



RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN - TIARET-

FACULTÉ DES SCIENCES DE LA MATIÈRE

ANNEXE SOUGUEUR

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : PHYSIQUE

Spécialité : Physique Energétique & Energies Renouvelables

Par : *BOUDJENANE Khaled*

THÈME

**Etude de l'effet de la couche anti réfléchissante
Sur la conversion photovoltaïque**

Soutenu publiquement le :

24 / 06 / 2018 devant le Jury composé de:

Mr. Bachir KHAROUBI	M. C .B	Université de Tiaret	Président
Mr. Abdelkader DJELLOULI	M. A .A	Université de Tiaret	Examineur
Mr. Abdelmalek. KHARROUBI	M. C. B	Université de Tiaret	Examineur
Mr. Djamel YESREF	M. A .A	Université de Tiaret	Encadreur

PROMOTION 2017 /2018

Dédicace

*Toutes les lettres ne sauraient trouver les mots
qu'il faut... .*

*Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude,
l'amour et le respect.....*

Je dédie cette mémoire à ...

A mes très chers parents

MA mère et mon père

A mes frères. Mes sœurs.

*A mes nièces. Meilleurs vœux de succès dans vos
études.*

A mes amis et mes camarades

(Saadi, Touati, Benelmouaz, Thamer, Boumaaza)

REMERCIEMENT

Je remercie ALLAH le clément de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail.

Tous mes remerciements à monsieur le professeur YESREF DJAMEL pour m'avoir encadré, de la confiance qu'il m'a témoigné au cours de cette année et d'avoir dirigé mes travaux de mémoire.

Je remercie sincèrement toutes les étudiantes qui m'ont accompagné durant l'année préparatoire, ce fût un honneur d'avoir étudié à avec vous.

Je remercie tout les professeurs du Département de physique, Université d'Ibn Khaldoun TIARET qui a veillé à ce que notre formation se déroule dans les meilleures conditions possibles et pour leurs encouragements sans oublier mes amies...

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERAL.....	1
CHAPITRE 1 : GENERALITE SUR LES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES	
1-1 INTRODUCTION.....	3
1-2 HISTORIQUE DE L'EFFET PHOTOVOLTAÏQUE.....	3
1-3 LE RAYONNEMENT SOLAIRE.....	5
1-3.1 Le soleil.....	5
1-4 NORMALISATION.....	8
1-5 L'ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE.....	8
1-6 LES DIFFERENTES TECHNOLOGIES.....	9
1-7 LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE.....	10
1-8 CONCLUSION.....	18
CHAPITRE 2 : MATERIAUX SEMI CONDUCTEUR POUR CELLULES SOLAIRE	
2-1 INTRODUCTION.....	19
2-2 PROPRIETES OPTIQUES.....	19
2-2.1 L'absorption.....	19
2-2.2 La transmission.....	20
2-2.3 La réflexion.....	20
2-3 CELLULES SOLAIRES A BASE DE SILICIUM.....	21
2-3.1 Silicium.....	21
2-3.2 Elaboration de la cellule.....	23
2-3.3 Réduction de la silice :.....	23
2-3.4 Purification du silicium :.....	23
2-4 LES SEMI CONDUCTEUR ET LE DOPAGE.....	26
2-4.1 Bandes d'énergie.....	27
2-4.2 Les semi-conducteurs intrinsèques.....	27
2-4.3 Le dopage.....	28
2-4.4 Jonction P-N.....	29
2-5 ETAPES DE FABRICATION D'UNE CELLULE SOLAIRE.....	29
2-6 LES PERTES AU NIVEAU DES CELLULES SOLAIRES CLASSIQUES.....	32
2-7 COUCHE ANTIREFLE.....	34

2-8	<i>ETAT DE L'ART</i>	39
2-9	<i>CONCLUSION</i>	42

CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSIONS

3-1	<i>INTRODUCTION</i>	44
3-2	<i>Présentation du programme PCID</i>	45
3-2.1	<i>Le simulateur PCID</i>	45
3-2.2	<i>Paramètres du dispositif</i>	47
3-2.3	<i>Paramètre des régions</i>	47
3-2.4	<i>Paramètres d'excitation</i>	48
3-2.5	<i>Résultats</i>	48
3-3	<i>Première partie : Simulation par PCID</i>	49
3-3.1	<i>Structure simulée</i>	49
3-3.2	<i>Paramètres de la structure simulée</i> :.....	50
3-4	<i>EXPLOITATION DES RESULTATS DE LA SIMULATION</i>	51
3-4.1	<i>Influence de l'épaisseur de la base</i> :.....	52
3-4.2	<i>Influence de l'épaisseur de l'émetteur</i> :.....	53
3-4.3	<i>Influence du dopage de l'émetteur</i> :.....	54
3-4.4	<i>Influence du dopage de la base</i> :.....	55
3-4.5	<i>Influence de la durée de vie(taux de recombinaison)</i> :.....	56
3-4.6	<i>Influence du dopage du BSF</i> :.....	57
3-4.7	<i>Influence de l'épaisseur du BSF</i> :.....	58
3-4.8	<i>Influence des vitesses des recombinaison (face avant et face arriere)</i>	59
3-4.9	<i>L'effet de la couche anti reflet</i> :.....	61
3-4.10	<i>l'influence des paramètres de la CAR sur le rendement</i>	62
3-5	<i>REPONSE SPECTRALE DE LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE</i>	65
3-6	<i>LA CARACTERISTIQUE I(V)</i>	65
3-7	<i>CONCLUSION</i>	66
	<i>CONCLUSION GENERALE</i>	67

Liste des figures

FIGURE 1-1: <i>Représentation schématique des différentes constantes d'illumination</i>	7
FIGURE 1-2: <i>Représentation graphique des spectres solaire AM.0 et AM1.5 en fonction de la longueur d'onde</i>	7
FIGURE 1-3 : <i>Cellule photovoltaïque et agencement des cellules photovoltaïques</i>	9
FIGURE 1-4 : <i>Les différentes technologies</i>	9
FIGURE 1-5: <i>Représentation du schéma de base d'une cellule solaire</i>	12
FIGURE 1-6: <i>Structure et principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque</i>	13
FIGURE 1-7 : <i>Points et valeurs remarquables des caractéristiques $I=f(v)$ et $P=f(v)$ d'une cellule solaire</i>	15
FIGURE 1-8 : <i>Le circuit électrique équivalent de la cellule solaire conventionnelle à exponentielle simple</i>	16
FIGURE 2-1: <i>Trois événements optiques d'un rayon lumineux</i>	19
FIGURE 2-2: <i>Description schématique de la propagation d'un rayon incident</i>	20
FIGURE 2-3: <i>Structure de silicium cristallin</i>	21
FIGURE 2-4: <i>Structure de bande du silicium</i>	22
FIGURE 2-5: <i>Chaine de fabrication d'une cellule photovoltaïque au silicium</i>	23
FIGURE 2-6: <i>Cellule solaire monocristallines</i>	24
FIGURE 2-7: <i>Structure cristalline(a) amorphe(b)</i>	25
FIGURE 2-8: <i>Structure du silicium polycristallin</i>	26
FIGURE 2-9: <i>la bande d'énergie</i>	27
FIGURE 2-10: <i>déplacement des électrons dans la jonction P-N [</i>	29
FIGURE 2-11: <i>Elément d'une cellule photovoltaïque</i>	29
FIGURE 2-12: <i>Diffusion de la lumière sur une surface texturée augmentant le piégeage</i>	31
FIGURE 2-13: <i>Principales pertes intrinsèques pour une cellule photovoltaïque en silicium. (1) Pertes des photons de grandes longueurs d'onde. (2) Pertes dues à l'énergie excédentaire des photons [Ricaud]. L'insert illustre le phénomène de thermalisation</i>	33
FIGURE 2-14: <i>réflectivité à l'interface des deux milieux</i>	35
FIGURE 2-15: <i>Schéma comparatif des phénomènes de réflexion sur surfaces plane et texturée</i> ...	37
FIGURE 2-16: <i>différentes structures des cellules solaires étudiées</i>	39
FIGURE 2-17: <i>Effet des couches antireflets sur la réponse spectrale</i>	40

FIGURE 2-18: <i>F(a) Comparaison de la réflectivité mesurée et simulée (IMD) pour un substrat de silicium recouvert</i>	41
FIGURE 3-1: <i>Fenêtre principale de PC1D</i>	46
FIGURE 3-2: <i>schéma de la cellule référence (conventionnelle)</i>	49
FIGURE 3-3: <i>Variation de la tension de circuit ouvert, le courant de court circuit et le rendement en fonction de l'épaisseur de la base.</i>	52
FIGURE 3-4: <i>Variation de la tension de circuit ouvert, le courant de court circuit et le rendement en fonction de l'épaisseur de l'émetteur.</i>	53
FIGURE 3-5: <i>Variation de la tension de circuit ouvert, le courant de court circuit et le rendement en fonction du dopage de l'émetteur</i>	54
FIGURE 3-6: <i>Variation de la tension de circuit ouvert, le courant de court circuit et le rendement en fonction du dopage de la BASE.</i>	55
FIGURE 3-7: <i>Variation de la tension de circuit ouvert, le courant de court circuit et le rendement en fonction du durée de vie</i>	56
FIGURE 3-8: <i>Variation de la tension de circuit ouvert, le courant de court circuit et le rendement en fonction de dopage du BSF.</i>	57
FIGURE 3-9: <i>Variation de la tension de circuit ouvert, le courant de court circuit et le rendement en fonction de l'épaisseur du BSF.</i>	58
FIGURE 3-10: <i>Variation de la tension de circuit ouvert, le courant de court circuit et le rendement en fonction de vitesse face avant</i>	59
FIGURE 3-11: <i>Variation de la tension de circuit ouvert, le courant de court circuit et le rendement en fonction de vitesse face arriere.</i>	60
FIGURE 3-12: <i>Evolution du rendement, en fonction de l'épaisseur de la couche anti reflet</i>	62
FIGURE 3-13: <i>Evolution du rendement, en fonction de l'indice de la couche anti reflet</i>	63
FIGURE 3-14: <i>Effet de la couche antireflet sur la réponse spectrale.</i>	65
FIGURE3-15: <i>la caractéristique I-V d'unecellule solaire</i>	65

Liste des tableaux

TABLEAU 3-1 : paramètre de la cellule de référence.....	50
TABLEAU 3-2 : les résultats des paramètres de cellule de référence.....	51
TABLEAU 3-3 : paramètres variables pendant la simulation.....	51
TABLEAU 3-4 : l'influence de la couche anti reflet sur le rendement.....	61
TABLEAU 3-5 : l'influence de l'absence de couche anti reflet sur le rendement.....	61
TABLEAU 3-6 : les conditions optimales pour une bonne cellule solaire.....	64

Liste des symboles

h	constante de Planck	eV.s
ν	fréquence du photon	s ⁻¹
c	vitesse de la lumière dans le vide	m/s
$F(\lambda)$	densité du flux de photons	photons.cm ⁻² s ⁻¹
T	température ambiante	°K
q	charge élémentaire	C
λ	longueur d'onde	μm
X_j	profondeur de jonction	μm
X_B	épaisseur de la base de la cellule supérieure	μm
n_i	concentration intrinsèque	cm ⁻³
J_{CC}	densité du courant de court-circuit	mA/cm ²
J_{dr}	densité du courant dans le ZCE	mA/cm ²
J_n	courant photon généré dans l'émetteur	mA/cm ²
J_P	densité du courant dans la base	mA/cm ²
J_{Obs}	densité du courant d'obscurité	mA/cm ²
τ	Durées de vie des électrons et des trous	μs
FF	facteur de tension	V
V_{CO}	tension en circuit ouvert	V
I_{CC}	le cou-courant	A
G	Paires électron-trou	
V_d	tension de diffusion	V
FF	facteur de forme	%

η	Rendement de conversion	%
QE	Rendement quantique	%
$R(\lambda)$	coefficient de réflexion	%
R_s	résistance série	
R_{sh}	résistance parallèle	
n_0	indice de réfraction de l'Air	
α	coefficient d'absorption	cm^{-1}
S_f, S_b	vitesse de recombinaison en surface cm/s	
E	champ électrique	V / c
P_{\max}	puissance maximum	mW/cm^2
IQE	rendement quantique	%

Z.C.E : Zone de charge d'espace.

AM0 : Spectre solaire hors atmosphère.

AM1.5G : Spectre solaire terrestre (global).

AM : Air Mass.

ARC : Anti-Reflective Coatings.

BSF : Back Surface Field.

UV : Ultraviolet.

PC1D : Personal Computer One Dimension.

ITO : Indium Tin Oxide

IR : Infrarouge

CAR : Anti-Reflective Coatings

INTRODUCTION GENERAL

L'énergie a été depuis l'antiquité le moteur de l'activité humaine, elle joue un rôle très important dans la vie quotidienne et dans le développement des nations. Selon les besoins plusieurs formes d'énergies sont apparues au fur et à mesure du développement de la civilisation humaine.

Généralement ces formes proviennent des sources d'énergie fossiles telles que le charbon, le pétrole, le gaz naturel et l'uranium. L'épuisement et la pollution provoquée par ces sources ainsi que la crise énergétique des années soixante-dix, amènent les pays qui ont de grands besoins d'énergie à se tourner vers des sources d'énergies renouvelables telles que le soleil, le vent, l'eau, la biomasse et la géothermie[1].

Parmi ces sources d'énergie on trouve le soleil, qui est contrairement aux autres sources d'énergies renouvelables, abondante et propre, d'autre part annuellement elle fournit à la terre une énergie supérieure à celle de la consommation mondiale.

L'électricité est l'une des formes non polluantes et silencieuses de conversion de l'énergie solaire, elle se produit au moyen d'un dispositif de conversion appelée cellule solaire basé sur l'effet photovoltaïque.

Le soleil fournit une énergie importante malgré la distance considérable qui le sépare de la terre.

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité au sein de matériaux semi-conducteurs comme le silicium [1].

Son utilisation a débuté au cours des années soixante pour les applications spatiales, et vers les années soixante dix pour les premières applications terrestre [2]. Les rendements obtenus pour les premières cellules étaient de l'ordre de 4 %.

Pour atteindre des rendements de conversion plus élevés, la cellule commençait alors à changer de configuration. La recherche s'oriente vers la réduction des pertes par réflexion. Ces pertes s'évaluent à 35% sur une surface de silicium. La qualité des revêtements anti réfléchissant et donc un paramètre essentiel pour obtenir des cellules solaires à rendement élevé [3, 4].

INTRODUCTION GENERALE

La solution consiste à déposer une couche quart d'onde d'un diélectrique à indice de réfraction intermédiaire entre celui de l'émetteur et celui de l'air (ZnO, ITO Oxide, SiO₂, TiO₂, MgF₂, ZnS, SiN_x)[5].

L'objectif principal de ce travail est simulé une cellule solaire à base de silicium par le programme PC1D permettant d'acquérir les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque.

Cette étude se présente de la façon suivante :

Le premier chapitre constitue un rappel général de quelques données de base concernant le rayonnement solaire, le principe de la conversion photovoltaïque et les paramètres essentiels caractérisant une cellule solaire

Dans le deuxième chapitre, nous présentons les matériaux de base dans la technologie photovoltaïque à savoir le silicium, et les étapes de fabrication d'une cellule solaire, et étudier l'influence de la couche antireflet.

Dans le dernier chapitre, nous présentons nos résultats obtenus par simulation d'une cellule photovoltaïque en utilisant le programme PC1D. Nous présentons aussi dans ce dernier chapitre, l'influence des paramètres de la cellule sur le rendement et sur les paramètres externes à savoir le courant de court circuit (I_{CC}), la tension de circuit ouvert (V_{CO}), le facteur de forme (FF), le rendement de conversion photovoltaïque (η) de la cellule.

CHAPITRE 1

GENERALITE SUR LES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES

1-1 INTRODUCTION

Pour décrire le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque, il est nécessaire de présenter le rayonnement solaire qui est la source d'énergie incidente. Mais commençons d'abord par un rappel historique des dates importantes de la découverte de l'effet photovoltaïque à la réalisation de cellules photovoltaïques.

1-2 HISTORIQUE DE L'EFFET PHOTOVOLTAÏQUE

L'effet photoélectrique est l'émission d'électrons d'un matériau, qui peut être un métal ou un semi-conducteur, lorsqu'il est éclairé. Les électrons ne sont émis que si la fréquence de la lumière est suffisamment élevée (la fréquence limite dépend du matériau), alors que leur nombre, qui détermine l'intensité du courant, est proportionnel à l'intensité de la source lumineuse. Deux effets sont à distinguer : l'émission d'électrons proprement dite et la modification de la conductivité du matériau qui donne l'effet photovoltaïque [6].

La conversion photovoltaïque repose sur l'effet photovoltaïque qui consiste en la transformation de l'énergie lumineuse en énergie électrique. La naissance d'une technologie résulte bien souvent de la combinaison des résultats des travaux connexes menés par nombre de chercheurs. C'est bien le cas pour le photovoltaïque. De la découverte de l'effet photoélectrique à la conception de la cellule photovoltaïque il a fallu attendre un siècle! Voici les dates importantes dans l'histoire du photovoltaïque :

1839 : Le français Alexandre Edmond Becquerel (1820/1891) découvre l'effet photoélectrique.

Avec son père Antoine César Becquerel (1788/1878), ils présentent devant l'Académie des Sciences l'effet photoélectrique expérimenté avec des électrodes de platine et de cuivre plongées dans une solution électrolytique acide [6].

1873 : Willoughby Smith (1828/1891), ingénieur électricien anglais [6].

1873 : Willoughby Smith (1828/1891), ingénieur électricien anglais, découvre avec son assistant J. May les propriétés photosensibles du sélénium [6].

1875 : Ernst Werner Von Siemens (1816/1892), ingénieur et industriel allemand, expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi conducteurs.

Mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire [6].

1877 : William Grylls Adams (1836/1915), professeur anglais, met en évidence l'effet photovoltaïque du sélénium [6].

1885 : Ernst Werner von Siemens précise que la conductivité du sélénium est proportionnelle à la racine carrée de l'intensité de la lumière et imagine les possibilités de captage de l'énergie solaire.

1887 : Heinrich Rudolf Hertz (1857/1894), physicien allemand, publie les résultats de ses expériences photoélectriques dans un article intitulé "Sur un effet de la lumière ultraviolette sur les décharges électriques" [6].

1902 : Philippe Lenard (1862/1947), physicien allemand, fait une série d'observations sur l'énergie cinétique des électrons et détermine que le seuil de l'effet photoélectrique dépend de la fréquence de la lumière incidente [6].

1905 : Albert Einstein (1879/1955), physicien allemand, publie "Sur un point de vue heuristique concernant la production et la transformation de la lumière". En 1921, il reçoit le prix Nobel de physique pour son apport à la physique théorique et particulièrement son explication de l'effet photoélectrique [6].

1916 : Robert Andrews Millikan (1868/1953), physicien américain, confirme expérimentalement les travaux d'Einstein [6].

1939 : Russel Ohl (1898/1987), ingénieur américain, découvre la jonction p-n et ses travaux le conduisent à développer la première cellule solaire en silicium [6].

1954 : La première photopile a été développée aux États-Unis par les chercheurs des laboratoires Bell (D.M. Chapin, C.S. Fuller, et G. L. Pearson), qui ont découvert que la photosensibilité du silicium pouvait être augmentée en ajoutant des "impuretés" [7]. C'est une technique appelée le "dopage" qui est utilisée pour tous les semi-conducteurs. Leur cellule solaire a un rendement de conversion de 6 %. Cette découverte constitue pour l'industrie spatiale naissante une solution idéale pour satisfaire les besoins en électricité à bord des satellites [7].

1958 : Une cellule avec un rendement de conversion de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace. Ce résumé historique laisse malheureusement dans l'ombre de nombreux chercheurs qui ont directement ou indirectement fait naître la technologie photovoltaïque. Après cet historique, nous allons procéder à une description du rayonnement solaire.

1-3 LE RAYONNEMENT SOLAIRE

1-3.1 Le soleil

➤ **Caractéristiques générales**

Le Soleil est une « petite » étoile, une boule de gaz, dont le diamètre est de 1 391 000 km, et qui est placée à 150 000 000 km de nous (périhélie : 147,1 millions de km et aphélie : 152,1 millions de km) [9].

Notre Soleil est une énorme boule de gaz composée de 70% d'hydrogène et de 28% d'hélium, les 2% restants représentent la plupart des autres atomes présents dans l'univers [8]. Le soleil ne possède pas de surface proprement dite, mais la température de radiation, si on l'assimile à un corps noir, est de 5 700 K [9].

Pour la structure du soleil, on distingue quatre zones particulières: le noyau, la photosphère, la chromosphère et la couronne [10].

- C'est dans le noyau que se produisent les réactions nucléaires libérant une énergie Considérable. L'énergie produite se propage par diffusion radiative puis par convection d'où elle s'échappe sous forme de rayonnement électromagnétique vers l'espace.

- La photosphère est une couche d'environ 300km d'épaisseur. Elle donne l'image visible du soleil. Sa surface apparaît granuleuse.

- La chromosphère est l'atmosphère du soleil. Elle a une épaisseur d'environ 8000 km et une température de 20000 k environs [10].

- La couronne est le prolongement de la photosphère sans limite, elle est formée de gaz peu dense et ionisé. Elle est invisible depuis la terre car son éclat se confond avec celui du ciel bleu. Elle ne peut être observée que pendant une éclipse solaire, sa température est très élevée puisque elle dépasse le million de degré [10].

➤ **Son énergie (Energie « humaine ment » inépuisable)**

C'est une gigantesque bombe thermonucléaire dont la puissance, émise sous forme de photons, représente un chiffre considérable : 3,821026 Watts [10]. C'est le résultat de la combustion de 596 millions de tonnes par seconde d'hydrogène convertis en 592 millions de tonnes par seconde d'hélium. La perte, 4 millions de tonnes/seconde, se traduit sous forme de rayonnement gamma. Chaque cm^2 de sa surface émet une énergie de 6 kilowatts. Mais il n'arrive sur Terre que 5 milliardièmes ($5 \cdot 10^{-9}$) de cette puissance. Cette pile thermonucléaire fonctionne grâce à la transformation de 4 noyaux d'atomes d'hydrogène qui fusionnent pour fournir 1 noyau d'atome d'hélium avec la libération d'une énergie de 25 000 mégawatts par gramme et par seconde (100 milliards de bombes à hydrogène de 1 mégatonne) [10].

➤ **L'atmosphère terrestre**

C'est un véritable filtre, car elle permet de modifier profondément le spectre du rayonnement solaire reçu au niveau du sol. Ce filtre est très utile pour la vie terrestre du fait qu'il réduit considérablement le rayonnement ultraviolet et le flux de particules cosmiques qui sont nocifs pour le développement des cellules vivantes[10].

➤ **Constantes d'illumination**

L'intensité lumineuse issue du soleil et normalement incidente sur la surface de la Terre est appelée la constante solaire. Cette constante est approximativement d'une valeur de $1,4 \text{ kW/m}^2$ au-dessus de la couche atmosphérique. Elle est réduite sur la Terre à 1 kW/m^2 par réflexion et absorption des particules présentes dans la couche atmosphérique [8].

