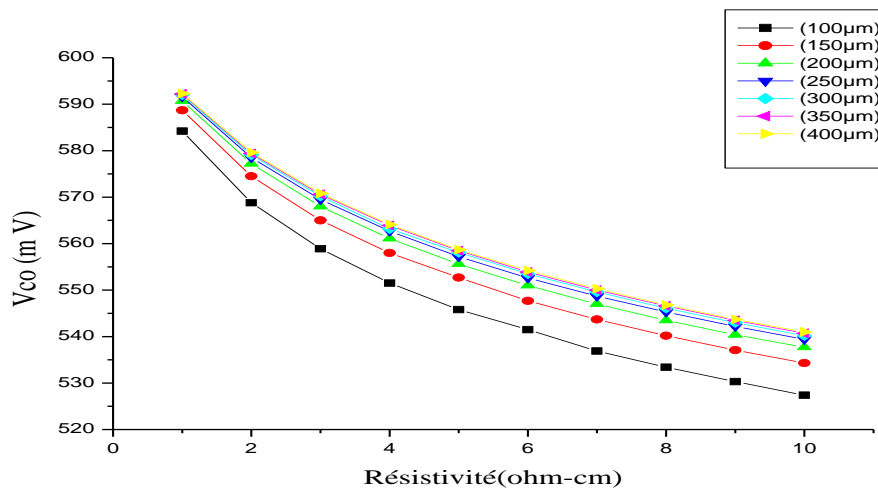


Figure IV-11: Variation de la tension de circuit-ouvert en fonction de la résistivité pour différentes épaisseurs de la base.

Lorsque l'épaisseur de la base augmente, la tension de circuit-ouvert croît puis se sature mais elle décroît avec l'augmentation de la résistivité de la base

IV.2.3.3 Etude du facteur de forme FF:

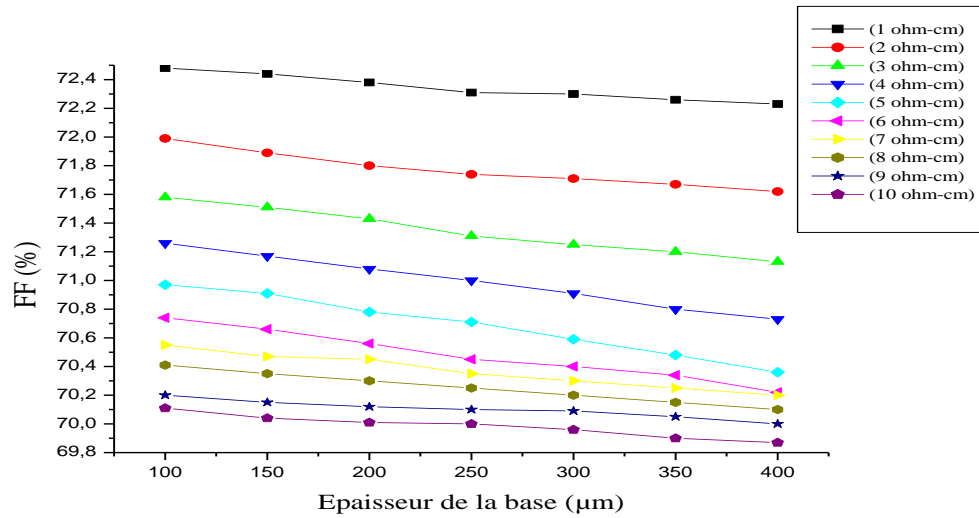


Figure IV-12: Variations de facteur de forme en fonction de l'épaisseur pour différentes résistivités de la base.

