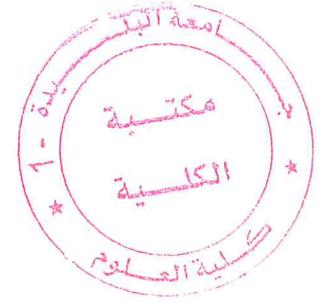


الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
 وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
 République Algérienne Démocratique et Populaire
 Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
 جامعة سعد دحلب البليدة 1
 UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA 1



كلية العلوم-دائرة الفيزياء
 Faculté des Sciences
 Département de Physique



MEMOIRE
 POUR L'OBTENSION DU DIPLOME DE
 MASTER EN PHYSIQUE
 Option : Matière Rayonnements

THÈME

LES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES À
 HÉTÉROJONCTION À BASE DE SILICIUM

Par :

Nadji zina

Devant le jury composé de :

M .A. BENAMAR	Professeur	Université de Blida 1	Président
F .Z. BEDIA	MCB	Université de Blida 1	Encadreur
A. BEDIA	MCB	Université de Blida 1	Examineur
N.BENZAKKOUR	MCB	Université de Blida 1	Examineur

Blida, septembre 2017

Remerciements

« Tout d'abord, je remercie Allah le tout puissant de m'avoir donné l'occasion de poursuivre mes études à l'université de Blida 1 »

Ce travail a été mené au sein du laboratoire « FUNDAPL » du département de physique, faculté des sciences, Université de Blida 1.

*J'exprime mes sincères remerciements et ma grande gratitude à Dr **BEDIA .F.Z**, Maître de conférences classe B de l'Université de Blida 1, pour avoir accepté d'être la promotrice de mon mémoire, ainsi que pour son encouragement et la grande confiance qu'elle m'a accordé. Je voudrais le remercier de m'avoir épaulé et d'avoir amélioré mes connaissances scientifiques.*

*Mes remerciements vont également à Monsieur le professeur **BENAMAR Mohamed El Amine**, Professeur et directeur de laboratoire à l'Université de Blida 1, pour m'avoir fait l'honneur de présider mon jury de mémoire.*

*Je remercie chaleureusement **Asma. BEDIA** et **N.BENZEKKOUR** d'avoir accepté de participer au jury et pour l'intérêt qu'elles ont manifesté pour ce mémoire.*

Un grand merci à tous les autres membres du laboratoire « FUNDAPL ».

Dédicace

A mes chers parents

A mon frère Merzek

A ma sœur wissem

A toute ma famille

A mes amis

A ceux que j'aime

Sommaire

Introduction général.....	1
---------------------------	---

Chapitre.1

Généralité sur les cellules solaires photovoltaïques

I.1.introduction	2
I. 2 Conversion photovoltaïque.....	2
I.3 Rayonnement solaire.....	2
I. 4 matériaux semi conducteur.....	4
I. 4.1 Semi-conducteurs intrinsèques.....	4
I. 4.2 Semi-conducteurs extrinsèques.....	4
I. 4.3 La jonction PN	6
I.5 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	6
I.6 Paramètres caractéristiques d'une cellule photovoltaïque.....	7
I.6.1 Caractéristiques courant-tension (I-V).....	8
I.7 Les différents types de cellule photovoltaïque.....	10
Bibliographie.....	12

Chapitre .II

Cellule photovoltaïque en silicium

II.1 Introduction.....	13
II.2 Propriétés Photovoltaïque de silicium.....	13
II.3 Cellules photovoltaïques à hétérojonctions de silicium HIT.....	14
II.3.1 Structure	14
II.3.2 Les composants de la cellule silicium à hétérojonctions.....	15
II.3.2.1 L'oxyde transparent conducteur	15

II.3.2.2 L'émetteur ...	16
II.3.2.3 Le Back Surface Field.....	16
II.3.2.4 Les contacts	16
II.4 Développement et avantages de la technologie silicium à hétérojonction.....	17
II.5 Conclusion.....	18
Bibliographie.....	19

Chapitre.III

Simulation de la cellule photovoltaïque à hétérojonction de silicium HIT

III.1 Introduction.....	20
III.2 Simulation numérique de l'hétérojonction a-Si:H/c-Si.....	20
III.2.1 Présentation de logiciel de simulation SCAPS.....	20
III.2.2 Notions de base.....	21
III.2.2.1 Lancer SCAPS.....	22
III.2.2.2 Définir le problème	22
III.2.2.3 Définir le point de fonctionnement	23
III.2.2.4 Sélection des caractéristiques à simuler	23
III.2.2.5 Commencer le calcul.....	23
III.2.3 Définition des différents matériaux d'une cellule à hétérojonctions de silicium amorphe/ silicium cristallin.....	25
III.2.3.1 Edition de la structure d'une cellule solaire.....	25
III.2.3.2 Contacts.....	25

III.2.3.3 Définition des couches	26
III.3 Etude de l'hétérojonction a-Si:H (n)/c-Si (p).....	27
III.3.1 Structure simulée a-Si:H(n)/c-si(p).....	27
III.3.2 Paramètres de la structure simulée.....	28
III.4 La caractéristiques J(V) de la cellule simulée.....	29
III.4.1 L'effet de la couche antireflet ITO sur la cellule solaire HJ	29
III.4.2 L'effet de la couche intrinsèque de silicium amorphe	30
III.4.3 L'effet du champ arrière (Back Surface Field : BSF).....	32
III.5 Conclusion.....	34
Bibliographie.....	35
Conclusion général.....	36

LISTE DES FIGURES

<p>Figure I.1 : Spectres du corps noir à la température de 5 900 K, du rayonnement solaire hors de l’atmosphère AM0 et celui au niveau de la mer AM1.5 avec les raies d’absorption de certains constituants de l’atmosphère comme la vapeur d’eau, l’oxygène et l’ozone [4].....</p> <p>Figure I.2 : Les quatre liaisons covalentes avec un atome donneur</p> <p>Figure I.3 : Les quatre liaisons covalentes avec un atome accepteur.....</p> <p>Figure. I.4: Création de la zone de transition dans une jonction PN.....</p> <p>Figure I.5 : Structure (à gauche) et diagramme de bande (à droite) d’une cellule photovoltaïque [4].....</p> <p>Figure I.6 : Courbe caractéristique Courant – Tension (I-V) d’une cellule solaire dans l’obscurité et sous éclairage standard AM 1.5[6].....</p> <p>Figure II.1:Structure d’une cellule photovoltaïque à hétérojonction a-Si:H / c-Si</p> <p>Figure II.2: Structure d’une cellule HIT.....</p> <p>Figure III.1 : Panneau de démarrage de SCAPS, le panneau d’action ou principal.....</p> <p>Figure III.2 : Panneau des bandes d’énergie.....</p> <p>Figure III.3 : Panneau d’affichage des courbes I-V à l’obscurité et en éclairage.</p> <p>Figure III.4: Structure HJ d’une hétérojonction a-Si:H(n)/c-Si(p).(a)sans couche antireflet ITO : a-Si:H(n)/c-Si(p) ; (b) avec couche antireflet ITO : ITO/ a-Si:H(n)/c-Si(p).....</p> <p>Figure III.5 : Caractéristique J(V) sous éclairage pour une cellule de référence HJ de type : sans couche antireflet ITO : a-Si:H(n)/c-Si(p) et avec couche antireflet ITO : ITO/ a-Si:H(n)/c-Si(p).....</p> <p>Figure III.6: Structure HIT d’une hétérojonction ITO/a-Si :H(n)/a-Si :H(i)/c-Si(p).....</p> <p>Figure III.7 : Caractéristique J(V) en l’obscurité et sous éclairage AM 1.5 de la cellule photovoltaïque à hétérojonction ITO /a-Si :H(n)/a-Si :H(i)/c-Si(p).</p>	<p>3</p> <p>5</p> <p>5</p> <p>6</p> <p>7</p> <p>8</p> <p>14</p> <p>17</p> <p>20</p> <p>22</p> <p>23</p> <p>25</p> <p>27</p> <p>29</p> <p>29</p>
--	---

Figure III.8: Structure de l'hétérojonction HJBSF: ITO/a-Si :H(n)/ c-Si(p)/ a-Si :H(p+) et HITBSF: ITO/a-Si :H(n)/a-Si :H(i)/c-Si(p)/ a-Si :H(p+).....31

Figure III.9 : Caractéristique J(V) sous éclairnement pour deux type de cellule avec une couche BSF : HJBSF: ITO/a-Si :H(n)/ c-Si(p)/ a-Si :H(p+) et HITBSF: ITO/a-Si :H(n)/a-Si :H(i)/c-Si(p)/ a-Si :H(p+).....31

Liste des tableaux

Tableau III.1: Principaux paramètres de simulation de la structure de la cellule photovoltaïque à hétérojonction HIT [9].....	26
Tableau III.2 : Caractéristiques J (V) sur des cellules HJ avec et sans couche antireflet ITO. Cellule de référenc].....	28
Tableau III.3: Caractéristiques J (V) sur des cellules HIT avec et sans couche intrinsèque de silicium amorphe.....	30
Tableau III.4: Caractéristiques J(V) sur des cellules HJ et HIT avec et sans couche du champ arrière BSF.....	32

Liste des symboles

E : Champ électrique.

