



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

UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID - TLEMCCEN

MEMOIRE

Présenté à :

FACULTE DES SCIENCES – DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

Pour l'obtention du diplôme de :

MASTER EN PHYSIQUE

Spécialité : Physique Energétique et Energie Renouvelable

Par :

Mlle BENASID Nadera

Sur le thème

Le Silicium Poreux et son rôle dans L'amélioration des performances des cellules photovoltaïques

Soutenu publiquement le 12 juillet à Tlemcen devant le jury composé de :

Mr BENMOUSSA Nesreddine	Professeur	Université de Tlemcen	Président
Mme RAHMOUN Khadîdja	Professeur	Université de Tlemcen	Encadrante
Mme BENBADJI Batoul	MCB	Université de Tlemcen	Examinatrice
Mr FEROUANI Abdelmadjid	MCB	AMC Tipaza	Examineur

Année Universitaire : 2020 ~ 2021

Remerciements

Ce travail a été réalisé à l'Université d'Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, faculté des sciences, département de physique, au sein de l'Unité de Recherche Matériaux et Energies Renouvelables « **URMER** ».

Tout d'abords, j'exprime toute ma profonde gratitude à ma directrice de mémoire de master **Mme Khadîdja Rahmoun**, professeur à la faculté des sciences de l'UABBT, pour m'avoir fait l'honneur d'être mon encadrant et d'assumer la fastidieuse mission de rapporteuse de ce manuscrit. J'ai progressé grâce à son encadrement, sa connaissance et ses explications et j'ai partagé avec elle le même bureau et beaucoup de choses.

J'adresse mon profond respect à **Mr N. BENMOUSSA**, Professeur à la faculté des sciences de l'UABBT, pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury de ce mémoire de master.

Je formule mes remerciements les plus sincères à **Mme B. BENBADJI**, maître de conférences à la faculté des sciences de l'UABBT, ainsi qu'à **Mrs A. FEROUANI** maître de conférences à l'AMC Tipaza, et membre de l'unité de Recherche URMER, d'être membres de jury et d'accepter d'examiner ce travail de recherche.

Je n'oublie pas d'exprimer ma gratitude à tous mes enseignants et professeurs pour la formation qu'ils m'ont dispensée pendant toutes ces années d'études et mes ami(e)s pour leurs soutiens et encouragements.

Benasid Nadera

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A mon cher père et ma chère mère

*Pour leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien
et leurs prières*

Tout au long de mes études

*Que dieu tout puissant, les garde, les protège et leur accorde
santé, longue vie et bonheur*

A mes frères, mes sœurs Zakia et Hafida

*Pour leur appui et leur encouragement permanent et soutien
moral*

A tous mes amis

Merci d'être toujours là pour moi.

Benasid Nadera

Listes des Figures

Chapitre I		
Figure I.1	Rayonnement solaire incident	4
Figure I.2	La structure de base des cellules solaires	4
Figure I.3	Schéma montrant la position des bandes de valence et de conduction dans un isolant, un semi-conducteur et un métal	5
Figure I.4	Mouvement des porteurs de charges libres dans une cellule solaire à base d'une simple jonction PN	6
Figure I.5	Représentation en coupe d'une cellule photovoltaïque	7
Figure I.6	Structure (image gauche) et diagramme de bande (image droite) d'une cellule photovoltaïque. Les dimensions respectives des différentes zones ne sont pas respectées	8
Figure I.7	Schéma électrique de la cellule photovoltaïque...	8
Figure I.8	Répartition (%) de la production de cellules par filière en 2011	9
Figure I.9	Cellule photovoltaïque organique	11
Figure I.10	Meilleur efficacité de la recherche des cellules en fonction du temps pour les différentes technologies	12
Figure I.11	Caractéristique $I=f(V)$ d'une cellule solaire	12
Chapitre II		
Figure II.1	Nombres de publications sur le silicium poreux parus par an depuis 1956 jusqu'à 1996	19
Figure II.2	Cellule d'anodisation à simple et à double réservoir pour la formation du silicium poreux	20
Figure II.3	Caractéristique $J(V)$ relative à un échantillon de silicium poreux (P^+) préparé à partir d'une solution de HF à 1%	21
Figure II.4	Représentation de la structure du silicium macroporeux	22
Figure II.5	Images par microscopie électronique en transmission des différentes morphologies possibles de silicium poreux	23
Figure II.6	Variation de la porosité avec la densité de courant appliqué pour deux types différents de substrats : type p (a) et type p+(b)	24
Figure II.7	Porosité en fonction de la densité de courant pour deux	24

	épaisseurs différentes (1 μm et 10 μm) de la couche, concentration d'HF = 35 %, substrat de type p	
Figure II.8	Variation de la surface spécifique en fonction de la porosité pour deux porosités initiales différentes	25
Figure II.9	Variation de l'épaisseur de la couche de silicium poreux avec le temps d'anodisation, dans le cas du silicium de type p, (a) et pour un substrat de type p+ (b)	26
Figure II.10	Spectres de photoluminescence d'un échantillon de silicium poreux de type	26
Figure II.11	Variation de la transmission en fonction de l'énergie pour deux membranes de Sip ayant la même porosité (72%) et la même épaisseur (40μm)	27
Figure II.12	Variation de l'indice de réfraction en fonction de la porosité pour un substrat de silicium dopé avec 10^{19} cm^{-3} de bore	28
Figure II.13	Spectres de réflexion des couches PS formées sur les régions de type n et p avec les orientations (100) et (111) par rapport à l'échantillon de c-Si	29
Chapitre III		
Figure III.1	L'importance de simulation	34
Figure III.2	Cellule en silicium (modèle 1)	36
Figure III.3	Cellule en silicium avec une couche de silicium poreux PSi (modèle 2)	36
Figure III.4	Cellule en silicium sans BSF (modèle 3)	36
Figure III.5	Cellule en silicium sans BSF (modèle 4)	36
Figure III.6	Cellule en silicium avec BSF (modèle 5)	36
Figure III.7	Cellule en silicium avec BSF et une couche de silicium poreux du (modèle 6)	37
Figure III.8	Variation de la caractéristique (I-V) des trois modèles à base de silicium	38
Figure III.9	Micrographie MEB de la cellule en silicium poreux	39
Figure III.10	Variation de la caractéristique (I-V) pour la cellule c-Si (p)/c-Si(n) /PSi(n)	40

Figure III.11	Variation du rendement quantique en fonction de longueur d'onde du modèle c-Si (p)/c-Si(n) /PSi(n)	40
Figure III.12	Éléments d'une cellule photovoltaïque avec BSF	41
Figure III.13	Variation de la caractéristique (J-V) à base de silicium cristallin sans silicium poreux et sans couche BSF	43
Figure II.14	Variation de la caractéristique (I-V) du modèle 4 à base de silicium poreux PSi	44
Figure II.15	Variation de la caractéristique (I-V) du modèle 5	45
Figure II.16	Variation du rendement quantique en fonction de longueur d'onde du modèle 5	46
Figure II.17	Variation de la caractéristique (I-V) du modèle 6	47
Figure II.18	Variation du rendement de la cellule BSF en fonction de l'épaisseur du silicium poreux	48
Figure II.19	Le facteur de forme en fonction de l'épaisseur du silicium poreux	49
Figure II.20	Le courant de court-circuit en fonction de l'épaisseur du silicium poreux	50
Figure II.21	La tension de circuit ouvert en fonction de l'épaisseur du silicium poreux	50

Liste des Tableaux

Chapitre I		
Tableau I.1	Distribution spectrale du rayonnement thermique	3
Tableau I.2	Exemples de cellules solaires de 2^{ème} génération	10
Chapitre II		
Tableau II.1	Classification des trois familles du SP	23
Chapitre III		
Tableau III.1	Paramètres utilisés dans la simulation	35
Tableau III.2	Résultats de la simulation des trois cellules à base de silicium	37
Tableau III.3	Représentation des caractéristiques du modèle3 avec une couche de silicium poreux c-Si (p)/c-Si(n) /PSi(n)	39
Tableau III.4	Paramètres utilisés dans la simulation pour le modèle avec BSF	42
Tableau III.5	Représentation des caractéristiques du modèle 3 à base de silicium cristallin	43
Tableau III.6	Représentation des caractéristiques du modèle 4 avec une couche de silicium poreux PSi	49
Tableau III.7	Représentation des caractéristiques du modèle 5 avec une couche BSF	45
Tableau III.8	Représentation des caractéristiques du modèle 6	47
Tableau III.9	Résultats de la simulation et comparaison avec les résultats de la littérature	51

Liste des symboles

Symbole	Signification	Unité
$I(V)$	Courant	A
I_{cc}	Courant de court-circuit.	A
I_s	Le courant de saturation de la diode	A
I_m	Le courant à la puissance maximal	A
I_{ph}	Courant photo générée ou photo courant.	A
V_{OC}	Tensions en circuit ouvert	V
V_m	La tension à la puissance maximale	V
J_{SC}	Densité du courant de court-circuit	mA cm ⁻²
R_{sh}	Résistance shunt	Ω
R_{se}	Résistance série	Ω
R_p	Résistance parallèle	Ω
P_i	La puissance d'éclairément reçue par unité de surface	W
P_{max}	La puissance maximale	W
E_g	Energie de la bande interdite (gap).	J ou eV
η	Rendement de conversion d'énergie	%
FF	Facteur de forme.	%
η	Le rendement.	%
S	La surface de la cellule photovoltaïque	m ²
λ	Longueur d'onde.	M
A	Coefficient d'absorption	cm ⁻¹
N_A	Densité des accepteurs	cm ⁻³
N_D	Densité des donneurs	cm ⁻³
μ	Mobilité des porteurs	m ² /Vs

q	La charge de l'électron($1.6 \times 10^{-19} C$).	C
QE	Le rendement quantique	%
T_j	La température de jonction	°C
k	La constante de Boltzmann est égale à $1.38 \times 10^{-23} J/K$.	J/K
A	Le facteur d'idéalité de la diode	-
ϵ	Permittivité électrique	F m⁻¹
ϵ_0, ϵ_r	Permittivité du vide, permittivité relative du matériau.	F m⁻¹
ϵ_r	Le constant diélectrique relatif.	-

Abréviations

c-Si Silicium Cristallin

PV Photovoltaïque

EDQ Rendement quantique externe

I-V Courant-tension

BC Bande de conduction

BV Bande de valence

PSi Silicium poreux

Sommaire

Chapitre I : Généralité sur les cellules photovoltaïques

I.1	Introduction	3
I.2	Le rayonnement solaire	3
I.3	La cellule photovoltaïque	4
I.3.1	Définition	4
I.3.2	Historique	5
I.3.3	Description	6
I.3.4	Principe de fonctionnement	6
I.3.5	Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque	8
I.4	Différentes type de cellule photovoltaïque	9
I.4.1	La 1 ère génération	9
I.4.2	La 2 ème génération	10
I.4.3	La 3 ème génération	10
I.5	La Technologie du photovoltaïque	11
I.6	Les grandeurs caractéristiques d'une cellule photovoltaïque	12
I.6.1	Courant de court-circuit I_{cc}	13
I.6.2	Point de puissance maximale P_{max}	13
I.6.3	Le rendement de conversion η	13
I.6.4	Tension de circuit ouvert V_{co}	13
I.6.5	Facteur de forme FF	14
I.6.6	Rendement quantique externe	14
I.7	Avantage et inconvénients d'une cellule photovoltaïque	14
I.7.1	Avantage	14
I.7.2	Inconvénients	15
I.8	Conclusion	15
Bibliographies		16

Chapitre II : Le silicium poreux

II.1	Introduction	18
II.2	Le silicium poreux	18
II.2.1	Définition	18
II.2.2	Historique	18
II.3	Elaboration des couches en silicium poreux	19

II.3.1	Anodisation	19
	Cellule d'anodisation	20
II.3.1.1		
	Condition d'anodisation	21
II.3.1.2		
II.4	Différents types de silicium poreux	22
II.4.1	La morphologie	22
II.4.2	Caractéristiques des couches poreuses	23
	La Porosité	23
II.4.2.1		
	Surface Spécifique	25
II.4.2.2		
	L'épaisseur	25
II.4.2.3		
II.5	Propriétés optiques du silicium poreux	26
II.5.1	La photoluminescence	26
II.5.2	L'absorption	27
II.5.3	L'indice de réfraction du silicium poreux	28
II.5.4	Réflectance	28
II.6	Oxydation de silicium poreux	29
II.7	Application du silicium poreux	29
II.7.1	Couche antireflet	30
II.7.2	Optoélectronique	30
II.7.3	Conversion de l'énergie	30
II.7.4	Microélectronique	30
II.8	Conclusion	31
Bibliographies		32
Chapitre III : Modélisation et simulation-Résultats et discussions		
III.1	Introduction	34
III.2	Simulation par logiciel SCAPS	34
III.3	Paramètres caractéristiques des cellules utilisées	35

III.4	Modélisation des structures étudiées	35
III.5	Etude de différents modèles	37
III.5.1	Modèle de la cellule c-Si (n, p)	37
III.5.2	Cellule en silicium avec une couche de silicium poreux PSi	38
III.5.3	Cellule en silicium avec BSF	41
	Introduction	41
III.5.3.1		
	Modèle 3 Si (p, n) modifié	42
III.5.3.2		
	Modèle 4 Si (p, n) avec une couche de silicium poreux	43
III.5.3.3		
	Modèle 5 avec BSF sans PSi	45
III.5.3.4		
	Modèle 6 avec PSi	46
III.5.3.5		
	Variation du rendement de la cellule BSF en fonction de l'épaisseur de silicium poreux	48
III.5.3.6		
III.6	Comparaison des résultats	51
III.7	Conclusion	52
	Bibliographies	53
	Conclusion Générale	54

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

L'énergie photovoltaïque est une énergie propre à longue durée de vie et à haute fiabilité. Elle peut donc être considérée comme l'une des énergies les plus renouvelables durable [1]. Les ressources non renouvelables telles que le carbone, le pétrole, le gaz naturel et l'énergie nucléaire ont une durée de vie limitée. Ainsi, la production d'électricité participe au phénomène d'effet de serre qui réchauffe la planète. Le développement d'énergies renouvelables inépuisables et non polluantes [2] est le résultat des effets combinés de phénomènes naturels réguliers comme le soleil, la lune et la terre, permettant ainsi , l'hydroélectricité, l'énergie éolienne, l'énergie de la biomasse, l'énergie marémotrice, la géothermie. L'effet photovoltaïque produit à partir du rayonnement solaire a été découvert en 1839 par le physicien français Alexandre-Edmond Becquerel. L'énergie solaire photovoltaïque est dite renouvelable elle est produite au moyens de cellules solaires. Les premiers matériaux le premier utilisé et le plus commercialisé dans l'industrie photovoltaïques le silicium.

L'objectif de ce travail est d'étudier l'amélioration des performances de cellules photovoltaïques à base de silicium et d'explorer la possibilité d'utiliser le silicium nanostructuré pour améliorer les performances de la cellule au silicium. Le silicium poreux est utilisé comme couche antireflet grâce à sa porosité permettant d'améliorer le rendement des cellules.

Nous avons eu recours au programme de calcul SCAPS-1D, crée par Marc Burgelman à l'Université de Gent 40 en Belgique [3] .

Notre mémoire est structuré en trois chapitres :

Dans **le premier chapitre**, nous rappellerons les notions préliminaires sur le rayonnement solaire, le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque et les différents types de cellules solaires.

Le deuxième chapitre est consacré à la description du silicium poreux. Nous décrirons d'abord l'obtention du silicium poreux qui est réalisé par la gravure électrochimique du silicium dans un électrolyte à base d'acide fluorhydrique (HF). Nous terminerons ce chapitre en décrivant les paramètres caractérisant le PSi particulièrement ses propriétés optiques pour l'application comme couche antireflet.

INTRODUCTION GENERALE

Dans **le troisième chapitre** nous avons modélisé et simulé par le logiciel SCAPS la cellule photovoltaïque à base de silicium. Six modèles de cellules photovoltaïques à base de silicium cristallin ont été étudiés, avec et sans BSF puis avec et sans couches de silicium poreux. Nous avons aussi tenté de faire une optimisation en faisant varier l'épaisseur de la couche PSi pour améliorer le rendement des cellules étudiées. Une étude comparative pour comparaison des résultats obtenus.

Enfin nous terminons par une **conclusion générale**, les **références** sont listées en fin de chaque chapitre.

Bibliographies

- [1] R. Hernanz et al. « Modelling of Photovoltaic Module », vol. 1, no. 8, pp. 1186–1190, 2010.
- [2] J.F. Lelievre, Elaboration de SiNX : H par PECVD « Optimisation des propriétés optiques, passivantes et structurales pour application photovoltaïques », thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, (s.d.).2007.
- [3] <https://scaps.elis.ugent.be/>.

Chapitre I

Généralités sur les cellules photovoltaïques

I.1 Introduction

Les cellules solaires photovoltaïques sont des appareils électroniques capables de convertir l'énergie solaire en électricité.

Dans ce chapitre, nous aborderons le domaine photovoltaïque. Introduisons d'abord les rayons solaires et les cellules solaires photovoltaïques, puis le développement actuel de la technologie photovoltaïque. Puis introduisons les fonctions des cellules photovoltaïques et des cellules solaires. Ainsi les paramètres des cellules photovoltaïques. Nous terminons par les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque.

I.2 Le rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est un ensemble d'ondes électromagnétiques émises par le soleil. Il comprend le spectre complet du rayonnement, des ultraviolets lointains tels que les rayons gamma aux ondes radio et à la lumière visible. Le rayonnement solaire comprend également les rayons cosmiques, qui peuvent être grossièrement divisés dans les catégories suivantes [1]:

1. 9% dans la bande des ultraviolets (<0,4 μm).
2. 47% dans la bande visible (0,4 à 0,8 μm
3. 44% dans la bande des infrarouges (>0,8 μm).

Nous pouvons accepter une hypothèse approximative selon laquelle le soleil rayonne comme un corps noir et sa température atteint 5762 K. C'est ce qu'on appelle la température apparente du soleil, ce qui est incompatible avec la réalité physique. Le tableau I.1 montre la répartition de l'énergie solaire dans la bande de rayonnement thermique [2].

Longueur d'onde (μm)	0-0.38	0.38-0.78	0.78
Pourcentage (%)	6.4	48	45.6
Energie (W/m^2)	87	656	623

Tableau I.1. Distribution spectrale du rayonnement thermique [2]

La figure I.1, montre que le rayonnement est constitué de photons avec des longueurs d'onde allant de l'ultraviolet (0,2 μm) à l'infrarouge lointain (3 μm) [3].