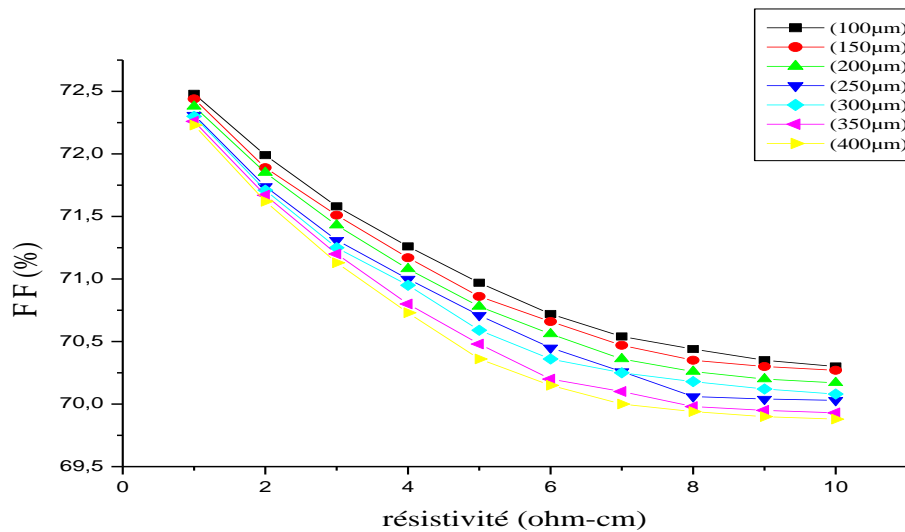


Figure IV-13 : Variations du facteur de forme en fonction de la résistivité pour différentes épaisseurs de la base

Si on augmente l'épaisseur, la facteur de forme diminue comme on le voit sur la figure ci-dessus mais quand la résistivité de la base augmente, cette décroissance est accentuée.

IV.2.3.4. Etude du rendement η :

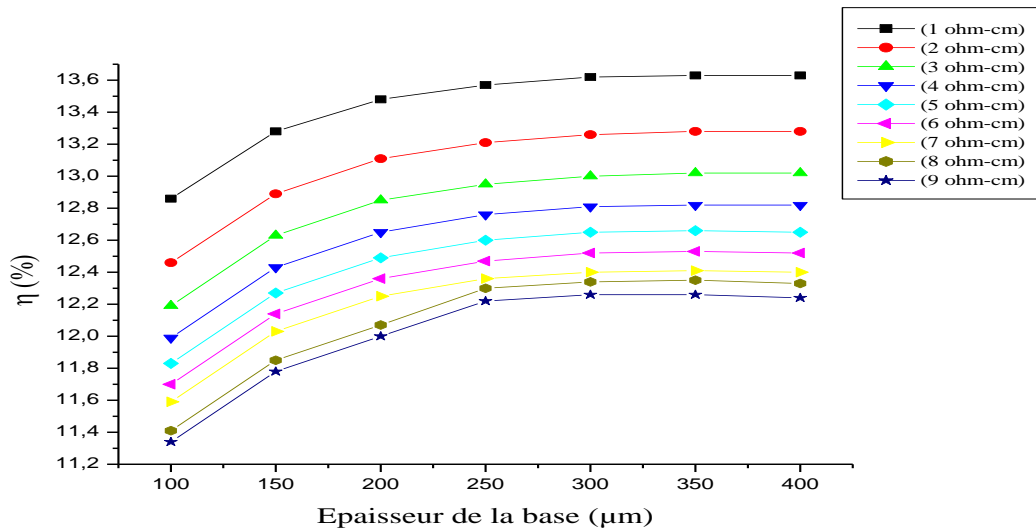


Figure IV-14 : Variations de rendement en fonction de l'épaisseur pour différentes résistivités de la base.

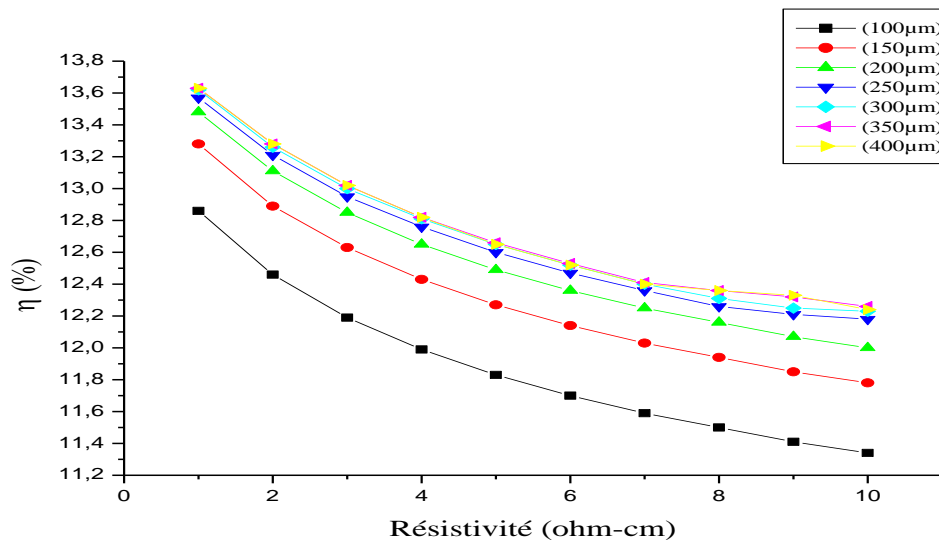


Figure IV-15: Variations du rendement en fonction de la résistivité pour différents épaisseurs de la base.