E_g : L'énergie de bande interdite.

n : Concentration des électrons et des trous respectivement.

n_0, p_0 : Concentration des électrons et des trous à l'équilibre respectivement.

N_A, N_D : Concentration des atomes accepteurs et des atomes donneurs respectivement.

μ_n, μ_p : Mobilité des électrons et des trous respectivement.

E_c : Énergie du bas de la bande de conduction.

E_v : Énergie du haut de la bande de valence.

$\Delta n(p)$: La densité d'électrons (de trous) en excès.

ϵ, ϵ_0 : Permittivité du vide, permittivité relative et permittivité totale respectivement.

I_{ph} : Est le courant photogénéré.

I_0 : Le courant de saturation de la diode.

q : la charge de l'électron.

K : la constante de Boltzmann.

T : la température en Kelvin.

q : Charge de l'électron.

KT : L'énergie thermique à la température ambiante.

I_m : le courant au point de puissance maximale.

V_m : la tension au point de puissance maximale.

P_i : la puissance incidente.

I_{cc} : Le courant de court-circuit.

J_{cc} : la densité de courant de court circuit.

V_{co} : La tension de circuit ouvert.

FF : Le facteur de forme.

η : Rendement de conversion .

UNSW: University of New South Wales.

InGaP : Indium gallium phosphide .

CIGS : Di-sélénium de galium d'indium de cuivre (Cu (In, Ga) Se₂) .

GaAs : Gallium arsenide .

AlGaAs : L'arséniure de gallium d'aluminium.

InGaAsP : Le phosphure d'arséniure d'indium gallium.

Cd : cadmium.

AM : La masse d'air.

AM 1.5 : Spectre de la lumière solaire.

Si : Silicium.

c-Si : Silicium cristallin.

a-Si:H : silicium amorphe hydrogéné.

mc-Si : Silicium multi cristalline.

BSF : Le champ arrière (Back Surface Field).

TCO : L'oxyde transparent conducteur.

ITO : L'oxyde d'indium et d'étain .

HIT ; Heterojunction with Intrinsic Thin film.

SCAPS : Solar Cell Capacitance Simulator.

ELIS : systèmes électroniques et informatiques.

AMPS-1D : Analysis of Microelectronic and Photonic Structures .

ASDMP: AmorphousSiliconDeviceModelling Program.

ASA :AmorphousSemiconductorAnalysis.

AFORS-HET :Automat for Simulation of Heterojunction.

HJ : hétérojonction .

Résumé

Dans ce travail, nous avons étudié les cellules solaires de type hétérojonction à l'aide de programme de simulation SCAPS. Nous avons étudié l'effet des couches (la couche antireflet, la couche intrinsèque de silicium amorphe et le BSF) sur les performances des cellules solaires. Les résultats obtenus par la simulation montrent que la cellule solaire HIT de type ITO présente un rendement de 25.43% lors de l'optimisation des paramètres suivants : l'épaisseur de la couche émetteur (10 nm), l'épaisseur du substrat (300 m), l'épaisseur de la couche intrinsèque (10nm) et l'épaisseur de la couche antireflet (80nm).

Mots de clés :HIT,Silicium ,SCAPS.

Abstract

In this work, we have studied heterojunction solar cells using a SCAPS simulation program. We studied the effect of the layers (the antireflection layer, the intrinsic layer of amorphous silicon and the BSF) on the performance of solar cells. The results obtained by the simulation show that the ITO solar cell HIT has a 25.43% efficiency when optimizing the following parameters: the thickness of the emitter layer (10 nm), the thickness of the substrate (300 m), the thickness of the intrinsic layer (10 nm) and the thickness of the antireflection layer (80 nm).

ملخص

في هذا العمل، درسنا الخلايا الشمسية متغاير heterojunction باستخدام برنامج SCAPS. درسنا تأثير الطبقات (الطبقة المضادة للانعكاس الطبقة الجوهريّة من السيلكون غير المتبلور و BSF) على أداء الخلايا الشمسية. النتائج التي تم الحصول عليها من المحاكاة تبين أن الخلايا الشمسية HIT من نوع ITO/a-Si:H(n)/a-Si:H(i)/c- لديها مردودية قيمتها $\eta = 25.43\%$ التي حصلنا عليها بعد تحسين المعاملات ك: سمك الطبقة الباعثة a-Si:H(n) (10 نانومتر)، وسمك الركيزة c-Si(p) (300 م)، وسمك الطبقة الجوهريّة a-Si:H(i) (10 نانومتر) وسمك الطبقة المضادة للانعكاس (80 نانومتر).

Introduction générale

Introduction générale

L'énergie solaire photovoltaïque c'est-à-dire la génération d'électricité à partir de la lumière est la plus récente, elle a l'avantage d'être non polluante, souple et fiable. Elle se produit d'un dispositif de conversion appelé "cellule solaire" basé sur un effet dit "l'effet photovoltaïque".

Les matériaux de base utilisés pour fabriquer les cellules solaires photovoltaïques sont les semi-conducteurs qui possèdent un gap suffisamment faible pour absorber le maximum du spectre solaire. De tous les semi-conducteurs qui possèdent tel gap, le silicium est le plus prometteur car il est non-toxique et très abondant sur la terre. De plus, ce matériau étant déjà à la base de toute la technologie de l'électronique. Ce matériau a plusieurs structures : monocristallin, polycristallin ou microcristallin ainsi que amorphe. Ce dernier a la particularité de se déposer en couches minces à des températures nettement inférieures sur n'importe quel type de substrat.

Les cellules solaires font actuellement l'objet de multiples recherches dans le but de réaliser le meilleur rapport entre le rendement énergétique et le prix de revient. Ces cellules ont une structure à homojonction ou à hétérojonction. Les cellules solaires à hétérojonction (a-Si:H / c-Si) combine le haut rendement stable du silicium cristallin avec le faible prix de la technologie de dépôt du silicium amorphe hydrogéné

Ce mémoire a pour but d'étudier la cellule solaire à hétérojonction de type a-Si:H/ c-Si par le logiciel SCAPS permettant de relier les caractéristiques photovoltaïques de la cellule aux paramètres des matériaux en vue d'améliorer les performances de la cellule. Ce travail est organisé comme suit :

- Dans le premier chapitre : nous présentons une généralité sur les notions générales des cellules solaires photovoltaïques.
- Le deuxième chapitre est consacré aux cellules solaires photovoltaïques à hétérojonction à base de silicium: Silicium amorphe / Silicium cristallin.
- Dans le troisième chapitre nous présentons le logiciel SCAPS et la simulation de la structure a-Si:H / c-Si. Et enfin nous discutons les résultats obtenus.

Chapitre I :

***Généralités sur les cellules
photovoltaïques***

I.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons une généralité sur les cellules photovoltaïques. Nous décrivons le principe de fonctionnement d'une cellule solaire ainsi que les différentes filières photovoltaïques.

I.2 Conversion photovoltaïque

La conversion photovoltaïque repose sur l'effet photovoltaïque qui consiste en la transformation de l'énergie lumineuse en énergie électrique. Le préfixe Photo vient du grec « phos » qui signifie lumière. « Volt » vient du patronyme d'Alessandro Volta (1745-1827), physicien qui a contribué aux recherches sur l'électricité. Photovoltaïque (PV) signifie donc littéralement électricité lumineuse.