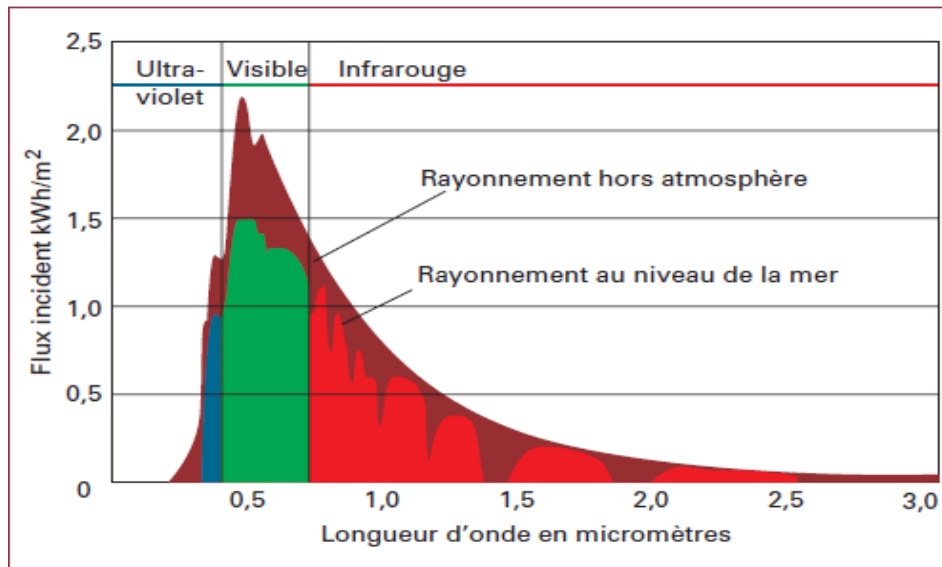


Figure I.1. Rayonnement solaire incident [3]

I.3 La cellule photovoltaïque

I.3.1 Définition

Une cellule photovoltaïque, également dénommée cellule solaire, est un composant électronique qui, exposé à la lumière (photons), produit de l'électricité grâce à l'effet photovoltaïque qui est à l'origine du phénomène [4]. La puissance obtenue est proportionnelle à la puissance lumineuse incidente et est fonction du rendement de la cellule [4]. La cellule photovoltaïque délivre une tension continue et un courant la traverse dès qu'elle est connectée à un circuit électrique (en général un onduleur, parfois une simple batterie) [4].

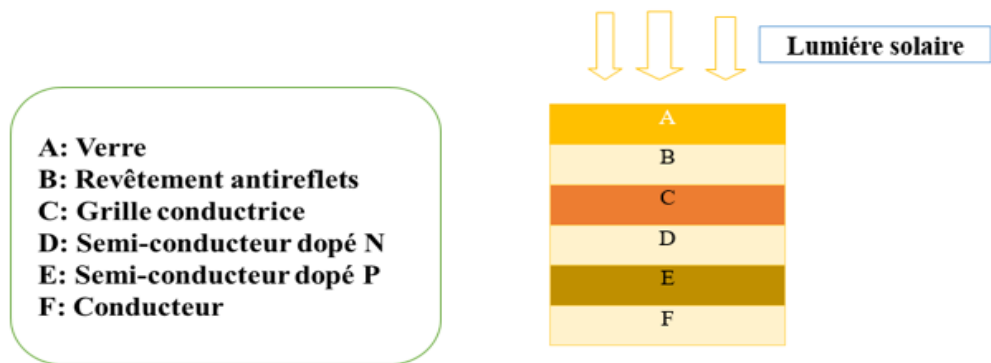


Figure I.2. Structure de base des cellules solaires

La figure I.3. Montre la position des bandes de valence et de conduction dans un isolant, un semi-conducteur et un métal. La bande interdite est définie comme la différence d'énergie entre la bande de valence et la bande de conduction. À 0 K, tous les électrons sont dans la bande de valence. Si l'énergie apportée est supérieure à l'écart d'énergie du matériau, les électrons peuvent être transférés de la bande de valence à la bande de conduction, où les électrons peuvent participer à la conduction du courant [5].

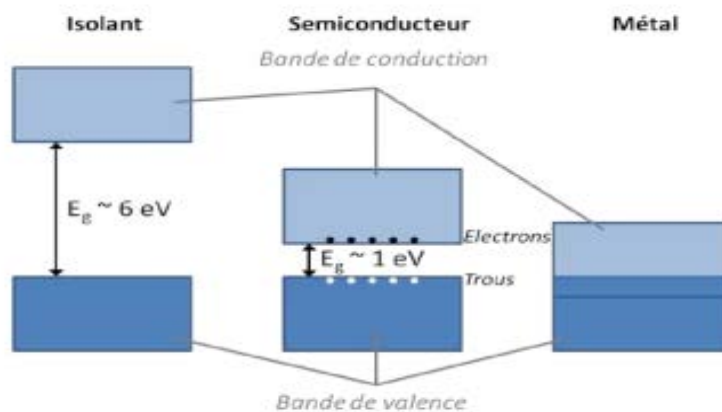


Figure I.3. Schéma montrant la position des bandes de valence et de conduction dans un isolant, un semi-conducteur et un métal [5]

I.3.2 Historique

Quelques dates importantes dans l'énergie photovoltaïque.

1839 : Le physicien français Edmond Becquerel découvre l'effet photovoltaïque.

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

1954 : Trois chercheurs américains Chapin, Pearson et Prince construisent une cellule photovoltaïque.

1958 : Batteries d'une efficacité de 9 minutes ; les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont lancés dans l'espace.

1973 : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite université du Delaware.

1983: La première voiture alimentée par l'énergie photovoltaïque conduite en Australie [6].

I.3.3 Description

L'énergie solaire par rapport aux autres sources d'énergie traditionnelles est considérée comme une source d'énergie peu coûteuse, propre pour l'environnement. Une cellule solaire est un dispositif photovoltaïque conçu pour convertir l'énergie solaire (lumière du soleil) en énergie électrique. Les paires électron-trou photo-générées dans la coque de l'absorbeur sont séparées par le gradient de champ électrique généré par la jonction PN avant recombinaison, il est important que le semi-conducteur sélectionné dans les applications photovoltaïques ait des propriétés électriques suffisantes, telles qu'une mobilité élevée, une grande longueur de diffusion et un coefficient d'absorption très élevé. La figure I.4 montre le mouvement des porteurs de charge libres dans une cellule solaire sur la base d'une seule jonction PN [7].

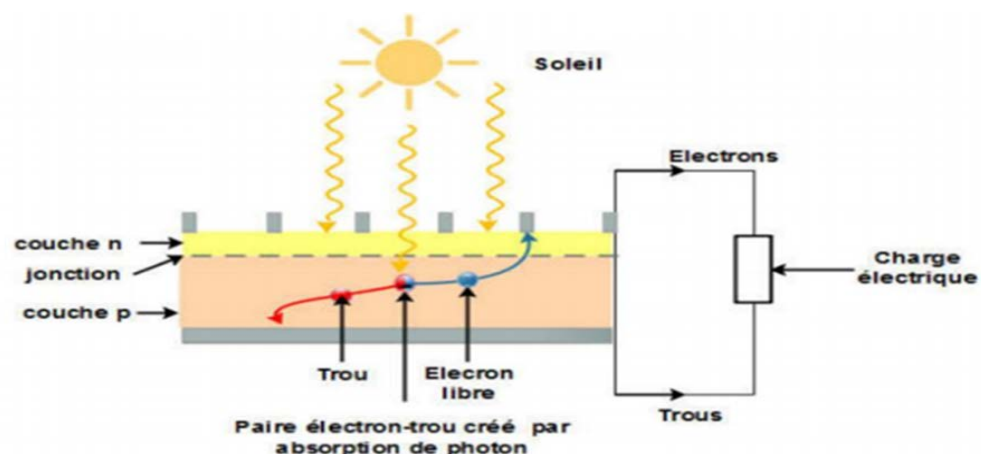


Figure I.4. Mouvement des porteurs de charges libres dans une cellule solaire à base d'une simple jonction PN [7]

I.3.4 Principe de fonctionnement

L'effet photovoltaïque a été démontré pour la première fois par E. Becquerel. Il a été découvert que certains matériaux émettent une petite quantité d'électricité lorsqu'ils sont exposés à la lumière. Albert Einstein expliqua le phénomène de la photoélectricité en 1912, mais il fallut attendre le début des années 50 pour le mettre en pratique dans des cellules photovoltaïques en silicium avec un rendement de 4,5%. Ici, nous introduisons le mécanisme de génération des porteurs d'électrons dans les semi-conducteurs sous l'influence des photons [8].

Le mécanisme de génération des porteurs d'électrons dans les semi-conducteurs sous l'influence des photons est reporté dans la référence [8]. Lorsque les photons sont absorbés dans le matériau composite, l'effet photoélectrique se produit le semi-conducteurs dopés P (positif) et N (négatif) sont appelés jonctions p-n (ou n-p). Sous l'action de ce champ, il reste un espace sur la surface supérieure pour la migration dans la direction opposée. Les électrodes placées sur les surfaces supérieure et inférieure collectent les électrons et leur permettent d'atteindre les trous à l'avant [9], figure I.5.

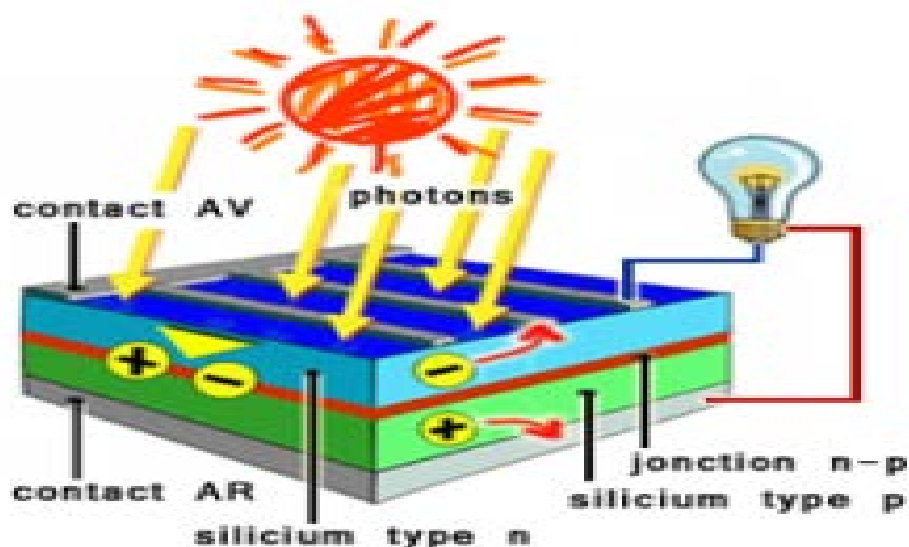


Figure I.5. Représentation en coupe d'une cellule photovoltaïque [9]

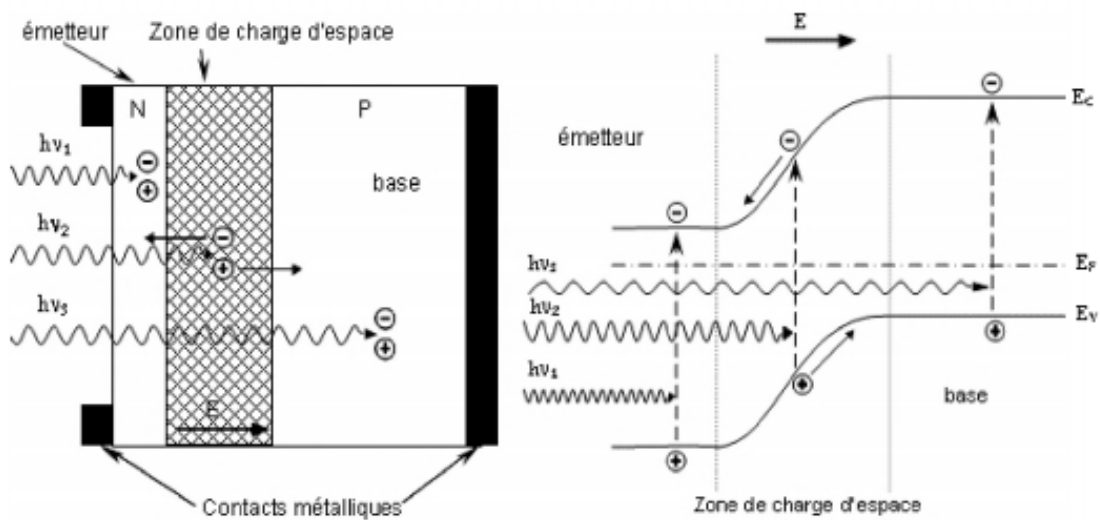
Les photons incidents créent des porteurs dans les régions n et p et la région de charge d'espace. Le transporteur varie d'une région à l'autre :

1. Dans la région n ou p, les porteurs minoritaires qui atteignent la région de charge d'espace sont « envoyés » par le champ électrique qui prédomine dans la région p

(pour les trous) ou dans la région n (pour les électrons). Nous aurons les photos diffusées en cours.

2. Dans la région de charge d'espace, le pair électron / trou générées par les photons incidents sont dissociées par le champ électrique : les électrons circuleront vers la région n, et les trous vers la région p. Nous aurons des photos de la génération actuelle.

La figure I.6. représente la Structure (a) et diagramme de bande (b) d'une cellule photovoltaïque [10].



1. (b)

Figure I.6. Structure (a) et diagramme de bande (b) d'une cellule photovoltaïque [10]

I.3.5 Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque

Afin de prendre en compte les limites de la batterie et de calculer le courant réel fourni à la charge du circuit externe, nous avons introduit un modèle qui comprend deux diodes, une résistance série et une résistance parallèle. Le modèle est représenté par le schéma électrique de la Figure I.7 [11].

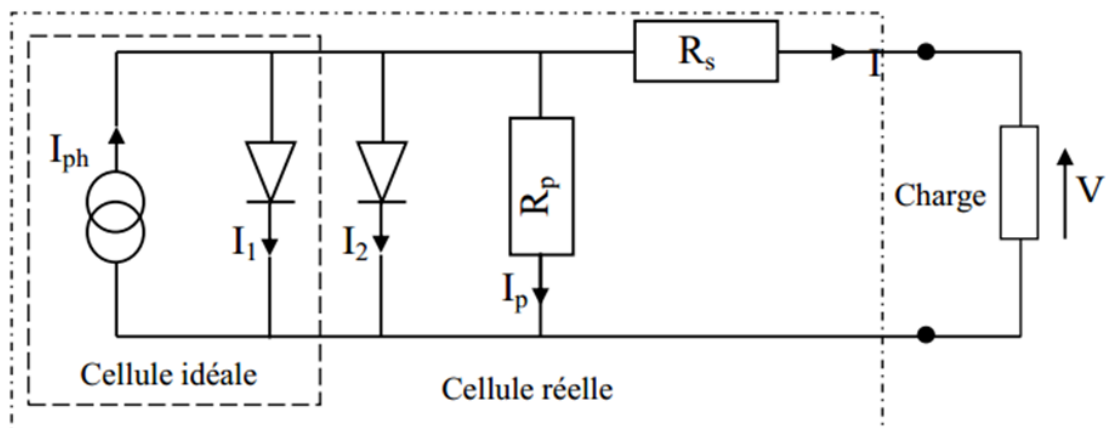


Figure I.7. Schéma électrique de la cellule photovoltaïque [11]

Une résistance parallèle R_p est ajoutée pour modéliser le courant de fuite présent dans la structure. Ces courants de fuite se produisent lorsque l'émetteur est à haute température du fait de la diffusion des contacts métalliques. Cela peut être causé par un court-circuit à l'extrémité de la batterie. La valeur de la résistance R_p doit être grande. La résistance série simule la résistance interne de la batterie, qui est due à la résistivité des différentes couches de la cellule, émetteur, base et contacts métalliques (notamment à l'interface métal / semi-conducteur). Afin de limiter son impact sur le courant de la batterie, il faut optimiser le contact métal / semi-conducteur en réduisant la résistivité du matériau pour avoir une faible résistance R_s [11].

I.4 Différentes types de cellule photovoltaïque

I.4.1 Cellule de 1ère génération

La première génération des cellules photovoltaïques est basée sur une seule jonction P-N, généralement en silicium utilisé comme matériau semi-conducteur, avec une épaisseur d'environ 200 μm . Il existe deux types de cellules :

1. une cellule en silicium monocristallin avec un taux de conversion photovoltaïque enregistré proche de 25%.
2. Une cellule en silicium polycristallin avec un taux de rendement de 20%.

Ces cellules sont réalisées à partir des résidus de l'industrie électronique sous forme de lingots refroidis axialement puis découpés en plaquettes minces et débarrassés de leurs défauts

recombinants par diffusion de phosphore ou d'aluminium [12]. Le rendement de ce type de cellules est inférieur à celui de cellules monocristallines mais leur fabrication est légèrement moins coûteuse [12].

Cependant, la méthode de production des panneaux solaires basée sur les wafers de silicium consomme énormément d'énergie et reste donc très coûteuse [12]. Cette génération domine actuellement le domaine du photovoltaïque avec 88% de part de marché en 2011 (figure 1.8) et le coût non négligeable de ces panneaux impacte significativement sur la place qu'occupe le photovoltaïque dans la production énergétique mondiale à l'heure actuelle [12].

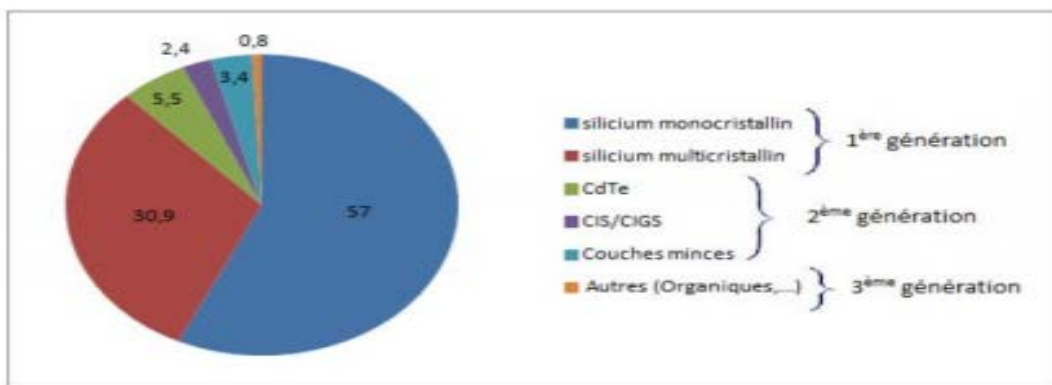


Figure I.8. Répartition (%) de la production de cellules par filière en 2011 [12]

I.4.2 La cellule de 2^{ème} génération

Il s'agit de cellules solaires à couches minces d'une épaisseur inférieure à 50 μm utilisant du silicium amorphe ou des composés II-VI tels que l'arséniure, Gallium (GaAs), tellure de cadmium (CdTe), di séléniure de cuivre et Indium (CuInSe_2) et dioxyde de titane (TiO_2) pouvant réduire les coûts par rapport à la première génération. Ces cellules sont flexibles et leurs utilisations sont diverses. Cependant, les étapes de production nécessitent plus d'énergie car un procédé sous vide est utilisé sous traitement à haute température (tableau I.2) [13].