Enfin, pour le rendement, on remarque à peu près la même forme de variation que celle de la tension de court-circuit avec une saturation à 13,63 % pour une résistivité de 1 Ω .cm. Le rendement s'améliore lorsque la résistivité diminue et plus l'épaisseur augmente jusqu'à son optimisation.

IV.2.4. Effet de la profondeur de jonction de l'émetteur :

Dans cette étude, on prend les valeurs optimisées de l'épaisseur et de la résistivité de la base, respectivement égale à $350 \mu\text{m}$ et $1 \Omega.\text{cm}$ tandis que les autres paramètres sont maintenus constants.

IV.2.4.1. Etude du courant de court-circuit I_{cc} :

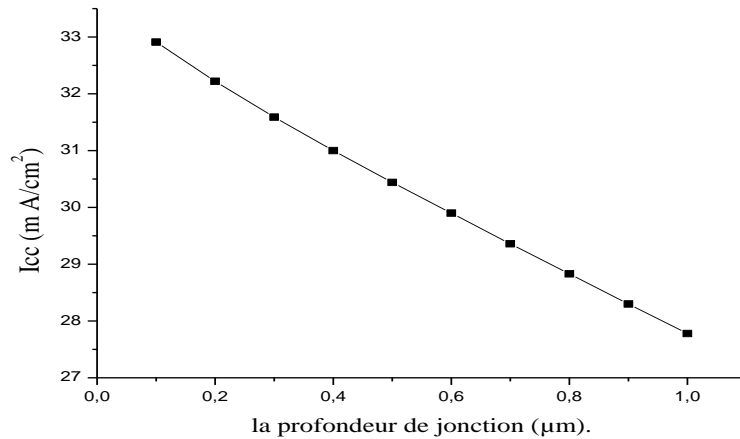


Figure IV-16: Variations du courant de court-circuit en fonction de la profondeur de jonction.

On remarque que le courant de court-circuit diminue avec l'augmentation de la profondeur de jonction.

IV.2.4.2. Etude de la tension de circuit ouvert V_{co} :

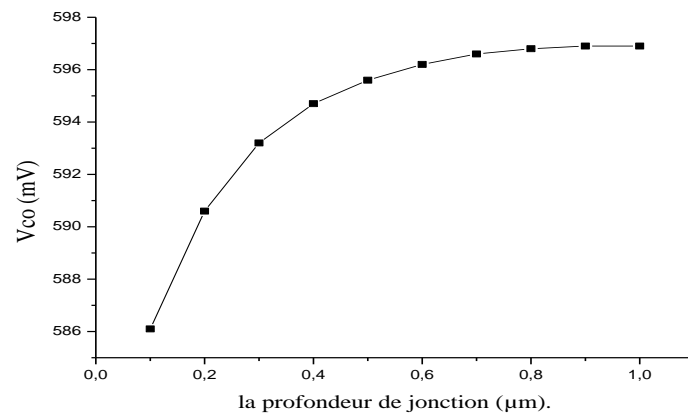


Figure IV-17 : Variations de la tension de circuit ouvert en fonction de la profondeur de jonction.

On remarque avec l'augmentation de profondeur de la jonction, on a augmentation de la tension de circuit-ouvert jusqu'à la valeur $0,8 \mu\text{m}$, juste après, on a une saturation de la tension à partir 596.

IV.2.4.3. Etude du facteur de forme FF :

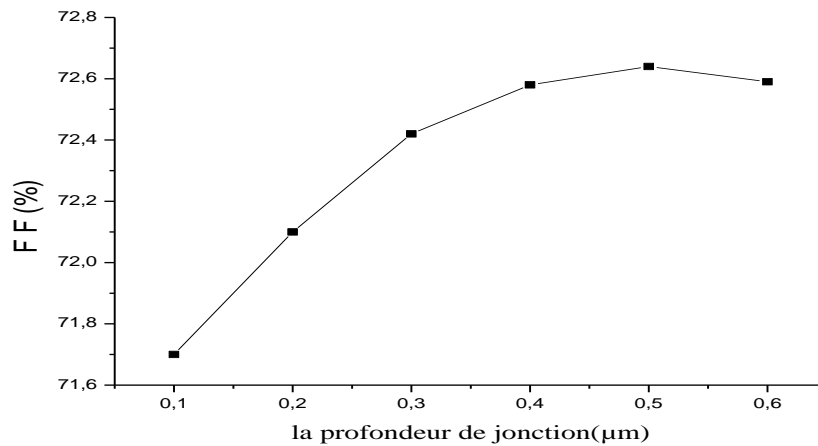


Figure IV-18: Variations du facteur de forme en fonction de la profondeur de jonction.