Pour tenir compte de la position relative du soleil qui modifie l'épaisseur d'atmosphère traversée, on introduit un coefficient *MA* appelé masse atmosphérique "masse air" de l'anglais "air mass (AM)", ou nombre d'air masse: C'est la distance parcourue par le rayon lumineux depuis son entrée dans l'atmosphère jusqu'au sol figure1-1. Partant de cette définition, le spectre solaire est subdivisé en plusieurs « masse air ». La désignation AM0 correspond à une masse d'air nulle pour la lumière arrivant au-dessus de notre atmosphère à incidence normale. Le titre AM1 représente le spectre solaire à la surface de la terre quand le soleil est au zénith. L'appellation AM1.5 désigne la masse d'air rencontrée pour la lumière arrivant à 48.2° sur la surface de la terre, soit une lumière plus faible du fait que l'épaisseur de la couche atmosphérique traversée est plus grande.

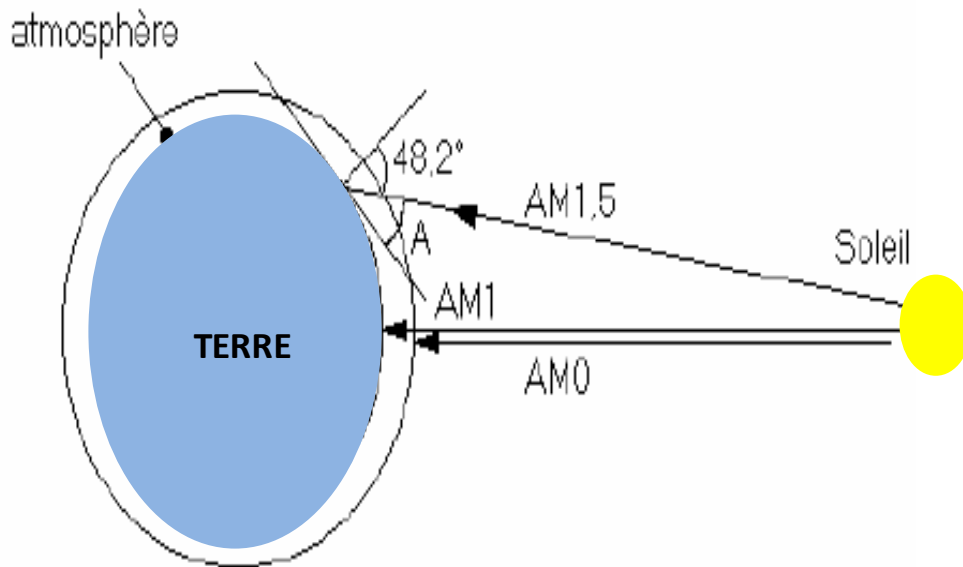


FIGURE 1-1 : Représentation schématique des différentes constantes d'illumination [8]

Dans les conditions normales et au niveau de la mer, le coefficient M_A est calculé comme suit :

$$AM = \frac{1}{\cos\theta} \quad (1.1)$$

Les spectres AM0 et AM1.5 sont représentés sur la figure1- 2.

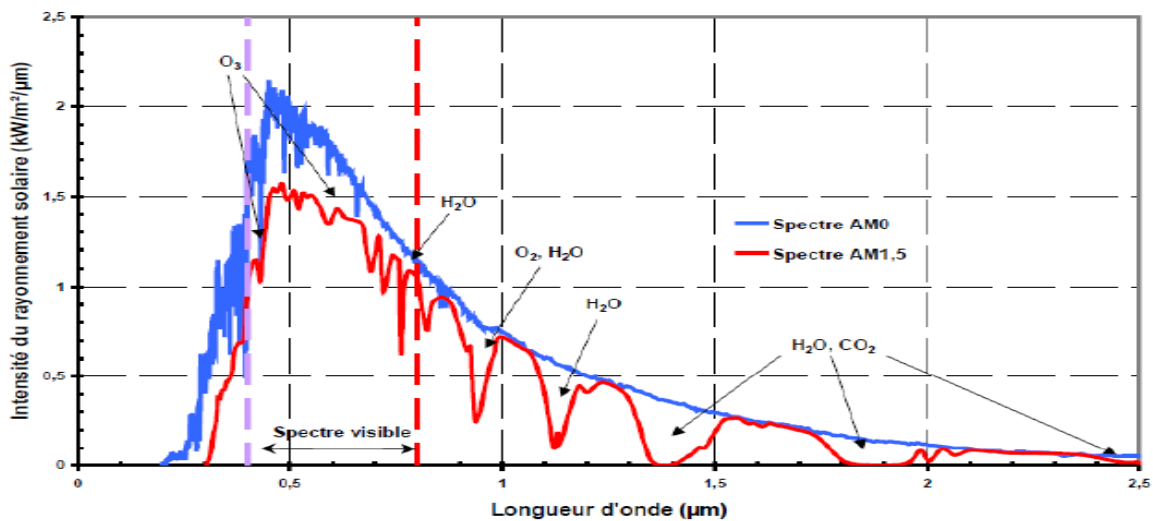


FIGURE 1-2 : Représentation graphique des spectres solaire AM.0 et AM1.5 en fonction de la longueur d'onde [11].

Ces spectres montrent que le soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur variant de 0.2 µm (ultraviolet) à 10 µm (infrarouge). Ce rayonnement solaire se décompose en bandes comme suit [12] :

- ❖ 6.4 % dans la bande ultraviolette (UV) : $0,2 < \lambda \leq 0,38\mu m$.
- ❖ 48,0 % dans la bande visible : $0,38 < \lambda \leq 0,78\mu m$.
- ❖ 45,6 % dans la bande infrarouge (IR) : $0,78 < \lambda \leq 10\mu m$.

1-4 NORMALISATION

Les modules photovoltaïques sont soumis à des conditions standards de qualification qui sont :

Une température de 25°C et un spectre AM1.5 (sous un éclairage égale à 1000 W/m²) [13].

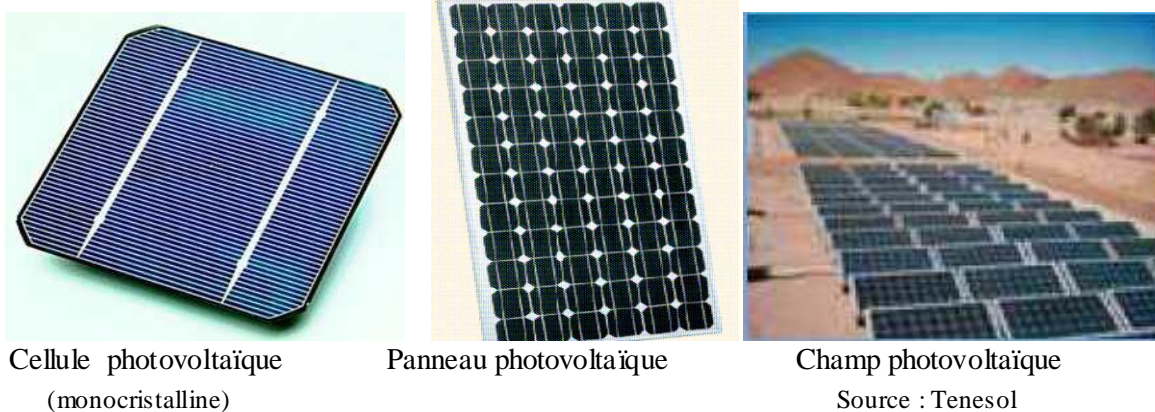
L'irradiation solaire dépend généralement de :

- L'inclination et le positionnement de la surface.
- La distance angulaire du lieu par rapport au soleil.
- Les conditions météorologiques.
- Le moment considéré dans la journée ainsi que la saison de l'année.
- La composition et la nature des couches nuageuses.

La combinaison de tous ces paramètres produit la variabilité dans l'espace et le temps de l'irradiation journalière [13].

1-5 L'ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE

Désigne l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire avec une cellule photovoltaïque. Plusieurs cellules sont reliées entre elles et forment un panneau solaire (ou module) photovoltaïque. Plusieurs modules qui sont regroupés dans une centrale solaire photovoltaïque sont appelés champ photovoltaïque. Le terme photovoltaïque peut désigner soit le phénomène physique - l'effet photovoltaïque - ou la technologie associée [14].



Cellule photovoltaïque
(monocristalline)

Panneau photovoltaïque

Champ photovoltaïque
Source : Tenesol

FIGURE 1-3 Cellule photovoltaïque et agencement des cellules photovoltaïques [14]

1-6 LES DIFFERENTES TECHNOLOGIES

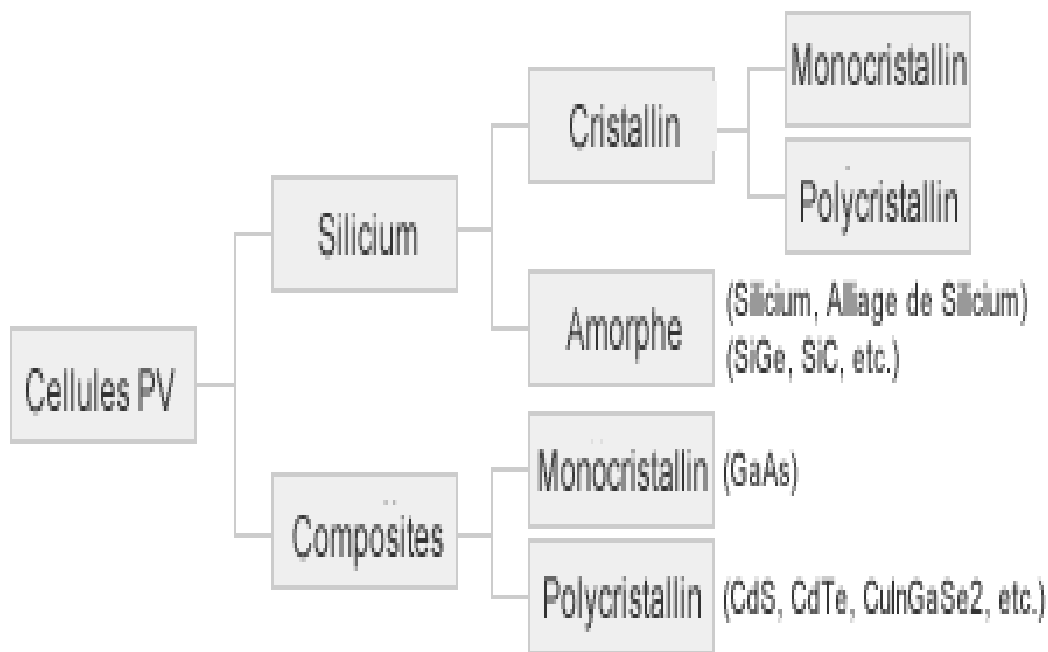


FIGURE 1-4 Les différentes technologies [14]

1-7 LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE.

1-7.1 Structure et principe de fonctionnement

➤ La structure

Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. L'illumination de la structure génère un courant ainsi qu'une tension, fournissant ainsi une puissance électrique au circuit extérieur. Le matériau utilisé doit donc à la fois permettre le transfert d'énergie du photon absorbé à un électron et la collecte de ce dernier de plus haute énergie par un circuit extérieur. De nombreux matériaux et procédés peuvent potentiellement satisfaire ces conditions pour donner une conversion photovoltaïque. En pratique, les matériaux semi-conducteurs, et plus particulièrement le silicium, sont les plus utilisés, le plus souvent sous la forme d'une homojonction p-n. La structure d'une cellule solaire est similaire à celle d'une jonction P-N, le courant sous obscurité dans une telle structure est donné par la formule (2), [15] :

$$I_{obs} = I_s \left[\exp\left(\frac{qV_d}{nkT}\right) \right] - 1 \quad (1.2)$$

n : le coefficient d'idéalité de la jonction P-N ($nn=1.4$).

V_d : Tension aux bornes de la jonction (Volt).

q : Charge élémentaire ($q = 1.6 \times 10^{-19}$ C).

k : Constante de Boltzmann ($k = 1.38 \times 10^{-23}$ J. KK^{-1}).

T : Température (K°).

I_s : Appelé courant inverse de la jonction P-N, possède deux composantes :

- Le courant de diffusion des porteurs minoritaires, constitué par les électrons de la région P et les trous de la région N qui parviennent à atteindre la zone de charge d'espace par diffusion.
- Le courant de génération thermique dû aux paires électrons-trous créées thermiquement dans la zone de charge d'espace.

Le schéma de base d'une cellule solaire est illustré par la figure 3. La cellule solaire se compose de plusieurs couches à savoir:

1-Un contact ohmique avant en forme de grille Le ZnO:Al est utilisé actuellement comme contact avant dans les cellules solaires [16].

2-une couche de passivation avant: la surface des semi-conducteurs contient une densité importante des défauts entraînant des pertes non négligeables liées à la recombinaison en surface. La passivation consiste à améliorer les qualités électroniques de la surface et du volume du matériau en neutralisant les effets de ces défauts électriquement actifs. Diverses couches de passivation sont utilisées en photovoltaïque mais les principales sont l'oxyde thermique du silicium et le nitrure de silicium hydrogéné [16].

3-la couche antireflet (C.A.R): pour minimiser la réflexion de la lumière. Le principe d'action des couches A.R est basé sur l'interférence des faisceaux lumineux dans les couches diélectriques minces. Cette couche est texturée pour augmenter la part de photons absorbés par la cellule, généralement de forme pyramidale. La longueur d'onde de la lumière incidente étant inférieure aux dimensions des structures ainsi réalisés, les rayons incidents suivent les lois de l'optique [16].

4- une couche de type N avec des charges négatives (l'émetteur).

5- une couche de type P avec des charges positives (la base).

6- la zone de charge d'espace (ZCE) est créée entre ces deux couches, c'est-à-dire la base et l'émetteur.

7- un contact arrière métallique qui couvre la surface arrière pour la collecte des porteurs et la protection contre les influences extérieures.

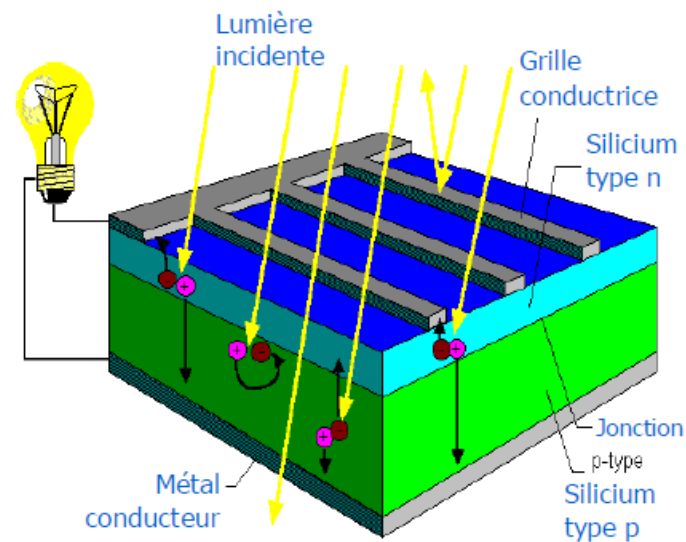


FIGURE 1-5 Représentation du schéma de base d'une cellule solaire [17]

➤ Principe de fonctionnement

Sous l'éclairement les photons incidents créent des porteurs dans chacune des régions P, N et la ZCE de la diode figure 1-6. Le comportement de ces porteurs diffère suivant le lieu de leur création. Dans les zones électriquement neutres P ou N, les photos porteurs minoritaires diffusent, ceux qui atteignent la région de charge d'espace sont propulsés par le champ électrique vers la région où ils deviennent majoritaires. Ces porteurs contribuent donc au courant par leur diffusion: C'est le photo-courant de diffusion. Dans la zone de charge d'espace, les paires électrons-trous créées par les photons, sont dissociées par le champ électrique, l'électron est propulsé vers la région de type n et le trou vers la région de type p. Ces porteurs donnent naissance à un photo-courant de génération. Ces deux contributions s'ajoutent pour créer un photo courant résultant I_{ph} [18]. Ce processus engendre une tension photovoltaïque car le domaine N du semi-conducteur devient chargé de façon négative et le domaine P de façon positive. La présence de contact ohmique assure la collecte des porteurs d'où la création d'un courant photo-généré I_{ph} , somme des deux contributions précédentes, Le photo courant I_{ph} contribue au courant de la diode I_d , appelé courant d'obscurité I_{obs} , qui résulte de la polarisation du composant. Le courant résultant est:

$$I = I_{ph} - I_d \quad (1.3)$$

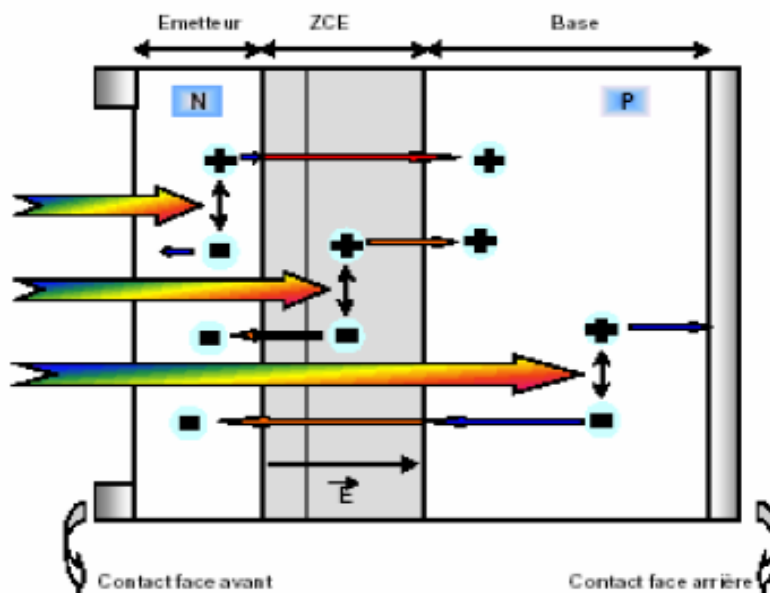


FIGURE 1-6 Structure et principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque [10]

1-7.2 Caractéristiques électriques de la cellule solaire

Les différents paramètres caractéristiques de la cellule sont les suivants :

➤ **Le courant de court-circuit (I_{CC})**

Il définit la quantité G des paires électron-trou créés et qui traverse la jonction sans recombinaison, ou bien c'est le courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule [19]. Il est donné par la relation suivante :

$$I_{ph} = qG(L_n + L_p) \quad (1.4)$$

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

Pour une diode idéale $I_{CC} = I_{ph}$

➤ **La tension en circuit ouvert (V_{CO})**

C'est la tension pour laquelle la cellule ne fournit aucun courant [19].

Elle est obtenue à partir de l'équation :

$$V_{CO} = \frac{KT}{q} \ln \left(\frac{I_{CC}}{I_S} + 1 \right) \quad (1.5)$$

➤ **Le facteur de forme (FF)**

Il définit l'efficacité de la cellule solaire, c'est le rapport entre la puissance maximale débitée

($P_M = V_M \times I_M$) Et la puissance idéale ($V_{CO} \times I_{CC}$) [19]. Il est obtenu par la formule (1.6), (voire Figure 7):

$$FF = \frac{V_M \times I_M}{V_{CO} \times I_{CC}} \quad (1.6)$$

Avec :

V_M : Tension correspondant à la puissance maximale fournie par la cellule.

I_M : Courant correspondant à la puissance maximale fournie par la cellule

Et :

$$P_M = V_M \times I_M \quad (1.7)$$

P_M : La puissance maximale

➤ **Le rendement de conversion d'énergie (η)**

C'est le rapport entre la puissance maximale générée et la puissance du rayonnement solaire incident (P_0) [19].

$$\eta = FF \frac{V_{CO} \times I_{CC}}{P_0} = \frac{V_M \times I_M}{P_0} \quad (1.8)$$

Pour illustration, les paramètres (V_{CO} , I_{CC} , I_M , V_M , P_M) sont reportés sur la figure 1-7.

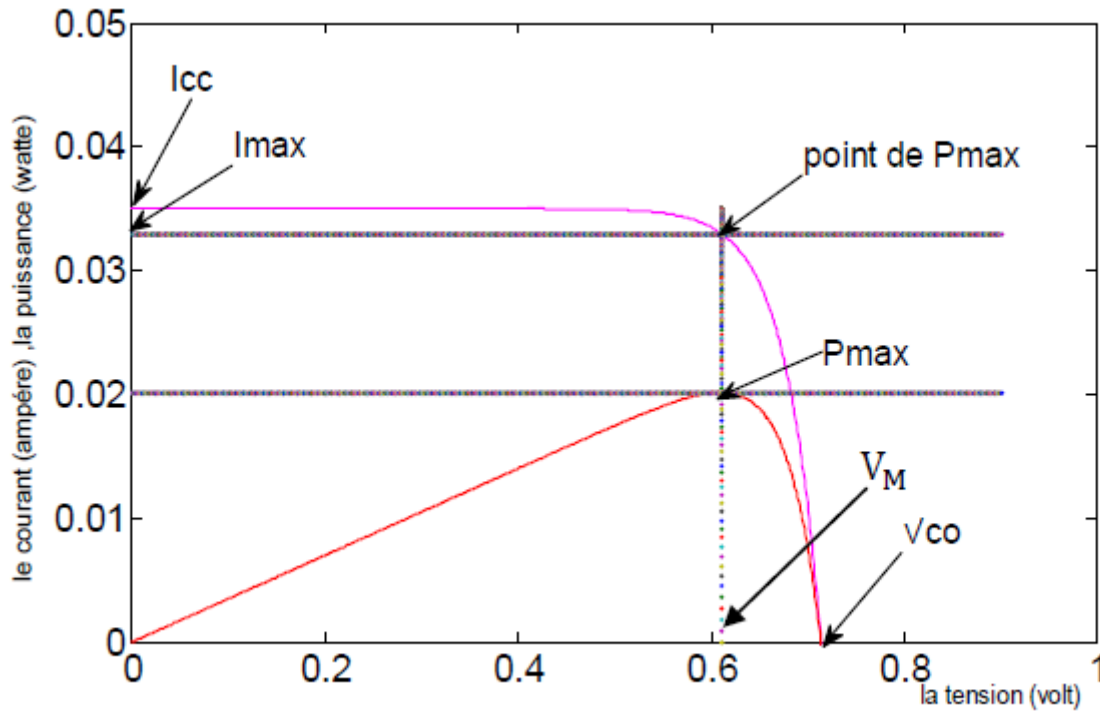


FIGURE 1-7 Points et valeurs remarquables des caractéristiques $I=f(v)$ et $P=f(v)$ d'une cellule solaire conventionnelle [19].

1-7.3 Modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque

En pratique, la conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique n'est pas totale car différentes pertes viennent influencer le rendement de la cellule. Pour développer un circuit équivalent à une cellule photovoltaïque, tout en tenant compte des différentes limitations de ce dispositif photovoltaïque, on utilise un Modèle à exponentielle simple. Ce dernier, est le plus courant et est utilisé par de nombreux auteurs pour obtenir des valeurs de certains paramètres de la caractéristique courant-tension d'une cellule solaire. Cette caractéristique est définie par l'équation suivante [20] :

$$I(V) = I_{ph} - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} - I_s \left[\exp\left(\frac{q(V + R_s I)}{nKt}\right) - 1 \right] \quad (1.9)$$

Le circuit électrique équivalent est schématisé sur la (figure 8).