Cellule solaire	Surface (cm^2)	Rendement (%)	Centre de test (date)
GaAs	0.9927	28.8 ± 0.9	NREL (05/2012) ^b
CIGS	0.9927	21.0 ± 0.6	FhG-ISE (04/2014) ^a
CdTe	1.0623	21.0 ± 0.4	Newport (08/2014)
Silicium amorphe	1.001	10.2 ± 0.3	AIST (07/2014) ^c

Tableau I.2. Exemples de cellules solaires de 2^{ème} génération

NREL : Laboratoire National des énergies renouvelables.

AIST : Institut national japonais des sciences et technologies industrielles avancées.

I.4.3 La cellule de 3ème génération

Les cellules de 3ème génération sont plus souples et très flexibles. Actuellement, il y a beaucoup de recherches dans le domaine photovoltaïque de cellules solaires pouvant dépasser 20% d'efficacité, appelé de troisième génération. Cette génération est basée sur de nouveaux matériaux autres que le silicium, y compris les nanotubes, les batteries concentré, fil de silicium, encre solaire utilisant la technologie des imprimantes conventionnelles, colorants organiques et polymères. La plupart des travaux sur les cellules solaires de troisième génération sont exécutés en laboratoire, et sont en cours de développement, et les rendements sont élevés [13].

1. Exemple les cellules **organiques** ayant une forte absorption optique elles sont plus fines, flexibles, faciles et moins chères à produire, tout en étant résistantes. Leurs Rendements est de 8 % à 10%. Le semi-conducteur utilisé est un polymère comme par exemple le poly acétylène figure 1.9, [14].

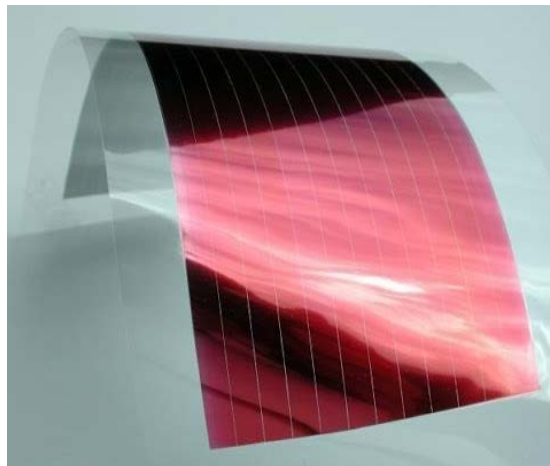


Figure I.9. Cellules photovoltaïques organiques

2. Les cellules photovoltaïques **multi jonctions** (cellules tandem)

Les cellules multi-jonctions sont composées d'un grand nombre de semi-conducteurs possédant chacun un spectre limité. Si les couches ont des longueurs d'ondes très proches cela permettra aux cellules d'absorber un spectre plus grand et qui permettrait d'obtenir un rendement très élevé d'environ 40 à 50%.

I.5 Les Technologies du PV

La figure I.10. représente la meilleur efficacité de la recherche des cellules pour les différentes technologies [15]

3. Celles-ci vont de 90% pour le silicium cristallin à 50% pour certains films minces à moins de 25% pour les cellules organiques.

4. Le principal problème sur lequel les chercheurs peuvent se concentrer est celui de réduire le processus de collecte de chaque perte de photon incident, qui a le potentiel de générer le plus grand nombre de paires électron-trou.

5. Le second est la différence entre l'efficacité des cellules en laboratoire et l'efficacité des cellules dans la production commerciale.

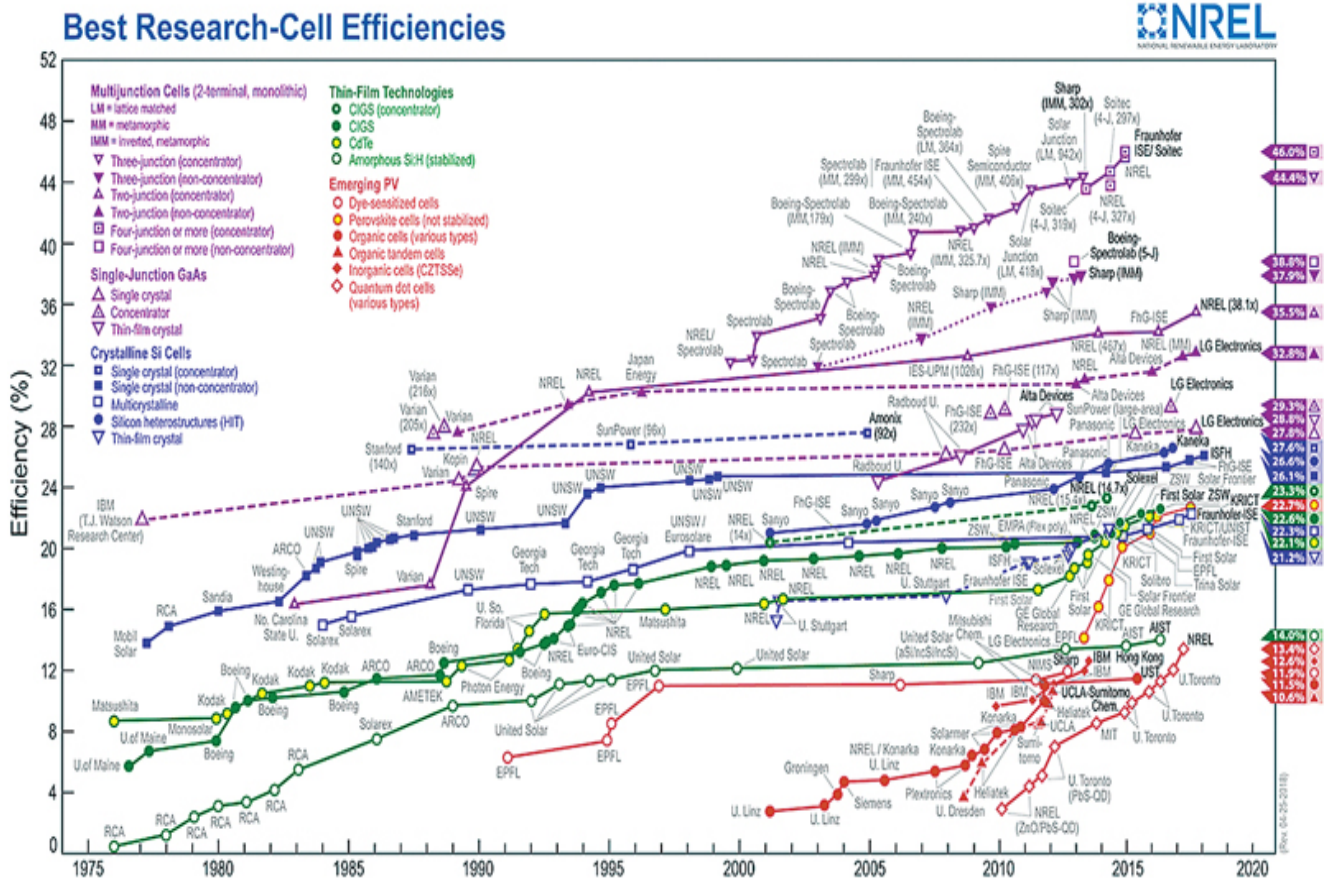


Figure I.10. Meilleur efficacité de la recherche des cellules en fonction du temps pour les différentes technologies [15]

I.6 Les grandeurs caractéristiques d'une cellule photovoltaïques

Les performances des cellules solaires sous lumière peuvent être entièrement décrites par la caractéristique $I = f(V)$, Figure I.11 [16].

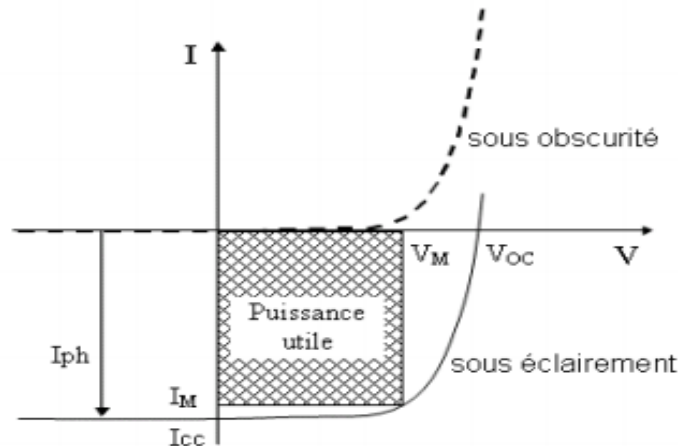


Figure I.11. Caractéristique $I(V)$ d'une cellule solaire [16]

À partir de la caractéristique $I=f(V)$ illustrée ci-dessus qui montre, les deux caractéristiques d'une diode à jonction pn sous obscurité et sous éclairement, on déduit les paramètres électriques propres à la cellule, à savoir:

I_{CC} : Courant de court-circuit quand $V=0$

V_{OC} : Tension en circuit ouvert quand $I=0$

I_M : Courant à la puissance maximale de fonctionnement de la cellule photovoltaïque.

V_M : Tension à la puissance maximale de fonctionnement de la photopile.

FF : Le facteur de forme, paramètre important, appelé aussi fill-factor.

I.6.1 Courant de court-circuit I_{CC}

I_{CC} ou bien J_{sc} est le courant obtenu en court-circuitant les bornes de la batterie ($V = 0$ dans le schéma équivalent). Il augmente linéairement avec l'intensité lumineuse de la cellule et dépend de la zone lumineuse, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité du porteur et de la température [17].

I.6.2 Point de puissance maximale P_m

La meilleure utilisation des cellules solaires est de faire fonctionner les charges à la tension maximale et au courant maximal. En fait, selon la formule $P = VI$, pour que P atteigne sa

valeur maximale, il faut que le produit VI atteigne sa valeur maximale. C'est le point de charge idéal pour les cellules solaires, c'est-à-dire la puissance maximale point P_m [18].

I.6.3 Le rendement de conversion η

Une autre caractéristique importante définie est le rendement de conversion photovoltaïque, qui est le rapport de l'énergie électrique maximale fournie par une cellule solaire à l'énergie lumineuse reçue [19], et est donné par la formule (I.1) suivante :

$$\eta = FF \cdot \frac{J_{sc} \times V_{OC}}{P_{in}} = \frac{J_m \times V_m}{P_{in}} = \frac{P_{max}}{P_{in}} \quad (I.1)$$

I.6.4 Tension de circuit-ouvert V_{OC} :

V_{OC} représente la tension à laquelle le courant de sortie de la batterie est nul (la tension maximale de la batterie) [20]. Cela dépend de la barrière d'énergie et de la résistance de shunt. Il change peu avec l'intensité lumineuse à mesure que la température diminue.

I.6.5 Facteur de forme FF

Le nom «facteur de forme» [21] ou facteur de remplissage est dérivé de la représentation graphique précédente et est défini par la relation suivante (I.2).

$$FF = \frac{J_m \times V_m}{J_{sc} \times V_{OC}} \quad (I.2)$$

Avec :

J_{sc} : Ou bien I_{cc} , densité de courant de court-circuit.

V_{OC} : Tension de circuit ouvert.

Plus la valeur FF est élevée, plus la caractéristique $I(V)$ est similaire à une source lumineuse idéale.

I.6.6 Rendement quantique externe EQE

L'efficacité quantique EQE est définie par le rapport du nombre d'électrons circulant dans le circuit externe connecté à la batterie au nombre de photons incidents à la surface du composant, comme indiqué dans la formule I.3 [22].

$$EQE = \frac{\text{nombre d'électrons le circuit externe}}{\text{nombre de photons incidents}} \quad (I.3)$$

I.7 Avantages et inconvénients d'une cellule photovoltaïque

I.7.1 Avantages

1. Tout d'abord, une fiabilité élevée. L'appareil n'a pas de pièces mobiles, il est donc particulièrement adapté aux zones reculées. C'est pourquoi il est utilisé sur les engins spatiaux [23].
2. En raison d'une maintenance réduite, les coûts d'exploitation sont très faibles et aucun carburant, transport, personnel professionnel et technique n'est nécessaire. [23].
3. Cette technologie utilisée dans l'industrie aérospatiale a prouvé sa stabilité et sa fiabilité pendant des décennies. Le système est conçu pour résister aux intempéries, aux rayons ultraviolets et aux changements de température [24].
4. Les appareils photovoltaïques ont un bilan énergétique positif. Ces modules sont recyclables et la plupart des composants peuvent être réutilisés ou recyclés [24].

I.7.2 Inconvénients

Le système photovoltaïque présente toutefois des inconvénients.

1. La technologie de fabrication des modules photovoltaïques est avancée et nécessite des investissements coûteux [25].
2. L'efficacité de conversion réelle du module est faible (la limite théorique de la batterie au silicium cristallin est de 28%) [25].
3. Le coût d'investissement des panneaux photovoltaïques est élevé [26].
4. Dépend de la production d'énergie de la lumière du soleil, toujours variable [26].

I.8 Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons rappelé quelques notions de base sur l'effet photovoltaïque ainsi que le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque. Nous avons fait un rappel sur les différents types de cellules photovoltaïques, première, deuxième et troisième génération et les grandeurs caractéristiques d'une cellule.

Bibliographies

- [1] Faical Benkali, Hakim Bektache, « Etude comparative des méthodes de maximisation de puissance dans un système photovoltaïque. » mémoire de master, Université Abderrahmane Mira-Bejaia, 2015.
- [2] Nawel G, Nadia B, « Etude d'un système photovoltaïque alimentant différents types de charge », mémoire de master, Université Badji Mokhtar -Annaba, 2017.
- [3] http://fr.solarpedia.net/wiki/index.Rayonnement_solaire_hors_atmosphere.png.
- [4] Abdelkader Metai, Ayemen Chaab, « Etude et simulation d'un système de production d'énergie photovoltaïque en site isolé » mémoire de master, Université Badji Mokhtar - Annaba, 2018.
- [5] Gorge Vanessa, « Caractérisation de matériaux et tests de composantes des cellules solaires à base des nitrures des éléments III-V », thèse de Doctorat Paris 11,2012
- [6] Djamil Boukher, « Optimisation d'un système d'énergie photovoltaïque application au pompage », thèse de magister, Université Mentouri de Constantine, 2007.
- [7] Kanoun Ahmed Ali, « Etude théorique et prédictive des nouveaux matériaux pour conception des cellules solaires et applications photovoltaïques. », thèses de Doctorat, 16-02-2020.
- [8] Mohamed Bousaaid, « Modélisation des phénomènes de vieillissement des modules Photovoltaïques », mémoire de master, Université Ahmed Draria Adrar.
- [9] Mouhamed Tchouar « Caractérisation des cellules photovoltaïques à base d'hétérojonction de silicium a-Si/c-Si » mémoire de master, Université Abou Baker Belkaid Tlemcen, 2018.
- [10] N. Oleksiy, « Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières inter digités », thèse de Doctorat, l'institut national des sciences appliqués de Lyon, 2003.
- [11] Nadjat Benadla, « Etude comparative de différentes cellules photovoltaïques à contacts arrières inter digités », thèse de Doctorat, Université Abou Baker Belkaid Tlemcen, 2020.
- [12] Halima Aziz, Somia Saddek, « Modélisation et simulation d'une cellule photovoltaïque organique inversée » mémoire de master , Université Ahmed Adraia Adrar, 2017.
- [13] Abdelkader Mekemeche, « Modélisation à deux dimensions des propriétés physiques de cellules solaires au silicium à base de substrat de type n.Étude de quelques cas particuliers de cellules innovantes. », Thèse de doctorat, Université Abdel Hamid Badis de Mostaganem, 2017.

[14] <https://www.google.com>

[15] <https://www.proboat.com/wp-content/uploads/2019/11/best-research-cell-efficiencies-chart.jpg>

[16] Mourad Atek, « Effets du taux d'ombrage sur les performances des cellules solaires à base de CIGS » mémoire master, Université Ferhat Abbas-Sétif, 2013.

[17] Zakaria Bendjellouli, « contribution à la modélisation d'une cellule solaire » mémoire de master, Université de Bechar, 2009.

[18] Fatiha Hananou, « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque » mémoire de master, Kasdi Merbah Ouargla, 2014.

[19] Mansoura Mancer, « Simulation numérique des caractéristiques électriques d'une cellule solaire à double jonction en (AlGaAsGaAs).pdf », Magister, Université Mohamed Khider Biskra, 2012.

[20] Rachid Bellouti, « Modélisation et commande d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique » mémoire de master, Université Mohamed Boudiaf -Msila, 2016.

[21] Z. E. Jouad, « Réalisation et caractérisation des cellules photovoltaïques organiques », thèse de Doctorat, Université Bretagne Loire, 23 juin 2017.

[22] Ismahane Ait Habbouche, « Etude des Caractéristiques du Silicium Poreux pour Application aux Cellules Photovoltaïques » mémoire de master, Université Abou Baker Belkaid Tlemcen, 2016.

[23] A. Chermitti et T. Alaoui, « Modélisation et commande d'un système De stockage photovoltaïque » mémoire de master, Université Abou Baker Belkaid Tlemcen, 2012.

[24] Abdelkader Metai, Ayemene Chaab, « Etude et simulation d'un système de production d'énergie photovoltaïque en site isolé » mémoire de master, Université Badji Mokhtar - Annaba, 2018.

[25] Abdelmoumene Benahamed « Etude des propriétés électrique des cellules photovoltaïque organique », mémoire de master, Université Abou Baker Belkaid Tlemcen, 2011.

[26] Ndiaye papa amado et kawther achair, « Production d'énergie électrique à partir d'un système photovoltaïque », mémoire de master, Université 8 Mai 1945-Guelma, 2019.

Chapitre II

Le silicium poreux

II.1 Introduction

Depuis la découverte de la forte photoluminescence du silicium poreux en 1990, de nombreuses recherches ont été menées sur la production d'équipements dans le monde entier sur les dispositifs optiques, tels que les lasers, les diodes, les modulateurs, miroirs ...

Dans ce chapitre, nous avons mené une étude bibliographique sur le silicium poreux, nous avons introduit la méthode et le mécanisme de sa fabrication, sa formation, les conditions d'anodisation, et les différents types de silicium poreux. Nous montrons que nous pouvons contrôler les paramètres caractéristiques de la structure, de forme, épaisseur ou porosité pour rendre ses propriétés adaptées à diverses applications ciblées.

II.2 Le silicium poreux

II.2.1 Définition

Il existe différentes méthodes de formation de silicium poreux, qui peuvent être divisées en deux catégories : sec et humide, la méthode la plus couramment utilisée est l'anodisation électrochimique du silicium [1]. Il est obtenu par attaque électrochimique dans de l'acide fluorhydrique (HF) dans une cellule d'anodisation.