On remarque avec l'augmentation de profondeur de la jonction, on a une optimisation du facteur de forme à 0,5 μm.

IV.2.4.4. Etude du rendement η :

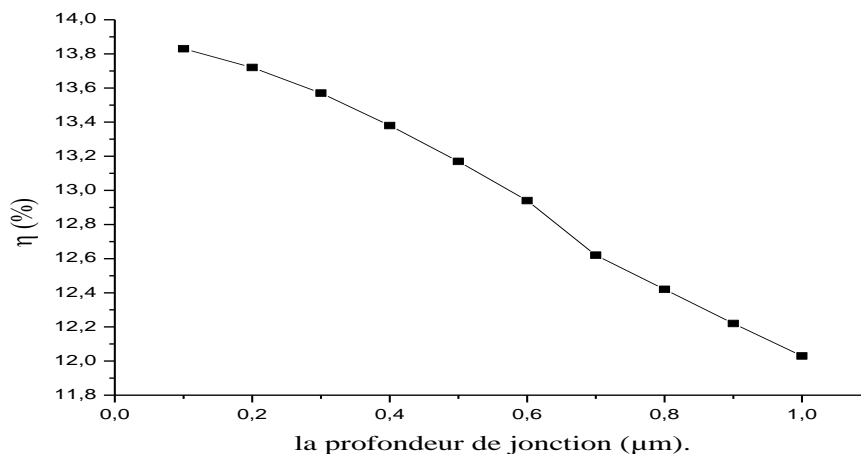


Figure IV-19: Variations le rendement en fonction de la profondeur de jonction (μm).

La plus grande valeur de rendement est de 13,82 %, elle est optimisée quand la profondeur de jonction atteint la valeur la plus minimale possible.

Le rendement décroît avec la profondeur de jonction, et son maximum est atteint pour de très faibles épaisseurs de l'émetteur.

Interprétation :

On constate que l'épaisseur de l'émetteur x_j a une influence sur le rendement : plus elle est grande, et plus le rendement diminue fortement. On peut expliquer ce phénomène grâce à la longueur de diffusion L_d , qui représente la longueur jusqu'à laquelle va diffuser la charge créée (électron ou trou).

- ✓ Si $x_j \ll L_d$: Les charges peuvent aller jusqu'à une longueur plus grande que la zone N^+ , elles vont donc la traverser, et être collectées.
- ✓ Si $x_j \gg L_d$: Les charges ne peuvent pas aller jusqu'à une longueur plus grande que la zone N^+ , et n'atteignent pas la ZCE pour pouvoir être collectées.

IV.3 Résultats de la simulation :

Paramètre optimale	Rendement
L'épaisseur de la base (350 μm)	13,63 %
Résistivité de la base (1 $\Omega\cdot\text{cm}$)	13,63 %
Le profondeur de la jonction (0,1 μm)	13,82 %

Tableau IV-2

Des études précédentes où nous avons obtenu l'optimisation des 3 paramètres (épaisseur et résistivité de la base, profondeur de jonction), et que nous rappelons ci-après :

- ✓ L'épaisseur de la base : 350 μm
- ✓ La résistivité de la base : 1 $\Omega\cdot\text{cm}$
- ✓ La profondeur de jonction : 0,1 μm

De ces paramètres que nous avons introduits dans nos calculs, nous ont permis d'obtenir une amélioration du rendement :

- ✓ Le courant de court-circuit : 32,91 mA/cm^2
- ✓ La tension de circuit-ouvert : 586,1 mV
- ✓ La puissance maximale : 13,82 mW/cm^2
- ✓ Le facteur de forme : 71,64%
- ✓ Le rendement : 13,82%

IV.3.1. Caractéristique I(V) :

La figure ci- dessous est tracée en fonction des valeurs optimisées (I_{cc} , V_{co} , P_m).