L'effet photovoltaïque a été mise en évidence pour la première fois en 1839 par le français *Alexandre Edmond Becquerel* (1820/1891) découvre l'effet photoélectrique. Avec son père *Antoine César Becquerel* (1788/1878), ils présentent devant l'Académie des sciences l'effet photoélectrique expérimenté avec des électrodes de platine et de cuivre plongées dans une solution électrolytique acide [1]. En 1875, *Ernst Werner Von Siemens* (1816/1892), ingénieur et industriel allemand, expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. *Albert Einstein* (1879/1955), physicien allemand, reçoit le prix Nobel de physique pour son apport à la physique théorique et particulièrement son explication de l'effet photoélectrique en 1921. En 1939, *Russel Ohl* (1898/1987), ingénieur américain, découvre la jonction p-n et ses travaux le conduisent à développer la première cellule solaire en silicium. La première photopile a été développée aux États-Unis en 1954 par les chercheurs des laboratoires Bell (*D.M. Chapin, C.S. Fuller, et G. L. Pearson*), qui ont découvert que la photosensibilité du silicium pouvait être augmentée en ajoutant des "impuretés" [2]. C'est une technique appelée le "dopage" qui est utilisée pour tous les semi-conducteurs. Leur cellule solaire a un rendement de conversion de 6 %. Cette découverte constitue pour l'industrie spatiale naissante une solution idéale pour satisfaire les besoins en électricité à bord des satellites. En fin 1958 : Une cellule avec un rendement de conversion de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.

I.3 Rayonnement solaire

Le soleil décharge continuellement une énorme quantité d'énergie radiante dans le système solaire, la terre intercepte une toute petite partie de l'énergie solaire rayonnée dans l'espace. Une moyenne de 1367 W atteint chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère terrestre (pour une distance moyenne Terre-soleil de 150 Millions de km), c'est ce que l'on appelle la constante solaire hors-atmosphère égale à 1367W/m^2 [3]. La part d'énergie reçue sur la surface de la terre dépend de l'épaisseur de l'atmosphère à traverser. Celle-ci est caractérisée par le nombre de masse d'air AM. Cette masse quantifie la puissance absorbée par l'atmosphère en fonction de l'angle θ du soleil par rapport au zénith.

$$AM = \frac{1}{\cos \theta} \quad (\text{I.1})$$

Les scientifiques ont donné un nom au spectre standard de la lumière du soleil sur la surface de la terre : AM1.5G ou AM1.5D. Le nombre "1.5" indique que le parcours de la lumière dans l'atmosphère est 1.5 fois supérieur au parcours le plus court du soleil, c'est-à-dire lorsqu'il est au zénith (correspondant à une inclinaison du soleil de 45° par rapport au zénith). Le « G » représente le rayonnement "global" incluant rayonnement direct et rayonnement diffus et la lettre « D » tient compte seulement du rayonnement direct [3].

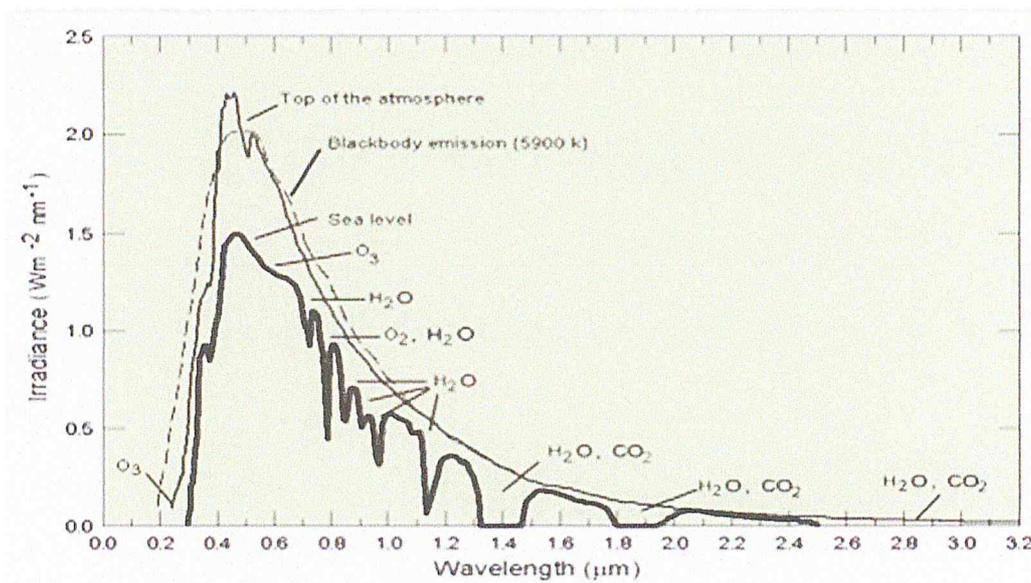


Figure I. 1 : Spectres du corps noir à la température de 5 900 K, du rayonnement solaire hors de l'atmosphère AM0 et celui au niveau de la mer AM1.5 avec les raies d'absorption de certains constituants de l'atmosphère comme la vapeur d'eau, l'oxygène et l'ozone [4]

Les spectres solaires *AM0* et *AM1.5* sont principalement utilisés pour évaluer les rendements de conversion des cellules solaires (figure I.1). *AM0* représente le spectre solaire dans l'espace (hors atmosphère) et est utilisée pour évaluer les performances des cellules solaires pour applications spatiales. Le spectre solaire *AM 1.5* représente le spectre solaire sur terre à une altitude de 0 m en plein soleil et avec un angle zénithal θ de $48,2^\circ$ (cette valeur de θ donnant $AM = 1.5$). Le rendement de conversion d'une cellule pour application terrestre est défini à 25°C et avec un spectre solaire *AM 1.5* dont la puissance incidente est de $1\,000\text{ W/m}^2$.

I. 4 matériaux semi conducteur

Un semi-conducteur est un matériau se situant entre le conducteur et l'isolant, qui a les caractéristiques électrique d'un isolant, qui présente une conductivité électrique intermédiaire entre celle des métaux et celle des isolants.

I. 4.1 Semi-conducteurs intrinsèques

Les électrons situés sur la couche la plus éloignée du noyau, qui participent aux liaisons covalentes peuvent, sous l'effet de l'agitation thermique, devenir porteur de charge. Le diagramme énergétique est constitué de deux bandes (conduction et valence) séparé par une bande interdite. Pour franchir cette bande l'électron doit acquérir de l'énergie (thermique, photon, ...) Mais le nombre d'électrons libres dans un semi-conducteur intrinsèque reste très faible. Ici le nombre de trou et d'électron est égal.

I. 4.2 Semi-conducteurs extrinsèques

Pour augmenter la conductivité des semi-conducteurs on y introduit des impuretés. Ce procédé est appelé dopage.

- **Dopage de type N :** On remplace un atome de silicium par un atome pentavalent. Quatre d'entre eux assurent les liaisons avec les atomes voisins de silicium et le cinquième resté disponible va être excité vers la bande de conduction très facilement par l'agitation thermique. D'où le nombre d'électron libre qui va fortement augmenter : dans ce cas le nombre de trou est très inférieur au nombre d'électron libre. On obtient ainsi un cristal dopé N (négatif). Les impuretés utilisées sont souvent du phosphore.

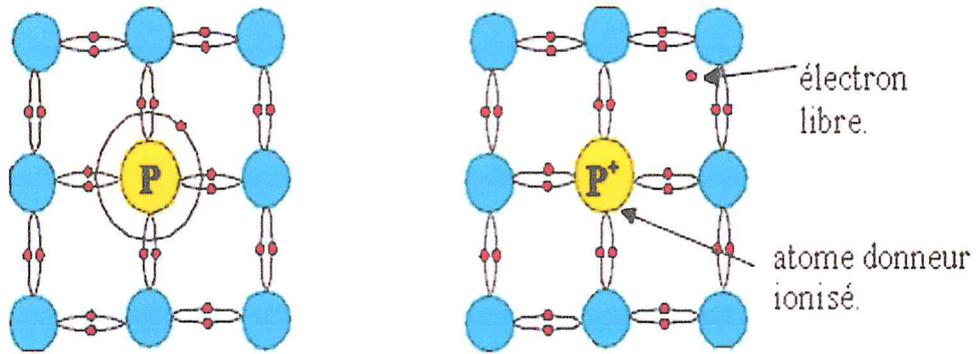


Figure I.2 : Les quatre liaisons covalentes avec un atome donneur

• **Dopage de type P** : De la même façon on introduit des atomes trivalents, ses trois électrons vont assurer les liaisons covalentes avec trois atomes voisins mais laisser un trou au quatrième. Ce trou se déplace de proche en proche dans le cristal pour créer un courant. Ici le nombre de trous est très supérieur au nombre d'électrons libres du cristal intrinsèque, on obtient donc un cristal dopé P (positif), les impuretés utilisées sont souvent du Bore.