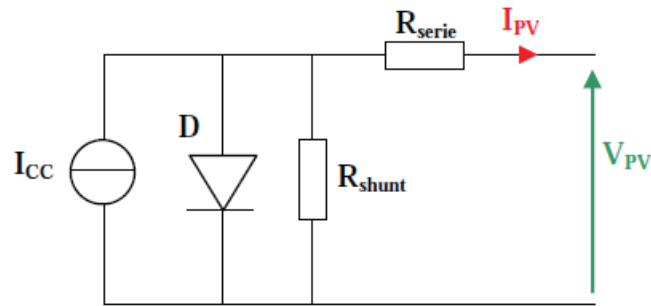


FIGURE 1-8 Le circuit électrique équivalent de la cellule solaire conventionnelle à exponentielle simple [21]

Les différents paramètres de ce modèle sont :

- a) Le générateur de courant : il délivre le courant I_{ph} correspondant au courant photo-généré.
- b) La résistance série: elle prend en compte la résistivité propre aux contacts entre les différentes régions constitutives de la cellule, à savoir l'émetteur, la base et les contacts métalliques.
- c) La résistance parallèle: également connue sous le nom de résistance shunt, elle traduit l'existence de shunts à travers l'émetteur, causé par un défaut. Ceci est le cas lorsque la diffusion des contacts métalliques à haute température perce l'émetteur par des particules d'impuretés. Elle peut aussi être due à un court-circuit sur les bords de la cellule. Cette valeur devra être la plus élevée possible [21].
- d) I_s : le courant de saturation de la diode
- e) : le facteur d'idéalité de la diode.

La méthode de calcul du courant I_{ph} est présentée dans le deuxième chapitre. Elle est basée sur la modélisation de trois courants :

$$I_{ph} = J_n + J_p + J_{dr} \quad (1.10)$$

Où :

J_n : le courant photo-généré dans l'émetteur.

J_p : le courant photo-généré dans la base pour la cellule simple.

J_{dr} : le courant photo-généré dans la ZCE.

1-7.4 Réponse spectrale de la cellule photovoltaïque (R_s)

La réponse spectrale, appelée aussi rendement de collection, est définie comme étant le rapport entre la densité de courant collectée et la densité de puissance pour chaque longueur d'onde du rayonnement lumineux.

Elle est donnée par la relation suivante [21] :

$$R_s = \frac{q}{h\nu \cdot EQE(\lambda)} \quad (1.11)$$

EQE: représente le rendement quantique externe (rendement de collection externe) de la cellule, c'est-à-dire le rapport du nombre de porteurs générés sur le nombre de photons incidents. Pour une longueur d'onde donnée, 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 (The internal quantum efficiency) $IQE(\lambda)$ de la cellule solaire par.

$$IQE(\lambda) = EQE(\lambda) \cdot (1 - R(\lambda)) \quad (1.12)$$

Avec

$$IQE(\lambda) = \frac{J(\lambda)}{\phi(\lambda) \times q(1 - R(\lambda))} \quad (1.13)$$

$J(\lambda)$: est la densité de courant collectée à la longueur d'onde λ .

$\phi(\lambda) \times q(1 - R(\lambda))$: est la partie transmise du flux de photons incidents, dans le matériau.

1-8 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons démontré le mode de fonctionnement de la cellule solaire à partir de son absorption du spectre solaire jusqu'à la production d'électricité. Nous avons décrit dans ce chapitre les composants du spectre solaire et le principe de fonctionnement de la cellule solaire, nous avons ensuite fait une modélisation de la cellule et nous avons fini ce chapitre par la modélisation de la technologie photovoltaïque.

CHAPITRE 2

***MATERIAUX SEMI CONDUCTEUR
POUR CELLULES SOLAIRE***

2-1 INTRODUCTION

Les cellules solaires sont des dispositifs à base de semi-conducteurs qui convertissent la lumière solaire en énergie électrique en utilisant l'effet photovoltaïque. Actuellement les matériaux utilisés se distinguent suivant deux branches principales: le silicium, les couches minces, Dans ce chapitre nous allons présenter le silicium comme matériau de base dans la technologie photovoltaïque et les étapes de fabrication d'une cellule solaire .puis on va voir l'effet de la couche anti reflet pour minimiser les pertes de la réflexion de la lumière.

2-2 PROPRIETES OPTIQUES

Un rayon lumineux formé de photons entrant en contact sur un matériau solide subit trois manifestations :

- l'absorption
- la transmission
- La réflexion

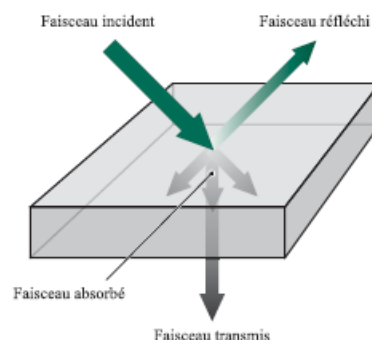


FIGURE 2-1: *Trois événements optiques d'un rayon lumineux [22].*

2-2.1 L'absorption

Seule la lumière absorbée est restituée sous forme d'énergie électrique. Le matériau photovoltaïque utilise différemment toutes les longueurs d'ondes du spectre solaire comme nous l'avons présenté au chapitre 1 : il se caractérise par sa réponse spectrale, c'est-à-dire l'efficacité avec laquelle il transforme l'énergie d'un rayonnement d'une longueur d'onde en énergie électrique. Cette efficacité dépend essentiellement des caractéristiques du matériau. Ainsi, la courbe d'absorption d'une cellule photovoltaïque au silicium ne concerne qu'une partie du rayonnement : celle comprise entre 0.35 et 1.1 μm [22].

À savoir une partie du rayonnement ultraviolet (0.35 à 0.40 μm), l'essentiel du rayonnement visible (0,40 à 0,70 μm) et une partie du rayonnement infrarouge (0.70 à 1.10 μm) ou proche infrarouge [22].

2-2.2 La transmission

Selon l'épaisseur du matériau, la transmission de la lumière est plus ou moins importante.

Les cellules au silicium cristallin à forte épaisseur (200 μm) ne transmettent pas de lumière, contrairement aux dispositifs en couche mince de type silicium amorphe (épaisseur < 1 μm) à travers lesquels la transmission n'est pas négligeable. Pour diminuer cette transmission, il suffit de rendre rugueuse la face arrière ou d'appliquer, à l'arrière d'un matériau une électrode présentant une propriété de réflexion adaptée (comme l'aluminium) qui piège par réflexion la lumière dans le matériau [22].

2-2.3 La réflexion

La réflexion de la lumière peut être spéculaire ou bien diffuse suivant la nature de l'interface. De manière courante, le terme « réflexion » est utilisé pour décrire la réflexion spéculaire sur une surface parfaitement plane. Et les lois géométriques de la réflexion ne s'appliquent qu'à la réflexion spéculaire [22].



FIGURE 2-2: Description schématique de la propagation d'un rayon incident [22].

La réduction de la réflexion de la lumière se fait en jouant sur les indices de réfraction des matériaux traversés, indices qui régissent directement le taux de réflexion des matériaux. Plus la différence des indices de réfraction est élevée de part et d'autre d'une surface, plus elle est réfléchissante. Par exemple, le silicium brut, d'un indice de réfraction de 3,75, au contact direct avec l'air (d'un indice de réfraction de 1) réfléchit 33% de la lumière incidente, pourcentage trop élevé pour assurer un rendement acceptable de la conversion photovoltaïque [22]. Le moyen de réduire ce taux de réflexion est d'intercaler entre le silicium et l'air un empilement optique constitué de matériaux à indices de réfraction différents afin de diminuer le saut d'indice de réfraction entre l'air et le silicium [22].

La réflexion dépend de la morphologie de l'interface, dès que la taille des défauts de l'interface est inférieure ou de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde, l'interface tend à devenir parfaitement réfléchissante. C'est pourquoi une surface de métal brut qui diffuse fortement devient parfaitement réfléchissante quand on la polit. Si l'on construit un miroir pour la lumière

visible, la taille des défauts ne doit pas excéder quelques centaines de nanomètres. De même la rugosité de la surface augmente la partie diffuse des rayons transmis et réfléchis [22].

2-3 CELLULES SOLAIRES A BASE DE SILICIUM

2-3.1 SILICIUM

Le Silicium est un matériau monoatomique qui cristallise dans la structure diamant. Il est constitué de deux réseaux cubiques faces centrées (CFC), imbriqués, décalés l'un par rapport à l'autre d'un quart de la diagonale principale. La maille élémentaire contient deux atomes de silicium, occupant les positions $(0, 0, 0)$ et $(1/4, 1/4, 1/4)$. Chaque atome de silicium possède une coordination tétraédrique et établit des liaisons de valence avec ses quatre voisins [23].

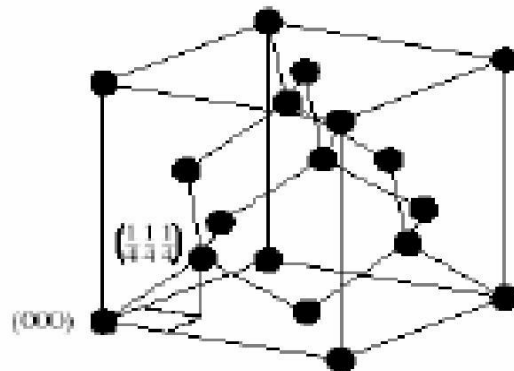


FIGURE 2-3: Structure de silicium cristallin [23].

Le silicium offre de nombreux avantages ; présent en abondance dans la croûte terrestre, c'est un matériau non toxique. Outre ses propriétés semi-conductrices, le silicium présente un oxyde naturel SiO_2 qui trouve de nombreuses applications en micro-électronique. Enfin, il est aisé de modifier les propriétés électriques du silicium en introduisant dans la matrice cristalline des atomes dopants tels que le Bore (induisant un dopage de type P) ou le Phosphore (induisant un dopage de type N). D'un point de vue photovoltaïque, le seul inconvénient du silicium réside dans sa structure électronique qui présente un gap indirect, $E_g = 1.12 \text{ eV}$ à 300 K, correspondant à une longueur

d'onde = 1107 nm [23]. Par conséquent, l'absorption du rayonnement solaire par le silicium sera plus faible que celle d'un semi-conducteur à gap direct comme l'arséniure de gallium GaAs.

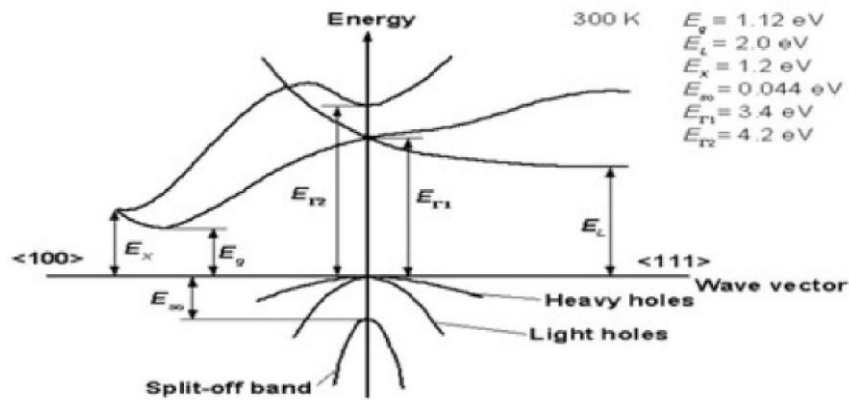


FIGURE 2-4: : Structure de bande du silicium [24]

Ainsi, si l'on considère les coefficients d'absorption des matériaux semi-conducteurs, l'épaisseur de silicium nécessaire pour absorber 90% du spectre solaire doit être de 100 mm [25]. La longueur de diffusion des porteurs minoritaires au sein du silicium, et par conséquent la qualité cristalline du matériau, devra alors tenir compte de ces impératifs à savoir une longueur de diffusion au moins égale à deux fois l'épaisseur de la cellule photovoltaïque. Le silicium utilisé pour les cellules photovoltaïques doit être d'une grande pureté, quelque soit sa forme. Comme beaucoup d'autres éléments, le silicium peut exister à température ambiante sous différentes structures, dont les deux extrêmes sont respectivement l'état amorphe et l'état cristallin (monocristallin ou polycristallin) [25].

Le silicium est le deuxième élément de la croûte terrestre, on le trouve sous forme oxydée (sable, silice, quartz). Les cellules de première génération sont basées sur une seule jonction P-N et utilisent généralement le silicium sous forme cristalline comme matériau semi-conducteur [25].

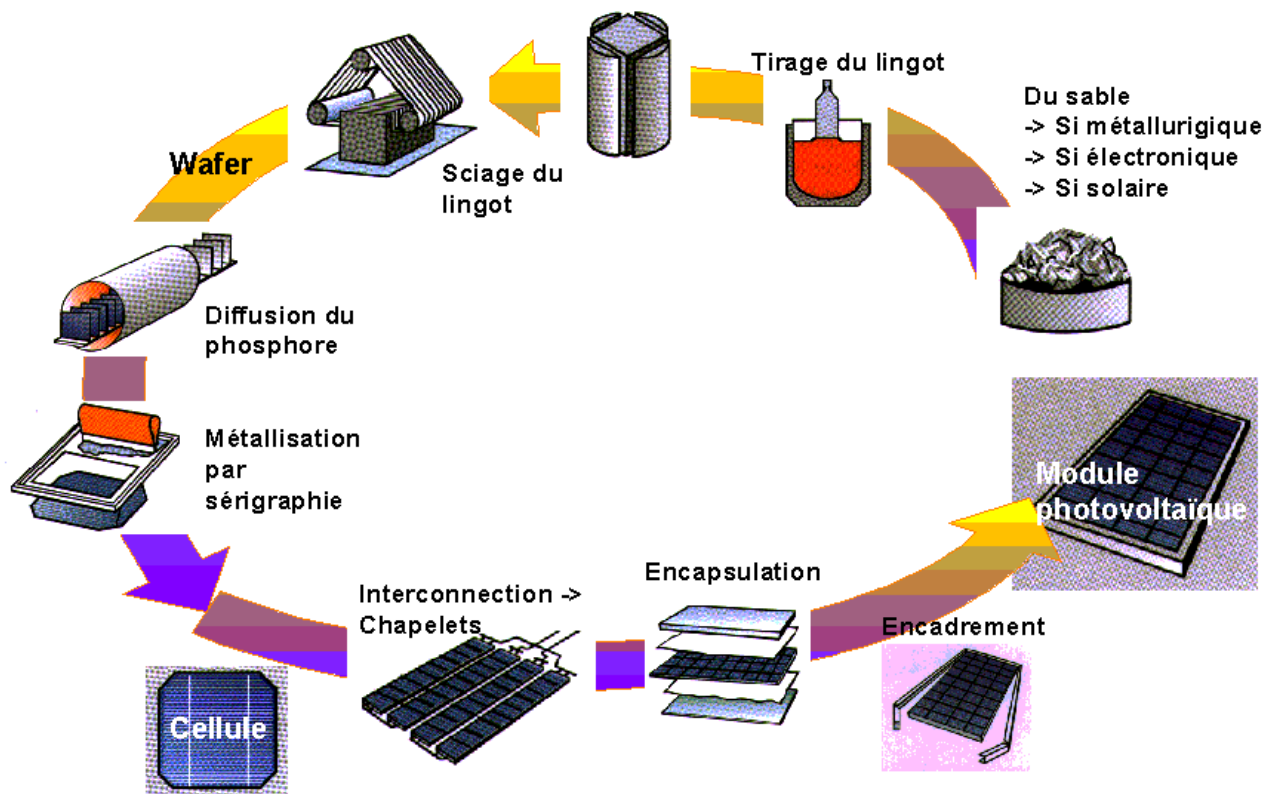


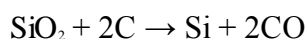
FIGURE 2-5: : Chaîne de fabrication d'une cellule photovoltaïque au silicium [25].

2-3.2 Elaboration de la cellule

Le silicium n'existe pas à l'état natif, mais sous forme d'oxydes la silice ou de silicates, qui sont des composés extrêmement stable [26].

2-3.3 Réduction de la silice :

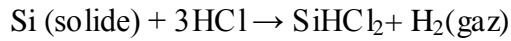
On réalise une électrolyse dans un four à arc pour atteindre une température assez élevée pour faire fondre la silice. La silice est mélangée avec du carbone [26].



Le silicium obtenu a une pureté de 98%, il faut encore le purifier pour obtenir un matériau de qualité électronique [26].

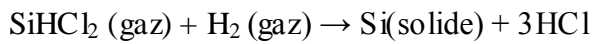
2-3.4 Purification du silicium :

On va effectuer une purification chimique, une des méthodes consiste à faire une distillation à partir de SiHCl_3 (trichlorosilane) liquide à température ambiante [26].



C'est une première purification car des précipités chlorés ne se mélangent pas au trichlorosilane [26].

Le SiHCl_3 (qui a une température d'ébullition faible: 31.8°C) est ensuite purifié par distillation [26].



Le silicium précédemment obtenu était polycristallin, il y a nécessité de le transformer en monocristallin pour améliorer sa conductivité. Les rendements de conversion pour les modules commercialisés en silicium sont dans la gamme 15 – 20% pour le silicium monocristallin [26].

➤Etat monocristallin:

La structure monocristalline est définie comme étant un arrangement ordonné et périodique d'atomes au sein d'un réseau cristallographique dont l'élément élémentaire est appelée maille. Le silicium cristallin dans la structure cubique diamant, qui est une structure cubique à faces centré (CFC) à motif, avec une distance interatomique ou paramètre de maille

$d=2.35\text{\AA}$, et des angles de liaison bien définis [27], comme l'indique la figure 2-6. Les liaisons chimiques dans le silicium sont de type covalentes et à ce type de liaison correspond des états électroniques couplés entre eux par potentiel périodique du cristal, conduisant à des états permis et interdits pour les électrons, et qui définissent l'existence de bandes d'énergies permises et interdites.



FIGURE 2-6: *Cellule solaire monocristallines [24].*

➤ **Etat amorphe:**

Cet état est systématiquement défini comme étant dépourvu d'ordre cristallin à longue distance par rapport à la distance interatomique. Les angles inter-liaison et les distances interatomiques ne sont pas respectés et seul un ordre à courte distance peut exister. Dans le silicium amorphe, les premiers voisins d'un atome de silicium seront bien aux sommets d'un tétraèdre, mais il y aura distorsion des angles de liaisons en atteignant les seconds, troisièmes voisins. On aboutira à une disposition des atomes ou certaines liaisons chimiques ne peuvent pas être satisfaites pour des raisons géométriques. Les niveaux d'énergie correspondant aux liaisons non satisfaites sont situés dans la région de la bande interdite du cristal puisque c'est précisément l'hybridation qui crée la bande interdite [28].

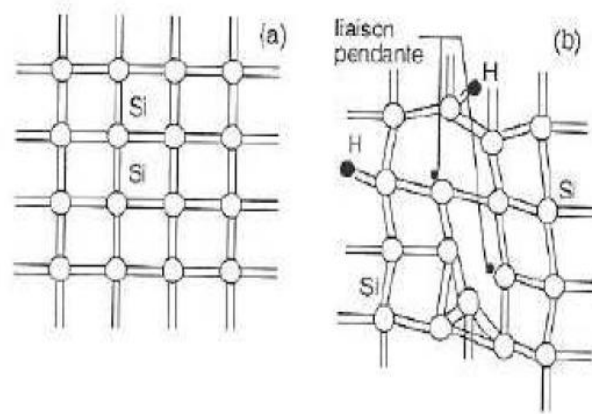


FIGURE 2-7: Structure cristalline(a) amorphe(b)[28]

➤ **Etat polycristallin:**

Une structure polycristalline est considérée comme étant un état intermédiaire entre l'état cristallin et l'état amorphe, elle est souvent considérée comme un mélange de ces deux phases. Le silicium polycristallin est constitué de grains monocristallins séparés entre eux par des zones désordonnées et riches de défauts cristallins, que l'on peut assimiler à du silicium amorphe et que l'on nomme joints de grains. Chacun de ces deux composants de silicium

polycristallin, grains et joints de grains, possède des caractéristiques propres que nous rappelons brièvement [28]:

- 1-Le grain peut être défini par sa taille et par sa qualité cristalline.

2–Les caractéristiques essentielles du joint de grain sont ses dimensions c'est-à-dire son épaisseur, et également ses défauts.

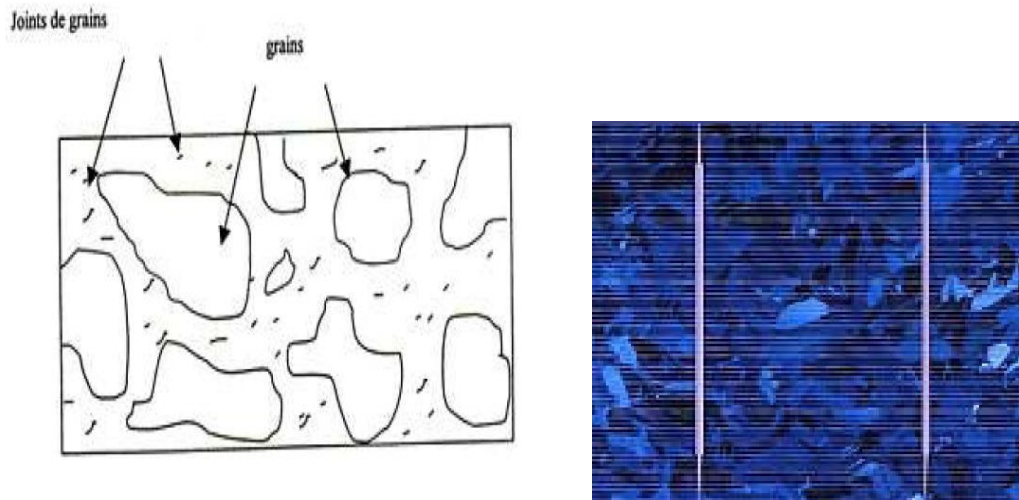


FIGURE 2-8: *Structure du silicium polycristallin [28].*

La structure polycristalline de silicium dépend fortement de ses paramètres du dépôt et en générale, la qualité de ce matériau est déterminée par la taille et la qualité des grains ou des cristallites qui le forment. En effet, les grains d'un polycristal ne sont pas de vraies cristallites monocristallines, ils peuvent contenir des défauts électriques venant d'états localisés à l'intérieur de la bande interdite [29].

En général, la qualité d'un matériau polycristallin est déterminée par la taille et l'orientation de ces grains, par la densité de défauts dans les joints de grains et dans les grains, et par les fractions volumiques de chaque état constituant le matériau. Les caractéristiques structurales d'un matériau polycristallin peuvent introduire des états localisés à l'intérieur de la bande interdite (liaison pendante). La qualité structurale détermine donc la structure électronique du matériau, et par conséquent le phénomène de transport à l'intérieur du matériau, sans tenir compte d'un dopage éventuel qui modifie les propriétés électriques du matériau comme pour un semi-conducteur parfait [29].

2-4 LES SEMI CODUCTEUR ET LE DOPAGE

Conducteurs: Ils sont caractérisés par des atomes ayant 1 électron de valence faiblement lié

Isolants: Généralement composés de plusieurs éléments, les électrons de valence sont fort liés.

Semi-conducteurs: Un semi-conducteur à l'état pur n'est ni un bon conducteur ni un bon isolant. Les semi-conducteurs à élément unique se caractérisent par des atomes possédant 4 électrons de valences [30].