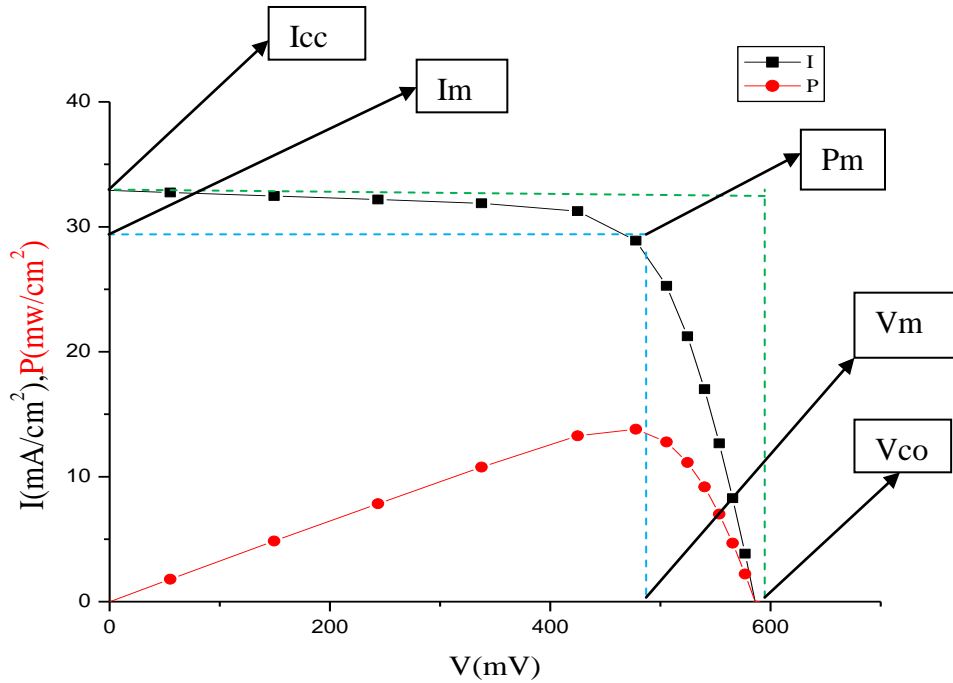


Figure IV-20: Caractéristique I(V) pour la cellule conventionnelle étudiée

IV.3.2. Réponse spectrale :

On appelle réponse spectrale (rendement de collecte ou rendement quantique) le nombre de charges (électrons ou trous) créées par chaque photon incident (Rendement Quantique Externe : RQE) ou absorbé (Rendement Quantique Interne : RQI). Il dépend de la longueur d'onde et est compris entre 0 et 1.

Dans le modèle idéal, il est égal à 1 pour tous les photons d'énergie égale ou supérieure à E_g et à 0 pour les autres.

On remarque que le RQI est proportionnel dans le cas général au RQE et lui est toujours supérieur puisque dans son expression, il est divisé par $(1-R)$ contrairement au RQE par R . le coefficient de réflexion est toujours inférieure à 1.

Le rendement quantique nous renseigne donc en amont sur la probabilité de création des paires électrons-trous par les photons absorbés. Par conséquent, il nous indique là où il faut améliorer cette probabilité.

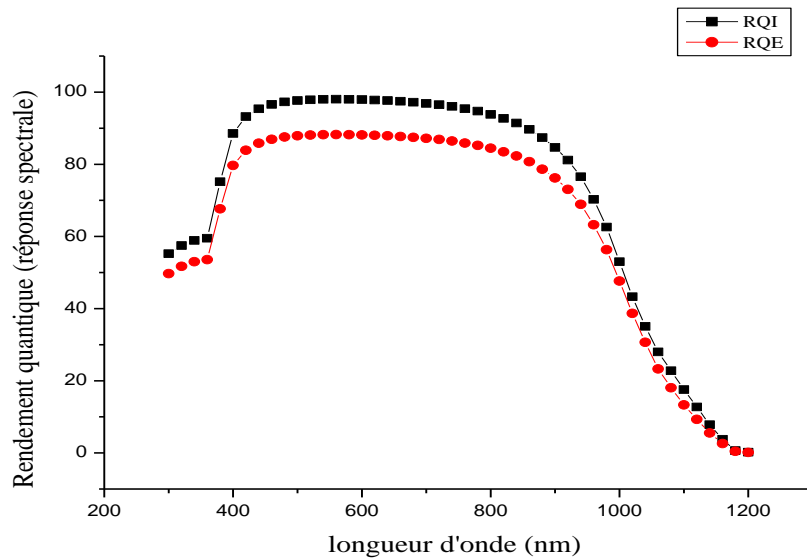


Figure IV-21: variation de rendement quantique en fonction de la longueur d'onde

On remarque sur la figure ci-dessus que la probabilité des photons de longueurs d'ondes plus petites (grandes énergies) de créer des porteurs se dégrade dans cette gamme de l'Ultra-Violet et qui concerne spécialement l'émetteur où il faut l'améliorer par exemple en optimisant la profondeur de jonction ou par l'incorporation d'un émetteur sélectif de plus petite résistance carrée, c'est-à-dire de plus grand dopage.