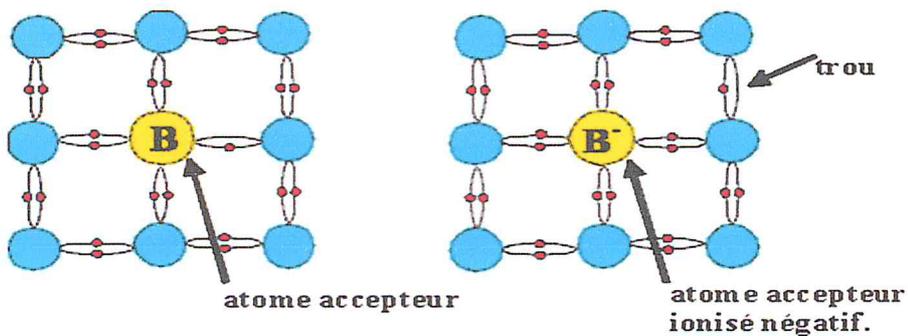


Figure I.3 : Les quatre liaisons covalentes avec un atome accepteur

I.4.3 La jonction PN

Une jonction PN est l'accolement d'une région dopée P et d'une région dopée N. Lors de cet assemblage les porteurs de charges libres s'attirent et se recombinent dans la zone de jonction où les porteurs libres disparaissent : c'est la zone de transition.

Il ne reste donc plus que les ions dans cette zone qui vont créer un champ électrique interne au niveau de la jonction et qui empêche les charges libres restantes dans chaque zone de traverser la jonction pour se recombiner.



Figure. I.4: Création de la zone de transition dans une jonction PN

I.5 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

La cellule solaire est une photodiode à jonction PN de grande surface qui génère un signal électrique sans l'aide d'une source d'énergie auxiliaire. Lorsque les photons issus du soleil frappent la cellule, certains sont réfléchis et d'autres sont transmis ou absorbés dans la cellule solaire, seuls les photons absorbés participent à l'effet photoélectrique. La conversion photovoltaïque met en jeu trois phénomènes physiques, intimement liés et simultanés :

- L'absorption de la lumière dans le matériau,
- Le transfert d'énergie des photons aux charges électriques,
- La collecte des charges.

Il est donc clair que les matériaux constituant une cellule solaire doivent avoir des propriétés optiques et électriques spécifiques pour permettre la conversion photovoltaïque. Dans le but de collecter les paires électron-trou générées, un champ électrique

permettant de dissocier les paires électrons /trou créés est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction PN. Le principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques est illustré sur la figure I.5.

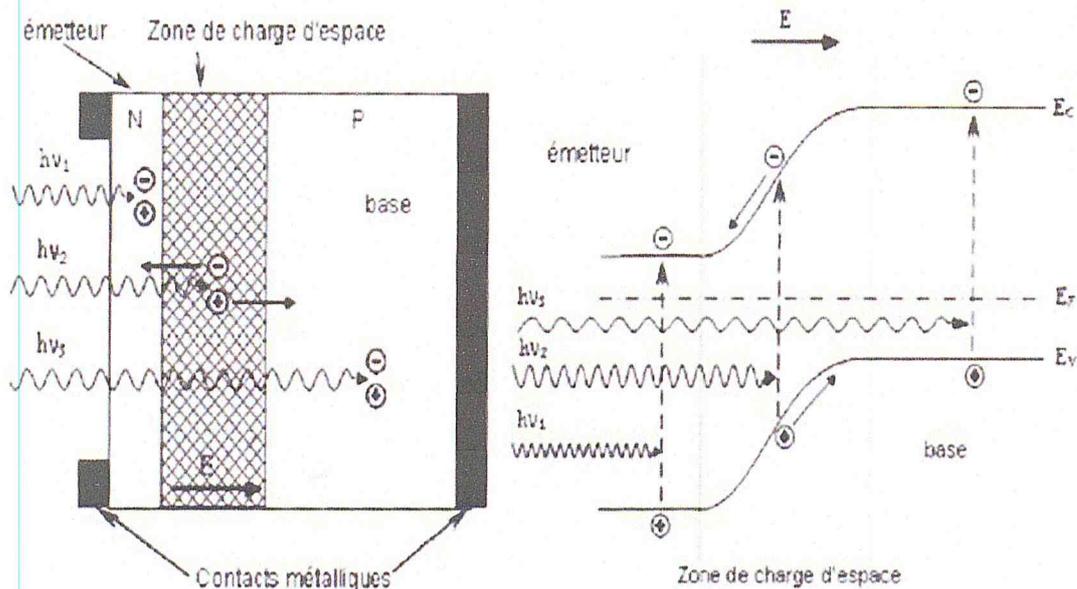


Figure I.5 : Structure (à gauche) et diagramme de bande (à droite) d'une cellule photovoltaïque [4]

Les photons incidents génèrent des paires électron-trou dans les régions de type N et P et dans la zone de charge d'espace. Les paires électron-trou générés se comportent différemment suivant la région. Dans les zones neutres N et P, les porteurs minoritaires diffusent. Ce qui atteint la zone de charge d'espace sont propulsés par le champ électrique vers la zone P (pour les trous) et vers la zone N (pour les électrons) où ils seront majoritaires. Ce transport de porteurs de charges engendre un photocourant de diffusion. Dans la zone de charge d'espace, les paires électron-trou photogénérés vont être entraînés par le champ électrique vers la région N (électrons) et la région P (trous). Ce déplacement des photoporteurs donne naissance à un photocourant de génération. Ces deux contributions ensemble ont pour résultat de donner un photocourant total I_{ph} . C'est un courant de porteurs minoritaires. Il est proportionnel à l'intensité lumineuse [5].

I.6 Paramètres caractéristiques d'une cellule photovoltaïque

Les performances d'une cellule solaire photovoltaïque consistent en différents paramètres physiques extraits des mesures de caractérisation de cette dernière par différentes méthodes, telles que les caractéristiques courant-tension ou bien le rendement quantique externe.

I.6.1 Caractéristiques courant-tension (I-V)

La cellule est caractérisée par des courbes courant-tension dans l'obscurité et sous éclairement (AM 1.5), qui suit dans le cas idéal l'équation de la diode (Figure I.6).

$$I = I_{ph} - I_0 e^{\left(\frac{qV}{KT} - 1\right)} \quad (I.2)$$

où

I_{ph} est le courant photogénéré

I_0 le courant de saturation de la diode

q la charge de l'électron

k la constante de Boltzmann

T la température en Kelvin

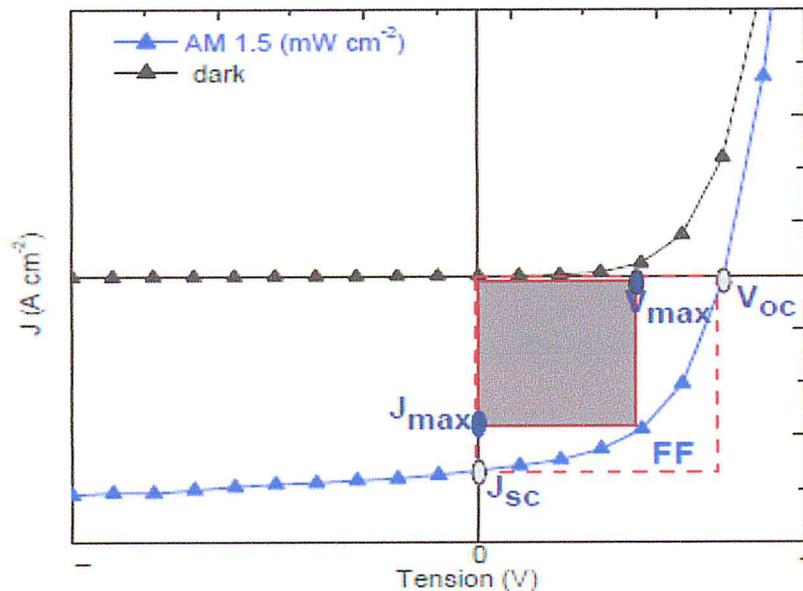


Figure I.6 : Courbe caractéristique Courant – Tension (I-V) d'une cellule solaire dans l'obscurité et sous éclairement standard AM 1.5 [6].