2-4.1 Bandes d'énergie

Les électrons de valence sont donc confinés dans une bande d'énergie appelée couche de valence. Lorsqu'un électron acquiert assez d'énergie (d'une source externe), il peut quitter la couche de valence, devenir libre et exister dans ce qu'on désigne la bande de conduction. En terme d'énergie, la différence entre la bande de valence et la bande de conduction est appelée écart énergétique. Une fois dans la bande de conduction, l'électron est libre de se déplacer à travers le matériau [30].

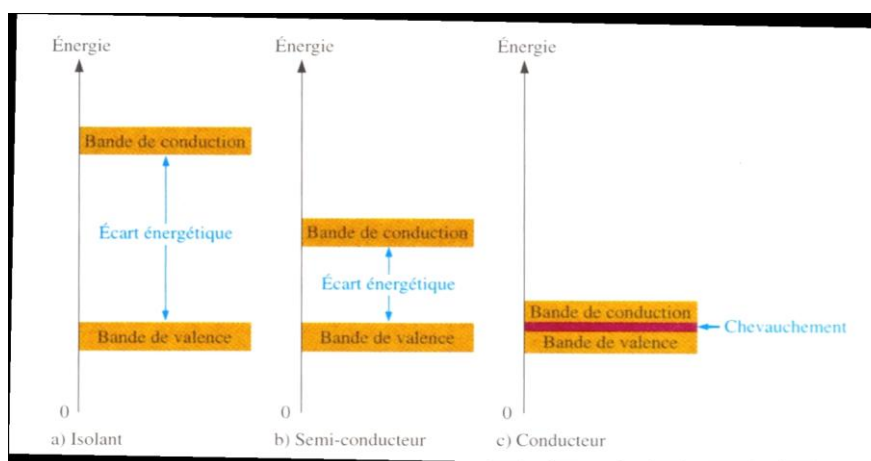


FIGURE 2-9: *la bande d'énergie[30]*

2-4.2 Les semi-conducteurs intrinsèques

Dans un cristal (par exemple de Si/Ge) Chaque atome partage ses 4 électrons de valence avec ses 4 atomes voisins. Ce sont les liens covalents. Un cristal est dit *intrinsèque* quand il ne possède aucune impureté, Dans un cristal (en général) il y a dégénérescence des niveaux d'énergie des orbites, A $T = 0K$, les bandes sont occupées jusqu'au niveau de Fermi E_F . Chaque bande d'énergie est séparée des bandes adjacentes par un écart énergétique dans lequel aucun électron ne peut exister.

Dans un cristal de Si pur à température ambiante, de part l'énergie thermique quelques électrons de valence absorbent suffisamment d'énergie pour passer dans la bande de conduction.

Lorsqu'un électron de valence « bondit » dans la bande de conduction, il laisse un espace vacant dans la bande de valence, appelé « trou ». Lorsqu'on applique une tension à travers une pièce de Si, les électrons libérés dans la bande de conduction, libres de se mouvoir, sont attirés vers la borne +

Dans un isolant, la bande de conduction est séparée par une grande bande interdite, « large » de 10 eV ou plus. Dans les semi-conducteurs, la bande d'énergie interdite est plus étroite, ~1 eV, cependant à $T=300\text{K}$, $E_{\text{cin}} \sim 0,026 \text{ eV} \Rightarrow$ très peu d'électrons peuvent franchir ce « gap » \Rightarrow très faible courant.

2-4.3 LE DOPAGE

Le dopage peut être créé de deux manières:

Si le cristal est dopé avec des atomes possédant un électron de valence supplémentaire, cet électron ne sera pas lié à un atome en particulier et pourra se déplacer librement à travers le réseau:

type-n

Si le cristal est dopé avec des atomes possédant un électron de valence de moins, il y aura donc un trou parmi les électrons de valence. Ce trou peut être rempli par un électron de valence d'un atome voisin, mais cela créera un autre trou. Ce trou peut être vu comme une charge positive mobile: *type-p*

Du point de vue des bandes d'énergie:

Type-n: les atomes d'impureté (appelés donneurs) produisent des niveaux remplis au-dessous de la bande de conduction. Les électrons de ces niveaux peuvent donc atteindre aisément (~0,05 eV) la bande de conduction. Ce sont les porteurs de charge mobiles.

Type-p: les atomes d'impureté (appelés accepteurs) produisent des niveaux vides au dessus de la bande de valence. Les électrons de la bande de valence peuvent atteindre ces niveaux aisément (~0,05 eV). Les trous laissés derrière eux dans la bande de valence sont les porteurs de charge mobiles [30].

2-4.4 JONCTION P-N

Les électrons de la région de type-n vont diffuser vers la région de type-p.

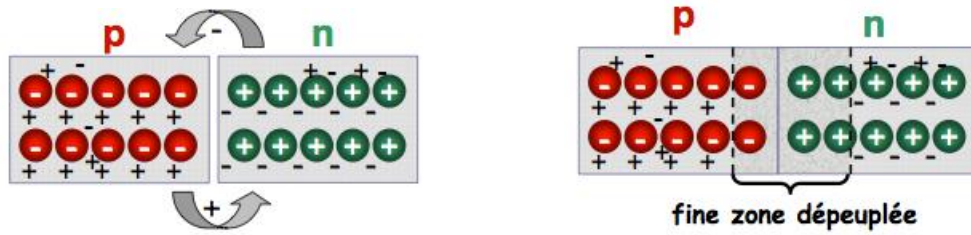


FIGURE 2-10: *déplacement des électrons dans la jonction P-N [30]*

La région de type-n devient positive à cause du manque d'électrons et la région du type-p devient négative à cause de l'excès d'électrons.

2-5 ETAPES DE FABRICATION D'UNE CELLULE SOLAIRE

La cellule photovoltaïque est constituée de plusieurs couches, l'élément de base de ses structures est la jonction P-N qui joue le rôle principal dans le dispositif solaire. Elle est le siège de la génération des porteurs et de leurs séparations. Bien que différentes structures soient envisageables pour l'élaboration des cellules photovoltaïques, des parties similaires sont présentées dans chaque composant. La structure d'une cellule photovoltaïque standard industrielle est présentée sur la figure 2-11 :

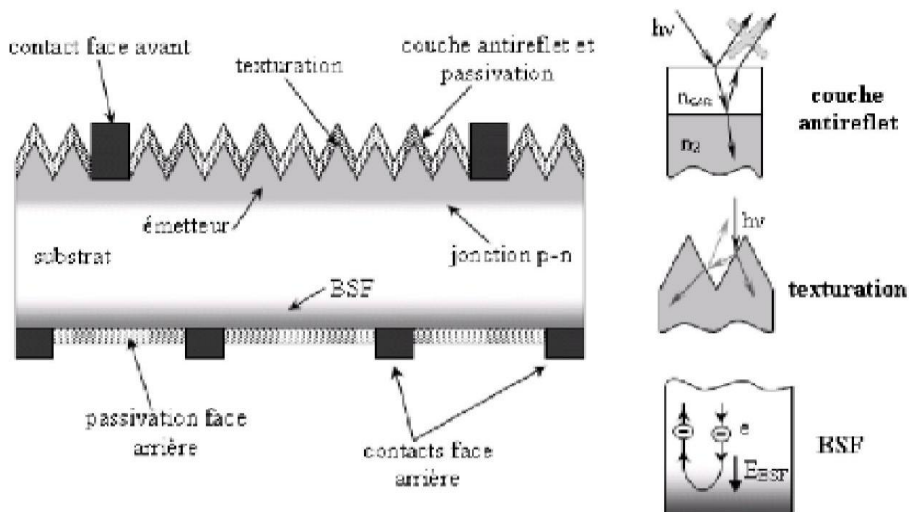


FIGURE 2-11: *Elément d'une cellule photovoltaïque [31].*

2-5.1 Passivation des faces avant et arrière

La surface des semi-conducteurs contient une densité importante de défauts (liaisons pendantes, impuretés, etc.) entraînant des pertes non négligeables liées à la recombinaison en surface. La passivation consiste à améliorer les qualités électroniques de la surface et du volume du matériau en neutralisant les effets de ses défauts électriquement actifs. Diverses couches de passivation sont utilisées en photovoltaïque mais les principales sont l'oxyde thermique de silicium (SiO_2) et le nitrure de silicium hydrogéné ($\text{SiN}_x\text{:H}$) [32].

2-5.2 Le substrat :

Généralement la cellule de Si est constituée d'un substrat en verre.

2-5.3 Couche antireflet

La qualité de photons pénétrant la cellule photovoltaïque dépend de la réflectivité de sa surface.

La réflectivité caractérise la quantité de photons réfléchi par la surface, soit une perte du rayonnement incident. Pour minimiser la réflexion de la lumière en surface, cette dernière est recouverte d'une couche anti-réfléchissante. Le rôle de la couche anti reflet est de réduire la réflectivité de la cellule au niveau de la face avant. Sans couches anti-réfléchissantes, la cellule solaire agit comme un miroir et reflète jusqu'à 33% de la lumière incidente sur la cellule. Cette couche réduit au minimum cette réflexion, en ramenant les pertes de réflexion à moins de 5% de sorte que la lumière du soleil va atteindre la surface de la cellule et diminuer les pertes optiques [33].

Différentes couches anti réfléchissantes sont utilisées en photovoltaïque. Elles peuvent être isolantes comme le TiO_2 , SiO_2 , ZnS , MgF_2 et SiN_x ou conductrice comme le ZnO ou l'ITO. La réflectivité dépend de l'indice de réfraction du matériau de l'épaisseur de la couche déposée, de l'angle d'incidence et de l'état de polarisation du rayon incident [33].

2-5.4 Texturation de la 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 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 de la surface (KOH, NaOH, acides), texturisation mécanique, plasma ou laser. Ces méthodes peuvent faire passer la réflectivité effective de 39% à moins de 10% [33].

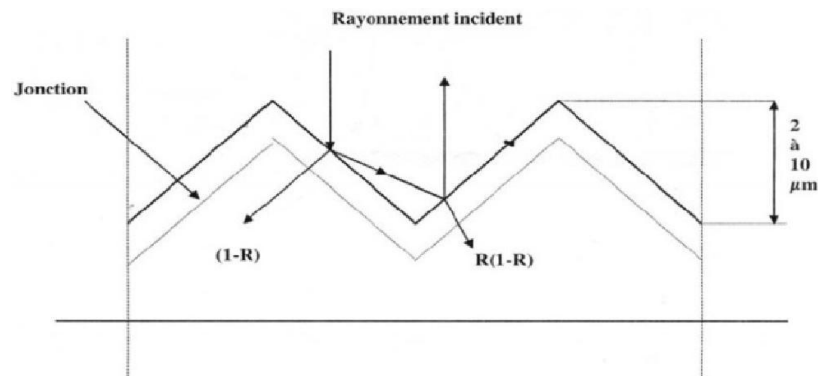


FIGURE 2-12: Diffusion de la lumière sur une surface texturée augmentant le piégeage [33].

2-5.5 Contacts face avant et arrière

Les contacts métalliques à l'émetteur et au substrat servent à collecter le courant de porteurs photo 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. Les contacts sont généralement réalisés par sérigraphie. Les doigts de sérigraphie possèdent une largeur minimale de $100\mu\text{m}$ et une épaisseur de $10\mu\text{m}$ à $30\mu\text{m}$ permettant de conduire une forte densité de courant. Pour les cellules photovoltaïques à haut rendement, la pulvérisation cathodique ou l'évaporation sous vide sont utilisées. La qualité de contact sur la surface avant dépend fortement du niveau de dopage en surface et du type de texturisation. Les contacts avant sont déposés avec une pâte contenant essentiellement de l'argent à travers d'une grille. Puis, la pâte est séchée dans une étuve à air à 150°C pendant un quart d'heure. Ensuite, de même pour la métallisation arrière une pâte en aluminium est déposée sur la quasi-totalité de cette face [33].

2-5.6 Champ électrique arrière

Le champ électrique arrière (BSF : Back Surface Field) est une couche fortement dopée sur la face arrière de la cellule. Cette zone a le même type de dopage que celui de la base, conduisant à une structure p-p+. Ce dernier consiste à créer une barrière de potentiel sur la face arrière de la

cellule pour assurer une passivation. La barrière de potentiel induite par la différence du niveau de dopage entre la base et le BSF tend à confiner les porteurs minoritaires dans la base. Donc le but du champ arrière est de diminuer la vitesse de recombinaison [33]. Le BSF le plus utilisé dans l'industrie photovoltaïque consiste en une couche d'aluminium déposée sur la face arrière, suivie d'un traitement thermique conduisant à un alliage de silicium et d'aluminium. La largeur du BSF va de quelques micromètres à plus de 10 μ m. L'effet d'un BSF est souvent modélisé par l'utilisation d'une vitesse de recombinaison de surface effective, qui est définie à la frontière de la région quasi-neutre de la base. Les valeurs typiques de ces vitesses obtenues avec un BSF en aluminium vont de 200 à 1000 cm/s, avec des variations selon le profil de dopage et la profondeur du BSF [34].

2-5.7 Emetteur et Base

L'émetteur de type N est réalisé par dopage en surface d'un substrat de silicium de type P. La partie dopée P du substrat (c'est-à-dire la majeure partie de celui-ci sauf la surface) constitue la base. L'interface de ces deux zones est celle d'une jonction P-N qui permet de dissocier les paires électron-trou créées. L'épaisseur totale de la cellule est actuellement proche de 200 μ m.

Les trous photogénérés ayant une longueur de diffusion plus faible que celle des électrons. En pratique, on réalise un émetteur de faible épaisseur (0,2 - 0,3 μ m) mais fortement dopé $\approx 10^{20}$ cm⁻³ et une base de plus grande épaisseur faiblement dopée $\approx 10^{15}$ à 10^{16} cm⁻³. Le fort dopage de l'émetteur permet de limiter la résistance du contact métal/semi-conducteur et créer un champ électrique suffisant au niveau de la zone de charge d'espace [35].

2-6 LES PERTES AU NIVEAU DES CELLULES SOLAIRES CLASSIQUES :

On peut classer les pertes au niveau des cellules solaires classiques (particulièrement à base de silicium) en deux grandes parties : des pertes physiques et des pertes technologiques. Les pertes physiques sont généralement liées aux propriétés des matériaux utilisés, pour les limitations technologiques, elles sont induites par le processus de fabrication. Des choix technologiques appropriés peuvent cependant avoir des conséquences sur les limitations intrinsèques du matériau [36].

2-6.1 Les pertes physiques

Une cellule solaire est soumise à trois principaux types de pertes physiques :

Les premières pertes se produisent quand les photons pénètrent dans la cellule, certains n'arrivent pas à communiquer leur énergie aux électrons.

Deuxième type de pertes : certains électrons n'ont pas assez d'énergie pour parvenir au circuit extérieur, ils dissipent alors cette énergie sous forme de chaleur, par un phénomène dit de « recombinaison ».

Troisième type de pertes, les pertes résistives : le courant électrique qui circule dans le semi-conducteur se transforme inévitablement, pour partie, en énergie thermique, à cause de la résistance électrique du matériau (ce phénomène est aussi connu sous le nom de pertes par effet Joule). Plus l'intensité lumineuse envoyée vers la cellule est élevée, plus ces pertes résistives augmentent. À des intensités lumineuses trop fortes, elles deviennent même tellement importantes qu'elles entraînent la diminution du rendement de la cellule.

La figure 2-13 montre les principales pertes intrinsèques pour une cellule photovoltaïque en silicium.

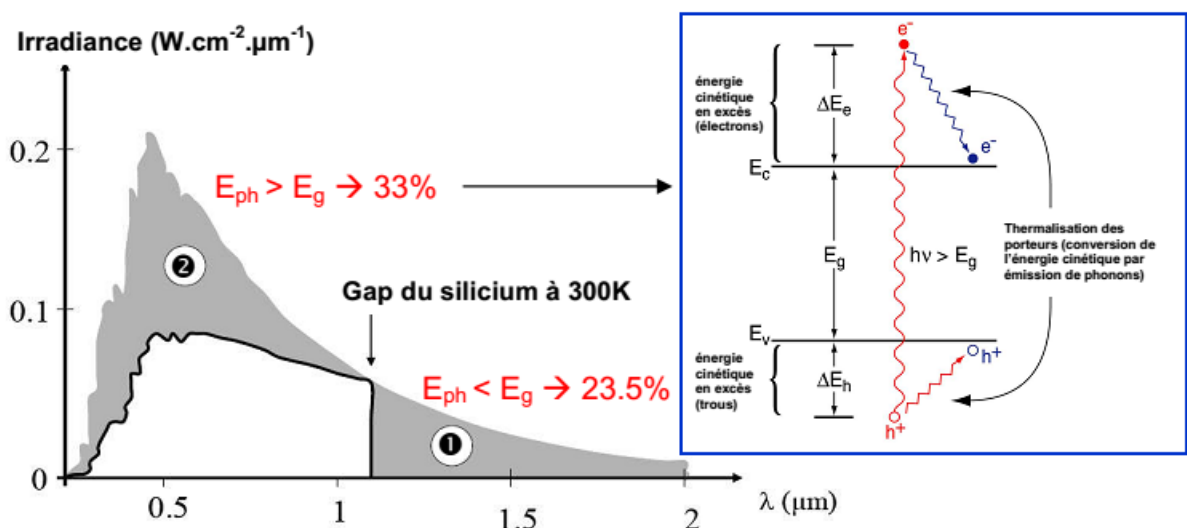


FIGURE 2-13: Principales pertes intrinsèques pour une cellule photovoltaïque en silicium.

(1) Pertes des photons de grandes longueurs d'onde. (2) Pertes dues à l'énergie excédentaire des photons [Ricaud]. L'insert illustre le phénomène de thermalisation [36].

2-6.2 Les pertes technologiques

Parmi les pertes technologiques les plus importantes, on trouve :

Les pertes par réflectivité, avant l'entrée de la lumière dans la cellule, une quantité de photons sont réfléchis par la surface avant de la cellule. Le coefficient de réflexion est voisin de 40% pour le silicium monocristallin poli optique. Une texturisation et une couche antireflet permettent de réduire ce coefficient en dessous de 5 % [37].

Les pertes par ombrage, le dépôt des contacts métalliques nécessaires pour collecter les charges photo générés entraîne une zone d'ombrage sur la surface exposée de la cellule en face avant.

Les pertes des IR, à cause de la limite de l'épaisseur de la cellule, un certain nombre de photons (photons infrarouges) travers la cellule sans être absorber.

Durée de vie et rendement de collecte, Le rendement de collecte correspond au rapport entre le nombre de porteurs de charge effectivement collectés et le nombre total de charges photo générés. Ce terme prend en compte les recombinaisons électrons-trous en volume et en surface de la cellule. Il dépend directement de la durée de vie des porteurs minoritaires (temps moyen entre la génération et la recombinaison d'un porteur et donc de leur longueur de diffusion L).

Les facteurs de pertes sont donc liés d'une part à des limitations propres au matériau et d'autre part à la technologie d'élaboration de la cellule. Si sur ces derniers que se portent la majorité des optimisations des cellules photovoltaïques.

2-7 COUCHE ANTIREFLE

2-7.1 Etude théorique de la réflexion

La surface de la cellule solaire est le siège d'une forte quantité de pertes par réflexion ; 34% des pertes sont localisées dans la surface d'une cellule en Si dans les grandes longueurs d'onde ($1.1\mu\text{m}$) et plus de 54% aux courtes longueurs d'onde ($0.4\mu\text{m}$) [38]. L'une des méthodes utilisées dans la conception des cellules solaires pour minimiser ce type de pertes est l'utilisation de couches antireflet (CAR, Anti-Reflective Coatings) ou bien la texturisation de la surface [38].

La CAR est un revêtement diélectrique mince avec une très faible valeur d'indice de réfraction. Le principe d'action des couches antireflet est basé sur l'interférence des faisceaux lumineux. Pour une incidence normale de la lumière sur une surface plane et lisse, l'épaisseur de la couche antireflet est choisie de sorte que la longueur d'onde dans le matériau diélectrique soit égale au quart de la longueur de l'onde incidente figure2- 29.

La réflexion de la lumière incidente, de longueur d'onde λ , sur la surface d'un semi-conducteur couvert d'une seule couche antireflet d'épaisseur (d) est donnée par [38] :

$$R = \frac{n_s - n_0}{n_s + n_0} \quad (2.1)$$

Avec l'épaisseur de la couche diélectrique est égale à :

$$d_{CAR} = \frac{2(N+1)\lambda}{4n_{CAR}} \quad ; N=1,2,3,4... \quad (2.2)$$

Où : R est la réflectivité à l'interface des deux milieux, n_s et n_0 sont les indices de réfraction du semi-conducteur et du milieu environnant respectivement. Si le milieu environnant est l'air, $n_0=1$

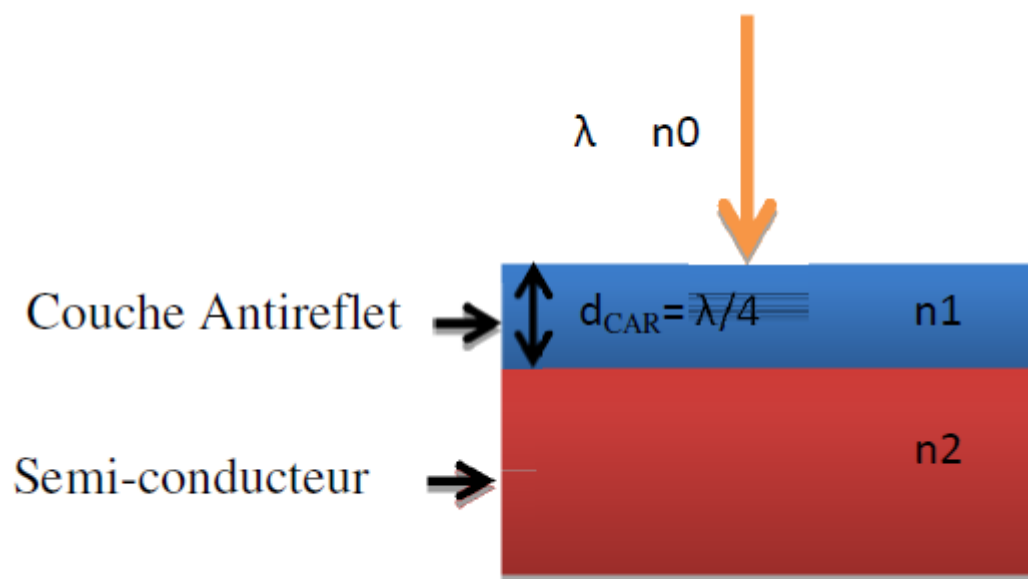


FIGURE 2-14: réflectivité à l'interface des deux milieux [38].

Les matériaux utilisés comme couche antireflet doivent avoir les propriétés optiques suivantes [38]:

Une bonne adhérence de contact.

Etre transparents dans la gamme de sensibilité des cellules solaires (0,2 -1,2 μm).

Réduire au maximum la réflexion.

Les matériaux typiques utilisés dans l'empilement d'une couche antireflet sont présentés dans le tableau 1. Pour les cellules photovoltaïques à haut rendement, une double couche antireflet est utilisée (avec deux matériaux diélectriques différents).

Tableau 1 : L'indice de réfraction, à 590 nm (2,1 eV), des matériaux couramment utilisés pour le revêtement antireflet [39].