L'autre partie concerne la queue de cette réponse spectrale, dans la fourchette des énergies proches du gap du silicium, qui devait abaisser de manière brutale. Les longueurs d'onde correspondantes concernent particulièrement la base de la cellule dont il faut améliorer la collecte en optimisant les paramètres de la cellule (épaisseur, dopage) de minimiser les recombinaisons, tout en augmentant les durées de vie des porteurs.

IV.3.3 Cellules à émetteurs de types N et P :

On va fixé les paramètres précédents et remplacé l'émetteur de type N par un autre émetteur de type P et en inversant le type de la base tout en gardant les mêmes dopages qu'auparavant. Les résultats obtenus des caractéristiques des deux cellules sont rassemblés dans le tableau suivant :

	$I_{cc}(mA/m^2)$	$V_{co}(mV)$	FF(%)	η (%)
Emetteur de type N	32,91	586,1	71,64	13,82
Emetteur de type P	31,77	588,9	72,20	13,51

Tableau IV-3 :Caractéristiques des cellules à émetteurs de type N et P.

On remarque que la cellule à émetteur de type N est meilleure que celle de type P dont les paramètres n'ont pas été optimisés dans ce travail. Une autre étude s'impose alors afin de tirer des conclusions.

Les courbes I(V) et les rendements quantiques internes (RQI) obtenus pour les deux types d'émetteur sont présentés, respectivement, dans les figures IV.22 et IV.23.

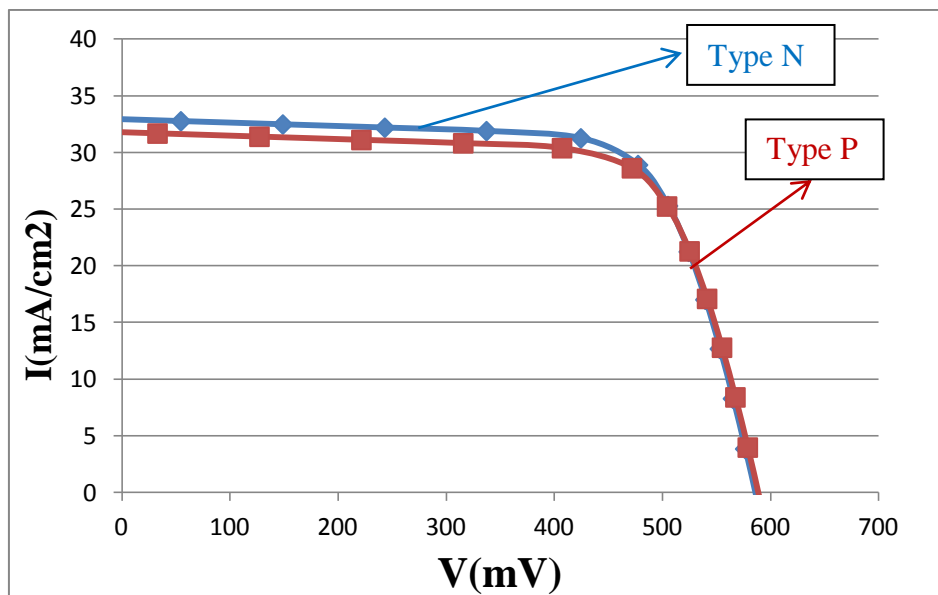


Figure IV-22: Caractéristiques I(V) pour les émetteurs de types N et P.

On remarque à première vue que pour la caractéristique I(V), la cellule à émetteur de type N est meilleure que celle de type P notamment par l'amélioration de son courant de court-circuit, certainement par une bonne collecte.