Dans l'obscurité aucun courant ne peut être généré par le dispositif photovoltaïque. La cellule dans le noir est seulement un redresseur de courant ou diode. Le courant photogénéré I_{ph} est dépendant du flux incident sur la cellule. Le photocourant est normalement indépendant de la tension appliquée mais pas toujours. Dans le cas idéal, le courant de court-circuit I_{cc} est égale au courant photogénéré I_{cc} et la tension de circuit ouvert V_{co} est donnée par :

$$V_{oc} = \frac{KT}{q} \ln\left(1 + \frac{I_{ph}}{I_0}\right) \quad (I.3)$$

Il existe un point sur cette courbe tel que le produit du courant et de la tension soit maximal. C'est le point de fonctionnement de la cellule. La puissance maximale de sortie de la cellule est représentée par l'aire du rectangle noir sur le graphique de la figure I.5. Le rendement de conversion est donné par l'équation.

$$\eta = \frac{V_m I_m}{P_i} = \frac{FF V_{co} I_{cc}}{P_i} \quad (I.4)$$

avec

I_m le courant au point de puissance maximale.

V_m la tension au point de puissance maximale.

P_i la puissance incidente.

Sous illumination, une cellule délivre du courant ; on peut alors déduire de la courbe courant-tension obtenue les paramètres suivants :

Le courant de court-circuit I_{cc} , qui est le point d'intersection de la caractéristique I(V) avec l'axe des ordonnées. Il caractérise le courant de sortie de la cellule si la charge à ses bornes est d'impédance nulle.

La tension de circuit ouvert V_{co} , qui est le point d'intersection de la caractéristique I(V) avec l'axe des abscisses. Elle correspond à la différence de potentiel mesurée lorsque le courant de sortie est nul.

Le facteur de forme FF, C'est le rapport entre la puissance maximale réellement délivrée par la cellule et la puissance maximale de la cellule. Ce paramètre compris entre 0 et 1, on l'exprime en % qualifie la forme plus ou moins rectangulaire de la caractéristique I(V) de la cellule solaire. Si celle-ci était carrée le facteur de forme serait égale à 1, la puissance P_m

sera égale à $(I_{cc} \times V_{co})$. Mais, généralement le facteur de forme prend des valeurs entre 0.6 et 0.85.

I.7 Les différents types de cellule photovoltaïque

Dans le photovoltaïque, il existe de nombreuses filières qui peuvent être regroupées en deux grands groupes : la filière silicium et la filière couches minces.

La filière silicium regroupe toutes les cellules à base de silicium cristallin ou multicristallin.

Elle est composée de cellules silicium à homojonctions et à hétérojonctions. Cette filière domine toujours le marché de la production des modules photovoltaïques : 90 % en 2005 et 67 % en 2008 [7].

Les substrats de silicium cristallin utilisés sont encore assez épais ($\sim 250 \mu\text{m}$) et représentent une bonne partie du coût de fabrication d'où la tendance vers l'utilisation de substrats moins épais pour baisser les coûts de fabrication. 25 % constitue le meilleur rendement obtenu en laboratoire par le professeur *Martin Green* de l'UNSW (*University of New South Wales*).

La filière couches minces Elle est composée de plusieurs branches :

- Les cellules en couches minces à base silicium amorphe. Les cellules sont soit à simple jonction p-i-n ou bien à jonctions multiples. Les épaisseurs sont de l'ordre du μm ce qui rend cette filière moins couteuse avec cependant des rendements plus faibles. Les meilleurs rendements (15 %) ont été obtenus avec des triples jonctions.
-
- Les cellules en couches minces de la famille des chalcopyrites $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ (CIGS) ou $\text{Cu}(\text{In,Ga})(\text{Se,S})_2$ (CIGSS). Des rendements de l'ordre de 20,1 % ont été obtenus avec des cellules CIGS. La rareté de l'indium et du gallium peut constituer un frein pour cette filière.
- Les cellules multi-jonctions en semi-conducteurs III-V (GaAs , AlGaAs , InGaAsP). De très bons rendements sont obtenus avec cette filière mais les coûts de fabrication sont plus élevés (bâti sous ultravide, croissance très lente). Les cellules sont destinées à des

applications spatiales. Un rendement de 32 % a été obtenu avec une triple jonction GaInP/GaAs/Ge sans concentrateur et 41 % avec concentrateur.

- Les cellules organiques qui suscitent un intérêt grandissant notamment avec un coût de fabrication potentiel très faible même si l'encapsulation pour lutter contre l'oxydation reste problématique. Elles sont encore cependant à l'état de recherche avec des rendements ne dépassant pas 5 %. Les cellules à colorants (Grätzel) sont aussi à bas coûts avec des rendements maximum de 11 % mais le vieillissement rapide de ces cellules est problématique.

A ces deux grandes filières qui occupent l'essentiel du marché photovoltaïque, nous pouvons ajouter les cellules en tellure de Cadmium (Cd étant toxique) et aussi les technologies en gestation (électrons chauds, ionisation par impact, bande intermédiaire). Ces concepts sont à l'état de recherche.

Notre travail est orienté vers la filière silicium et plus particulièrement les cellules à hétérojonctions à base de silicium cristallin.

Références

- [1] Edmond Becquerel, « Mémoire sur les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires», C.R. Acad. Sci. 9, 561 (1839).
- [2] D.M. Chapin, C.S. Fuller, and G. L. Pearson, J. Appl. Phys. **25**, 676 (1954).
- [3] Bendjellouli Zakaria, «Le Photovoltaïque fonctionnement et technologies », mémoire magistère, universite de Bechar, algérie, 2009.
- [4] Djicknoum DIOUF , «Cellules photovoltaïques silicium à hétérojonctions et à structure interdigitée en face arrière» , thèse de doctorat , université paris –sud 11,(2010) .
- [5] Henry. Mathieu, «Physique des semiconducteurs et des composants électroniques », 2^{ème} Edition, Masson, France, 1990.
- [6] HassinaDerbal-Habak, cellules solaires photovoltaïques plastiques nanostructurees. Matiere Condensee [cond-mat]. Thèse doctorat, Universite d'Angers, 2009.
- [7] Trends in photovoltaic applications 1992-2008, Technical report, IEA Photovoltaic Power Systems Programme, September 2009.

Chapitre II :

***Cellule photovoltaïque en
silicium***

II.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons la filière silicium et plus particulièrement les cellules photovoltaïques à hétérojonctions c-Si/a-Si:H en décrivant les deux matériaux utilisés (c-Si et a-Si:H) et les composants de ce type des cellules.

II.2 Propriétés Photovoltaïque de silicium

Aujourd'hui, plus de 99% des équipements photovoltaïques utilisent le silicium comme matériau de base [1], cela revient à sa abondance sur terre, et au fait qu'il n'est pas toxique et chimiquement stable dans le temps. Il possède un oxyde naturel (SiO_2) présentant d'excellentes propriétés électroniques. Il appartient à la colonne IV, troisième ligne du tableau périodique des éléments, situé respectivement entre le carbone et le germanium, et l'aluminium et le phosphore. C'est un semiconducteur avec une énergie de gap égale à 1,12 eV à 300 K dans l'état cristallin. Le silicium se présente sous différentes formes, les plus répandues étant le monocristallin le silicium multicristallin et le silicium amorphe.

- ❖ Le silicium monocristallin comporte des grains parfaitement ordonnés de taille supérieur à 10 cm [2] et permet d'obtenir des meilleurs rendements en cellules solaires [3]. La monocristallisation est élaborée par la méthode Float zone (Fz) [4] et la méthode Czochralski (Cz). Ce type de matériau, qui présente d'excellentes qualités électroniques, est très coûteux.
- ❖ le silicium polycristallin ou multi-cristallin : Il apparaît comme la juxtaposition de petits cristaux monocristallins d'orientations différentes et de dimensions du millimètre ou centimètre. Pour fabriquer ce matériau, on refond tous les déchets provenant du tirage de monocristaux, on obtient des lingots qu'il faut ensuite scier en plaquettes (wafers). Il occupe 55,9% du marché et tend à progresser.