Matériau	n
MgF ₂	1,38
SiO ₂	1.46
Al ₂ O ₃	1.76
Si ₃ N ₄	2.05
Ta ₂ O ₅	2.2
ZnS	2.36
SiO _x	1.8-1.9
TiO ₂	2.62

2-7.2 Facteurs influençant la réflexion

Plusieurs facteurs influents sur la réflexion à la surface d'une cellule, parmi ceux-ci on peut citer : Indice de réfraction, surface du substrat et l'angle d'incidence [39].

2-7.3 Indice de réfraction

L'indice de réfraction est fonction de la fréquence de la radiation et par suite à la longueur d'onde de la radiation $n=f(\lambda)$. Donc une valeur élevée de l'indice de réfraction implique une

réflexion élevée du rayonnement, donc le choix d'une CAR à indice de réfraction adéquat est nécessaire [40].

2-7.4 Surface du substrat

Toute rugosité de la surface réduit la réflectivité en favorisant les chances pour la lumière de se réfléchir sur le matériau. Par exemple, pour une surface avec une micro-texture pyramidale, un rayon arrivant en incidence normale par rapport au plan de la cellule est réfléchi sur la face d'une « pyramide » adjacente, diminuant ainsi le coefficient de réflexion. De plus, le rayon transmis dans la cellule l'est avec un angle de réfraction différent de 0° , augmentant son parcours au sein du silicium par rapport au cas d'une surface plane. La probabilité d'absorption des photons est donc améliorée [40].

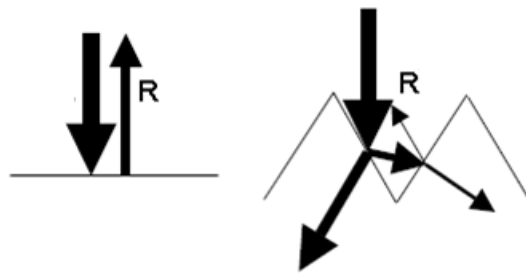


FIGURE 2-15: Schéma comparatif des phénomènes de réflexion sur surfaces plane et texturée [40].

2-7.5 Angle d'incidence

Il est bien connu que les paramètres de rendement électriques des piles solaire et des modules photovoltaïques dépendent de l'angle d'incidence [41]. Le coefficient de réflexion dépendent de l'angle d'incidence R , particulièrement lorsque R est supérieure à 30° . Au fur et à mesure que R augmente la réflexion de la lumière incidente augmente: Dans ces conditions, l'effet antireflet de la couche n'est pas assuré de manière efficace et les valeurs de l'indice de réfraction et de l'épaisseur de la couche pour une incidence normale ne sont plus optimales [42].

Les matériaux utilisés comme couches antireflet

Conductors: ZnO, ITO (Indium Tin Oxide)

Isolants: SiO₂, TiO₂, MgF₂, ZnS, SiN_x ...

SiNx:H avec $n=2$ est fortement utilisé car il a la propriété de passiver les défauts d'interface.

Etant donné les valeurs de son indice de réfraction, le nitrure de silicium n'est pas suffisant pour couvrir la gamme d'indices de réfraction adéquats. Pour cette raison, il est préférable de mettre en place le dépôt d'oxynitrure de silicium hydrogéné $\text{SiO}_x\text{N}_y\text{:H}$. Les couches minces de SiO_xN_y possèdent la particularité d'être transparentes dans la gamme du visible et leur indice de réfraction peut être varié de l'oxyde de silicium pur (1.47) au nitrure de silicium (2.3) en changeant la composition des gaz utilisés lors du dépôt [43]. On retiendra que le meilleur moyen pour réaliser une adaptation optique entre l'air et le substrat est le dépôt d'une couche antireflet. L'oxynitrure de silicium (SiO_xN_y) comme couche antireflet (CAR).

L'intérêt pour l'étude des films d'oxy-nitrure de silicium avec la composition variable a augmenté pendant les 20 dernières années. En effet, une variation de la stoechiométrie comporte la modification des propriétés électriques, mécaniques et optiques de ces films. Le dépôt de ces couches apporte des solutions très intéressantes dans plusieurs domaines d'applications physiques et technologiques [44, 45]; comme revêtements de protection contre la corrosion, barrières d'anti-diffusion et couches d'anti réflexion pour les piles solaires.

Les structures de SiO_xN_y :

La connaissance de la structure de SiO_xN_y est essentielle pour applications électriques et optiques. La formule d'oxynitrure de silicium stoechiométrique est donnée par la formule

SiO_2N_2 . Dans le cas d'un alliage (SiO_xN_y) non-stoechiométrique amorphe tétraédrique, deux différents modèles peuvent décrire sa structure; modèle des liaisons aléatoires (RBM) et modèles du mélange aléatoires (RMM). Ce dernier suppose que des films a- SiO_xN_y sont constitués par un mélange de deux phases : SiO_2 et Si_3N_4 et le RBM, considère que ces matériaux sont constitués par Si-O et Si-N liens coordonnés dans cinq types tétraédriques $\text{SiO}_v\text{N}_{4-v}$ où $v=0, 1, 2, 3, 4$ [46, 47].

On obtient une gamme d'indices de réfraction de 1.72 à 3.1 pour un empilement à quatre couches [47, 48].

2-8 ETAT DE L'ART

2-8.1 Effet des couches antireflets (CAR) sur le rendement énergétique :

Z. Benmohamed, et al. [49] ont étudié l'influence de deux types de couches antireflets, sur les performances de la cellule à base de silicium multi cristallin élaboré par la méthode Polix de Photowat. Différentes structures illustrées par la figure (2-14) sont étudiées par le simulateur PC1D.

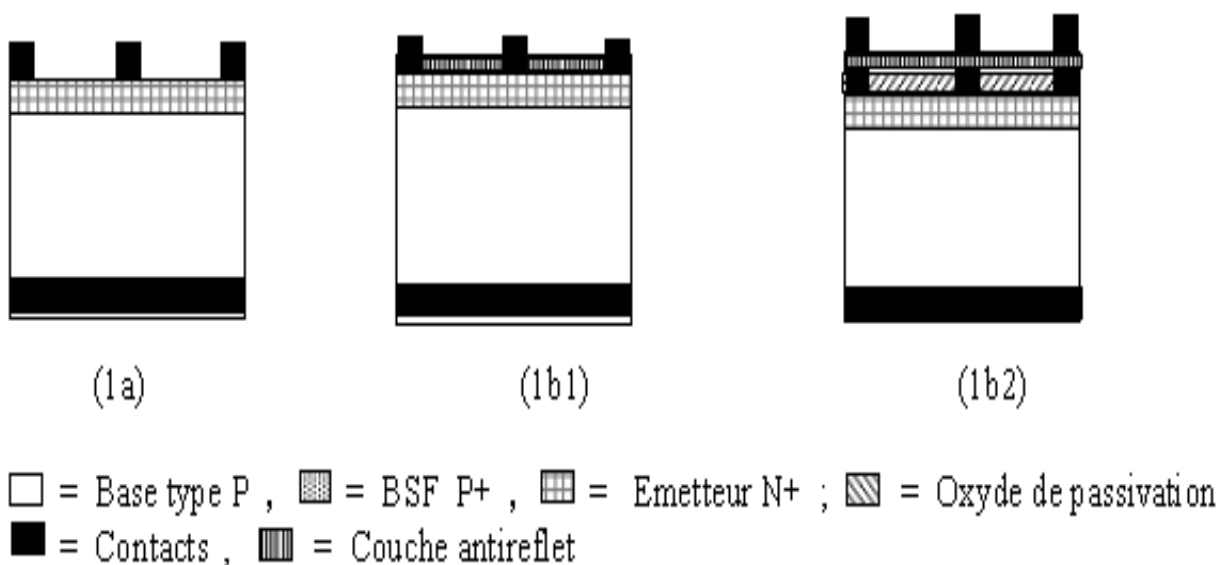


FIGURE 2-16: *différentes structures des cellules solaires étudiées[49]*

- Cellule N+P sans couche de passivation ni couche antireflet d'épaisseur 150 μm avec un dopage de base de $N_A=1017\text{cm}^{-3}$, l'émetteur est dopé à $N_D=5.1019\text{cm}^{-3}$ et de profondeur de jonction $X_J=0.1\mu\text{m}$ figure. 1a.
- Cellule N+P avec deux différentes couches antireflets à savoir la couche de Nitrure de Silicium (Si_3N_4) (ARC) d'épaisseur 60nm (Figure. 1b1) et la couche de Fluorure de Magnésium sur Sulfure de Zinc MgF_2 (106nm) / ZnS (56nm) figure2-16.

Les auteurs ont trouvé un rendement de 9.75 % pour la cellule N+P simple. Et une amélioration du rendement qui passe de 9.75 % à 14.4 % dans le cas de la simple couche antireflet Si_3N_4 , comme ils ont remarqué que le rendement est meilleur dans le cas de la double couche antireflet MgF_2/ZnS . En effet ils ont obtenu un rendement de 15.3 %. Ce résultat est expliqué par la

diminution des pertes par réflexion et l'augmentation du courant de court circuit et de la tension en circuit ouvert.

D'autre part, l'influence de ces deux couches sur la réponse spectrale est nettement visible sur la figure 2-17 une amélioration du rendement quantique externe aux grandes longueurs d'ondes est observée du fait de l'absorption des photons de faibles énergies. Et une augmentation remarquable dans l'intervalle 400 à 1100 nm, domaine où la réponse spectrale est dominée par les porteurs photo générés dans la base [49].

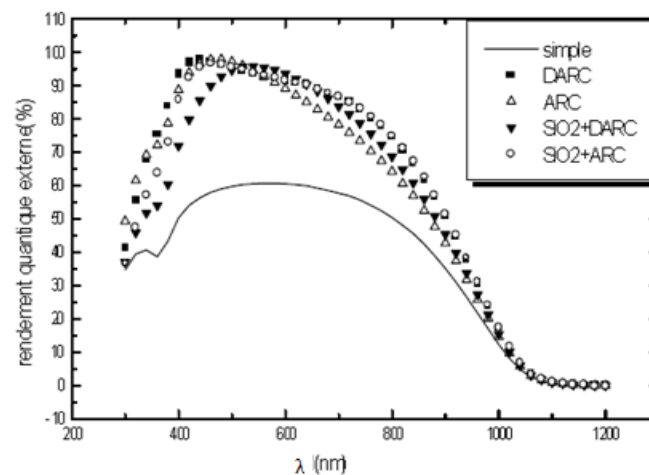


FIGURE 2-17: : Effet des couches antireflets sur la réponse spectrale [49]

2-8.2 Effet de la couche antireflet et son épaisseur sur la réflectivité

J-F Lelievre [50] a étudié l'influence de la couche antireflet SiN_x et de son épaisseur sur la réflectivité. Les résultats de simulation obtenus à l'aide du logiciel PC1D sont représentés sur la figure 2-18. Les paramètres utilisés sont les suivants :

- silicium \rightarrow épaisseur $300 \mu\text{m}$
- base de type p ($2.5 \Omega.\text{cm}$) ; longueur de diffusion $LD = 140 \mu\text{m}$
- Émetteur n+ (3.10^{20}cm^{-3} ; $x_j = 0.3 \mu\text{m}$)
- vitesse de recombinaison en surface avant $S_f = 5000 \text{cm.s}^{-1}$
- vitesse de recombinaison en surface arrière $S_b = 1000 \text{cm.s}^{-1}$

- Illumination → AM1.5G.

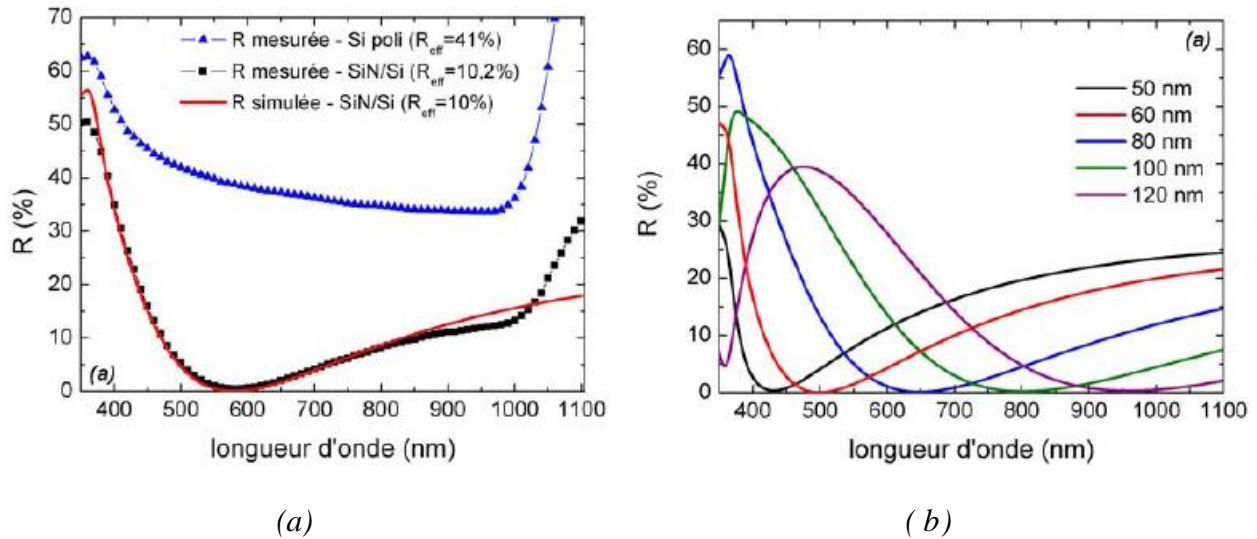


FIGURE 2-18: *F(a) Comparaison de la réflectivité mesurée et simulée (IMD) pour un substrat de silicium recouvert [50].*

Ou non de SiN_x ($R = \text{NH}_3/\text{SiH}_4 = 7.7$; $n [605 \text{ nm}] = 2.03$; $e = 71 \text{ nm}$). (b) la réflectivité pour différentes épaisseurs de SiN ($R = \text{NH}_3/\text{SiH}_4 = 7.7 - n [605 \text{ nm}] = 2.03$).

L'auteur a montré que:

- Le dépôt d'une couche antireflet(SiN_x) sur une surface de silicium polie peut réduire les pertes par réflexion.
- Le maximum du rayonnement solaire se situe pour une longueur d'onde d'environ 600nm et il apparaît logique de choisir le minimum de réflectivité effective autour de celle-ci($R_{\text{eff}} = 9.9\%$).
- Une augmentation de l'épaisseur du SiN_x entraîne un déplacement du minimum de réflectivité vers les grandes longueurs d'ondes, celui-ci restant toujours très proche de zéro.

2-9 CONCLUSION

Enfin, nous dirons qu'il est bien clair d'après ces études que le dépôt de la couche antireflet est une étape très importante pour améliorer le rendement électrique. En effet, les résultats obtenus par les différents chercheurs montrent que la couche d'oxy-nitride de silicium fait office de couche antireflet qui permet de réduire considérablement les pertes optiques. Ceci nous a motivé à entreprendre notre étude sur les propriétés optiques de cette couche. Comme nous nous sommes intéressés dans ce chapitre à l rôle de cette couche dans les modules photovoltaïques qui est également une étape indispensable dans la fabrication des modules photovoltaïques et qui entre aussi dans l'adaptation optique des rayonnements entre l'air et la cellule solaire.

CHAPITRE 3

RESULTATS ET DISCUSSIONS

3-1 INTRODUCTION

Avec l'augmentation de la complexité dans tous les dispositifs électroniques, il est devenu nécessaire pour les ingénieurs de conception, de prédire le comportement de ces systèmes avec des modèles rigoureux. La simulation a donc été largement utilisée dans le domaine photovoltaïque afin de déterminer les paramètres les plus importants pour le fonctionnement des cellules solaires, de minimiser les pertes et d'optimiser les paramètres physiques et géométriques de la cellule en vue d'obtenir un rendement maximum. La difficulté majeure réside dans le grand nombre de paramètres influençant le rendement. Le logiciel le plus utilisé pour la simulation numérique est PC1D. Nous avons utilisé ce dernier pour la simulation de notre cellule.

Tout d'abord, nous avons présenté la structure de la cellule et puis les résultats de simulation et en fin l'interprétation des résultats obtenus.

3-2 PRESENTATION DU PROGRAMME PC1D

La simulation est la représentation imitative du fonctionnement d'un système ou d'un processus sans expérimentation. En raison du coût élevé de l'expérience, cet outil est devenu primordial pour le développement des recherches notamment en photovoltaïque, gagnant du temps et de l'argent. La simulation est basée sur des modèles physiques ou empiriques (reposant sur des données expérimentales) lorsque le phénomène est inconnu. Le développement des modèles physiques suit généralement les étapes suivantes :

- Analyse qualitative du modèle,
- Etablir quantitativement le modèle,
- Résolution des équations du modèle quantitatif.

La résolution des équations consiste à définir les conditions initiales et aux limites du problème et la création du domaine de simulation (maillage). En raison de la non-linéarité des modèles, la résolution du problème est souvent numérique (itérative), car la résolution analytique est assez complexe sauf pour des cas plus simples.

De nombreux programmes informatiques ont été développés au cours de ces dernières années afin de simuler le fonctionnement des cellules solaires. Parmi eux, les logiciels commerciaux Sentaurus (<http://www.synopsys.com/2009>), COMSOL (<http://www.comsol.com/comsol->

multiphysics 2014), ATLAS Silvaco ([Http://www.silvaco.com/](http://www.silvaco.com/) 2012), le logiciel unidimensionnel gratuit PC1D (Clugston & Basore 1997) développé par P.A. Basore et ses collègues de l'Université de New South Wales, en Australie, et qui est très utilisé en photovoltaïque grâce à sa simplicité et sa rapidité.

3-2.1 Le simulateur PC1D

Comme il a été mentionné plus haut, PC1D a été développé par P.A Basore et ses collaborateurs à l'université « New South Wales of Sydney » en Australie. Grâce à son interface simple et sa vitesse d'exécution, il a une grande popularité dans le domaine des recherches photovoltaïques. Malgré son unidimensionnalité, il est largement toujours utilisé dans la simulation des cellules solaires à structures simples ou comme un intermédiaire de calcul pour les simulateurs multidimensionnels. La dernière version vérifiée 5.9 de PC1D a été lancée à partir de février 2008, elle est disponible en téléchargement gratuit (PC1D 2008).

La simulation de la structure photovoltaïque est réalisée en introduisant en premier lieu ses différents paramètres (géométrie, dopages, paramètres électriques et optiques, etc...), ensuite, on choisit l'excitation caractéristique et enfin, l'exécution du programme. Le logiciel se compose de quatre distinctes 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 figure 3-1.

cellule kALIO - PC1D for Windows

File Device Excitation Compute Graph View Options Help

The area has been normalized to 1 cm². It has a shallow passivated emitter that has been pyramidally textured and an aluminum back surface field. The file scans the one-sun I-V curve of the cell. To solve for the spectral response, select ScanQE for the Excitation file.

DEVICE

Device area: 1 cm²
No surface texturing
No surface charge
 Front reflectance from reflectance.ref
No Exterior Rear Reflectance
 Internal optical reflectance enabled
 Front surface optically rough
 Emitter contact: 0.64 Ω
 Base contact enabled
 Internal conductor: 1.54×10^{-5} S

REGION 1

Thickness: 150 μm
 Material modified from si.mat
 Carrier mobilities from internal model
 Dielectric constant: 11.9
 Band gap: 1.124 eV
 Intrinsic conc. at 300 K: 8.56×10^9 cm⁻³
 Refractive index from si.inr
 Absorption coeff. from si300.abs
 Free carrier absorption enabled

N-type background doping: 4.992×10^{15} cm⁻³
 1st front diff.: P-type, 6.836×10^{19} cm⁻³ peak
No 2nd front diffusion
 1st rear diff.: N-type, 1.479×10^{20} cm⁻³ peak
No 2nd rear diffusion

Bulk recombination: $\tau_n = \tau_p = 1000$ μs
 Front-surface recom.: S model, $S_n = S_p = 100$ cm/s
 Rear-surface recom.: S model, $S_n = S_p = 1 \times 10^7$ cm/s

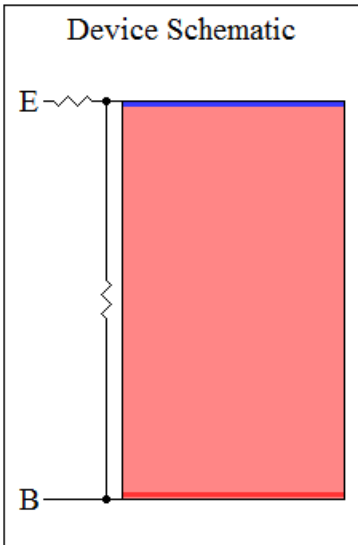
EXCITATION

Excitation from lightiv.exc
 Excitation mode: Transient, 50 timesteps
 Temperature: 25°C
 Base circuit: Sweep from -0.8 to 0.8 V
Collector circuit: Zero
 Primary light source enabled
 Constant intensity: 0.1 W cm⁻²
 Spectrum from am15g.spc
Secondary light source disabled

RESULTS

Short-circuit Ib: 0.0385 amps
 Max base power out: 0.0200 watts
 Open-circuit Vb: -0.6491 volts

Device Schematic



The schematic shows a vertical rectangular cell. The top edge is labeled 'E' with a wavy line representing a textured emitter contact. The bottom edge is labeled 'B' with a solid line representing a base contact. The interior of the rectangle is shaded in a light red color, representing the silicon wafer. A vertical line on the left side indicates the thickness of the device.

FIGURE 3-1: : Fenêtre principale de PC1D

3-2.2 Paramètres du dispositif

Les paramètres du dispositif (Device) à introduire sont classés par ordre d'apparition comme suit :

- La surface du dispositif,
- La texturisation (avant et/ou arrière),
- La densité de charge surfacique (avant et/ou arrière),
- La réflectance externe (avant et/ou arrière),
- La réflectance interne,
- Les résistances séries internes,
- Les résistances shunt internes.

3-2.3 Paramètre des régions

PC1D permet de créer plusieurs régions selon leurs géométries et leurs propriétés. Dans chaque région, les paramètres introduits 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 soit, fournis avec le logiciel pour les matériaux les plus utilisés comme le silicium, le germanium et l'arséniure de gallium, ou changés. Les paramètres placés dans ce fichier sont : les mobilités ($\text{cm}^2/\text{V.s}$), le constant diélectrique, l'énergie du gap (eV), l'indice de réfraction, la concentration intrinsèque (cm^{-3}), le coefficient d'absorption optique (cm^{-1}) et l'absorption des porteurs libres,
- Le type et la concentration du dopage (pour la base),
- Le profil de dopage des faces (avant et/ou arrière),
- Les durées de vie des porteurs dans le volume,
- Les vitesses de recombinaison (avant et/ou arrière).

3-2.4 Paramètres d'excitation

Selon les résultats recherchés, on choisit comme suit le type de fichiers d'excitation à introduire :

- Le fichier « One-Sun.exc » (intensité globale de tout le spectre d'un seul soleil : généralement celui d'AM1.5 Global) permet de simuler différentes caractéristiques (courant/tension-puissance/tension, etc...),
- Le fichier « Scan-qe.exc » (intensité de chaque longueur du spectre) pour simuler de la réponse spectrale.