II.2.2 Historique

Depuis 1956, Uhlir a découvert la forme de microstructure du silicium. Le silicium poreux a été découvert en 1956 au cours d'une étude d'électro polissage avec une solution d'acide fluorhydrique (HF), il a observé que la surface de la plaquette était complètement recouverte de dépôts noirs. En 1957, Fuller et Ditzenberg ont fait le même constat, sauf qu'un courant électrique a été appliqué à la solution HF-HNO₃.

Depuis la découverte de la photoluminescence à température ambiante En 1990, par Canham un regain d'intérêt est porté sur les applications du silicium poreux. Dès lors, Canham et al. Lehmann et Gosele s'intéressent aux propriétés de photoluminescence, ils rapportent que par rapport au silicium monolithique, le silicium poreux a une bande d'énergie améliorée, ce qui affecte les effets quantiques liés à la taille. Ensuite, Vial et Derrien ont étudié en détail les propriétés physiques du silicium poreux, et ont conduit à la réalisation de nombreuses applications, telles que les matériaux photoluminescents, les couches sacrificielles pour les microsystèmes microstructures, les couches sensibles pour les capteurs de gaz ou les dispositifs optoélectroniques [2,3]. Le silicium poreux vu sa grande surface spécifique est

utilisé dans de nombreuses applications comme par exemple les couches antireflets pour les cellules solaires. La Figure II.1.représente le nombres de publications sur le silicium poreux parus par année depuis 1956 jusqu'à 1996 [3]

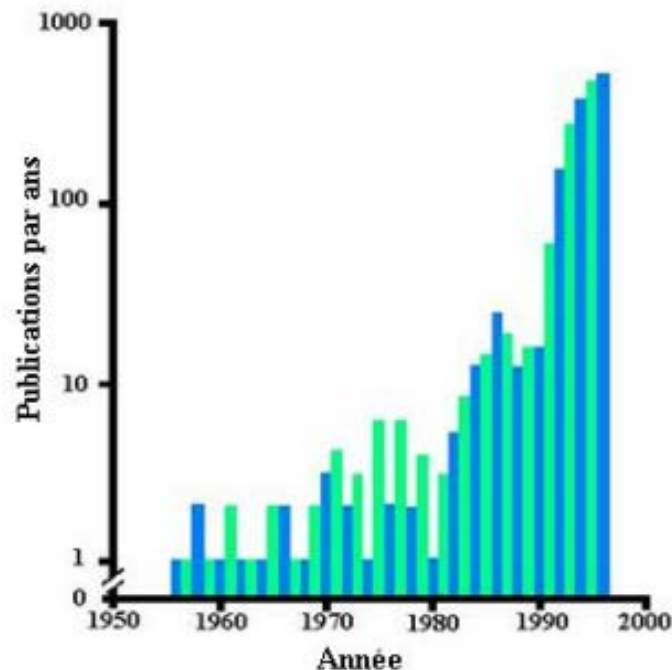


Figure II.1.Nombres de publications sur le silicium poreux parus par an depuis 1956 jusqu'à 1996 [3]

II.3 Elaboration des Couches en silicium poreux

Le silicium poreux est obtenu par gravure électrochimique d'un substrat de silicium monocristallin dans une solution à base d'acide fluorhydrique. Un courant est appliqué entre l'anode formée par le substrat en silicium et la cathode en platine. Les propriétés physiques et structurelles de la couche de silicium poreux résultante, telles que la porosité, la taille des pores et la morphologie, dépendent des paramètres des conditions d'anodisations que nous allons citer plus bas.

II.3.1 Anodisation

Le silicium poreux est obtenu par attaque électrochimique du silicium monocristallin dans une solution d'acide fluorhydrique (HF). Cette réaction est communément appelée anodisation. L'anodisation du silicium dépend de plusieurs facteurs. L'attaque électrochimique se fait dans une cellule à double ou à simple réservoir, ou le substrat de silicium monocristallin est utilisée

comme anode, comme le montre la figure II.2, et le courant généré entre l'anode et la cathode conduit à la formation de PS[4,5].

II.3.1.1 Cellule d'anodisation

Deux types de cellules d'anodisation au Téflon ou en polypropylène sont généralement utilisés, comme le montre la figure II.2

1. Cellule d'anodisation simple qui utilise des contacts électriques métalliques à l'arrière de la tranche de silicium
2. Cellule d'anodisation à double réservoir ou le réservoir est séparée par des plaquettes, Le HF est utilisé pour l'anodisation et le contact arrière, la largeur des spots est contrôlée par un masque en Téflon.

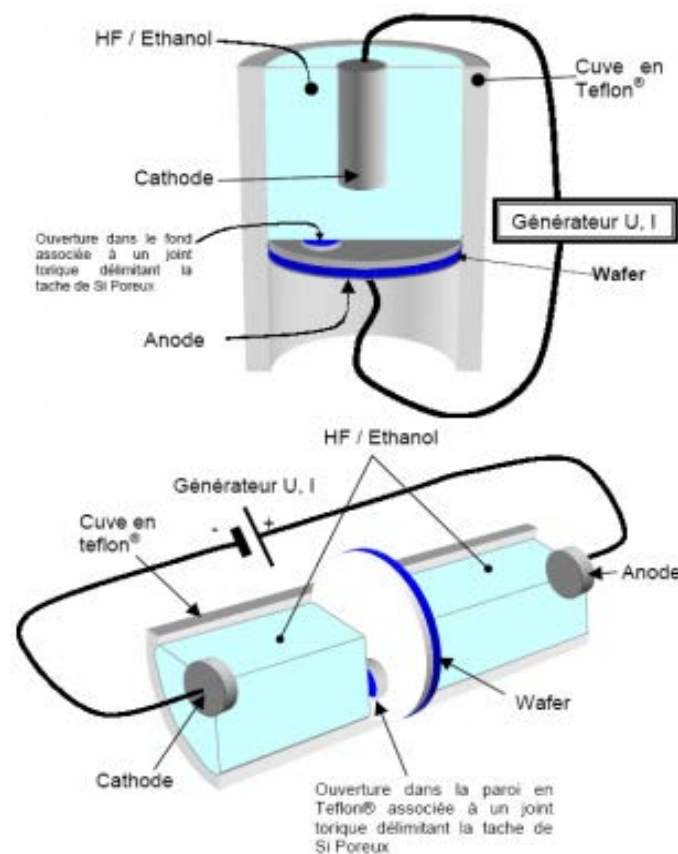


Figure II.2. Cellule d'anodisation à simple et à double réservoir pour la formation du silicium poreux [4]

II.3.1.2 Conditions d'anodisation

La taille et la forme des pores, la porosité et l'épaisseur dépendent de :

1. La nature du type de substrat (n ou p, orientation cristallographique) et le niveau de dopage du silicium (résistivité).
2. La concentration d'acide fluorhydrique.
 1. La densité de courant d'anode appliquée.
 2. Le temps d'anodisation.
 3. L'éclairage du substrat.
 4. La température éventuelle de la solution HF.

Par conséquent, les conditions de formation de silicium poreux pour un substrat et un électrolyte donnés varient en fonction de la densité de courant d'anode appliquée.

Pour les faibles tensions, on observe la formation d'une couche de silicium amorphe assez mal définie (zone A). Pour des tensions plus grandes, il y a la formation d'une couche poreuse issue de la dissolution localisée du silicium cristallin (zone B) et pour les fortes tensions, on observe la dissolution de la surface du silicium qu'on appelle l'électropolissage (zone C).

La figure II.3 montre la courbe caractéristique de la densité de courant appliquée en fonction de la tension (J (V)) [5,6] .

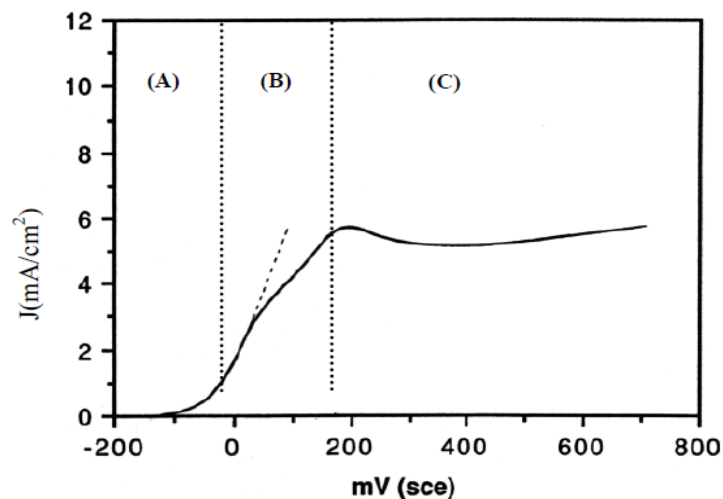


Figure II.3. Caractéristique densité de courant - tension réalisée sur un substrat de silicium dopé p+ et avec une concentration d'acide fluorhydrique de 1%[6]

II.4. Différents types de silicium poreux

II.4.1 La morphologie

Le silicium poreux est une forme nanostructures de silicium monocristallin. Selon la taille des nano-cristaux de silicium qui le composent, sa morphologie est généralement divisée en trois catégories, et sa taille peut aller de quelques nanomètres à quelques microns. Nous parlerons de silicium [7]:

1. Nano-poreux : microcristaux entre 1 et 5 nanomètres.
2. Méso-pores : microcristaux entre 10 et 100 nm.
3. Macro-pores : microcristaux entre 100 nm et 1 μm .

Les grains sont séparés par des trous, et pour toutes les morphologies, les trous ont à peu près la même taille que les grains obtenus. De plus, comme le montre la Figure II.4, à mesure que la taille des cristallites augmente, l'apparition d'une anisotropie colonnaire devient plus évidente.

Le silicium **macroporeux** est obtenu à partir d'un substrat de silicium de type n légèrement dopé placé dans l'obscurité et la densité de courant est faible, en ajustant la densité de courant, des trous sont formés par l'inégalité de la surface le long des lignes de courant perpendiculaires à la surface ,la taille des pores est comprise entre 0,1 et 1 μm [8].

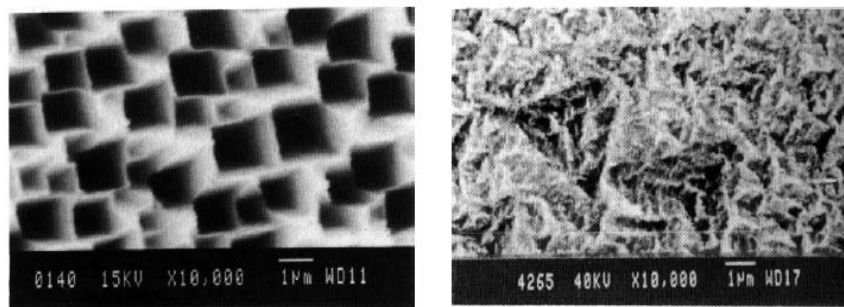


Figure II.4.Représentation de la structure du silicium macroporeux [8]

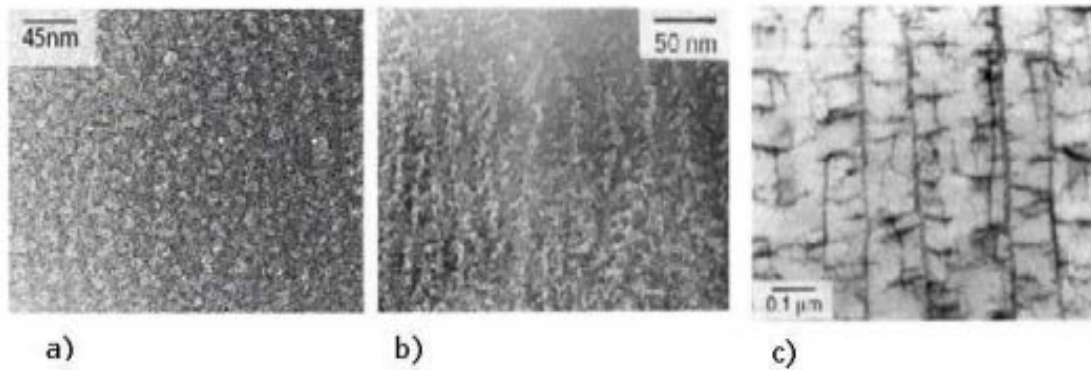


Figure II.5. Images par microscopie électronique en transmission des différentes morphologies possibles de silicium poreux : a) type p silicium nano-poreux ,b) type p+ : structure colonnaire silicium méso -poreux et c) silicium macroporeux [7]

Pour le silicium **nano-poreux** avec un arrangement aléatoire de cristallites les uns par rapport aux autres, la structure est semblable à une éponge.

Le silicium **méso-poreux** à une structure colonnaire vertical et le reste de l'interconnexion entre ces colonnes.

Selon la taille des pores, le silicium poreux peut être divisé en trois catégories, comme le montre le tableau II.1[4].

Type du substrat	Forme des pores de la couche poreuse	Type de pores	Diamètres des pores (nm)
P, et n sous éclairément	Structure homogène	Nano poreux	<2
P ⁺ , n ⁺	Structure colonnaire	Méso poreux	2 – 50
N	Structure spongieuse	Macro poreux	>50

Tableau II.1. Classification des trois familles du silicium poreux [4]

II.4.2 Caractéristiques des couches poreuses

II.4.2.1 La porosité

La porosité est définie comme le pourcentage en volume d'air dans le matériau. Elle peut être mesurée par gravimétrie, de préférence sur des couches épaisses, la valeur réalisable en silicium poreux est généralement comprise entre 15% et 90%. La figure II.6 montre la variation de la porosité avec la densité et la concentration de courant, utilisé pour l'électrolyse d'échantillons de silicium poreux de type p et de type p+. On observe en particulier que la porosité augmente avec l'augmentation de la densité de courant, ce qui peut s'expliquer par la dissolution préférentielle du volume plutôt que de l'épaisseur [2].

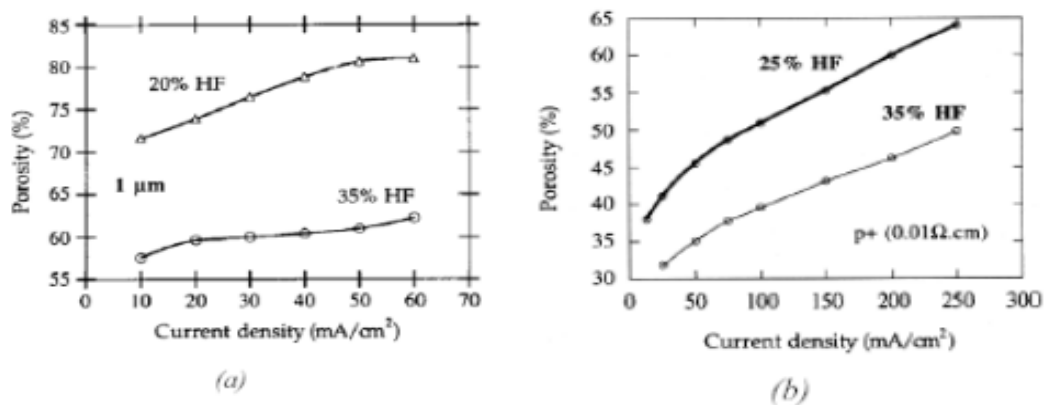


Figure II.6. Variation de la porosité avec la densité de courant appliqué pour deux types différents de substrats : type p (a) et type p+(b) [2]

Par conséquent, pour une condition d'anodisation donnée (densité de courant, concentration HF), la porosité mesurée de la couche la plus épaisse est plus grande. La figure II.7, montre bien que la couche la plus épaisse présente une porosité plus élevée car elle reste plus longtemps dans l'acide en raison de la dissolution chimique supplémentaire de la couche de silicium poreux dans l'acide fluorhydrique [8].

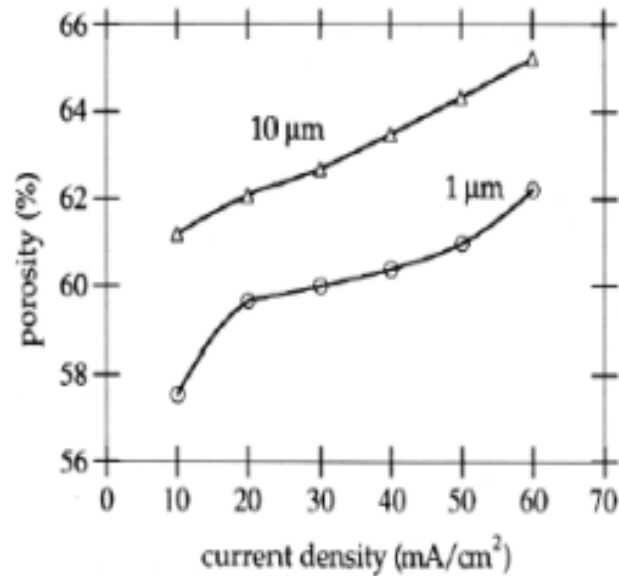


Figure II.7. Porosité en fonction de la densité de courant pour deux épaisseurs différentes (1 μm et 10 μm) de la couche, concentration d'HF de 35 %, le substrat est de type p [2]

II.4.2.2 Surface spécifique

Le silicium poreux possède une très grande surface intérieure spécifique. La surface spécifique est définie comme le rapport entre la surface de développement et le volume de la couche. La figure II.8 montre le changement de la surface spécifique du matériau poreux de type p avec la porosité. On note que la surface interne du matériau est très grande, environ $500 \text{ m}^2 / \text{cm}^3$, la porosité est de 75% [2,4,8,9, 10].

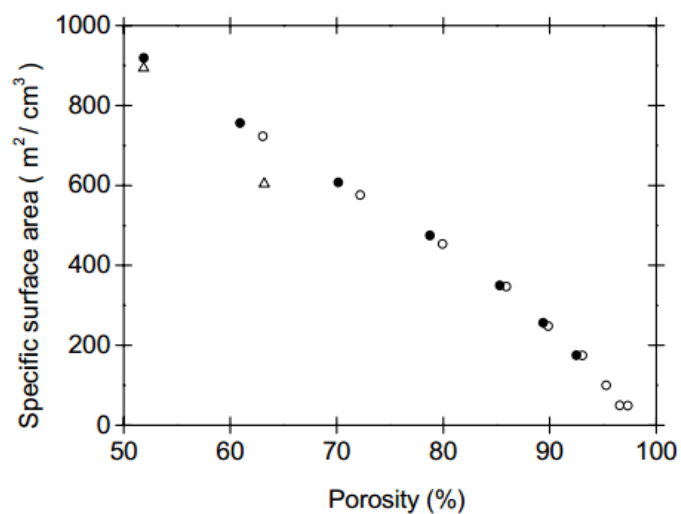


Figure II.8. Variation de la surface spécifique en fonction de la porosité pour deux porosités initiales différentes [10]

II.4.2.3 L'épaisseur

L'épaisseur est proportionnelle à la durée du temps d'anodisation. Elle est donc contrôlée en contrôlant le temps d'anodisation. La figure II.9 montre que dans le cas des substrats de type p (figure II.9.a) et de substrats de type p + (figure II.9.b), l'épaisseur de l'échantillon est directement déterminée à l'aide d'un profileur qui utilise une pointe pour déterminer la différence de niveau entre le haut et le bas de la couche poreuse sur la moitié de l'échantillon qui a été dissous dans la soude, ou indirectement par la simulation du spectre de réflectance [2]. On peut aussi déterminer l'épaisseur par microscopie électronique à balayage.