Les rendements obtenus avec des cellules photovoltaïques à base de silicium monocristallin sont plus importantes. Mais, il faut signaler que les techniques d'élaboration utilisées pour obtenir du silicium monocristallin sont très coûteuses. Le silicium multi-cristallin a donc l'avantage d'être moins coûteux que le silicium monocristallin. Cela explique la prédominance des cellules à base de silicium multi-cristallin dans l'industrie photovoltaïque.

- ❖ Le silicium amorphe a une structure atomique désordonnée, non cristallisée, vitreuse, mais il possède un coefficient d'absorption de la lumière environ 1000 fois supérieur au silicium cristallin. Une fine couche de $0,3 \mu\text{m}$ est donc suffisante pour absorber l'essentiel du spectre visible [6]. Il est obtenu de façon simple par dépôt en phase vapeur sur des substrats économiques tels que le verre, le quartz ou l'aluminium. La décomposition en phase vapeur de silane SiH_4 à basse température (200 à 400°C) permet de déposer du silicium amorphe hydrogéné avec une vitesse avoisinant la dizaine de nanomètres par minute. Cependant, la grande densité de défauts du silicium amorphe (liaisons pendantes, états d'interface, structure multi-cristallin) limite son rendement de conversion, entre 5 et 6 % et des problèmes de stabilité apparaissent rapidement quand on l'expose au soleil et aux intempéries (quelques centaines d'heures) [7].

II.3 Cellules photovoltaïques à hétérojonctions de silicium HIT

II.3.1 Structure

La figure II.1 représente la structure conventionnelle d'une cellule silicium à hétérojonctions où les contacts sont placés sur les deux faces de la structure. Sur un substrat de silicium cristallin, sont déposées sur les deux faces de la couche de silicium amorphe hydrogéné qui vont créer des hétérojonctions entre le silicium cristallin et le silicium amorphe. La couche de a-Si:H déposée sur la face avant (face éclairée) a un dopage différent du substrat c-Si et est appelée émetteur. La couche de a-Si:H déposée sur la face arrière est du même type de dopage que le substrat et est appelée BSF (Back Surface Field). Au dessus de l'émetteur est ensuite déposé un oxyde transparent conducteur. Les contacts métalliques sont enfin placés sur les deux faces de la cellule.

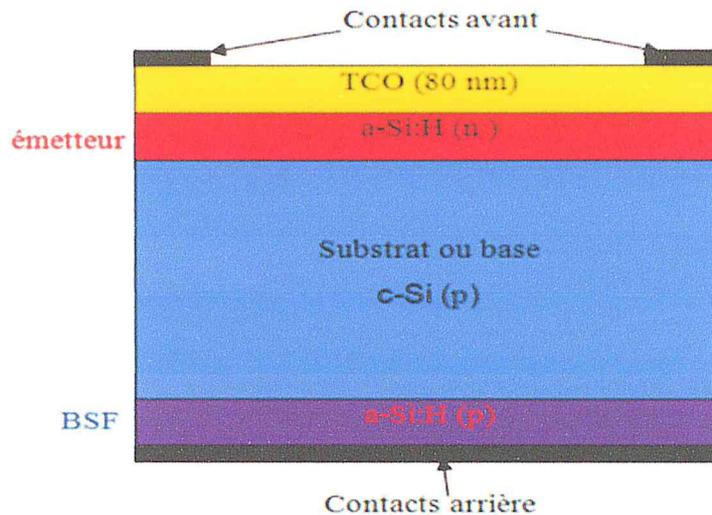


Figure II.1: Structure d'une cellule photovoltaïque à hétérojonction a-Si:H / c-Si.

II.3.2 Les composants de la cellule silicium à hétérojonctions

II.3.2.1 L'oxyde transparent conducteur

Dans la structure standard d'une cellule photovoltaïque, un oxyde transparent conducteur est placé sur la face avant (face éclairée) de la cellule. Le TCO doit avoir certaines propriétés :

- Il doit être avoir une excellente transparence optique. Etant placé sur la face avant, cette condition est nécessaire pour avoir le maximum de lumière qui pénètre dans la cellule pour générer des paires électron-trou ;
- Il doit avoir une bonne conductivité pour assurer la collecte des porteurs;
- Il doit aussi avoir une bonne adhérence sur une variété de substrats.

Les oxydes transparents conducteurs sont des matériaux à grand gap. Il existe une grande variété d'oxydes transparents conducteurs possibles. Nous avons les oxydes de zinc, les oxydes d'étain et les oxydes d'indium qui peuvent être dopés avec un grand nombre d'éléments atomiques (selon les cas : Al, In, Ga, F, Sn).

L'oxyde d'indium dopé à l'étain nommé ITO (Indium Tin Oxide) est l'oxyde transparent conducteur le plus connu et aussi le plus utilisé. L'ITO possède en effet d'excellentes propriétés : transparence supérieure à 80 % voire 90 % sur le spectre visible, résistivité faible de $10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ à $5 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ pour les meilleurs ITO mais pouvant

excéder $5 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ pour des ITO médiocres, et une très bonne adhérence sur une multitude de substrats .

II.3.2.2 L'émetteur

L'émetteur est constitué par une fine couche de silicium amorphe hydrogéné de dopage opposé au substrat ou du c-Si fortement dopé dans le cas d'une homojonction. L'émetteur permet d'avoir une jonction (p-n) afin de séparer les paires électron-trou photogénésés. Il doit être pris très mince pour minimiser l'absorption dans cette couche. Toutefois, c'est une couche qui a une résistance carrée importante d'où la nécessité de la couvrir d'un excellent conducteur (métal ou oxyde transparent conducteur) pour assurer la collecte des porteurs [9].

II.3.2.3 Le champ arrière(BSF : Back Surface Field)

Le BSF est une couche qui crée un champ électrique arrière et qui permet également de passiver la face arrière de la cellule. Le BSF est une couche fortement dopé (p+ ou n+) avec le même type de dopage que le substrat. Avec une jonction p+-p ou n+-n, une barrière de potentiel est induite par la différence de niveau de dopage entre le substrat et le BSF. Cette barrière de potentiel sur la face arrière de la structure permet de confiner les porteurs minoritaires dans le substrat et ainsi d'éviter qu'ils ne se recombinent sur la face arrière de la cellule. La structure BSF permet de réduire les recombinaisons sur la face arrière et d'assurer une meilleure collecte des porteurs majoritaires [9].

II.3.2.4 Les contacts

Les contacts métalliques sont placés sur les deux faces de la cellule pour les structures standards. Ces contacts permettent de collecter le courant photogénéré. Les contacts métalliques de type ohmique constituent un cas idéal car le maximum de courant sera collecté avec ce type de contact.

II.4 Développement et avantages de la technologie silicium à hétérojonction

Les premiers composants à base d'hétérojonctions a-Si:H/c-Si ont été réalisés par l'équipe de Walter FUHS [10]. Cette découverte fut exploitée par l'entreprise japonaise SANYO pour réaliser des cellules solaires. SANYO a commencé ces premiers travaux sur les cellules silicium à hétérojonctions a-Si:H/c-Si vers la fin des années 1980 et la première publication a été faite en 1991 [11].

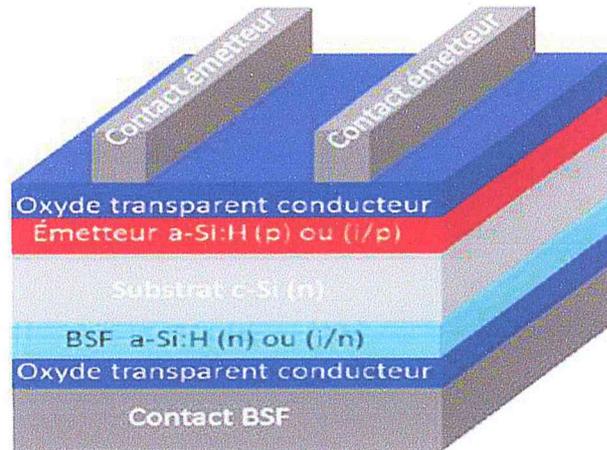


Figure II.2: Structure d'une cellule HIT.