Ensuite, on choisit un mode d'excitation parmi trois qui sont le mode d'équilibre, stationnaire et transitoire. Les derniers paramètres à introduire sont les suivants :

- La température,
- Le circuit (résistance, tension),
- L'éclairement (intensité, fichier d'air masse).

3-2.5 Résultats

La quatrième partie est consacrée à la visualisation des résultats. Lorsqu'on utilise le fichier « One- Sun.exc » comme excitation, les résultats obtenus sont :

- La valeur du courant de court-circuit (I_{cc}),
- La valeur de la puissance maximale (P_m),
- La valeur de la tension en circuit ouvert (V_{co}).

Ces résultats permettent de calculer le rendement de conversion (η) ainsi que le facteur de forme (FF). Ce mode permet aussi de visualiser les courbes courant- tension (I-V) et puissance - tension (P-V). Le fichier « Scan-qe.exc » permet d'obtenir:

- La valeur de courant de court-circuit,

- La valeur de la puissance maximale.

Ce mode permet aussi de visualiser les trois courbes de réflectance, du rendement quantique externe (EQE) et du rendement quantique interne (IQE).

3-3 PREMIERE PARTIE : SIMULATION PAR PC1D

3-3.1 Structure simulée

La structure de la cellule utilisée pour la simulation est de type n⁺-p-p⁺ de surface 1 cm² avec une texturisation à la surface avant.

Pour simuler l'influence des différents paramètres, nous avons tout d'abord défini une cellule solaire de référence (conventionnelle) avec un ensemble de paramètres fixes, puis nous avons fait varier les paramètres un par un (les autres restant fixes) afin d'analyser leur influence sur les caractéristiques de la cellule solaire. La figure 3-2 représente la structure de la cellule de référence utilisée pendant la simulation.

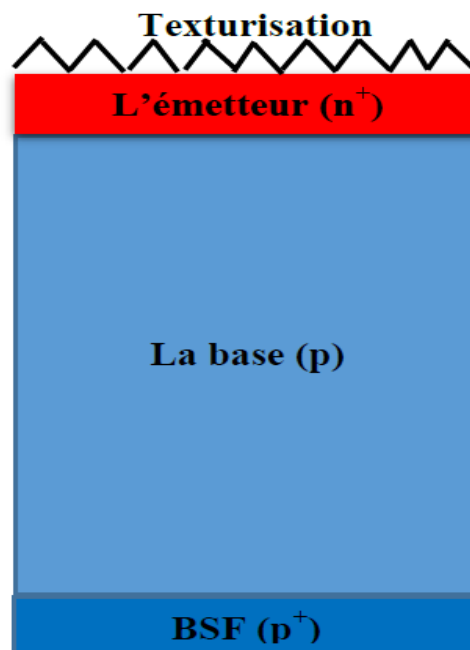


FIGURE 3-2: : schéma de la cellule référence (conventionnelle).

3-3.2 Paramètres de la structure simulée :

TABLEAU 3-1 : paramètre de la cellule de référence

Couche antireflet	n _{car}	2,03
	d _{car} (nm)	75
Texturisation	Angle (°)	54,75
	Depth (μm)	3
Emetteur	L'épaisseur (μm)	0,1
	Dopage (cm ⁻³)	5 .10 ¹⁹
	Profile de diffusion	Erfc
Base	Concentration (cm ⁻³)	2,341.10 ¹⁷
	Taux de recombinaison (μs)	350
	L'épaisseur (μm)	300
BSF	L'épaisseur (μm)	6
	Dopage (cm ⁻³)	4.10 ¹⁹
Passivation	Surface avant (cm/s)	10 ³
	Surface arrière (cm/s)	10 ⁷

L'épaisseur de La cellule conventionnelle est de 300μm et l'épaisseur de l'émetteur est 0.1μm qui est fortement dopé (5.10¹⁹ cm⁻³). Le dopage à la base était à 2,341.10¹⁷ cm⁻³avec un taux de recombinaison de 350μs, l'épaisseur de la BSF est égale à 6 μm dopé à 4.10¹⁹ cm⁻³. la vitesse de recombinaison sur la surface avant est égale 10³ cm/s et la vitesse sur la surface arrière est 10⁷ cm /s

Cellule de référence : On va voir quelle est l'influence des paramètres géométriques et le dopage sur le rendement.

TABLEAU 3-1 : les paramètres de cellule de référence

	Emetteur	Base	BSF
Epaisseur (μm)	0.1	300	6
Dopage(At/cm ³)	5.10 ¹⁹	2,341.10 ¹⁹	4.10 ¹⁹

TABLEAU 3-2 : les résultats des paramètres de cellule de référence

V _{co} (V)	I _{cc} (A/cm ²)	η(%)
0,5128	0,0338	14

3-4 EXPLOITATION DES RESULTATS DE LA SIMULATION

A partir de la cellule de référence décrite précédemment, Nous avons simulé une cellule de même type n+ p p+ de surface 1 cm² avec une texturation à la surface avant, de profondeur (depth) 3µm et d’angle facial 54,74°. Pour optimiser le captage du rayonnement nous avons tout d’abord varié l’épaisseur de la cellule, ainsi la variation pour la profondeur et le dopage de l’émetteur et de BSF, aussi le dopage de la base et la durée de vie des porteurs minoritaires. Puis nous avons analysé l’influence de la vitesse de recombinaison sur la face avant pour déterminer les meilleurs paramètres géométrique de la cellule.

L’ensemble des variations est résumé dans le tableau 3-3.

TABLEAU 3-3: paramètres variables pendant la simulation

Paramètre	Valeur minimale	Valeur maximale
épaisseur de la cellule	5 µm	250 µm
épaisseur de l’émetteur	0,1 µm	0,5µm
dopage de l’émetteur	1.10 ¹⁹ cm ⁻³	3.10 ²¹ cm ⁻³
dopage da la base	1.10 ¹⁵ cm ⁻³	1.10 ¹⁷ cm ⁻³
durée de vie des porteurs minoritaires	0,1 µs	10 ⁶ µs
dopage du BSF	1.10 ¹⁸ cm ⁻³	5.10 ¹⁹ cm ⁻³
épaisseur du BSF	1 µm	10 µm
vitesse de recombinaison face avant	10 cm/s	10 ⁷ cm/s
vitesse de recombinaison face arriere	10 cm/s	10 ⁷ cm/s

3-4.1 Influence de l'épaisseur de la base :

Pour étudier l'influence de l'épaisseur de la cellule sur le rendement nous avons varié ce dernier et fixé les autres paramètres et la figure 3-3 représenté la variation du rendement en fonction de l'épaisseur de la cellule solaire.

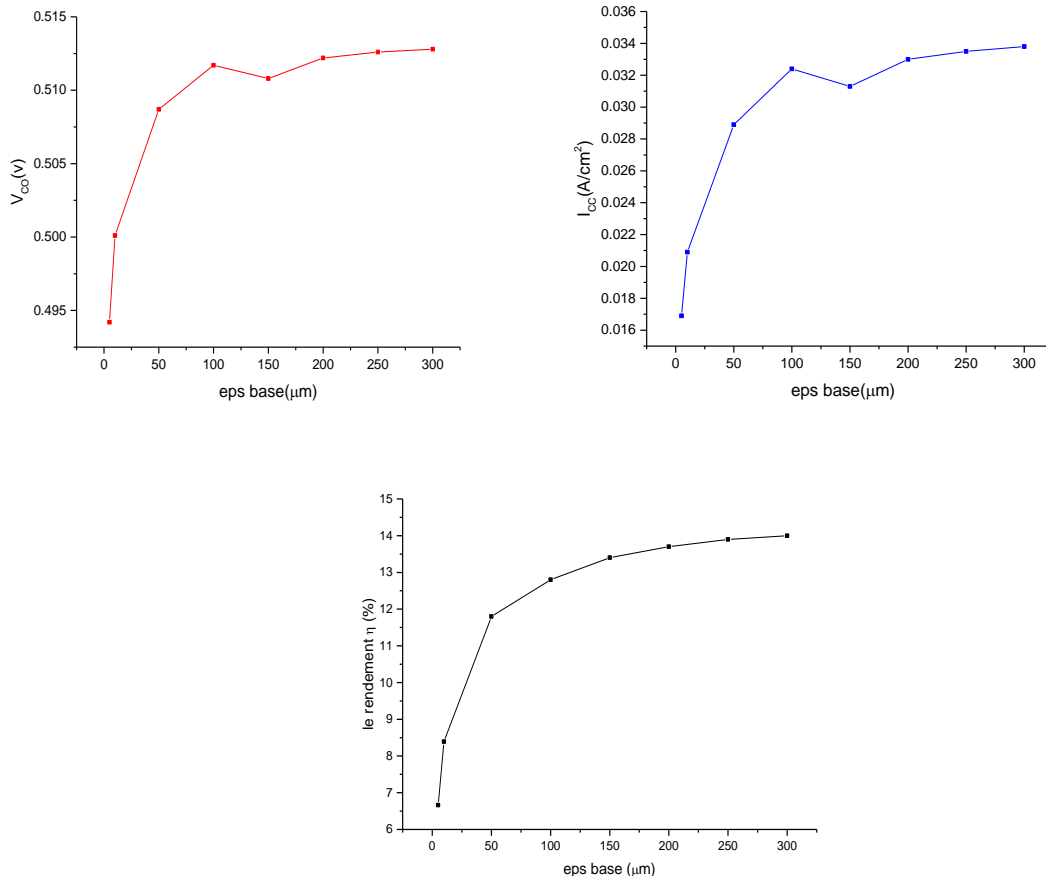


FIGURE 3-3: : Variation de la tension de circuit ouvert, le courant de court circuit et le rendement en fonction de l'épaisseur de la base.

D'après les résultats de la simulation, nous avons remarqué que lorsque l'épaisseur de la base augmente, il y a une décroissance dans la tension de circuit ouvert et légère décroissance dans le courant de court circuit et par conséquent le rendement augmente.

Ce résultat est expliqué par l'épaisseur de la cellule est un facteur important pour l'absorption des photons, pour cette raison nous avons choisi une épaisseur de 250 μm pour un bon rendement et pour toutes les autres simulations qui faire.

3-4.2 Influence de l'épaisseur de l'émetteur :

Pour estimé l'influence de l'épaisseur de l'émetteur de la cellule sur le rendement nous avons varié ce dernier et fixé les autres paramètres et la figure 3.4 représenté la variation de rendement en fonction de l'épaisseur de l'émetteur n+.

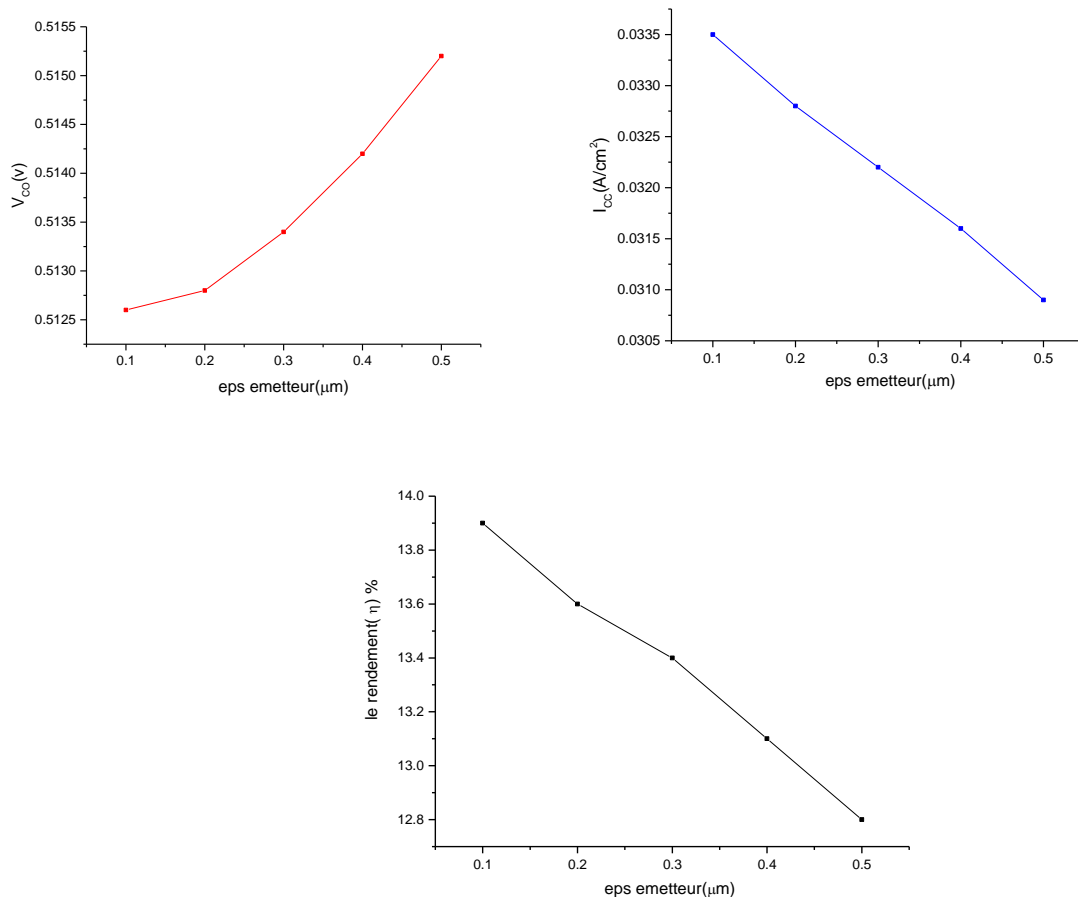


FIGURE 3-4: : Variation de la tension de circuit ouvert, le courant de court circuit et le rendement en fonction de l'épaisseur de l'émetteur.

Comme on peut le voir sur la figure 3-4, l'augmentation de l'épaisseur de l'émetteur entraîne la décroissance de la tension de circuit ouvert et le courant de court circuit et par suite le rendement. Nous avons choisi un émetteur de 0.1 μm pour un bon rendement et pour toutes les autres simulations qui suivent, cela est dû au rendement élevé obtenu par rapport aux autres épaisseurs plus grandes ($e > 0.1 \mu\text{m}$). L'explication de ce résultat est que Les nouveaux émetteurs utilisés actuellement sont dopés à 10^{19}cm^{-3} et nécessite une faible épaisseur de l'ordre de 0.1 μm . Ce type d'émetteur est appelé émetteur transparent et dispose d'un phénomène de diffusion très important.

3-4.3 Influence du dopage de l'émetteur :

Pour étudier l'influence de dopage de l'émetteur de la cellule sur le rendement nous avons varié ces derniers et fixé les autres paramètres. La figure 3.5 représenté la variation de rendement en fonction de dopage du l'émetteur.

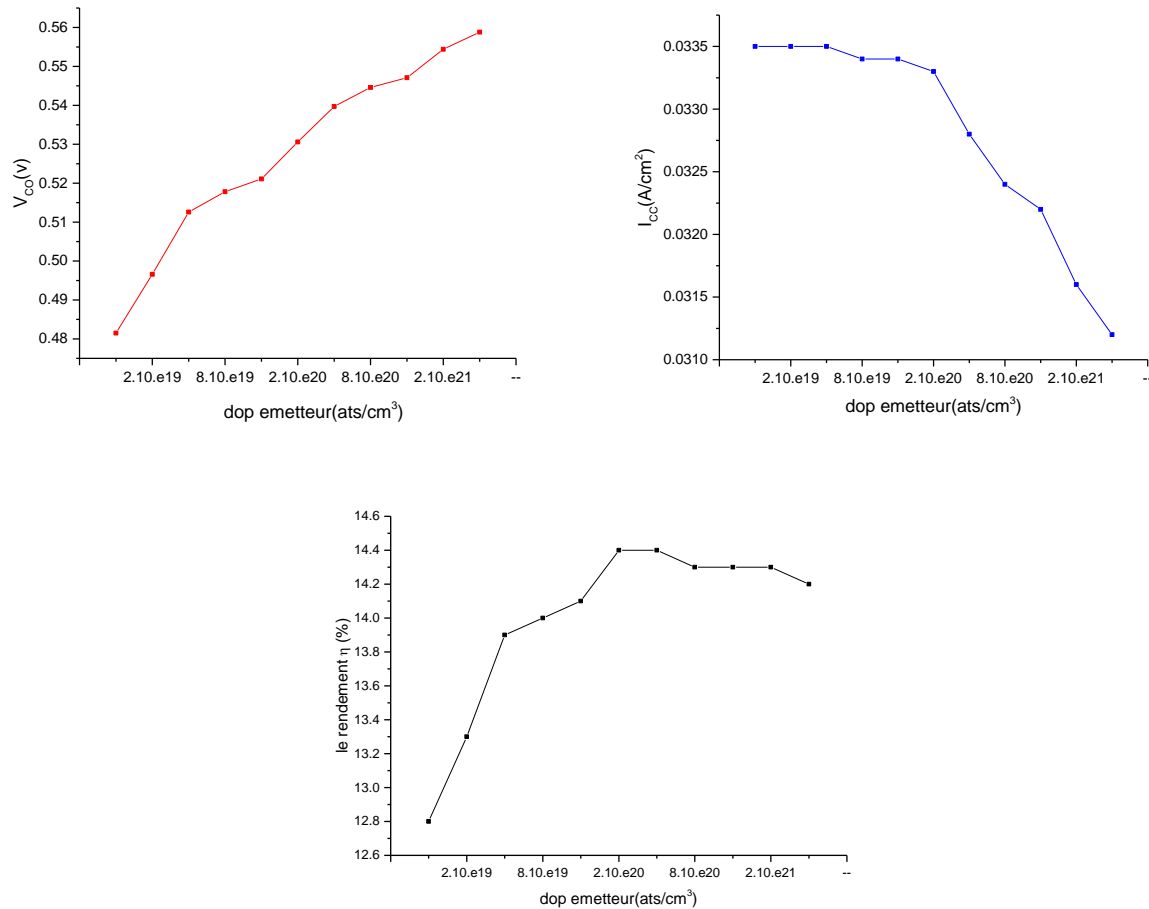


FIGURE 3-5: : Variation de la tension de circuit ouvert, le courant de court circuit et le rendement en fonction du dopage de l'émetteur.

D'après les résultats trouvés, l'élévation du dopage de l'émetteur entraîne une légère diminution du courant de court circuit et par conséquent le rendement augmente jusqu'à certaine valeur de dopage puis il va diminuer, nous constatons que le rendement prend sa valeur optimale pour un dopage de $2.10^{20} \text{ cm}^{-3}$ nous avons choisi cette valeur pour un bon rendement et pour toutes les autres simulations qui suivent. Alors que la tension de circuit ouvert augmente à cause de la

croissante de la barrière de potentiel et faisant augmenter la zone de charge d'espace ce qui entraîne la croissance du champ séparateur et conduit à une dégradation des performances.

3-4.4 Influence du dopage de la base :

Pour étudier l'influence de dopage de la base de la cellule sur le rendement nous avons varié ces derniers et fixé les autres paramètres et la figure 3-6 représenté la variation de rendement en fonction de dopage de la base.

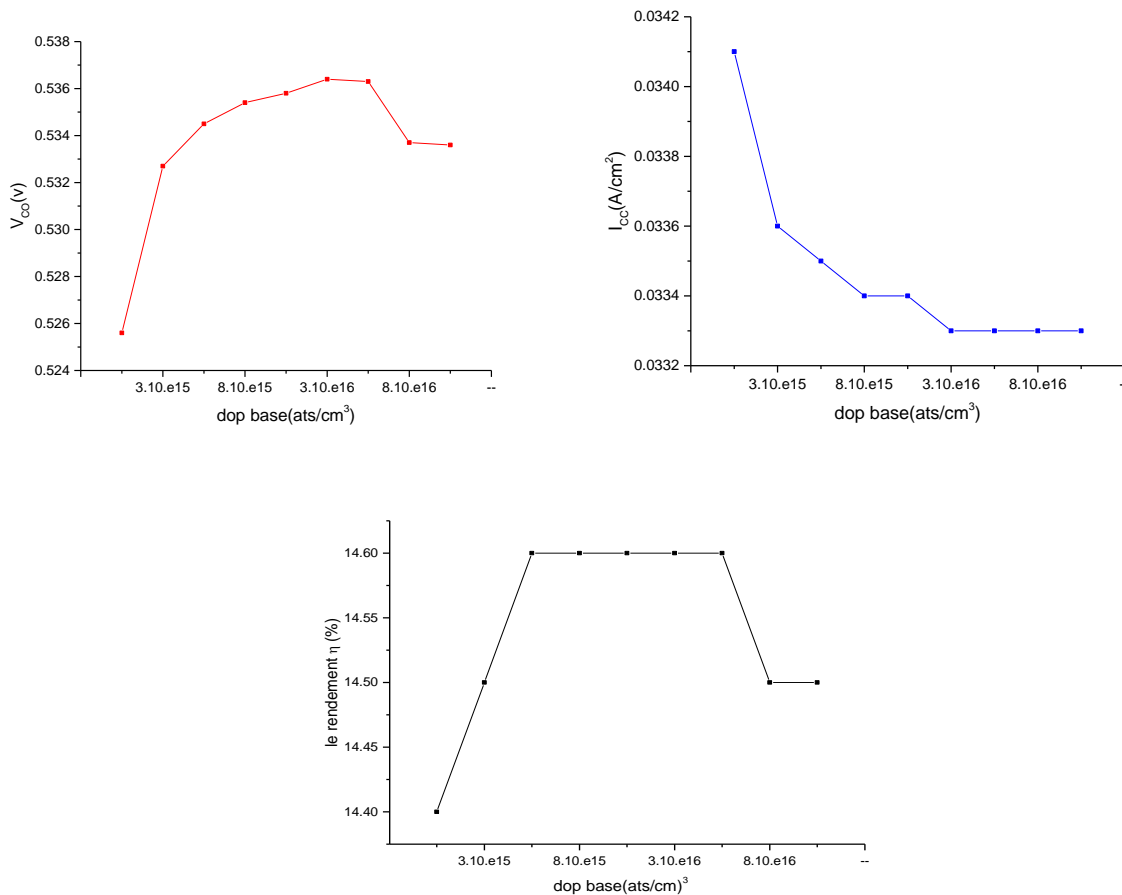


FIGURE 3-6: : Variation de la tension de circuit ouvert, le courant de court circuit et le rendement en fonction du dopage de la BASE.

Lorsqu'on augmente le dopage du substrat, la tension de circuit ouvert augmente à certain valeur puis elle va diminuée et le courant de court circuit aussi diminue, On remarque que le rendement en fonction du dopage de la base prend une valeur maximale à $5.10^{16} \text{ cm}^{-3}$, ce qui est due l'effet considérable du dopage élevé (excès des recombinaisons) grâce à l'augmentation de la mobilité des électrons et de la durée de vie des porteurs de charges. Après il commence à diminuer à cause de la croissance des recombinaisons Auger.

Donc nous avons choisi la concentration de $5.10^{16} \text{ cm}^{-3}$ pour un bon rendement qui présente un rendement optimale pour la suite de notre simulation.

3-4.5 Influence de la durée de vie(taux de recombinaison):

Pour étudier l'influence du taux de recombinaison sur le rendement nous avons varié ce dernier et fixé les autres paramètres et la figure 3.7 représenté la variation de rendement en fonction de taux de recombinaison.