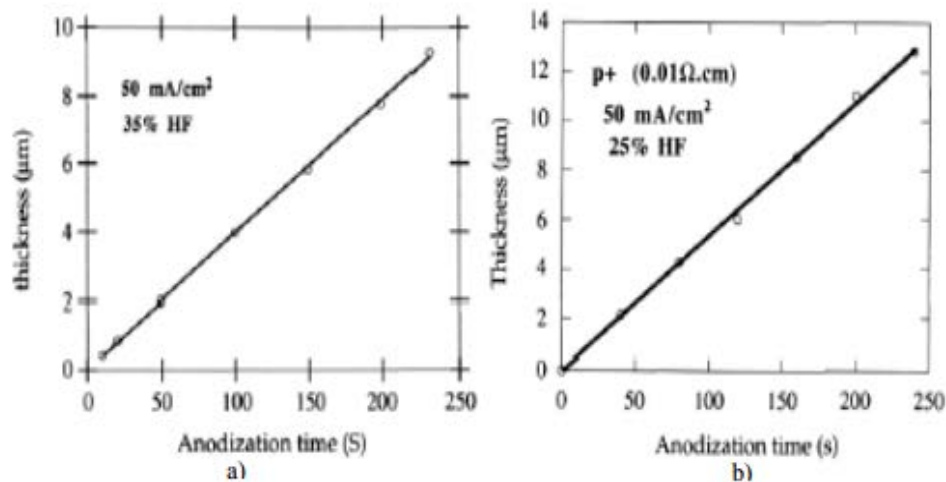


Figure II.9. Variation de l'épaisseur de la couche de silicium poreux avec le temps d'anodisation, (a) dans le cas du silicium de type p, (b) pour un substrat de type p+ [2]

II.5 Propriétés optiques du silicium poreux

Le silicium poreux possède des propriétés optiques intéressantes, étroitement liées à sa porosité.

II.5.1 La photoluminescence

Le silicium cristallin est un semi-conducteur à gap indirect. Comparé aux semi-conducteurs à gap direct (tels que le GaAs) (rendement 1-10%), son efficacité optique est faible (0,001%) à température ambiante. On comprend donc l'intérêt suscité par la forte luminescence (efficacité de 1 à 5%) du silicium poreux à température ambiante découverte par Canham en 1990 [8].

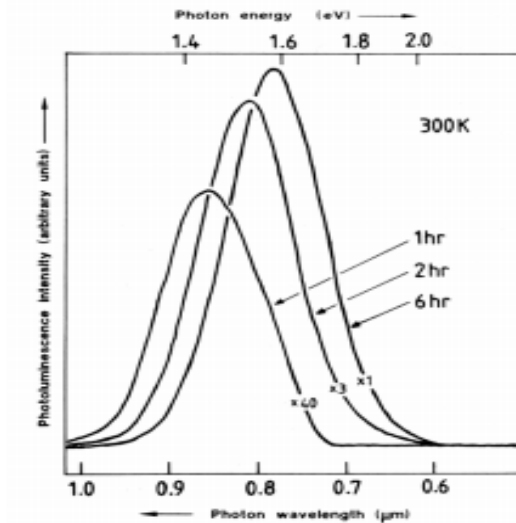


Figure II.10. Spectres de photoluminescence d'un échantillon de silicium poreux de type p [11]

La figure II.10 montre le spectre de photoluminescence obtenu avec un échantillon de silicium poreux réalisé sur un substrat de type p et dont la porosité a été modifiée en plaçant la couche dans une solution acide pendant 2 ou 6 heures. Le spectre d'émission est situé en lumière visible avec une hauteur moyenne et une largeur de bande de 200 nm. La position du spectre dépend de sa porosité : à mesure que la porosité augmente, il passe au bleu. Le confinement quantique dans le cristal explique l'augmentation de l'énergie de bande interdite du silicium poreux par rapport au silicium cristallin. [8].

II.5.2 L'absorption

La figure II.11 montre la relation entre le coefficient de transmission T et l'énergie de trois films de silicium poreux libres de même épaisseur ($40 \mu\text{m}$) et de porosités différentes constitués d'un substrat dopé p. le coefficient d'absorption α est donné par la formule II.1, suivante[8,11] :

$$T = T_0 \exp(-\alpha d (1-P)) \quad (\text{II.1})$$

Avec :

T_0 : La valeur du plateau vers les basses énergies.

d : L'épaisseur

P : La porosité

En revanche, nous avons remarqué sur la même figure qu'à mesure que la porosité augmente, le spectre de transmission se déplace vers une énergie plus élevée.

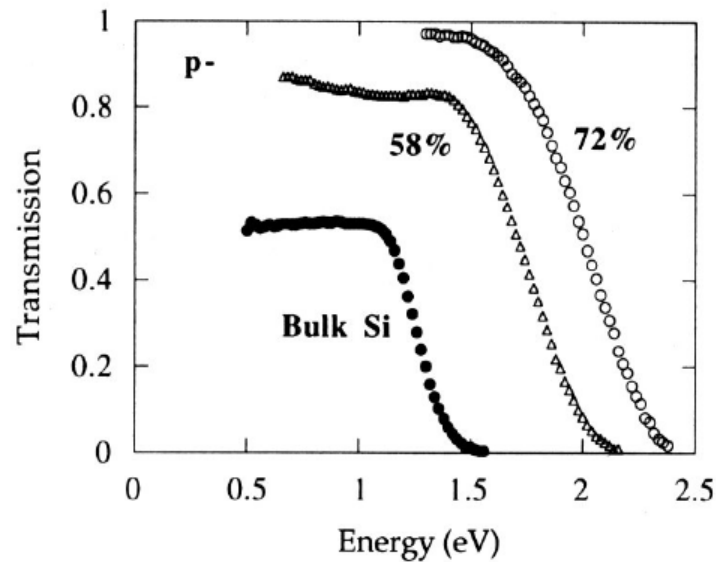


Figure II.11. Variation de la transmission en fonction de l'énergie mesurée à température ambiante pour des membranes de Sip ayant la même épaisseur 40 μ m [11]

Plus la porosité augmente, plus la taille des cristallites diminue ce qui conduit à une orientation énergétique plus élevée du spectre d'absorption.

II.5.3 L'indice de réfraction du silicium poreux

L'indice de réfraction du silicium varie avec la porosité. Plus la porosité augmente, plus l'indice de réfraction diminue, comme le montre la figure II.12. Plusieurs modèles (Bruggeman, Looyenga, etc.) ont été développés, après oxydation l'indice de réfraction du silicium poreux diminue, il dépend du taux d'oxydation et de la porosité initiale [5].

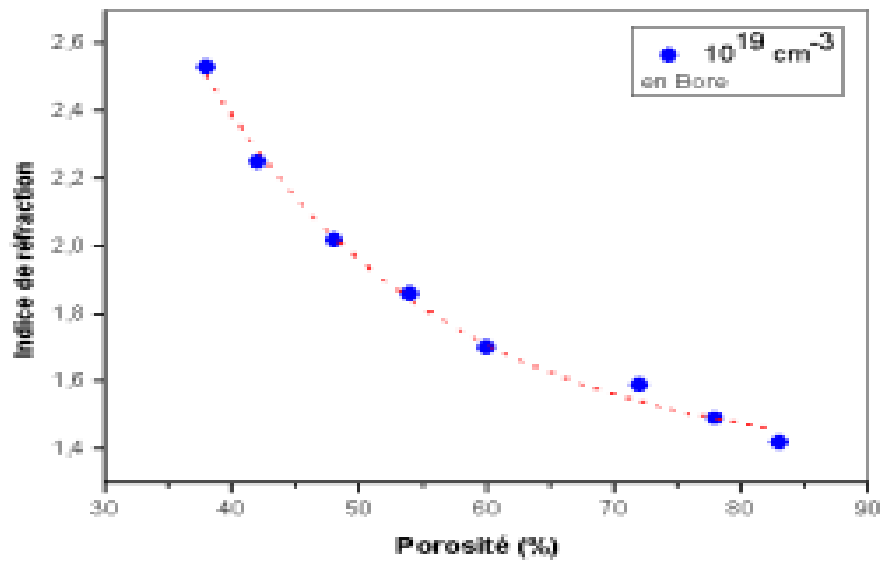


Figure II.12. Variation de l'indice de réfraction en fonction de la porosité pour un substrat de silicium dopé avec 10^{19} cm^{-3} de bore [5]

II.5.4 Réflectance

Le silicium poreux est utilisé comme couche antireflet grâce à ses propriétés optiques. Salman a montré que par rapport aux autres types (111) et (100) échantillons de type n et p, la valeur de réflexion obtenue à partir de la couche PS formée sur le c-Si de type n (100) est plus faible, donc elle est différente comparé au silicium non poreux, l'indice de réfraction est abaissé et contrôlé par la porosité élevée, ce qui entraîne une réflectivité plus faible. La réduction maximale de la réflexion lumineuse varie de 450 à 650 nm. La réflexion de 650 à 1000 nm augmentera légèrement, ce qui peut être dû à la distribution aléatoire des trous et à l'augmentation de la rugosité de surface du PS. L'atténuation de la réflectance est provoquée par la transmission de la lumière à l'interface poreuse. La figure II.13 affiche le spectre de réflexion de la couche PS dans les régions de type p de type n et de type p avec l'orientation (100) et (111) par rapport à l'échantillon c-Si [12].

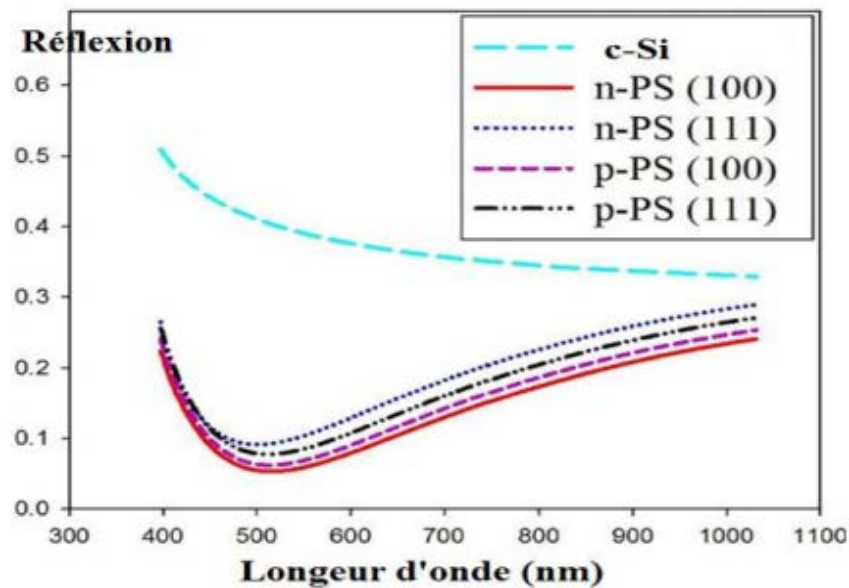


Figure II.13. Spectres de réflexion des couches PS formées sur les régions de type n et p avec les orientations (100) et (111) par rapport à l'échantillon de c-Si [12]

La couche PS ARC dans une cellule solaire est un paramètre très important, qui devrait améliorer l'efficacité de la cellule solaire pour améliorer la conversion de la lumière et augmenter l'absorption de la lumière dans la région visible du spectre solaire [4].

II.6 Oxydation du silicium poreux

Le silicium poreux vu sa grande surface spécifique s'oxyde dès sa sortie de la cellule d'anodisation ; ainsi une couche d'oxyde se forme remplissant les pores. L'oxydation est la méthode de passivation la plus utilisée. Il existe différentes méthodes d'oxydation : oxydation thermique, oxydation chimique, oxydation assistée par plasma, oxydation renforcée par la technologie d'irradiation et anodisation.

II.7 Applications du silicium poreux

Le silicium poreux offre la possibilité d'ajuster l'indice de réfraction en fonction de sa porosité, qui est une qualité très appréciée par la photonique (détecteurs de gaz, couches antireflets, guides d'ondes, cristaux photoniques)[13].

Son application dans les domaines de l'optoélectronique et de la microélectronique devient de plus en plus importante, car le silicium poreux présente de très bonnes propriétés d'électroluminescence et de photoluminescence dans les spectres visible et infrarouge, notamment du fait de sa surface spécifique.

II.7.1 Couche antireflet

Un revêtement antireflet (CAR) est utilisé pour minimiser la réflexion de la lumière, le principe de fonctionnement de la couche antireflet est basé sur le phénomène d'interférence par division d'amplitude provoqué par l'introduction d'une couche mince de matériau diélectrique entre le milieu extérieur (indice n_0) et le substrat (indice silicium n-Si).

II.7.2 Optoélectronique

L'efficacité de photoluminescence est plus élevée, et dans la région visible ou infrarouge, la LED a une durée de vie plus longue, et le problème de la mauvaise compatibilité entre les composants et les puces de silicium sont résolues. Il est intéressant de souligner l'importance du contrôle de la porosité pour contrôler l'indice de réfraction. C'est le concept principal de l'introduction du silicium poreux comme guide d'ondes [14].

II.7.3 Conversion de l'énergie

Le transfert d'énergie basé sur la théorie cinétique peut se produire dans un réseau de nano fils formé par des régions interconnectées de nanoparticules de silicium, dans lequel il est important d'analyser les effets de la porosité et des infiltrations structurelles [15]. L'utilisation de détecteurs au silicium permet de reconstruire les points d'interaction où un grand nombre de particules d'ions lourds se heurtent, mettant ainsi en évidence et étudiant le plasma de quarks et de gluons, et le plasma et les gluons constituent les premiers moments de l'univers matériel [14].

II.7.4 Microélectronique

En combinant optique, électronique et mécanique sur une micro-plateforme, il est devenu une réalité émergente pour la réalisation de la technologie des micro-dispositifs. Comme les Puces dans la caractérisation globale du sang, y compris le chargement, le mouvement, la manipulation et l'analyse sur une seule puce, son principe de fonctionnement est basé sur la fabrication de filtres optiques de haute qualité à base de silicium poreux qui transmettent et réfléchissent l'infrarouge., en étudiant le comportement des transistors à effet de champ dans les microstructures et nanostructures à base de silicium vis-à-vis du transport d'électrons et

des caractéristiques de spin, il peut être considéré comme une composante majeure de l'industrie de la microélectronique [14].

II.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons mené une recherche bibliographique sur le matériel silicium poreux, nous avons rappelé sa découverte, la méthode de préparation, les conditions d'anodisation et les caractéristiques de la couche poreuse telles que l'épaisseur, la porosité, la morphologie de la couche poreuse, en rappelant les différents types de silicium nano-poreux, méso-poreux et macroporeux les pores. Nous avons aussi fait un bref aperçu sur ses propriétés optiques et son application.

Bibliographies

- [1] Sabrina Gouas, « Etude des propriétés optiques du réflecteur arrière à base de silicium poreux gravé en monocouche et multicouche sur la face arrière des cellules solaires en silicium », mémoire de master, Université Larbi Ben M'hidi (Oum El Bouaghi), 2013.
- [2] Souhila Fakiri, « Modélisation de la permittivité diélectrique du silicium poreux oxydé et non oxydé » mémoire de master, Université Abou Baker Belkaid Tlemcen, 2012.
- [3] Mourad Ouddah, « Etude du silicium poreux destiné aux cellules solaires », thèse de mémoire, Université Mentouri Constantine, 2009.
- [4] Ismahane Ait habbouche « Etude des Caractéristiques du Silicium Poreux pour Application aux Cellules Photovoltaïques », mémoire de master, Université Abou Baker Belkaid Tlemcen, 2016.
- [5] Adel Najar « Amplification optique dans des guides d'onde en silicium poreux dopés aux terres rares », thèse de Doctorat, Université de Rennes1, 2007.
- [6] G. Zhang, S. D. Collins, R. L. Smith, Journal of Electrochemical Society 136 (5), 1561 (1989)
- [7] Arnaud porcher, « silicium poreux pour capteurs et MEMS résonants intégrés », thèse de doctorat, Ecole doctorale : Electrotechnique automatique de Lyon, 2009.
- [8] S. Setzu, « Réalisation et étude de structure à modélisation d'indice optique en silicium poreux », thèse de doctorat, Université Joseph Fourier-Genoble, 1999.
- [9] Nihel Bensmaine Haddam, Amélioration des performances d'une cellule solaire à base de couches de revêtement antireflet en ZnO, mémoire de master, Université Abou-Bekr Blkaid de Tlemcen, 2020.
- [10] Ghania Fortas, « Etude et caractérisation de dépôts de métaux dans le silicium poreux » mémoire, Université des Sciences et de la Technologie D'Oran (Houari Boumediene), 2006.
- [11] Dorra Abidi, « Couches minces et membranes auto supportées de silicium Poreux : nano composites hybrides et apport de la diffusion Raman infrarouge », thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie et de l'Université de Tunis el Manar, 2009.
- [12] K. A. Salman, Z. Hassan, et K. Omar, « Effect of Silicon Porosity on Solar Cell Efficiency », Int J Electrochem Sci, vol. 7, p. 11, 2012.
- [13] Amin Chalhoub, Nadjib. Semmar, C. Boulmer-Leborgne, A. Petit, V. Dolique, et P. Le fauchoux, « Étude comparative des propriétés thermo-physiques du silicium microporeux et silicium cristallin », Université d'Orléans.

[14] Salima Debboub, « Etude des effets de la porosité sur les propriétés élastiques des matériaux poreux par micro acoustique. », thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar - Annaba, 2012.

[15] G. Lerondel, « Propagation de la lumière dans le silicium poreux : application à la photonique », thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier-Genoble, 1997.

Chapitre III

Modélisation et Simulation - Résultats et Discussions

III.1 Introduction

Le silicium poreux est un matériau qui est de plus en plus utilisé, notamment en microélectronique et en biologie, grâce à ses propriétés remarquables et ses procédés de fabrication assez simples.

Ce chapitre nous avons nous avons cité le silicium cristallin, qui est considéré comme l'un des choix les plus adaptés compte tenu de ses bonnes propriétés électriques. Il existe de nombreux problèmes dans les structures c-Si (n) -c-Si (p) et Psi(n) avec et sans BSF.

Dans ce travail, on a préféré d'utiliser le logiciel SCAPS crée par Marc Burgelman de l'université de Gent 40 en Belgique comme outil de simulation numérique, car il tient compte de tous les facteurs pouvant limiter les performances photoélectriques dans les cellules solaires, mis à part des facteurs primordiaux qui sont : l'épaisseur, Le gap d'énergie du Silicium cristallin et la permittivité diélectrique relative, Les densités effectives des électrons et des trous N_c , N_v .