SANYO domine actuellement le marché de la production des cellules silicium à hétérojonctions avec ses cellules HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin film) dont l'originalité est d'utiliser une couche de silicium amorphe hydrogéné intrinsèque (non dopé) entre le silicium amorphe hydrogéné dopé et le silicium cristallin (Figure II.2). Cette couche de silicium amorphe intrinsèque joue un rôle primordial dans les valeurs élevées de V_{co} obtenues avec la technologie HIT.

La technologie des cellules silicium à hétérojonctions possède plusieurs avantages :

- ❖ elle possède un grand potentiel d'amélioration du rendement avec l'optimisation du dépôt du silicium amorphe (passivation du silicium cristallin) .
- ❖ L'intégralité du procédé de fabrication est à basse température (autour de 200 °C) ce qui permet de baisser considérablement le budget thermique et aussi d'utiliser des substrats moins épais et de prévenir toute dégradation liée à la mauvaise qualité du substrat. La réduction de l'épaisseur du substrat constituant la voie privilégiée pour diminuer le coût des cellules solaires en c-Si ou mc-Si, cette technologie est mieux adaptée que la technologie silicium à homojonctions où le procédé est à haute température. D'autant plus que la réduction de l'épaisseur du substrat rend encore plus critique la passivation des surfaces.
- ❖ La technologie silicium à hétérojonctions est donc simple à mettre en œuvre et sa mise à l'échelle est facile.

II.5 Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté les propriétés photovoltaïques de silicium et les cellules photovoltaïques à hétérojonctions à de silicium de type c-Si/a-Si:H.

Références

- [1] M.A.Green, «silicon solar cells :operating principals technology and system applications» ,Sydney, Australia : centre for photovoltaic devices and systems ,UNSW,(1992),274.
- [2] B. Loic, «cellules photovoltaïques organiques souples à grandes surfaces », thèse doctorat, université Bordeaux I,(2008).
- [3]U .Gangopadhyay, S.Roy et al, «comparative simulation study between n-type and p-type silicon solar cells and the variation of efficiency of n-type solar cells by the application of passivation layer with different thickness using AFORS HET and PC1D»,IOSR journal of engineering (IOSRJEN) ISSN:2250-3021,(2012),41-48.
- [4] Keck et al., The Review of Scientific Instruments 25, 331 (1954)
- [5] J. Czochralski, Z. Physik Chem. 92, 219 (1918).
- [6]<http://membres.lycos.fr/energiesoltpe/principe.htm>
- [7] : S. Quoizola, Epitaxie en phase vapeur de silicium sur silicium mesoporeux pour report sur substrats économiques et application photovoltaïque bas coût. Thèse de doctorat. INSA de Lyon. 2003.
- [8] Colin Wood, «Polarization Effects in Semiconductors», Springer, USA, 2007.
- [9] Gilles Poulain, «Procédés laser pour la réalisation de cellules photovoltaïques en silicium à haut rendement», Thèse doctorat, l'institut national des sciences appliquées de Lyon, France, 2012.
- [10] Aouati Redha, «Etude de l'interaction électron-matière des nano structures de l'arséniure de gallium», Thèse doctorat, Université Constantine, Algérie, 2011
- [11] Djicknoum Diouf, «Cellules photovoltaïques silicium à hétérojonctions et à structure interdigitée en face arrière», thèse doctorat, Université de Paris, France, 2010.

Chapitre III :

*Simulation de la cellule
photovoltaïque à
hétérojonction de silicium
HIT*

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons la structure de la cellule solaire à hétérojonction (silicium amorphe / silicium cristallin) étudiée. Ensuite, le simulateur numérique SCAPS unidimensionnel développé par ELIS, à l'université de Gent en Belgique, est présenté et nous terminons par les résultats obtenus.

III.2 Simulation numérique de l'hétérojonction a-Si:H/c-Si

La simulation de l'hétérojonction a-Si:H/c-Si exige de disposer d'un logiciel permettant de simuler les caractéristiques électriques. Les logiciels les plus utilisés dans le domaine photovoltaïque pour la simulation numérique sont PC1D, ISE TCAD, Silvaco... Ainsi, plusieurs laboratoires ont développé leur propre logiciel:

- AMPS-1D « Analysis of Microelectronic and Photonic Structures » développé à Pennsylvania State university (USA) par l'équipe du professeur Stephen Fonash [1].
- ASPIN développé à l'université de Ljubljana (Slovénie) ASPIN développé à l'université de Ljubljana (Slovénie) [2]
- ASDMP « Amorphous Silicon Device Modelling Program » développé par le professeur Parsathi Chatterjee de l'Indian Association for Cultivation of Science (Kolkata, Inde) [3].
- ASA « Amorphous Semiconductor Analysis » développé à l'université technologique de Delft (Pays Bas) [4].
- ATLAS de Silvaco International (USA) [5].
- AFORS-HET « Automat for Simulation of Heterojunction » développé au Hahn Meitner Institute (Allemagne) [6].
- SCAPS « A Solar Cell Capacitance Simulator » unidimensionnel développé par ELIS, à l'université de Gent en Belgique [7].

III.2.1 Présentation de logiciel de simulation SCAPS

SCAPS (Solar Cell Capacitance Simulator) est un logiciel de simulation numérique des cellules solaires unidimensionnelles développé par le département des systèmes électroniques et informatiques (ELIS), à l'université de Gent en Belgique. Plusieurs chercheurs ont contribué au développement de ce logiciel : Alex Niemegeers, Marc Burgelman, Koen Decock, Johan Verschraegen, Stefaan Degraeve [8].

Ce logiciel est disponible gratuitement pour la communauté des recherches photovoltaïques (PV) (Instituts et établissements de recherche). Il fonctionne sur PC sous les systèmes d'exploitation Windows 95, 98, NT, 2000, XP, Vista, Windows 7, Windows 8 et occupe 50 MB d'espace sur le disque.

SCAPS est développé pour les cellules de la famille CuInSe₂ et CdTe. Cependant, plusieurs extensions ont amélioré ses capacités de façon à devenir applicable pour les cellules solaires cristallines (de la famille Si et GaAs), ainsi que les cellules solaires amorphes (a-Si et les micro-morphes Si). Un aperçu de ses principales caractéristiques est donné ci-dessous :

- Jusqu'à 7 couches semi-conductrices.
- Presque tous les paramètres peuvent être introduits avec des variations graduées (en dépendance de la composition et la profondeur de la cellule, ex : χ , ϵ , N_c , N_v , v_{thn} , μ_n , μ_p , N_D , N_A , tous les pièges (défauts N_t).
- Mécanismes de recombinaison : bande-à-bande (directe), Auger, SRH.
- Les niveaux des défauts : en volume ou à l'interface, en considérant leurs états de charge et la recombinaison à leurs niveaux.
- Les niveaux des défauts, type de charge : pas de charge (neutre), monovalent (un seul donneur, accepteur), divalent (double donneur, double accepteur, amphotère), multivalent (défini par l'utilisateur).
- Les niveaux des défauts, distribution énergétique : niveau discret, uniforme, Gauss, sous forme de queue ou bien une combinaison.
- Les niveaux des défauts, propriété optique : excitation directe par la lumière est possible (connu par effet de l'impureté photovoltaïque, IPV).
- Les niveaux des défauts, transitions métastables entre les niveaux.
- Contacts : travail de sortie du métal ou régime de bande plate ; propriété optique (réflexion ou transmission) du filtre.
- Tunneling, inter-bandes (dans la bande de conduction ou dans la bande de valence), tunneling à/ou à partir des états de l'interface.
- Génération : à partir d'un calcul interne ou bien d'un fichier $g(x)$ fourni par l'utilisateur.
- Illumination : plusieurs types de spectre sont disponibles (AM0, AM1.5D, AM1.5G, AM1.5G édition 2, Monochromatique, Blanc, etc.).
- Illumination: du côté p ou n.

III.2.1 Présentation de logiciel de simulation SCAPS

SCAPS (Solar Cell Capacitance Simulator) est un logiciel de simulation numérique des cellules solaires unidimensionnelles développé par le département des systèmes électroniques et informatiques (ELIS), à l'université de Gent en Belgique. Plusieurs chercheurs ont contribué au développement de ce logiciel : Alex Niemegeers, Marc Burgelman, Koen Decock, Johan Verschraegen, Stefaan Degraeve[8].