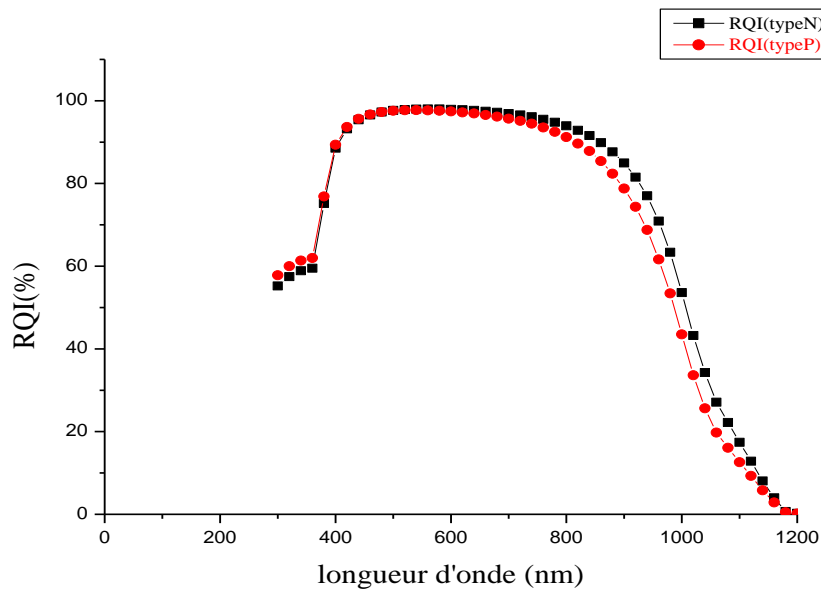


Figure IV-23: Variations des rendements quantiques internes en fonction de la longueur d'onde.

On observe que dans les petites longueurs d'onde (grandes énergies), le rendement quantique interne de l'émetteur de type P amélioré que celui de type N, certainement grâce aux paramètres physique du type. Par exemple, la mobilité des électrons minoritaires dans le semi-conducteur de type P est grande par rapport aux trous dans le type P.

Mais à partir de 600nm (moyennes et grandes longueurs d'onde) où ces énergies sont absorbées dans la base plus épaisses, le rendement quantique interne de l'émetteur de type N devient meilleur que celui du type P car les types se sont inversés dans la base par rapports à l'émetteur.

Cette comparaison est superficielle, pour mieux comparer les cellules à émetteur de type N et P, il faut sans doute optimiser les paramètres physiques et géométriques de l'émetteur de type P afin d'apporter les conclusions préliminaires.

Conclusion générale :

Ce modeste travail de mémoire de master en modélisation et caractérisation des matériaux nous a permis de voir en :

- Introduction : le sujet dans sa globalité,
- Chapitre I : l'ensoleillement qui est la source d'énergie des cellules solaires,
- Chapitre II : la physique des semi-conducteurs et en par la suite la jonction PN qui est la base fondamentale de la compréhension du fonctionnement des cellules,
- Chapitre III : la présentation la cellule solaire et ses caractéristiques,
- Chapitre IV : l'aboutissement à des résultats en optimisant les paramètres physiques et géométriques d'une cellule solaire cristalline au silicium dont et les grandeurs sont données par défaut par le logiciel PC1D.

Nous sommes contents de garder les valeurs du logiciel d'une cellule solaire conventionnelle au silicium cristallin d'émetteur frontal de type N et d'une base épaisse de type P dopée généralement au Phosphore par diffusion thermique (profil fonction erreur complémentaire : erfc).

On a fait varier quelques paramètres essentiels de cette cellule pour voir leurs influences sur les caractéristiques de la cellule que sont le courant de court-circuit I_{cc} , la tension de circuit-ouvert V_{co} , le facteur de forme FF, la puissance au point de fonctionnement maximal et enfin le rendement énergétique.

Nous avons aussi en fin de ce travail essayer de comprendre quelles sont les gammes de longueurs d'onde du spectre solaire qu'il faudrait améliorer pour augmenter la réponse spectrale (rendement quantique) et par conséquent prévoir en amont les rendements énergétiques attendus.

La modélisation s'est faite en variant un seul paramètre et en gardant fixes les autres paramètres. Pour l'étude du paramètre suivant, on a fixé le paramètre précédent à sa valeur optimale et en gardant les suivants constants et ainsi de suite.

Les paramètres que nous avons étudiés sont :

- l'épaisseur et le dopage de la base,
- L'épaisseur de l'émetteur.

Les résultats superficiels obtenus nous ont permis de tirer les conclusions suivantes :

-La variation de l'épaisseur de la base vers des valeurs plus grandes fait augmenter le courant de court-circuit et la tension de circuit-ouvert ainsi que le rendement et par contre fait diminuer le facteur de forme.