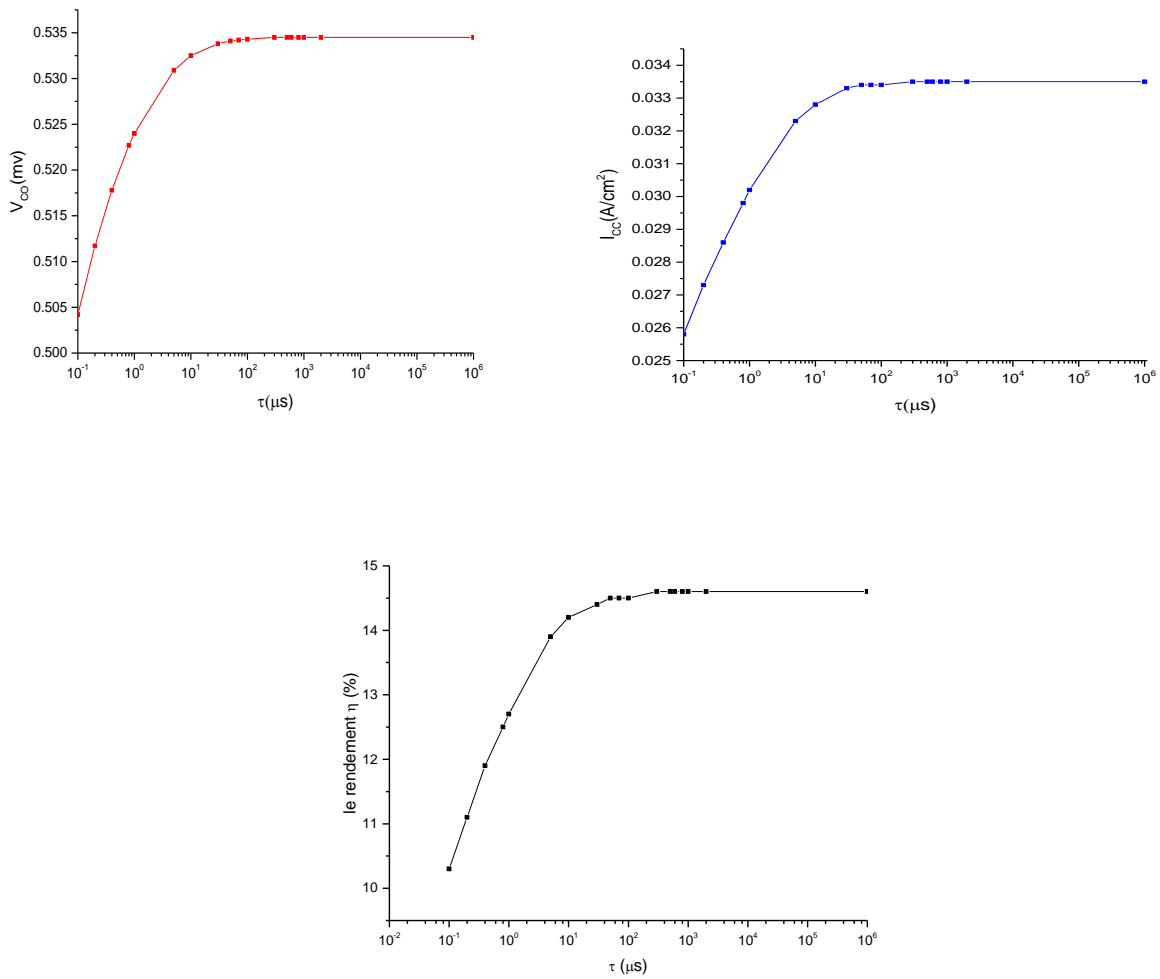


FIGURE 3-7: : Variation de la tension de circuit ouvert, le courant de court circuit et le rendement en fonction du durée de vie

D'après les résultats trouvés, l'élévation du durée de vie entraine une légère augmentation du courant de court circuit et la tension de circuit ouvert par conséquent du rendement aussi augmente due à l'élimination des recombinaisons en volume.

3-4.6 Influence du dopage du BSF :

Pour étudier l'influence de dopage de la couche de BSF sur le rendement de la cellule nous avons varié ce dernier et fixé les autres paramètres et la figure 3.8 représenté la variation de rendement en fonction de dopage de la BSF.

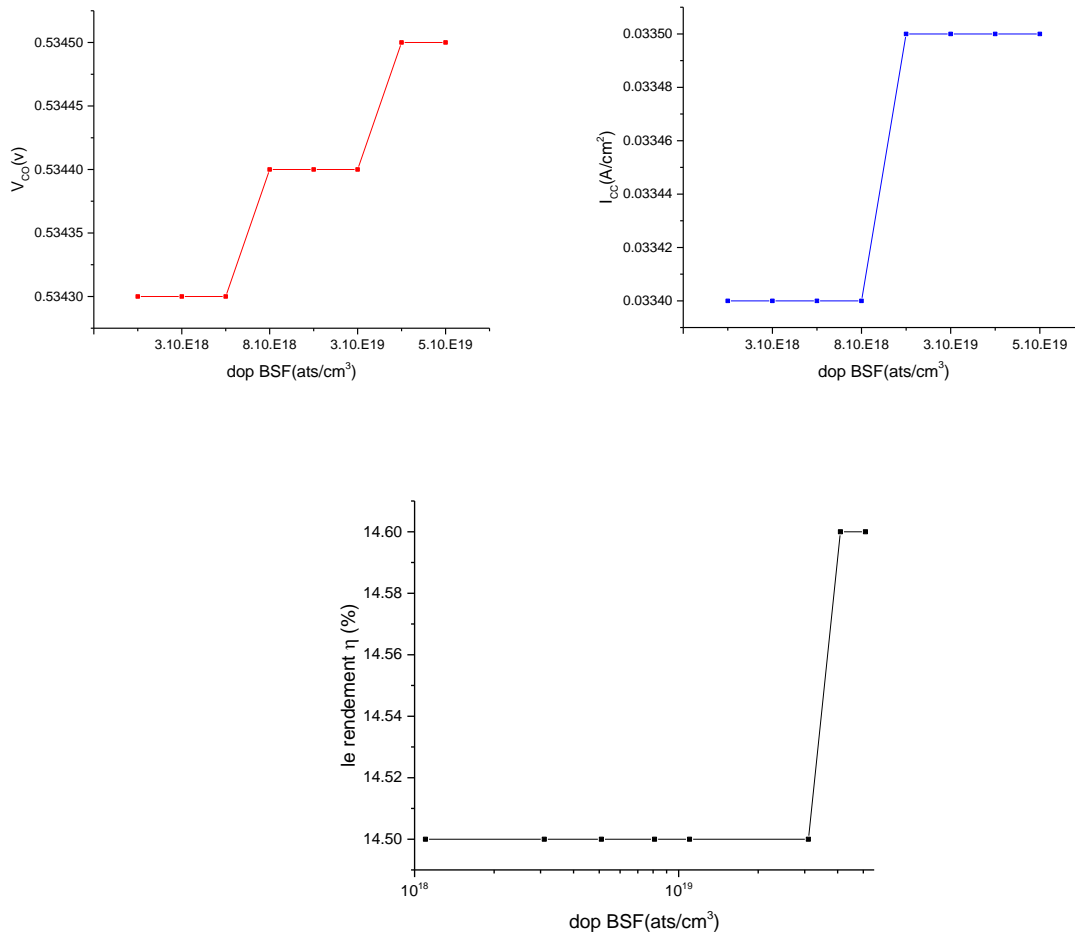


FIGURE 3-8: : Variation de la tension de circuit ouvert, le courant de court circuit et le rendement en fonction de dopage du BSF.

L'augmentation du niveau de dopage du BSF donne une amélioration importante de toutes les caractéristiques de la cellule. Nous pouvons constater qu'il y a une valeur optimale du dopage de la couche de BSF qui correspond au maximum de rendement de la cellule, Pour cette cellule de type n+ p p+ le dopage optimal est égal à $4.10^{19} \text{ cm}^{-3}$, pour le bon rendement. La recombinaison dans le BSF est très faible étant donné son emplacement sur la face arrière de la cellule, et les conditions de collecte des porteurs sont mauvaises. Un BSF fortement dopé permet de réduire la recombinaison au niveau du contact métal semi-conducteur.

3-4.7 Influence de l'épaisseur du BSF :

Pour estimé l'influence de l'épaisseur de la couche de BSF sur le rendement nous avons varié ce dernier et fixé les autres paramètres et la figure 3.9 représenté la variation de rendement en fonction de l'épaisseur de la BSF.

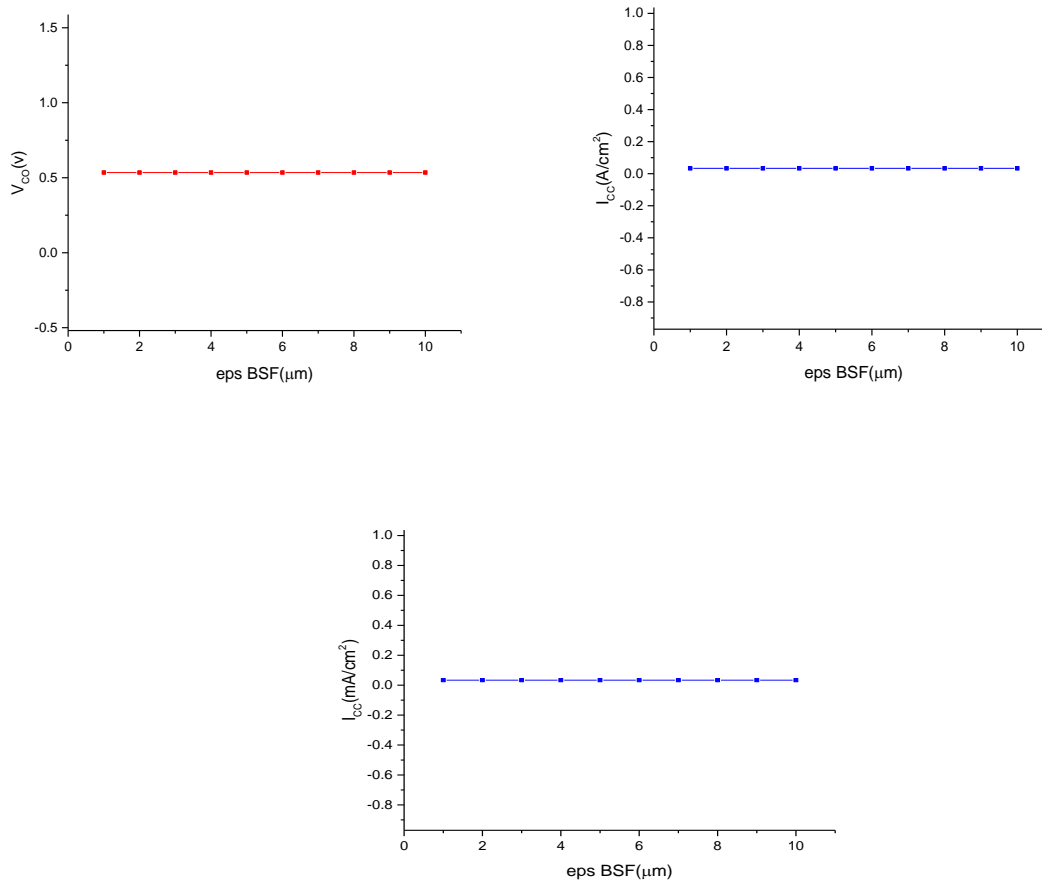


FIGURE 3-9: : Variation de la tension de circuit ouvert, le courant de court circuit et le rendement en fonction de l'épaisseur du BSF.

La croissance de l'épaisseur du BSF entraine la stabilité de tous les paramètres de la cellule donc l'épaisseur du BSF doit être fine pour réduire la recombinaison dans cette couche en permettant le passage des paires électrons-trous créées au contact arrière. D'après les résultats obtenus (Figure3.9) on remarque que le rendement en fonction de l'épaisseur de BSF prend une valeur constante proche de $2\mu\text{m}$. Nous avons choisi cette valeur $2\mu\text{m}$ pour un bon rendement et pour toutes les autres simulations qui suivent.

3-4.8 Influence des vitesses des recombinaison (face avant et face arriere)

➤ vitesse face avant :

Pour étudier l'influence de la recombinaison en surface avant sur le rendement nous avons varié ce dernier et fixé les autres paramètre et la figure3-10 représenté la variation de rendement en fonction de la recombinaison en surface.

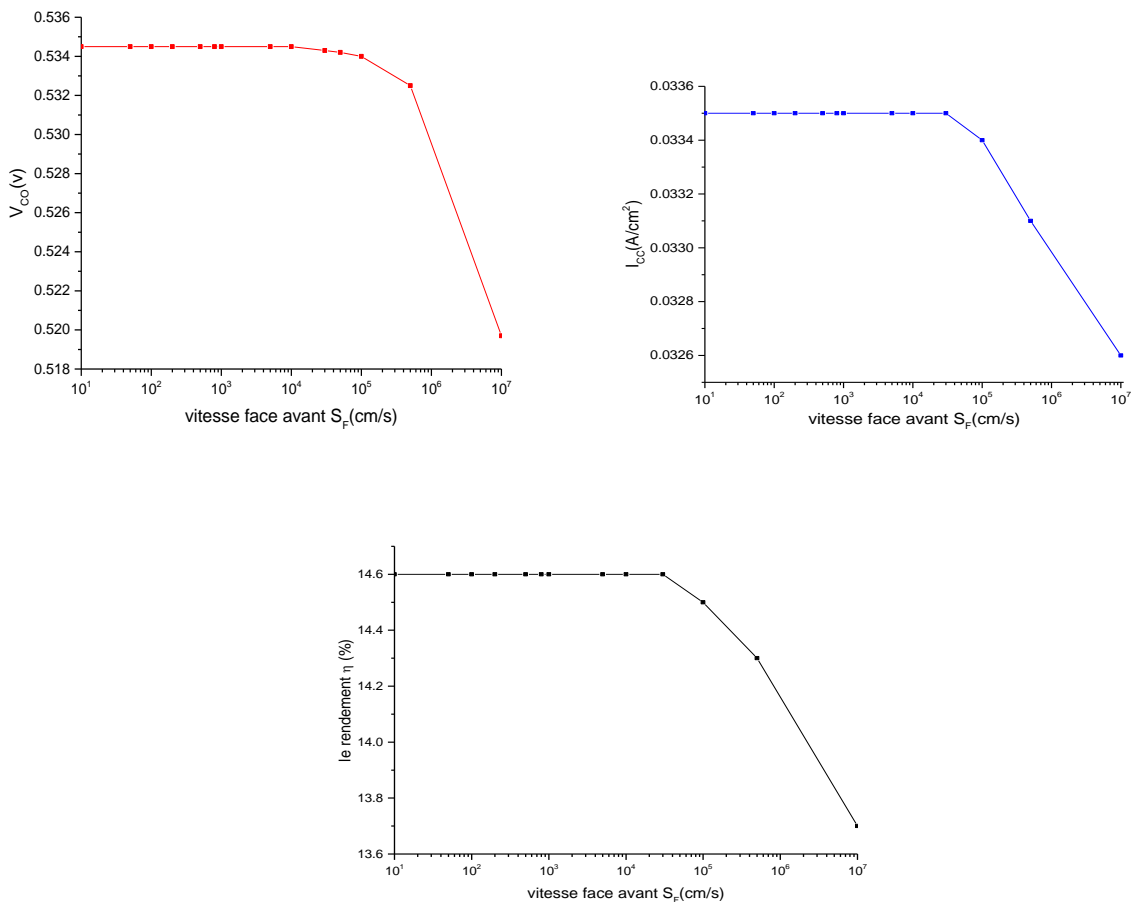


FIGURE 3-10: *Variation de la tension de circuit ouvert, le courant de court circuit et le rendement en fonction de vitesse face avant.*

Le courbe de rendement (Figure 3-10) montre que le rendement de la cellule cela prend une valeur constante 14.6% à partir de la vitesse de face avant S_F (10-30000cm/s) puis commence à décliner pour atteindre la valeur 13.7% à la vitesse de 10^7 cm/s ,La grande vitesse de recombinaison peut dégrader le rendement. Donc elle n'a pas d'influence importante sur les caractéristiques de la cellule.

➤ vitesse face arrière

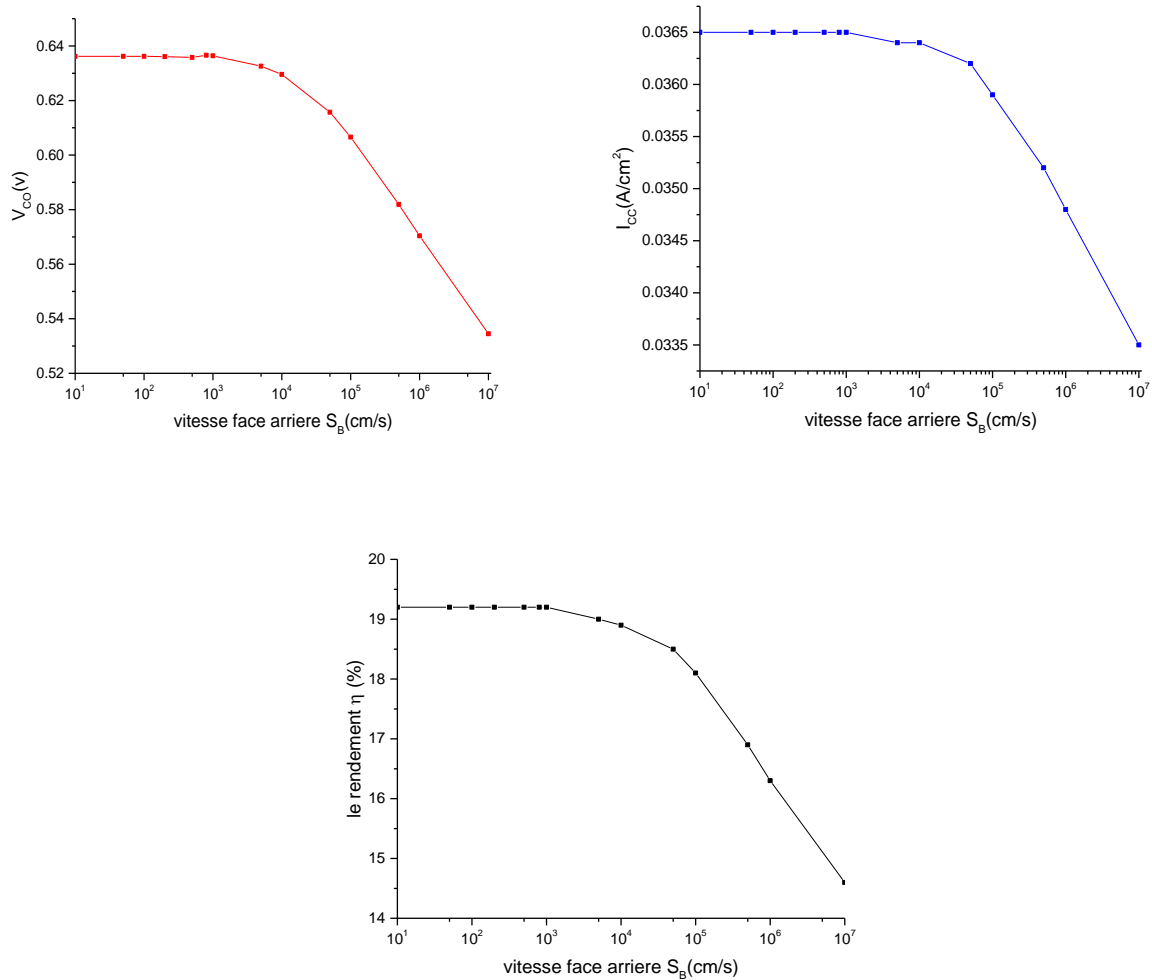


FIGURE 3-11: : Variation de la tension de circuit ouvert, le courant de court circuit et le rendement en fonction de vitesse face arriere.

La courbe de rendement figure 3-11 montre que le rendement de la cellule prend une valeur constante 19.2% à partir de la vitesse de face arriere S_b (10-30000cm /s) puis commence à décliner pour atteindre la valeur 14.6% à la vitesse de 10^7 cm /s. même résultat obtenue par rapport la vitesse face avant.

L'augmentation du dopage BSF provoque une amélioration de l'intensité du champ de surface arrière dans la jonction n^+/n créant une barrière de potentiel qui tend à confiner les porteurs minoritaires (trous) dans la région légèrement dopée et aide à les pousser vers le front. Ainsi, le rendement de conversion monte sensiblement.

3-4.9 L'effet de la couche anti reflet :

Pour minimiser la réflexion de la lumière, nous avons utilisé une couche antireflet (CAR), L'utilisation d'une couche antireflet dans le processus de fabrication d'une cellule solaire est un élément important pour optimiser le rendement de la cellule photovoltaïque, dans ce travail on va voir l'influence de la couche anti reflet sur le rendement de cellule PV .

Pour étudier l'influence de la couche anti reflet sur le rendement nous avons utilisé ce dernier et fixé les autres paramètres puis en lève la couche CARet représenté la variation de rendement en fonction de la couche anti reflet

➤ Avec la couche :

TABLEAU 3-4 : *l'influence de la couche anti reflet sur le rendement*

Vco (V)	Icc (A/cm ²)	η(%)
0 ,6354	0 ,0365	19,2

➤ Sans couche anti reflet :

TABLEAU 3-5 : *l'influence de l'absence de couche anti reflet sur le rendement*

Vco (V)	Icc (A/cm ²)	η(%)
0 ,6264	0 ,0133	13,3

D'après les résultats obtenu (tableaux : 3-4,3-5) on résulte que la couche anti reflet prend un rôle très importante dans la cellule PV et pour donner un bon rendement, on remarque qu'il y a une variation du rendement de 5,9% donc l'effet de cette couche est très intéressé.

3-4.10 l'influence des paramètres de la CAR sur le rendement

➤ l'influence de l'épaisseur de CAR

Pour étudier l'influence de la couche anti reflet sur le rendement nous avons varié ce dernier et fixé les autres paramètres et la figure 3-12 représenté la variation de rendement en fonction de l'épaisseur de la couche anti reflet.