III.2 Simulation par Logiciel SCAPS

Pour établir la réalité physique, la simulation joue le rôle d'un pont qui relie le monde théorique au monde expérimental, comme il est illustré dans le schéma qui suit. Plusieurs logiciels de simulations et d'étude des performances des cellules solaires ont été développés par les chercheurs aux laboratoires citons par exemples : SILVACO (Silicon Valley Corporation, c'est une compagnie américaine), AMPS-1D (Analysis of Microelectronic and Photonic Structures, États -Unis), PC-1D (Personal Computer One Dimensional, Australie), SCAPS-1D (Solar Cell Capacitance Simulator One dimensional, Belgique), etc... Afin de compléter notre étude nous allons utiliser le logiciel SCAPS -1D.

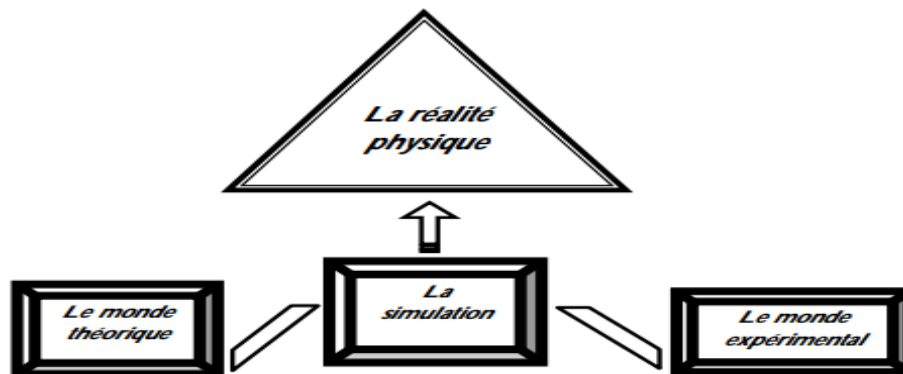


Figure III.1.L'importance de simulation [1]

Le code de simulation de dispositif SCAPS-1D (Solar Cell Capacitance Simulator in one Dimension) permet de simuler les caractéristiques du courant électrique AC (courant alternatif) ou DC (courant continue) des cellules solaires en films minces. La dernière version a été développée par l'université de GENT de Belgique –département d'électronique and système d'information (ELIS) électroniques and information systèmes. Il n'est pas nécessaire d'avoir une licence pour l'utiliser, il est gratuit et très pratique en effet, il possède une base de données contenant plusieurs types de cellules solaires, fichier data, d'extension « def » dont on peut modifier leurs différents paramètres (largeur, dopage...) [1].

III.3 Paramètres Caractéristiques des Cellules Utilisées

<i>Propriété</i>	<i>c-Si type n</i>	<i>c-Si type p</i>	<i>PSi type n</i>
<i>Température (K)</i>	300	300	300
<i>Épaisseur (µm)</i>	Variable	Variable	Variable
<i>Bande de gap (ev)</i>	1.12	1.12	Variable
<i>Permittivité électrique relative ϵ</i>	11.9	11.9	Variable
<i>Affinité électrique (ev)</i>	4.05	4.05	4.09
<i>Densité effective (BC : $1/cm^3$)</i>	2.8×10^{19}	2.8×10^{19}	2.8×10^{19}
<i>Densité effective (BV : $1/cm^3$)</i>	1.04×10^{19}	1.04×10^{19}	1.04×10^{19}
<i>Densité des donneurs ($1/cm^3$)</i>	1×10^{16}	00	1×10^{16}
<i>Densité des accepteurs ($1/cm^3$)</i>	00	1×10^{16}	00
<i>Vitesse Thermique des électrons (cm/s)</i>	1.5×10^3	1.5×10^3	1.5×10^3
<i>Vitesse Thermique des trous (cm/s)</i>	4.5×10^3	4.5×10^2	4.5×10^2
<i>Mobilité des électrons (cm^2/vs)</i>	1×10^7	1×10^7	1×10^7
<i>Mobilité des trous (cm^2/vs)</i>	1×10^7	1×10^7	1×10^7

Tableau III.1. Paramètres utilisés dans la simulation [2]

III.4 Modélisation des structures étudiées

Le but de notre travail est d'étudier l'effet de la couche de silicium poreux sur une cellule photovoltaïque en silicium cristallin. Pour cela nous allons travailler étape par étape. Nous allons d'abord étudier la cellule en silicium cristallin de type (n, p) puis la cellule de type (p, n) en optimisant les épaisseurs ensuite une couche de silicium poreux (PSi) est introduite dans la cellule pour introduire finalement ces modèles dans un modèle avec BSF qui est étudié avec et sans BSF et avec et sans couche de silicium poreux. Une optimisation est réalisée afin d'améliorer les performances d'une cellule en silicium avec une couche de silicium poreux qui joue le rôle de couche antireflet grâce à sa forte porosité. Les modèles sont représentés par les figures III (2-8) ci-dessous.

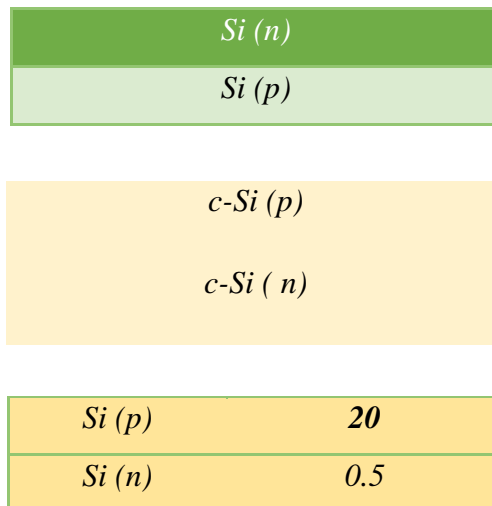


Figure III.2. Cellule en silicium modèle 1, 2 et 3



Figure III.3. Cellule en silicium avec une couche de silicium poreux PSi (modèle 4)

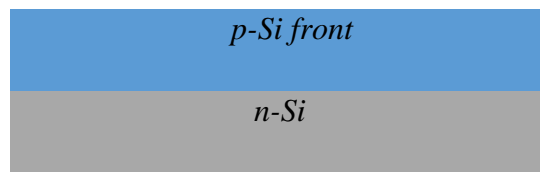


Figure III.4. Cellule en silicium sans BSF (modèle 3bis)

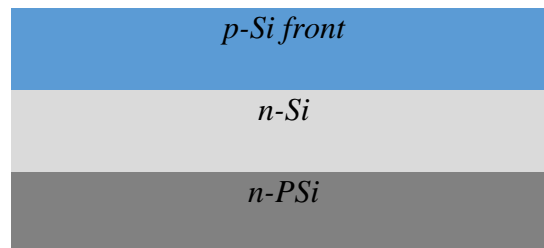


Figure III.5 .Cellule en silicium sans BSF (modèle 4bis)



Figure III.6.Cellule en silicium avec BSF (modèle 5)

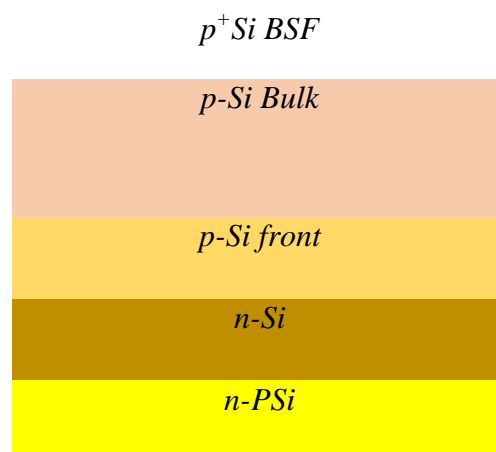


Figure III.7.Cellule en silicium avec BSF et une couche de silicium poreux du (modèle 6)

III.5 Etude des différents modèles

III.5.1 Modèles de la cellule c-Si (n, p)

Notre travail consiste à modéliser une cellule solaire à base de c-Si et à simuler ces paramètres électriques, optiques et géométriques afin de concevoir une cellule ayant le rendement électrique optimal.

Nous prenons une cellule au c-Si (n-p) sans une couche PSi comme représentée sur la figure III.2. Sous une température optimale $T=300^{\circ}\text{K}$, où l'épaisseur du c-Si(p) est $38\mu\text{m}$, et l'épaisseur du c-Si(n) est $28\mu\text{m}$ en se basant sur les travaux expérimentaux de K. A. Salman [3]. Dans notre étude, nous utilisons une cellule solaire composée des hétérojonctions **c-Si type p/c-Si type n**. Le schéma simplifié de la structure est représenté sur la figure III.2.

Le Tableau III.2, résume les résultats de la simulation obtenus pour les **3 modèles** à base de silicium, **Si(n)/Si(p)**, **Si(p)/Si(n)** avec différentes épaisseurs en se basant sur le Tableau III.1.

La variation de la caractéristique (I-V) des trois modèles en silicium est représentée sur la figure III.8.

Les matériaux	L'épaisseur (μm)	$V_{oc}(\text{V})$	J_{sc} (mA/cm^2)	FF%	Eta%	
Si (n)	28					
Si (p)	38	0.395	38.023	43.42	6.53	Modèle 1
Si (n)	0.5					
Si (p)	20	0.395	40.449	42.81	6.85	Modèle 2
Si (p)	20					
Si (n)	0.5	0.495	43.492	62.65	13.50	Modèle 3

Tableau III.2. Résultats de la simulation des trois cellules à base de silicium

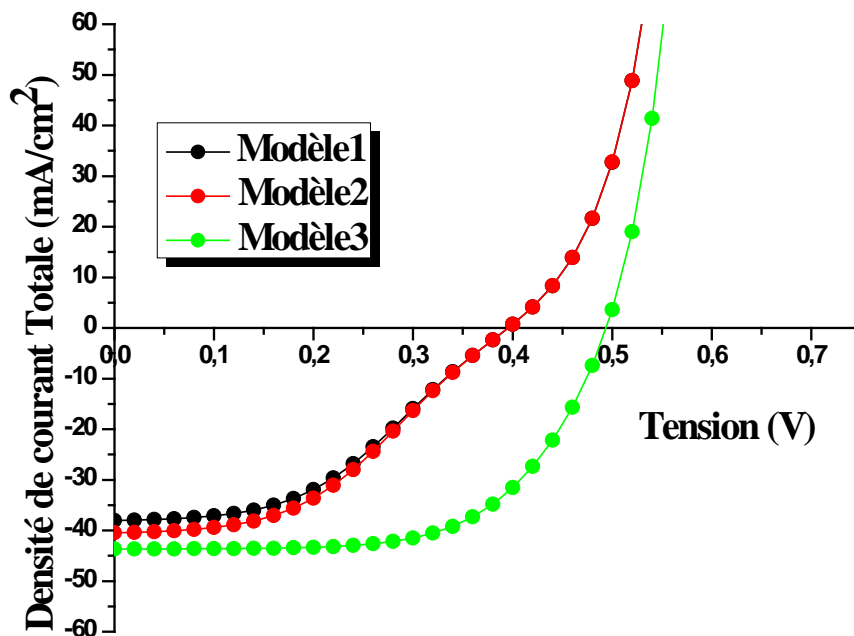


Figure III.8 .Variation de la caractéristique (I-V) des trois modèles à base de silicium

III.5.2 Cellule en silicium avec une couche de silicium poreux PSi

Dans cette partie notre travail consiste à modéliser une cellule solaire à base de silicium en lui ajoutant une couche de silicium poreux et à simuler ses paramètres électriques, optiques et géométriques afin de concevoir une cellule ayant le rendement électrique optimal.

Nous prenons la cellule au **c-Si (n-p)** du **modèle 3** avec une couche de PSi de type n, sous une température optimale $T=300^{\circ}\text{K}$, où l'épaisseur du c-Si (p) est $20\mu\text{m}$, et l'épaisseur du c-Si(n) est $0.5\mu\text{m}$ ainsi que les valeurs du tableau III.1.

L'épaisseur du c-PSi est de $39\mu\text{m}$ en se basant sur les travaux expérimentaux de K. A. Salman [3] , voir l'image MEB représentée en figure III.9.

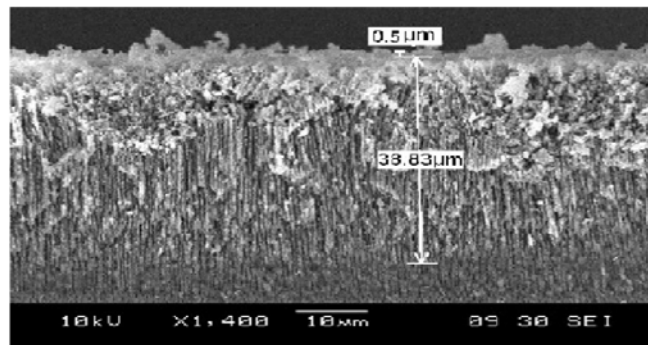


Figure III.9. Micrographie MEB de la cellule en silicium poreux [3]

Le schéma simplifié de la cellule **c-Si (p)/ c-Si (n)/c-PSi (n)** est représenté sur la figure III.3 qui est représenté aussi dans le tableau III.3.

Les résultats représentés sur le Tableau III.3 résument l'effet de la couche P*Si* de type n sur la tension à circuit ouvert, le courant de court-circuit, le facteur de forme et le rendement.

Les courbes représentatives de la variation de $I(V)$ et le rendement quantique représentent sur la figure III.10-III.11.

Les matériaux	L'épaisseur (μm)	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm^2)	FF%	η %	
Si (p)	20	0.5681	43.4609	82.07	20.26	Modèle 4
Si (n)	0.5					
PSi (n)	39					

Tableau III.3. Représentation des caractéristiques du modèle3 avec une couche de silicium poreux **c-Si (p)/c-Si(n) /PSi(n)**

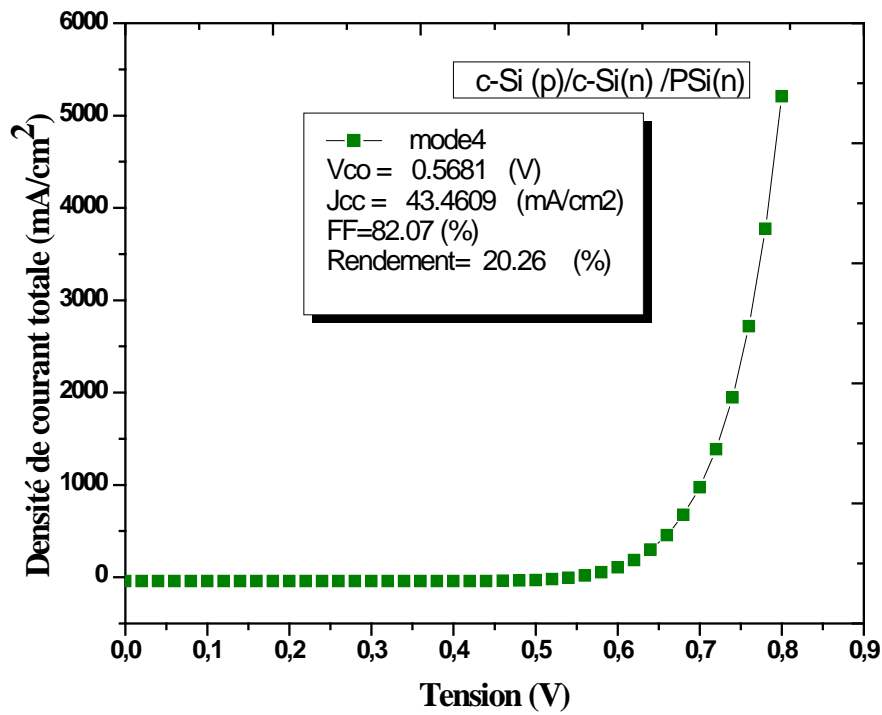


Figure III.10. Variation de la caractéristique (I-V) pour la cellule c-Si (p)/c-Si(n) /PSi(n)

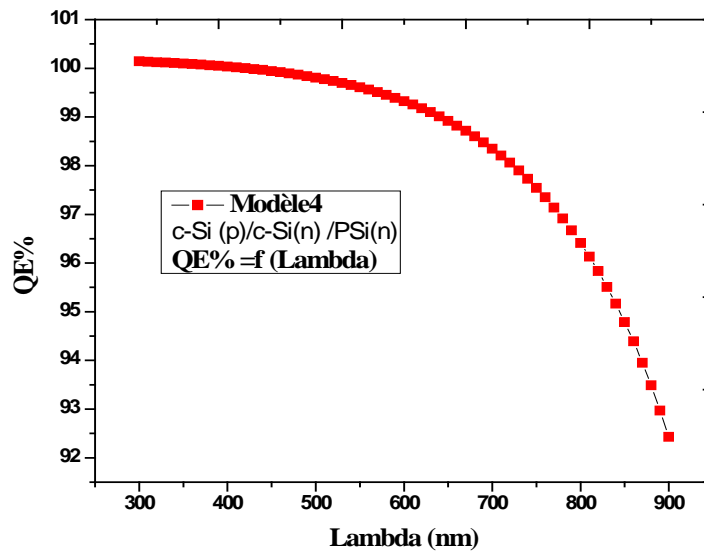


Figure III.11. Variation du rendement quantique en fonction de longueur d'onde du modèle c-Si (p)/c-Si(n) /PSi(n)

On remarque que la grande partie de l'absorption des photons se trouve dans la bande 300 nm -500 nm, puis une diminution du rendement est observée dans l'intervalle 500 nm- 900 nm.

III.5.3 Cellule en silicium avec BSF

II.5.3.1 Introduction

Le champ électrique arrière (BSF : Back Surface Field) consiste à créer une barrière de potentiel (par exemple, jonction p^+ , p) sur la surface arrière de la cellule pour assurer une passivation. La barrière de potentiel induite par la différence de niveau de dopage entre la base et le BSF tend à confiner les porteurs minoritaires dans la base (voir l'insertion sur la figure III.12). Ceux-ci sont donc tenus à l'écart de la face arrière qui est caractérisée par une vitesse de recombinaison très élevée [4].