-La variation de dopage de la base vers le haut, décroît le courant de court-circuit, et fait baisser la tension de circuit-ouvert, le facteur de forme et le rendement.

-L'accroissement de l'épaisseur de l'émetteur fait augmenter la tension de circuit-ouvert et le facteur de forme et diminuer le courant de court-circuit. Quant au rendement, il décroît également avec la profondeur de jonction, et sa valeur maximale est atteinte pour de très faibles épaisseurs de l'émetteur.

Par ailleurs pour l'étude de la réponse spectrale, nous avons également vu que la probabilité d'absorption des photons de longueurs d'ondes plus petites (grandes énergies) par les porteurs se dégrade dans cette gamme de l'Ultra-Violet et qui concerne spécialement l'émetteur où il faut l'améliorer par exemple en optimisant la profondeur de jonction ou par l'incorporation d'un émetteur sélectif de plus petite résistance carrée, c'est-à-dire de plus grand dopage.

L'autre partie concerne la queue de cette réponse spectrale, dans la fourchette des énergies proches du gap du silicium, qui devait abaisser de manière brutale. Les longueurs d'onde correspondantes concernent particulièrement la base de la cellule dont il faut améliorer la collecte en optimisant les paramètres de la cellule (épaisseur, dopage) de minimiser les recombinaisons, tout en augmentant les durées de vie des porteurs.

En dernier, en prenant les mêmes paramètres de la cellule à émetteur de type P que celles du type N, nous avons remarqué que selon les caractéristiques $I(V)$ et les rendements quantiques internes que les grandeurs de ce dernier sont meilleures que celles du type P. Pour en savoir plus, il reste à optimiser les paramètres de la cellule à émetteur de type P.

Comme perspectives de ce travail, cette étude mérite d'être poursuivie en étudiant toutes les autres grandeurs afin de les optimiser dans le but d'améliorer le rendement énergétique des cellules photovoltaïques.

Bibliographie :

1. Ouvrages :

- H. Mathieu et H. Fanet, « *Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques* », 6^{ème} édition Dunod, Paris, 2009.
- A. Vapaille, « *Physique des dispositifs à semi-conducteurs* », Edition Masson, 1970.
- A. Laugier et J.-A. Roger, « *Les photopiles solaires du matériau du dispositif aux applications* ». Edition Lavoisier Tec. & doc, Paris, France, 1981.
- M. Orgeret, « *les piles solaires, le composant et ses applications* », édition Masson, Paris, 1985.
- A. Ricaud, « *Photopiles solaires, de la physique de la conversion photovoltaïque aux filières, matériaux et procédés* », Presses polytechniques et universitaires romandes (Suisse), 1997.
- D. A. Clugston and P. A. Basore, « PC1D Version 5: 32-bit Solar Cell Modeling on Personal Computers », Presented at the 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conf., October 1997.

2. Mémoires de Magistères :

- A. Mekemeche, « *Etude à deux dimensions de cellules solaires en silicium monocristallin à émetteur sélectif à l'aide de PC2D* », Université de Mostaganem (Algérie), Mémoire de Magistère, 2013.
- F. Benyettou, « *Etude et Modélisation d'une cellule photovoltaïque au silicium poly cristallin à l'aide de PSpice* », Université de Mostaganem (Algérie), Mémoire de Magistère, 2013.
- M. Nia, « *Etude comparative des méthodes d'estimation du rayonnement solaire* », Université de Setif (Algérie), Mémoire de Magistère, 2010.
- N. Benahmed Benabdellah, « *Propriétés physiques des semi-conducteurs (Si monocristallin et Ge) et Simulation des cellules solaires à base de Si et SiGe* », Mémoire de magistère, Université de Tlemcen (Algérie), 2006.
- M. Lasladj, « *Simulation numérique des cellules solaires de troisième génération pour des applications spatiales* », Mémoire de magistère, Université de Setif (Algérie), 2014.

3. Mémoires de Masters :

- C. Messaoudi, « *Méthode de détermination des paramètres d'une cellule solaire par Excel : Perspectives pour une cellule solaire bifaciale en silicium.* », Université de Mostaganem (Algérie), Mémoire de Master, 2015.
- S. Belaidi, « *Simulation par Excel d'une cellule solaire conventionnelle en silicium*», Université de Mostaganem (Algérie), Mémoire de Master, 2015.

4. Sites-Internet :

- <http://www.pveducation.org/pvcdrom> (consulté du 15/04/2016 au 15/05/2016)