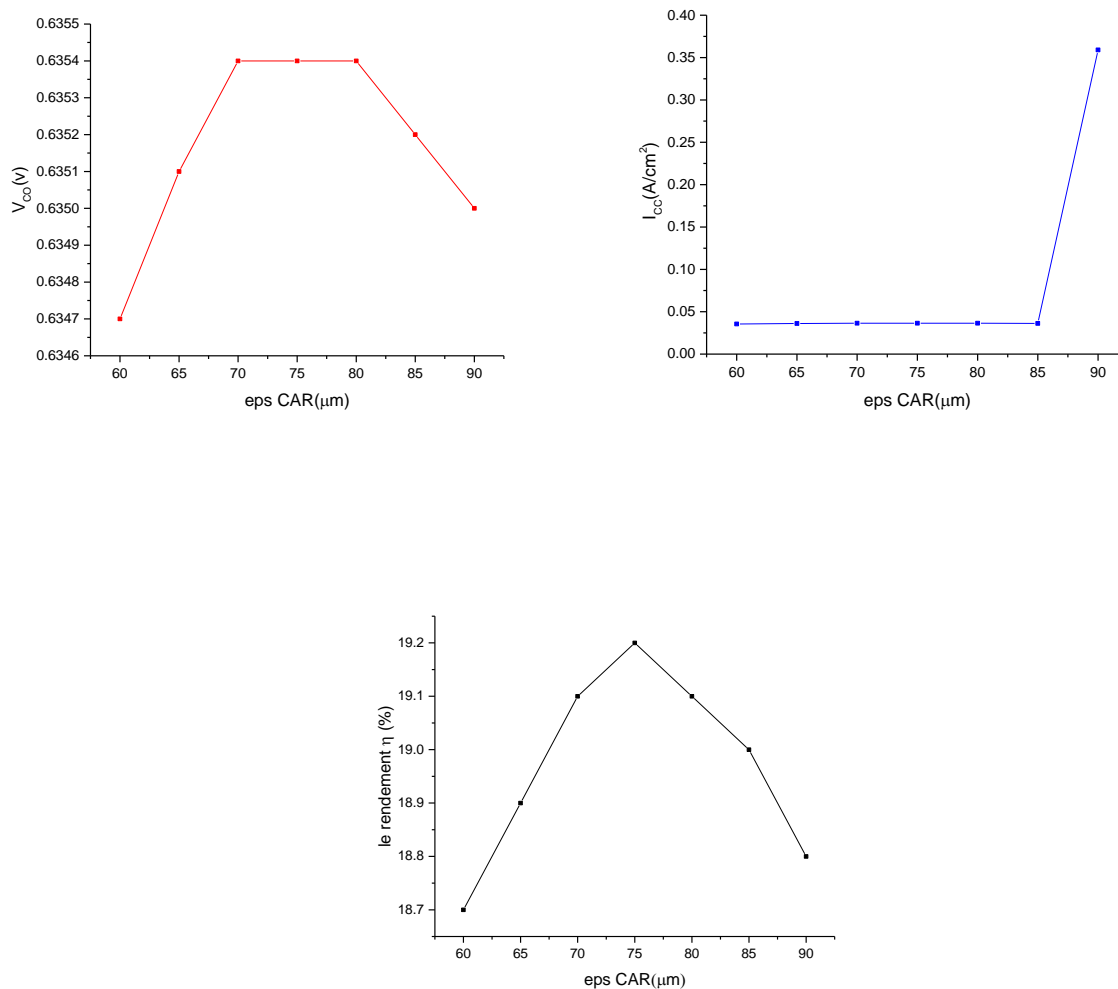


FIGURE 3-12: : Evolution du rendement, en fonction de l'épaisseur de la couche anti reflet

L'épaisseur de la couche anti reflet doit être importante pour assurer l'absorption des rayonnements. D'après les résultats obtenus figure 3-12 on remarque que le rendement en fonction de l'épaisseur de la couche est augmenté puis elle va diminuer. Et nous avons choisi l'épaisseur de 75 μm qui présente un bon rendement 18,2% pour la suite de la simulation.

➤ l'influence de l'indice de CAR

Pour étudier l'indice de la couche anti reflet sur le rendement nous avons varié ce dernier et fixé les autres paramètres et la figure 3-13 représenté la variation de rendement en fonction de l'indice de la couche anti reflet

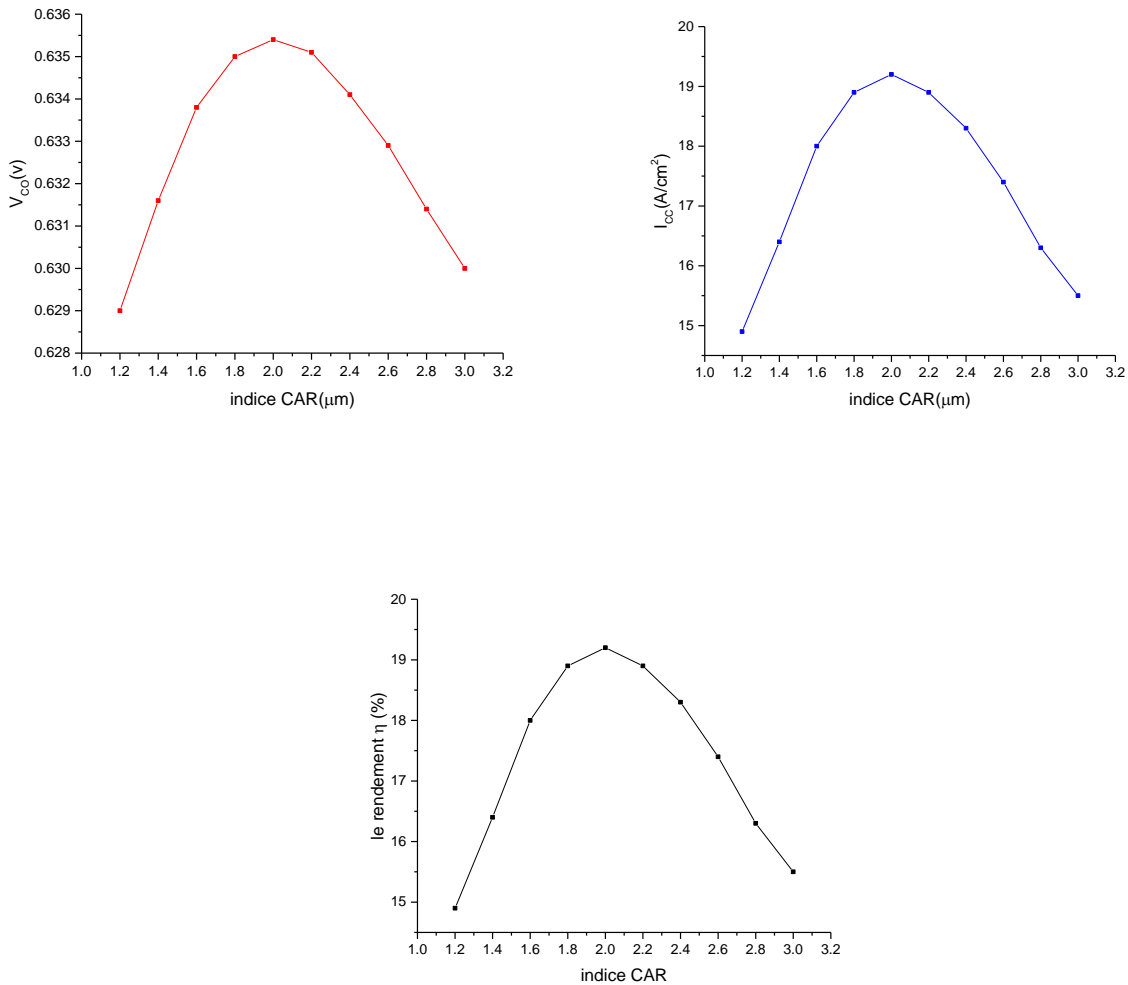


FIGURE 3-13: *Evolution du rendement, en fonction de l'indice de la couche anti reflet*

D'après le résultat obtenu figure 3-13 On remarque que le rendement en fonction de l'indice de la couche prend sa valeur maximale 18,3 % à 2,01 après, il prend une diminution. Donc nous avons choisi l'indice de 2 ,01 pour un bon rendement.

Le tableau suivant résume les valeurs optimales de la cellule qui peuvent donner un bon rendement :

TABLEAU 3-6 : *les conditions optimales pour une bonne cellule solaire.*

Couche antireflet	n_{car}	2,01
	d_{car} (nm)	75
Texturisation	Angle ($^{\circ}$)	54,75
	Depth (μm)	3
Emetteur	L'épaisseur (μm)	0,1
	Dopage (cm^{-3})	$2 \cdot 10^{20}$
	Profile de diffusion	Erfc
Base	Concentration (cm^{-3})	$5 \cdot 10^{15}$
	Taux de recombinaison (μs)	500
	L'épaisseur (μm)	250
BSF	L'épaisseur (μm)	1
	Dopage (cm^{-3})	$4 \cdot 10^{19}$
Passivation	Surface avant (cm/s)	10^3
	Surface arrière (cm/s)	10^3

3-5 REPONSE SPECTRALE DE LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE

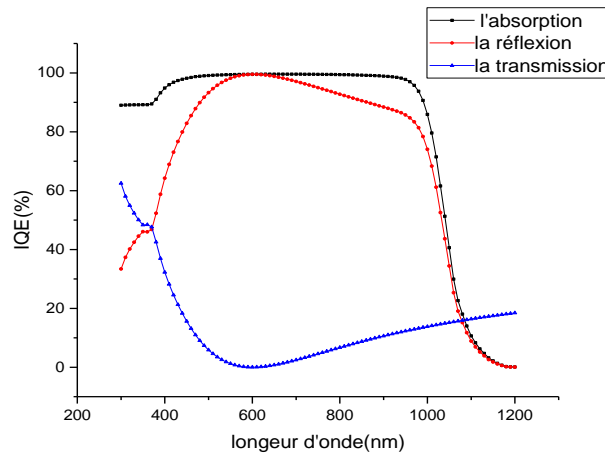


FIGURE 3-14: *Effet de la couche antireflet sur la réponse SPECTRALE.*

D'autre part, l'influence de cette couche sur la réponse spectrale est nettement visible sur la figure (3-14), une amélioration du rendement quantique externe aux grandes longueurs d'ondes est observée du fait de l'absorption des photons de faibles énergies. Et une augmentation remarquable dans l'intervalle 400 à 1100 nm, domaine où la réponse spectrale est dominée par les porteurs photo générés dans la base.

3-6 LA CARACTERISTIQUE I(V)

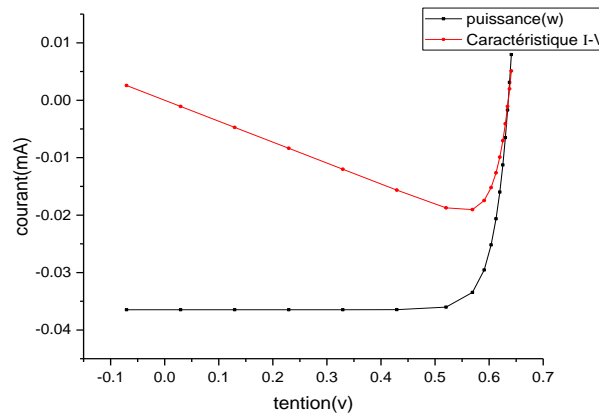


FIGURE 3-15: *la caractéristique I-V d'une cellule SOLAIRE.*

La cellule solaire simulée est à base de silicium d'une épaisseur 250 μm dopée à $5.10^{15} \text{ cm}^{-3}$, de face avant (face éclairée) texturée en pyramides inversées, cette texturation permet une réduction importante du coefficient de réflexion et ainsi des pertes optiques dans la cellule. La couche de BSF est d'épaisseur $2\mu\text{m}$ dopé à $4.10^{19} \text{ cm}^{-3}$. Les résultats obtenus sont :

$$\mathbf{P_{max} = 19.2 \text{ mW} \quad I_{cc} = 36.5 \text{ A} \quad V_{co} = 635.4 \text{ mV} \quad \eta = 19.2\% .}$$

3-7 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons essayé d'optimiser le rendement de la cellule solaire. Nous avons choisi une cellule de référence ensuite nous avons changé les paramètres un par un en fixant les autres et puis nous avons fait varier les paramètres de la couche anti reflet. On a trouvé que la structure simulée donne un rendement de **19,2%** avec l'introduction de la couche antireflet(CAR) et dans l'absence de cette couche la structure citée donne un rendement de **13,3%**, **c.-à-d. une diminution de 5,9%**. **Cela justifie le rôle que joue la couche anti réfléchissante** pour les performances des cellules solaires.

CONCLUSION GENERALE

D'après les résultats obtenus :

Quel que soit la structure d'une cellule solaire, une optimisation de ses paramètres est nécessaire pour avoir un bon rendement. Habituellement, les paramètres à optimiser sont : l'épaisseur de la cellule, les niveaux et les profils de dopage, la configuration des contacts et le confinement optique. Les valeurs des paramètres optimaux dépendent de la structure de la cellule solaire, de la qualité du matériau, de la vitesse de recombinaison en surface (faces avant et arrière), sans oublier les paramètres de la couche antireflet, etc... L'optimisation de la cellule solaire enseigne donc sur l'étude de l'influence de ces paramètres sur le rendement afin d'en obtenir le meilleur.

Les paramètres de la couche anti reflet a un effet appréciable sur le rendement de la cellule solaire, qui est dû à la grande valeur du coefficient d'absorption, donc plus l'interférence des faisceaux lumineux grand, plus l'absorption du rayonnement n'est grande et Réduire au maximum la réflexion.

Les différents résultats optiques mesurés pour les différentes paramètres de la couche antireflet, confirme les différents résultats prédit par nos simulations. Dans ce cas, l'utilisation de nos programmes pour le calcul de différentes propriétés optiques peut être une bonne solution, On a trouvé que la structure simulée donne un rendement de **19,2%** avec l'introduction de la couche antireflet(CAR) et dans l'absence de cette couche la structure citée donne un rendement de **13,3%**, **c.-à-d. une diminution de 5,9%**. **Cela justifie le l'influence de cette couche anti réfléchissante** pour les performances des cellules solaires.

REFERENCE

- [1] LAHRECHE Imen, mémoire de master, «Mesure des Propriétés Externes d'une Cellule Photovoltaïque », Université Med Khider Biskra, 2013.
- [2] Malek MENMANSOR, thèse de doctorat, université Terre et Marrie CURIE, PARIS juillet 2013.
- [3] J. ZAHO, M.A , « optimized antireflection coating solar cells ,IEEE Trans .Dev, vol 38,p.1925-1934,1991.
- [4] D.J, Aiken «Antireflection coating design for series interconnected multijunction solar cells »,Prog. Photovolt ,2000.
- [5] Zighed LILIA ,these de doctorat ,université de Constantine,2007.
- [6] J. del Alamo, S. Swirhun and R. M. Swanson, Solid State Electronics **28**, 47 (1985).
- [7] J. del Alamo and R. M. Swanson, IEEE Trans. Elect. Devi. **34**, 1580 (1987).
- [8] B. Benoit, «Réalisation Et Caractérisation De Cellules Photovoltaïques Organiques Obtenues Par Dépôt Physique». Thèse de Doctorat, Université de Limoge, France, (2004).
- [9] G. Adolf, K. Joachim, V. Bernhard, «Crystalline Silicon Solar Cells». Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, Freiburg, Germany, (1998).
- [10] J. Barnard « Energie Solaire Calcul Et Optimisation ». Ellipses édition, Paris, France, 2004.
- [11] A. Labouret, M. Villoz, Energie solaire photovoltaïque, 3^{ème} édition, DUNOD, Paris, 2006.
- [12] J. M. Navarro, « Cell ules photovoltaïques organiques transparentes dans le visible » Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier, 2008.

- [13] Energie solaire photovoltaïque.doc / B. Flèche - D. Delagnes / juin 07.
- [14] G. Adolf, K. Joachim, V. Bernhard, «Crystalline Silicon Solar Cells». Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, Freiburg, Germany, (1998).
- [15] N. Oleksiy, «Simulation, Fabrication Et Analyse De Cellules Photovoltaïques A Contacts Arrières Interdigités». Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. France, (2005).
- [16] R. Alain, «Convertisseurs photovoltaïques». Site Web : http://www.cythelia.fr/images/file/Convertisseurs%20photovoltaïques_Alain%20Ricard_Nov-07.pdf.
- [17] M. Madani, «Réalisation Des Couches Antireflets Dans Les Cellules Solaires a Couches Minces». Thèse de Magister, Abou-Bakr Belkaid De Tlemcen. Algérie, (2006).
- [18] G. Adolf, K. Joachim, V. Bernhard, «Crystalline Silicon Solar Cells». Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, Freiburg, Germany, (1998).
- [19] W.C. Benmoussa, S. Amara et A. Zerga, «Etude Comparative Des Modèles De La Caractéristique Courant-Tension D'une Cellule Solaire Au Silicium Monocristallin» Revue des Energies Renouvelables ICRES-07 Tlemcen, Algérie, (2007), 301 – 306.
- [20] B.B. Nadia, «Propriétés physiques des semi-conducteurs (Si monocristallin et Ge) et Simulation des cellules solaires à base de Si et SiGe». Mémoire de Magister, Université Abou-Bakr Belkaid de Tlemcen, Algérie (2006).
- [21] NAIT KACI Fazia , Etude et réalisation de couches d'oxy-nitride de silicium sur un substrat de silicium monocristallin ou multicristallin », MEMOIRE DE MAGISTER, Université M'Hamed Bougara- BOUMERDES, 2010.
- [22] Jean-François LELIEVRE. « Elaboration de SiNx : H par PECVD : optimization des propriétés optiques, passivantes et structurales pour applications photovoltaïques ». Thèse de doctorat. INSA de Lyon. 2007.
- [23] W. DIB, « Modélisation des structures photovoltaïques : aspects fondamentaux et appliqués », Thèse Doctorat, Université Abou bekr belkaid de Tlemcen, 2010.
- [24] N. Benhmed Benabdillah, « Propriétés physiques des semi-conducteurs (Si monocristallin et Ge) et Simulation des cellules solaires à base de Si et SiGe », mémoire Magister, Université Abou bekr Belkaid -Tlemcen, 2006.
- [25] P. papet, « nouveaux concepts pour la réalisation de cellules photovoltaïques à contacts interdigités sur substrats minces en silicium cristallin », Thèse Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2007.

- [26] H. Mathieu, « Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques », Edition Masson, Paris, (1990).
- [27] B. Zebentout, Z. Benamara, T. Mohammed-Brahim, Thin solid films, Vol 516(2007), pp84-90.
- [28] L. L. Kazmerski, Solid-State Electron 21 (1978)1545.
- [29] HECHT « PHYSIQUE-2. Electricité et magnétisme » Ed. de boek
Th. L. Floyd « Electronique, Composants et systèmes d'application » Ed. Goulet
- [30] J.É. Bourée, P.R. Cabarrocas, « Cellules solaires en couches minces à base de silicium »,
Laboratoire de Physique des Interfaces et des Couches Minces, École Polytechnique, 91128 Palaiseau Cedex.
- [31] A. Yazid, « Optimisation des cellules solaires conventionnelles à base de silicium de type N », mémoire Magister, université Abou bekr belkaid-Tlemcen, 2010-2011.
- [32] P. papet, « nouveaux concepts pour la réalisation de cellules photovoltaïques à contacts interdigités sur substrats minces en silicium cristallin », Thèse Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2007.
- [33] I.F. Bouguenna, “ Modélisation et Optimisation d'une Cellule Solaire Tandem a-Si:H/a-SiGe, mémoire magister”, Université Mohamed Boudiaf Oran, 2009.
- [34] W. DIB, « Modélisation des structures photovoltaïques : aspects fondamentaux et Appliqués », Thèse Doctorat, Université Abou bekr belkid de Tlemcen, 2010.
- [35] NOZIK A. « Third Generation Solar Photon Conversion: High Efficiency through Multiple Exciton Generation in Quantum Dots ».Energy & Nanotech. Workshop II: Prospects for Solar Energy in the 21st Century, Oct. 2004, Rice University, Houston, USA.
- [36] PAPET P. «Nouveaux concepts pour la réalisation de cellules photovoltaïques à contacts interdigités sur substrats minces en silicium cristallin», Thèse EEA. Lyon : INL - INSA de Lyon, 2007, 157 p.
- [37] P. Würfel, «Physics of solar cells, from principles to new concepts », Wiley-vch Verlag GmbH & Co.KGaA, 2005, ISBN: 3-527-40428-7.
- [38] ABDERRZEK MAHFOUD, Modélisation des cellules solaires tandem à couches minces et à haut rendement, thèse de Doctorat, UNIVERSITE SETIF - 1,2015.
- [39]H. J. Havel .TiO₂ coatings by a low temperature spray process.
- [40] J. L. Balenzategui, and F. Chenlo. Solar Energy Materials and Solar Cells, Volume 86, Issue1.

- [41] D. Bouhafs. Thèse de magister. UDTS alger .Juin (1993).
- [42] F. Rebiba, E. Tomasellaa, T. M. Duboisa, J. Celliera, T. Sauvageb, M. Jacqueta. Surface et Coatings Technology 200(2005).
- [43] R. Machoro, E.C. Samano, G. Soto, F. Villa, L. Cota-Araiza, Mater.Lett. 45(2000).
- [44] L. Pinard, J.M. Mackowski, Thin Solid Films 333(1998).
- [45] F. Pinakidou, M. Katsikini, E.C. Paloura, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B 200 (2003).
- [46] V.A. Gritsenko, R.W.M. Kwok, Hei. Wong, J.B. Xu, J. Non-Cryst. Solids 297(2002).
- [47] S. Winderbaum, F. Yun, O. Reinhold, J. Vac. Sci. Technol. A 15(1997).
- [48] Z. Benmohamed, M. Remram et A. Laugier 1. Rev. Energ. Ren. : Valorisation.(1999).
- [49] M.Lipinski .R.Mroczynski .Archivee of metallurgy and materials vol 53 (2008)
- [50] J-F Lelievre. Thèse de doctorat. Lyon(2007).

RÉSUMÉ

La consommation d'énergie est nécessaire au développement social et économique. Ces médiocrités rappellent l'extrême importance de la maîtrise énergétique : savoir créer de l'énergie, savoir l'économiser aussi, il y a un compromis entre la production et la consommation et par suite il faut entrer dans une logique forte d'économies d'énergie et augmenter nettement la part des énergies renouvelables. La conversion photovoltaïque est la transformation directe d'une énergie électromagnétique en énergie électrique continue. Cette énergie électromagnétique est le plus souvent le rayonnement solaire. Dans ce travail, nous avons réalisé une cellule solaire à base de Si dans le but d'optimiser le rendement en agissant sur quelques éléments constituant la cellule.

Mots clés : cellules solaires, silicium, couche antireflet, simulation, rendement, PC1D.

ABSTRACT

The consummation of energy is required for the development social and economic. These equilibrium necessities the most importance of the utilization of the energy: know how create energy and know economized this energy. There is a compromise between the production and the consummation. Furthermore, everybody must have a fort logical in utilization of energy in the world. The conversion photovoltaic is the transformation direct of the electromagnetic energy on electrical permanent energy. Even, this electromagnetic energy is the solar radiation. In this work, we were realized a solar cell Si in the mean of optimization of its efficiency on action of the elements constructed the cell.

Key words: Solar cell, silicon, anti-reflection layer, simulation, yield. PC1D.

ملخص

استهلاك الطاقة ضروري من اجل التقدم الاجتماعي والاقتصادية, وهذا الاعتدال يتطلب التمكن من الاستخدام الأمثل لهذه الطاقة ومعرفة كيفية توليد هذه الطاقة و معرفة استغلالها بطريقة اقتصادية أيضا, لذا يجب أن يكون هناك توازن بين إنتاج الطاقة و استغلالها و بالتالي يجب أن يدخل الإنسان في منطق اقتصاد الطاقة الكهربائية و رفع أسهم الطاقات المتجددة. تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية هي تحول الطاقة الالكترومغناطيسية (الفوتونات الضوئية) إلى طاقة كهربائية هذه الطاقة هي الأشعة الضوئية. في هذه المذكرة قمنا بانجاز خلية من مادة سلسيوم بهدف تحسين مردود هذه الأخيرة مؤثرين على خصائص الخلية الشمسية.

الكلمات الرئيسية: خلية شمسية, سلسيوم, مضادة الانعكاس, محاكاة, فعالية PC1D.