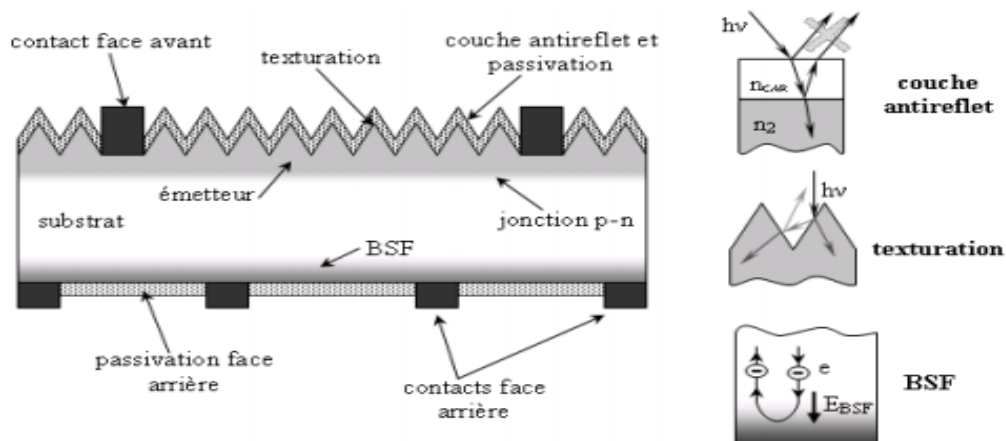


Figure III.12 .Éléments d'une cellule photovoltaïque avec BSF [4]

Nous nous proposons d'étudier une cellule au BSF avec une couche de silicium poreux PSi. Le modèle est composé du **modèle 3** auquel est ajouté deux couches de silicium, p^+ Si BSF/ p -Si Bulk/ p -Si front / n -Si, comme représentée sur la figure III.6. Sous une température optimale $T=300^\circ\text{K}$, où l'épaisseur du p^+ Si BSE est $2\ \mu\text{m}$, l'épaisseur du p -Si Bulk est $300\ \mu\text{m}$, l'épaisseur du p -Si front est $20\ \mu\text{m}$ et l'épaisseur du n -Si est $0.5\ \mu\text{m}$, d'abord et ensuite nous ajoutons une couche de silicium poreux de $39\ \mu\text{m}$.

Les paramètres utilisés sont représentés sur le tableau III.4.

<i>Propriété</i>	<i>c-Si type n</i>	<i>c-Si type p</i>	<i>p-Si Bulk</i>	<i>BSF (p+)</i>	<i>PSi type n</i>
<i>Température (K)</i>	300	300	300	300	300
<i>Epaisseur (μm)</i>	Variable	Variable	300	2	39
<i>Bande de gap (ev)</i>	1.12	1.12	1.12	1.12	4.25
<i>Affinité électrique (ev)</i>	4.5	4.5	4.5	4.5	4.09
<i>Permittivité électrique relative ϵ_r</i>	11.9	11.9	11.9	11.9	2
<i>Densité effective (BC : $1/\text{cm}^3$)</i>	2.8×10^{19}	2.8×10^{19}	2.8×10^{19}	2.8×10^{19}	2.8×10^{19}
<i>Densité effective (BV : $1/\text{cm}^3$)</i>	1.04×10^{19}	1.04×10^{19}	1.04×10^{19}	1.04×10^{19}	1.04×10^{19}
<i>Vitesse Thermique des électrons (cm/s)</i>	1×10^7	1×10^7	1×10^7	1×10^7	1×10^7
<i>Vitesse Thermique des trous (cm/s)</i>	1×10^7	1×10^7	1×10^7	1×10^7	1×10^7
<i>Mobilité des électrons (cm^2/vs)</i>	1.5×10^3	1.5×10^3	1.5×10^3	1.5×10^3	1.5×10^3
<i>Mobilité des trous (cm^2/vs)</i>	4.5×10^2	4.5×10^3	4.5×10^3	4.5×10^3	4.5×10^2
<i>Densité des donneurs ($1/\text{cm}^3$)</i>	1×10^{20}	00	00	00	1×10^{16}
<i>Densité des accepteurs ($1/\text{cm}^3$)</i>	00	1×10^{16}	1×10^{16}	1×10^{19}	00

Tableau III.4. Paramètres utilisés dans la simulation pour le modèle avec BSF

III.5.3.2 Modèle 3 Si (p, n) modifié

Nous nous proposons d'étudier le **modèle 3** sans couche BSF avec les paramètres représentés dans le tableau III.4 avec une mobilité des trous de $4.5 \cdot 10^2 \text{ cm}^2/\text{vs}$ conformément au modèle proposé par l'équipe de Burgelman dans le logiciel SCAPS 3.3.07 [5] comme représenté sur la figure III.4. Les résultats obtenus sont représentés sur le Tableau III.5. La variation de I (V) est représentée par la figure III.13.

Les matériaux	L'épaisseur (μm)	V_{OC} (V)	J_{sc} (mA/cm^2)	FF%	Eta%	
Si (p)	20	0.5548	26.222	81.508	11.859	Modèle 3bis
Si (n)	0.5					

Tableau III.5.Représentation des caractéristiques du modèle 3bis à base de silicium cristallin avec une mobilité des trous égale à $4.5 \cdot 10^2 \text{ cm}^2/\text{vs}$

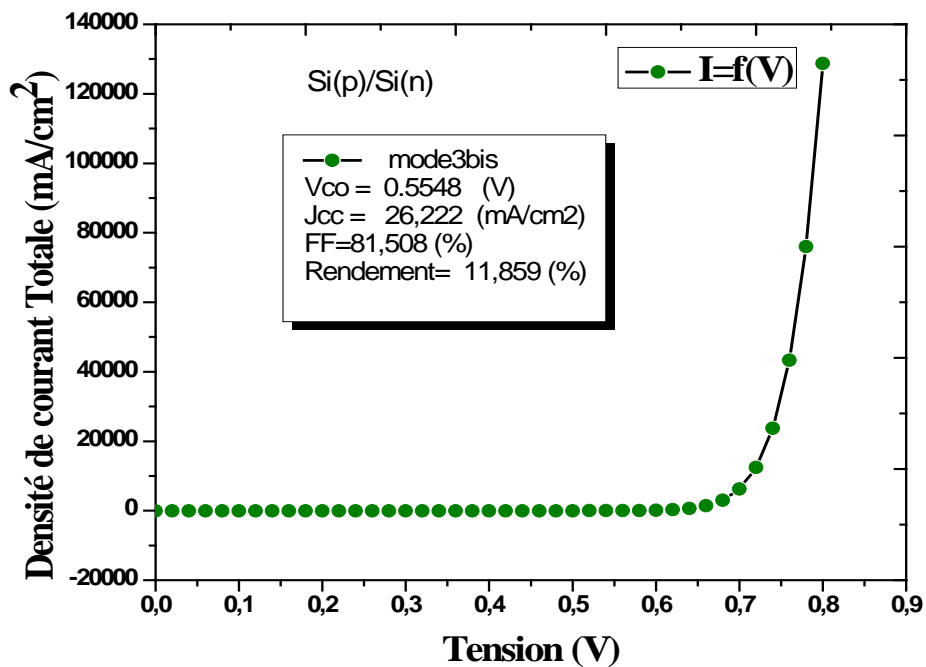


Figure III.13 .Variation de la caractéristique (J-V) à base de silicium cristallin modele3 Si(p)/Si(n) sans silicium poreux et sans couche BSF avec une mobilité des trous égale à $4.5 \cdot 10^2 \text{ cm}^2/\text{vs}$

III.5.3.3 Modèle 4 Si (p, n) avec une couche de silicium poreux

Nous avons ajouté une couche de silicium poreux à la cellule en silicium de type (p-n) représenté par le schéma de la figure III.5. Les résultats sont représentés sur le Tableau III.6.

Les matériaux	L'épaisseur (μm)	$V_{OC}(V)$	J_{sc} (mA/cm^2)	$FF\%$	$Eta\%$	
Si (p)	20	0.556	27.952	81.532	12.686	Modèle 4bis
Si (n)	0.5					
PSi(n)	39 μm					

Tableau III.6. Représentation des caractéristiques du modèle 4 avec une couche de silicium poreux PSi avec une mobilité des trous égale à $4.5 \cdot 10^2 \text{ cm}^2/\text{vs}$ (modèle 4bis).

La variation de la caractéristique (I-V) du modèle 4 (modèle 4bis) avec une mobilité des trous égale à $4.5 \cdot 10^2 \text{ cm}^2/\text{vs}$ avec de silicium poreux PSi est représentée par la figure III.14.

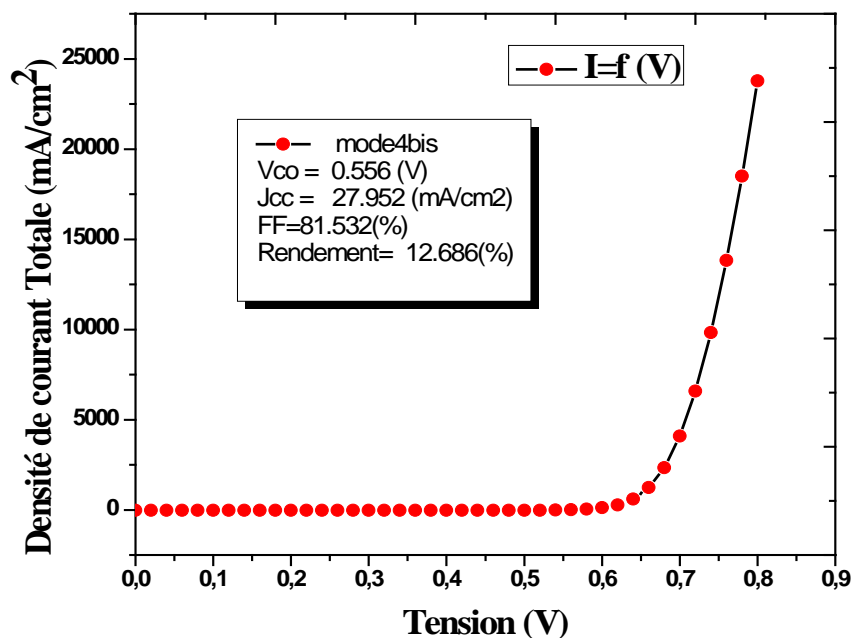


Figure III.14. Variation de la caractéristique (I-V) du modèle 4 bis avec une couche de silicium poreux PSi

Nous remarquons une amélioration du rendement passant d' $\eta = 11.8595\%$ à $\eta = 12.6862\%$. Le silicium poreux permet d'améliorer le rendement énergétique grâce à sa porosité qui fait chuter son indice de réfraction et sa permittivité diélectrique, il joue le rôle de couche antireflet.

III.5.3.4 Modèle 5 avec BSF sans PSi

Nous nous proposons d'étudier le **modèle 3** avec une couche BSF comme représenté sur la figure III.6. Le Tableau III.7 résume l'effet de la couche Si BSF de type p^+ sur la cellule à base de silicium cristallin Si (p, n).

Les matériaux	L'épaisseur (μm)	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm^2)	FF%	Eta %	
p^+ Si BSF	2					
p -Si Bulk	300					
p -Si front	20	0.62	35.762	83.02	18.42	Modèle 5
n -Si	0.5					

Tableau III.7. Représentation des caractéristiques du modèle 5 avec une couche BSF

Nous remarquons une nette amélioration du rendement en ajoutant une couche BSF au **modèle 3** passant de **11.8595 à 18.42 %**.

La variation de la caractéristique (I-V) du modèle 5, et la variation du rendement quantique en fonction de longueur d'onde du modèle 5 sont représentées par les figures III.15 et III.16.

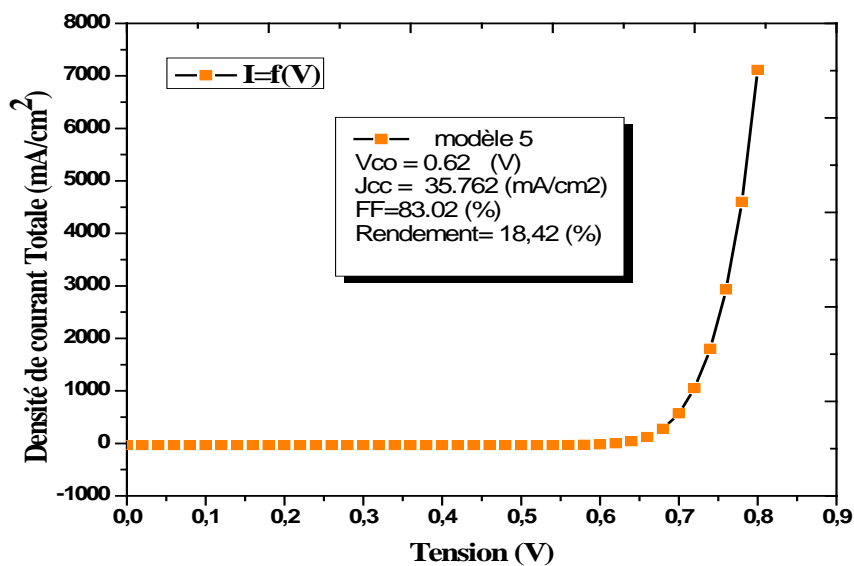


Figure III.15 .Variation de la caractéristique $I(V)$ du modèle 5

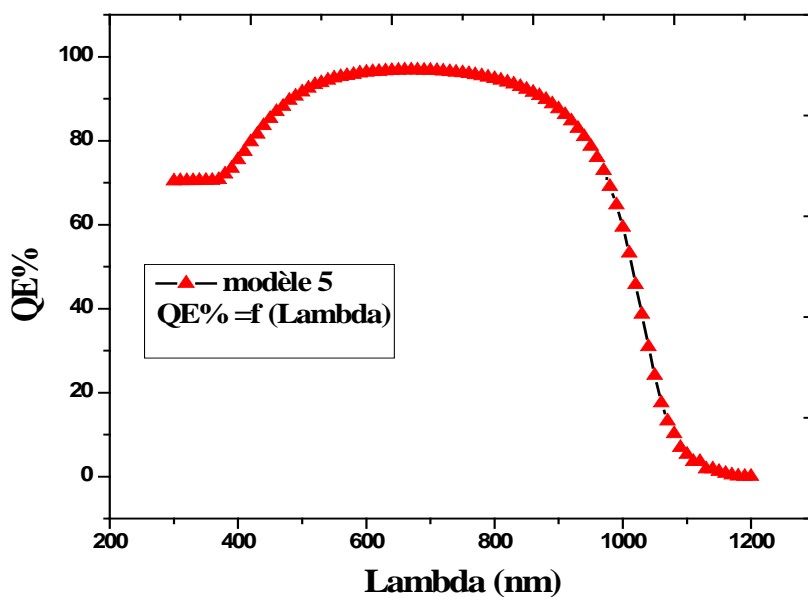


Figure III.16 .Variation du rendement quantique en fonction de longueur d'onde du modèle 5

On remarque que la grande partie de l'absorption des photons se trouve dans la bande (400 nm-850 nm), puis on voit une diminution du rendement dans l'intervalle (850 nm-1150

nm). 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 850 nm, domaine où la réponse spectrale est dominée par les porteurs photo générés dans la base.

III.5.3.5 Modèle 6 avec PSi

Nous nous proposons d'ajouter dans ce modèle à la cellule au BSF une couche de silicium poreux PSi de type n comme représentée sur la figure III.7.

On rappelle que la température optimale est $T=300^{\circ}\text{K}$, où l'épaisseur du $p^+\text{Si}$ BSF est $2\ \mu\text{m}$, l'épaisseur du $p\text{-Si}$ Bulk est $300\ \mu\text{m}$, l'épaisseur du $p\text{-Si}$ front est $20\ \mu\text{m}$, l'épaisseur du $n\text{-Si}$ est $0.5\ \mu\text{m}$, et l'épaisseur de $n\text{-PSi}$ est $39\ \mu\text{m}$.

Dans notre étude, nous utilisons une cellule solaire composée des hétérojonctions suivantes : $p^+\text{Si BSF}/p\text{-Si Bulk}/p\text{-Si front}/n\text{-Si}/n\text{-PSi}$.

Les matériaux	L'épaisseur (μm)	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm^2)	FF%	Eta %	
$p^+\text{Si BSF}$	2					
$p\text{-Si Bulk}$	300					
$p\text{-Si front}$	20	0.6217	37.4918	83.04	83.04	Modèle 6
$n\text{-Si}$	0.5					
$n\text{-PSi}$	39					

Tableau III.8.Représentation des caractéristiques du modèle 6

Les résultats représentés sur le Tableau III.8, la tension à circuit ouvert, le courant de court - circuit, le facteur de forme et le rendement montrent l'effet de la couche de silicium poreux du modèle 6. Le rendement de la cellule est passé de **18.42%** à **19.3563%**.

Nous remarquons une nette amélioration du rendement passant de **11.8595%** à **18.42 %** avec BSF et **19.3563%** en ajoutant au modèle 5, avec une couche de silicium poreux de $39\ \mu\text{m}$ d'épaisseur.

La figure III.17 représente la variation de la caractéristique (I-V) du modèle 6.

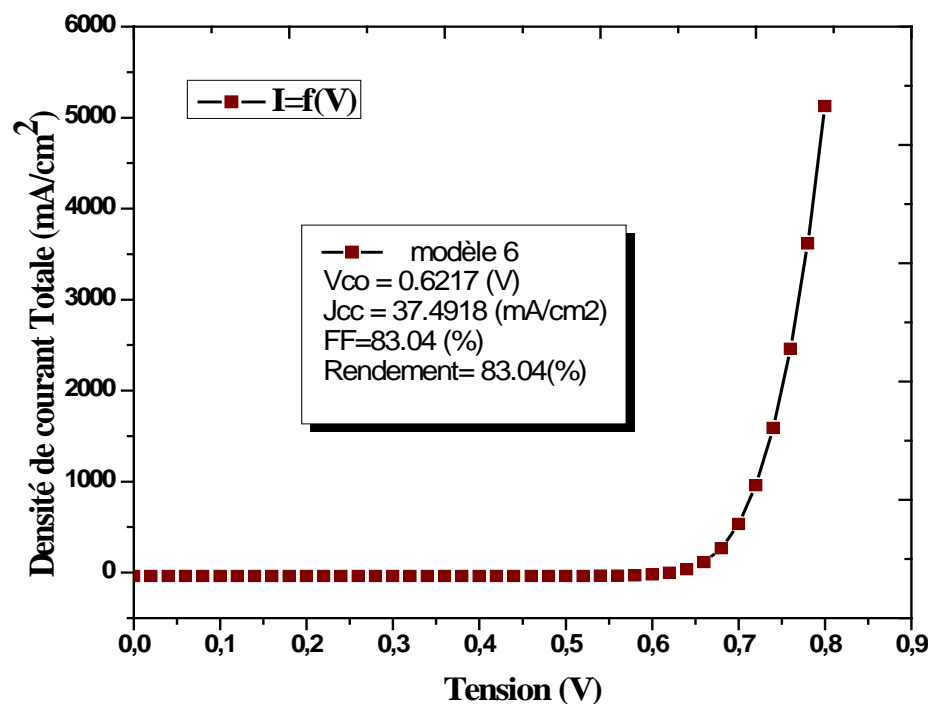


Figure III.17.Variation de la caractéristique (I-V) du modèle 6

III.5.3.6 Variation du rendement de la cellule BSF en fonction de l'épaisseur du silicium poreux

Dans tout notre travail nous avons utilisé une épaisseur du silicium poreux de 39 μm conformément à l'épaisseur réalisée expérimentalement par Salman [3]. A l'aide du logiciel de simulation SCAPS, nous avons fait varier l'épaisseur de la couche de silicium poreux allant de 1 μm jusqu'à 110 μm afin de voir l'évolution des différents paramètres de la cellule. Plus l'épaisseur n'augmente et plus le rendement de la cellule diminue. Nous remarquons que le rendement diminue faiblement allant de **19.3583%** pour 1 μm à **19.3579%** pour 8 μm et **19.3573%** pour 20 μm . Pour 39 μm il est de **19.3563%**. Le rendement est donc approximativement égal à **19.36%** pour des épaisseurs allant de 1 μm à 110 μm ce qui montre que l'épaisseur de la couche de silicium poreux de type n n'influe pas beaucoup sur le rendement de la cellule. En revanche ce qui devrait influencer sur le rendement de la cellule c'est la porosité du silicium poreux. Plus la porosité augmente et plus l'indice de réfraction

diminue et la permittivité diélectrique aussi [6] et le gap est grand. Pour cela nous avons été amené à choisir une très forte porosité qui est de 91% [7], la transmittance est donc importante, la transparence optique est excellente.

La Variation du rendement de la cellule BSF en fonction de l'épaisseur du silicium poreux est représentée par la figure III.18.

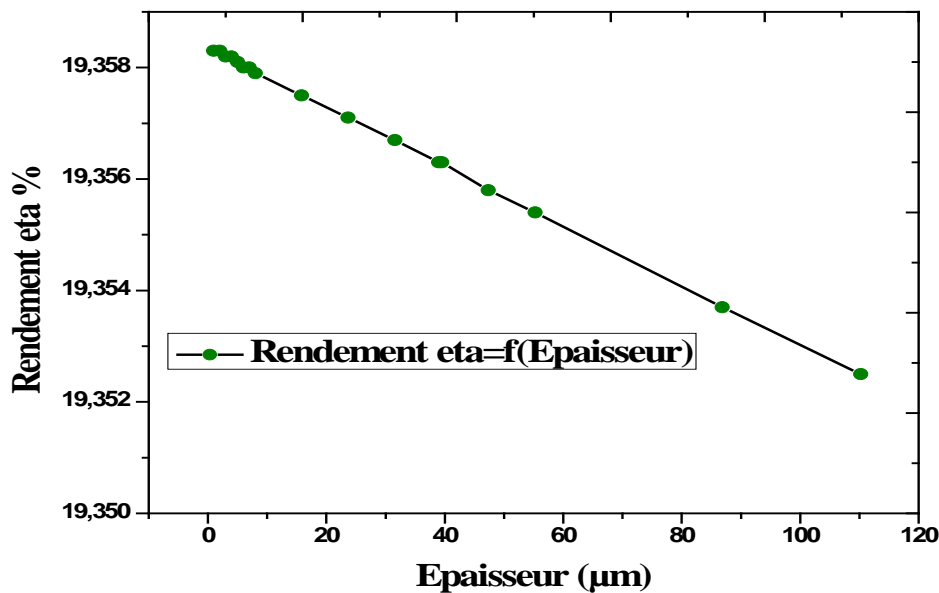


Figure III.18 .Variation du rendement de la cellule BSF en fonction de l'épaisseur du silicium poreux

Nous pouvons déterminer les variations des autres grandeurs physiques tel que le facteur de forme, le courant de court-circuit la tension en circuit ouvert. Les résultats obtenus sont illustrés en Figure III.19-III.21. Le facteur de forme FF diminue en fonction de l'épaisseur ainsi que J_{sc} tandis que V_{oc} augment avec l'augmentation de l'épaisseur du PSi.

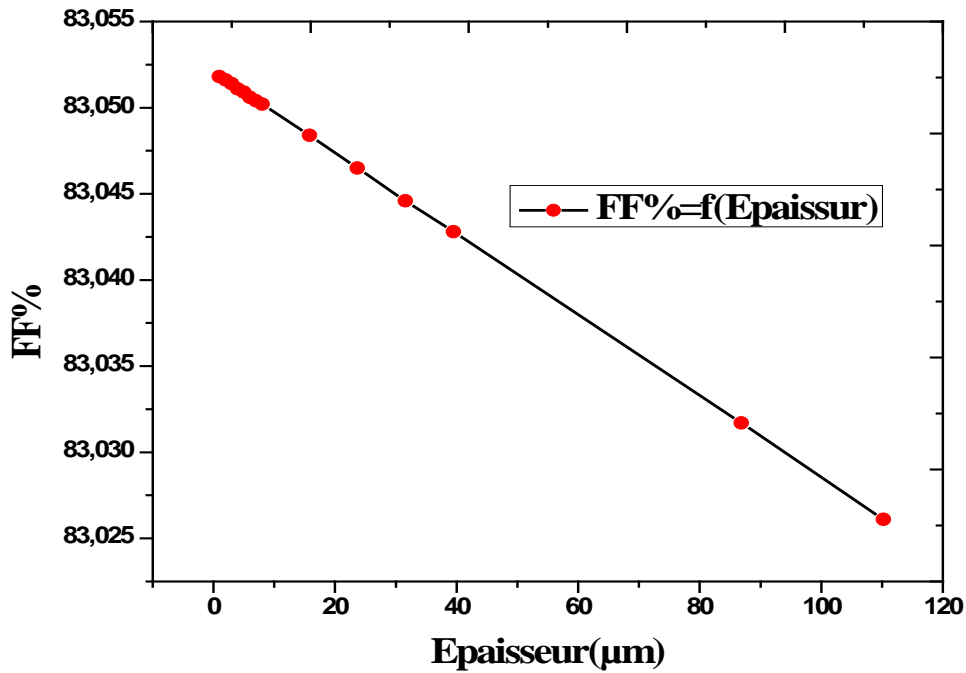


Figure III.19. Le facteur de forme en fonction de l'épaisseur du silicium poreux

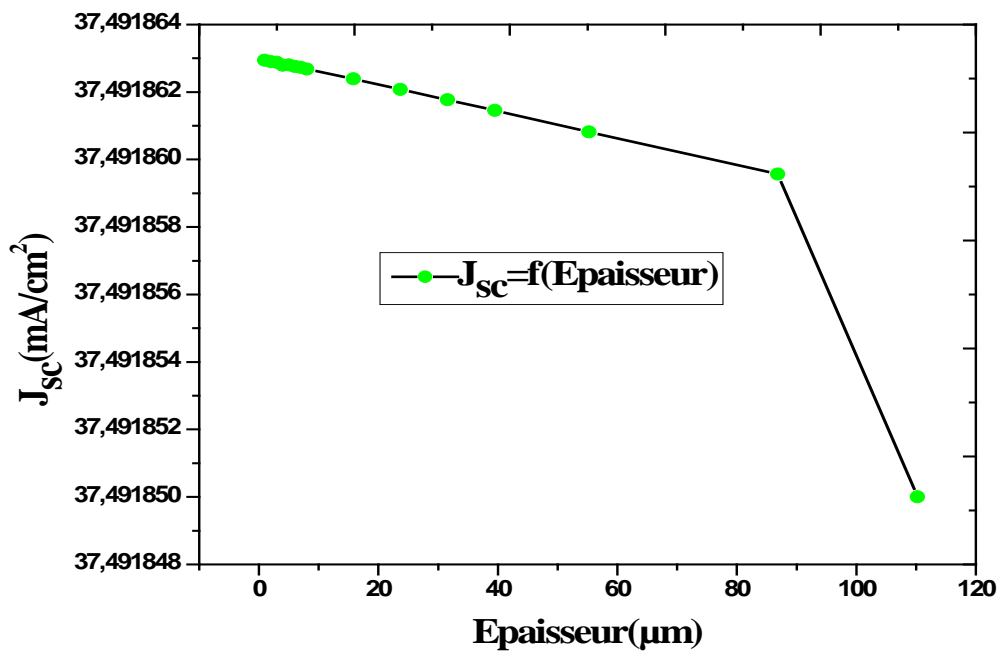


Figure III.20. Le courant de court-circuit en fonction de l'épaisseur du silicium poreux

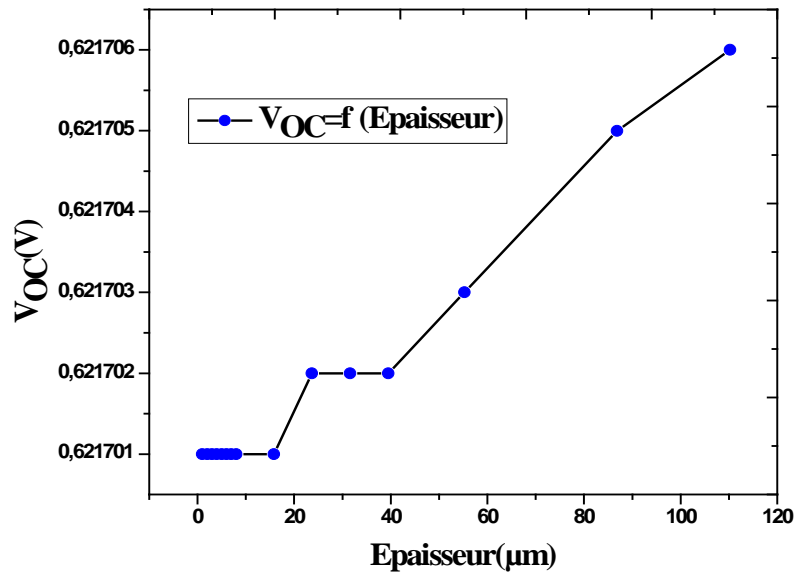


Figure III.21. La tension de circuit ouvert en fonction de l'épaisseur du silicium poreux

III.6 Comparaison des résultats

Le Tableau III.9, regroupe les résultats que nous avons obtenus par simulation pour les différents modèles avec et sans couche de silicium poreux en comparaison avec quelques résultats expérimentaux de la littérature.

Type de Cellule	V_{OC} (V)	J_{SC} (mA/cm ²)	FF%	Eta%
c-Si (n, p)	0.3953	38.023569	43.42	6.53
c-Si (p, n)	0.4955	43.492344	62.65	13.50
c-Si (p, n)/PSi (n)	0.5681	43.460914	82.07	20.26
c-Si (p, n)	0.5548	26.222581	81.50	11.85
c-Si (p, n)/PSi (n)	0.5566	27.951884	81.53	12.68
c-Si (n ⁺ , p) [8]	0.580	18.5	73	7.85
Si (n+, p) [9]	0.598	17.2	0.74	7.6
Si (n+, p) [10]	0.580	95	-	10.3
c-Si (n+, p)/PSi [8]	0.601	27.2	77	12.54
c-Si (n+, p)/PSi [9]	0.606	20.1	0.75	9.5
c-Si (n+, p)/PSi [10]	0.570	137	-	13.5
BSF (p)/ c-Si (p, n)	0.6204	35.762401	83.02	18.42
BSF (p)/ c-Si (p, n)/PSi (n)	0.6217	37.491861	83.04	19.53

Tableau III.9. Résultats de la simulation et comparaison avec les résultats de la littérature

Les résultats montrent une augmentation des performances de la cellule à base de silicium, pour V_{OC} , J_{SC} , FF et le rendement. Pour mieux comparer nous avons essayé de faire une optimisation

en faisant varier l'épaisseur de la couche du silicium poreux qui donne le même rendement entre $2\ \mu\text{m}$ et $39\ \mu\text{m}$ comme utilisé par K. A. Salman [3].

Donc les résultats de la simulation viennent confirmer les résultats expérimentaux obtenus par différents chercheurs [7, 8,9]. Nous avons montré que le silicium poreux avec sa porosité permet d'augmenter les performances de la cellule jouant le rôle d'une couche antireflet.

III.7 Conclusion

Dans le but de pouvoir améliorer les performances des dispositifs photovoltaïques, il est souvent nécessaire d'avoir recours à la simulation numérique. Pour cela, nous avons introduit le concept d'une programmation par le logiciel numérique SCAPS sur la cellule solaire à base de c-Si, pour étudier l'effet de la porosité du silicium utilisé comme couche anti reflet (ARC) sur les paramètres d'une cellule solaire en silicium avec et sans couche BSF.

Nous avons modélisé et simulé plusieurs cellules en silicium cristallin avec différentes épaisseurs pour trouver les meilleures caractéristiques. Un rendement de 20.26%, avec une température de 300K pour une épaisseur de $39\ \mu\text{m}$ pour le p-Si, de $0.5\ \mu\text{m}$ pour le c-Si(n) et de $20\ \mu\text{m}$ pour le c-Si(p) est obtenu. Dans tous les modèles avec silicium poreux les caractéristiques sont améliorées. Le silicium poreux avec sa porosité allant de 0 à 97% à son indice de réfraction qui diminue ce qui lui permet d'acquiescer une bonne transmittance et lui donne le rôle de couche antireflet pour les cellules solaires.

Enfin, le rendement atteint par les cellules à base de Silicium avec une couche de silicium poreux et les performances qu'elle présente en font l'un des matériaux qui apporteront une contribution significative au potentiel énergétique solaire à bas cout du futur.

Bibliographies

- [1] Amiri. Ariannejad, « Introducing CTS (Copper-Tin-Sulphide) as a solar Cell by using solar Cell capacitance simulator (SCAPS) ».Springer International Publishing, 2019.
- [2] Ismahane Ait habbouche, « Etude des Caractéristiques du Silicium Poreux pour Application aux Cellules Photovoltaïques », mémoire de master, Université Abou Baker Blkaid Tlemcen, 2016.
- [3] K.A.Salman et al. Superlattices and Microstructures, «Improved performnce of a crystalline silicon solar cell based on ZnO/PS anti-reflection coating layers »,50 (2011)517-528.
- [4] Pierre Papet, « Nouveaux concepts pour la réalisation de cellules photovoltaïque à contact Interdigites sur substrats minces en silicium cristallin », l’Institut National des Sciences appliquées de Lyon (INSA), 2007.
- [5] A. Niemegeers, M. Burgelman, K. Decock, J. Verschraegen, and S. Degrave, « SCAPS Manual 2 September 2013», Man. SCAPS-1D, no. September, 2013.
- [6] K.Rahmoun, S.Fakiri « Modeling to Predict Effective Dielectric Constant of Porous Silicon Low-Dielectric-constant Thin Films », Spectroscopy Letters, 47:348–355, 2014.
- [7] Khaldun A. Salman, Khalid Omar, Z. Hassan, « The effect of etching time of porous silicon on solar cell performance», Superlattices and Microstructures, 50 647–658, 2011.
- [8] R Chaoui, A Messaoud, « Screen-Printed Solar Cells with Simultaneous Formation of Porous Silicon Selective Emitter and Antireflection Coating », Desalination, 209, 118-121. (2007).
- [9] Panek, P, Lipinski, M. Czternastek, H. « Porous Silicon Layer as Antireflection Coating in Solar Cells s », Opto-Electronics Review, 8(1), 57-59, (2000).
- [10] V.Yerokhov, I. Melnik, Tsisaruk, A., Semochko, I, «Porous Silicon in Solar Cell Structures», Opto-Electronics Review, 8(4), 414-417, (2000).

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

L'objectif de ce travail de recherche, était de voir l'influence de la porosité de la couche PSi et de son épaisseur sur l'augmentation de leur rendement. Nous avons utilisé le silicium poreux comme matériaux de base ou comme un moyen de passage à l'obtention d'une meilleure efficacité des cellules solaires en c-Si. En effet une simulation numérique des caractéristiques électriques, courant-tension et rendement, d'une cellule solaire en silicium cristallin avec une couche PSi par le logiciel SCAPS-1D nous a permis une comparaison entre les différentes structures de type n et de type p, ensuite déterminer laquelle des structures présente le meilleur rendement de conversion. Nous avons fait également une étude de l'effet de l'épaisseur de la couche PSi, et l'introduction des modèles mathématiques sur les paramètres de sortie de la cellule qui sont, la tension de circuit ouvert V_{OC} , le courant de court-circuit, I_{CC} , le facteur de forme FF et le rendement de conversion et nous avons trouvé que la cellule c-Si de type p avec un traitement PSi représente un rendement optimum allant de 20.26% pour une porosité de 91% tout en se référant aux travaux de K.A. Salman, qui a montré que le meilleur rendement est obtenu pour une porosité de 91%. Nous avons montré plus l'épaisseur augmente et plus le rendement diminue. Dans ce travail nous avons montré par l'intermédiaire de la simulation numérique qu'une couche de silicium poreux de forte porosité et de faible épaisseur joue un rôle primordial dans l'amélioration des performances de la cellule photovoltaïque. Nous avons étudié plusieurs modèles et nous avons montré qu'à chaque tentative d'ajouter une couche de silicium poreux le rendement de la cellule augmente. Nous avons donc montré que le silicium poreux a un rôle important dans l'amélioration des performances de la cellule en silicium grâce à sa porosité contrôlée qui permet une bonne transmittance de la lumière. Il joue le rôle de couche antireflet.

Résumé:

Dans ce travail, nous avons étudié des cellules solaires à base silicium cristallin c-Si de type n et de type p avec et sans couche de silicium poreux par la simulation numérique via le programme de calcul SCAPS-1D créé à travers Marc Burgelman, 6 modèles ont été étudiées caractéristiques tels que I_{CC} , V_{OC} , FF, et le η ont été calculées.

Ont conclu que l'utilisation du traitement PSi dans les cellules PV amène à l'élévation du rendement quantique et augmente l'efficacité de la cellule solaire par rapport à une cellule sans couche de PSi. Nous avons aussi étudié l'ajout d'une couche BSF qui augmente aussi le rendement.

Mots Clés: Cellule solaire photovoltaïque ; Silicium Poreux; Silicium cristallin ; SCAPS-1D ; Rendement quantique interne.

Abstract:

In this work, we studied n-type and p-type crystalline silicon c-Si solar cells with and without a porous silicon layer by numerical simulation via the SCAPS-1D calculation program created by Marc Burgelman, 6 models were studied characteristics such as I_{CC} , V_{OC} , FF, and the η were calculated.

Concluded that the use of the PSi treatment in PV cells leads to the increase in quantum efficiency and increases the efficiency of the solar cell compared to a cell without a PSi layer. We also investigated the addition of a BSF layer which also increases the yield.

Keywords: Photovoltaic solar cell; Porous silicon PSi; crystalline silicon c-Si; SCAPS-1D; internal quantum efficiency.

الملخص:

في هذا العمل، درسنا الخلايا الشمسية c-Si من السيليكون البلوري من النوع n والنوع p مع وبدون طبقة سيليكون مسامية عن طريق المحاكاة العددية عبر برنامج حساب SCAPS-1D الذي أنشأه Marc Burgelman، تمت دراسة 6 نماذج من الخصائص مثل I_{CC} تم حساب V_{OC} و FF و η .

خلص إلى أن استخدام علاج PSi في الخلايا الكهروضوئية يؤدي إلى رفع كفاءة الكم ويزيد من كفاءة الخلية الشمسية مقارنة بالخلية التي لا تحتوي على طبقة PSi. لقد بحثنا أيضًا في إضافة طبقة BSF التي تزيد أيضًا من المحصول.

الكلمات المفتاحية: الخلايا الشمسية الكهروضوئية؛ سيليكون مسامي السيليكون البلوري SCAPS-1D؛ كفاءة الكم الداخلية