Ce logiciel est disponible gratuitement pour la communauté des recherches photovoltaïques (PV) (Instituts et établissements de recherche). Il fonctionne sur PC sous les systèmes d'exploitation Windows 95, 98, NT, 2000, XP, Vista, Windows 7, Windows 8 et occupe 50 MB d'espace sur le disque.

SCAPS est développé pour les cellules de la famille CuInSe_2 et CdTe . Cependant, plusieurs extensions ont amélioré ses capacités de façon à devenir applicable pour les cellules solaires cristallines (de la famille Si et GaAs), ainsi que les cellules solaires amorphes (a-Si et les micro-morphes Si). Un aperçu de ses principales caractéristiques est donné ci-dessous :

- Jusqu'à 7 couches semi-conductrices.
- Presque tous les paramètres peuvent être introduits avec des variations graduées (en dépendance de la composition et la profondeur de la cellule, ex : χ , ϵ , N_c , N_v , v_{thn} , μ_n , μ_p , N_D , N_A , tous les pièges (défauts N_t).
- Mécanismes de recombinaison : bande-à-bande (directe), Auger, SRH.
- Les niveaux des défauts : en volume ou à l'interface, en considérant leurs états de charge et la recombinaison à leurs niveaux.
- Les niveaux des défauts, type de charge : pas de charge (neutre), monovalent (un seul donneur, accepteur), divalent (double donneur, double accepteur, amphotère), multivalent (défini par l'utilisateur).
- Les niveaux des défauts, distribution énergétique : niveau discret, uniforme, Gauss, sous forme de queue ou bien une combinaison.
- Les niveaux des défauts, propriété optique : excitation directe par la lumière est possible (connu par effet de l'impureté photovoltaïque, IPV).
- Les niveaux des défauts, transitions métastables entre les niveaux.
- Contacts : travail de sortie du métal ou régime de bande plate ; propriété optique (réflexion ou transmission) du filtre.

- Tunneling, inter-bandes (dans la bande de conduction ou dans la bande de valence), tunneling à/ou à partir des états de l'interface.
- Génération : à partir d'un calcul interne ou bien d'un fichier $g(x)$ fourni par l'utilisateur.
- Illumination : plusieurs types de spectre sont disponibles (AM0, AM1.5D, AM1.5G, AM1.5G édition 2, Monochromatique, Blanc, etc.).
- Illumination: du côté p ou n.

III.2.2 Notions de base

SCAPS s'ouvre avec l'icone 'Action Panel'. La fenêtrer qui s'ouvre est présentée dans la figure III.1.

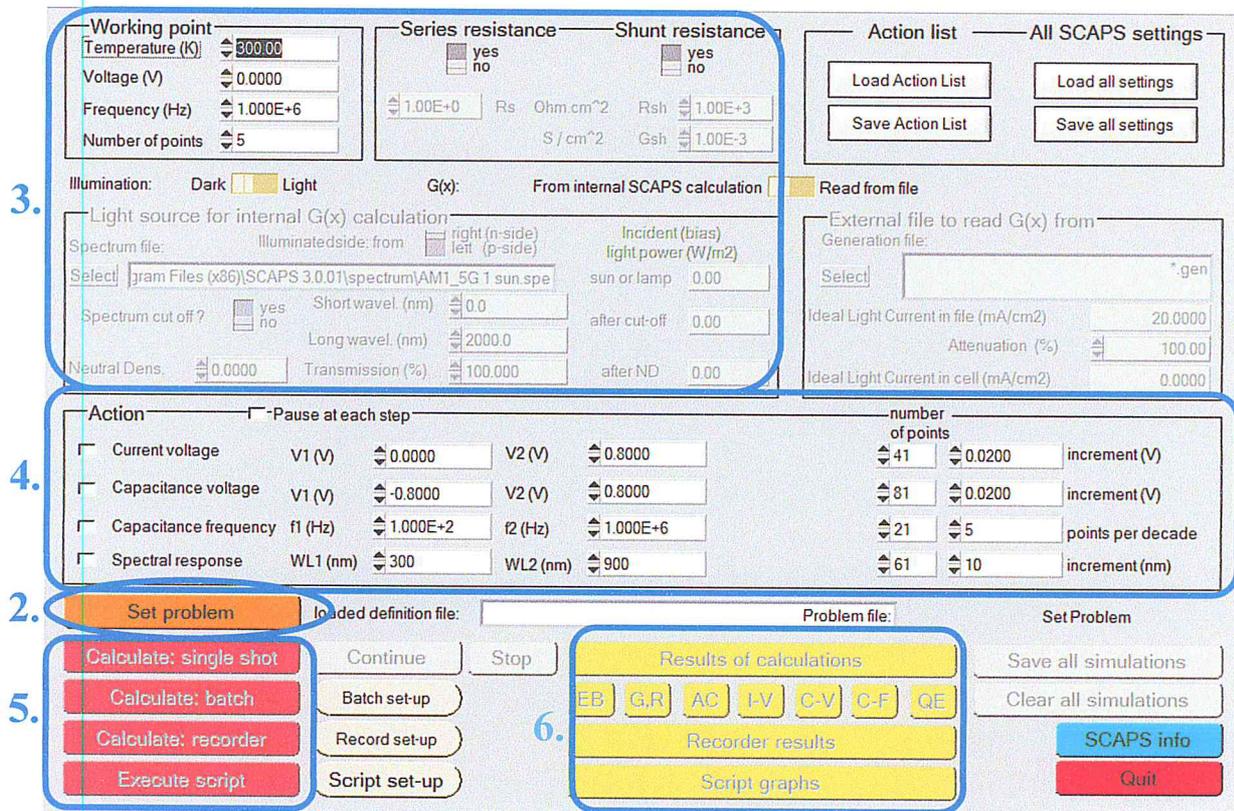


Figure III.1 : Panneau de démarrage de SCAPS, le panneau d'action ou principal.

La signification des blocs est expliquée comme suivant:

1. Lancer SCAPS.
2. Définir le problème, ainsi que la géométrie, les matériaux et toutes les propriétés de la cellule solaire étudiée.

3. Indiquer les circonstances dans lesquelles la simulation est effectuée (spécifier le point de fonctionnement).
4. Indiquer la mesure (la caractéristique) à simuler.
5. Commencer le calcul.
6. Afficher les courbes de simulation.

III.2.2.1 Lancer SCAPS

On clique sur l'icône « SCAPS » sur le bureau, ou bien double-clique sur le fichier SCAPS3200.EXE dans le gestionnaire de fichiers (ou dans n'importe quelle autre version de SCAPS). SCAPS s'ouvre avec le panneau d'action.

III.2.2.2 Définir le problème

On clique sur le bouton SET PROBLEM dans le panneau d'action, et on choisit LOAD dans le coin droit en bas du panneau qui s'ouvre par la suite. On sélectionne et on ouvre (par exemple NUMOS CIGS Baseline.def. Ceci est un fichier exemple d'une cellule solaire à base de CIGS. Par la suite, il est possible de modifier toutes les propriétés de la cellule en cliquant sur 'SET PROBLEM' dans le panneau d'action.

III.2.2.3 Définir le point de fonctionnement

Le point de fonctionnement spécifie les paramètres qui ne sont pas variables dans les mesures de la simulation, et qui sont relatifs à l'opération de mesure. On trouve la température T , le voltage V de la polarisation, la fréquence f_{et} d'illumination (l'obscurité ou la lumière).

III.2.2.4 Sélection des caractéristiques à simuler

Dans la partie Action, on peut choisir un ou plusieurs mesures à simuler: I-V, C-V, C-fet QE (λ). On peut ajuster également, les valeurs initiales et finales de l'argument, ainsi que le nombre des étapes.

III.2.2.5 Commencer le calcul

A- Afficher les courbes simulées

Après les calculs, SCAPS passe au panneau de bande d'énergie, présenté dans la figure III.2. On peut voir les diagrammes de bandes, les densités des porteurs libres et la densité du courant. On peut faire apparaître les résultats par les commandes SAVE GRAPHS,

SHOW, et les valeurs s'affichent par la suite à l'écran. Il est possible de faire du Couper & Coller vers, par ex., Excel, ou sauvegarder les valeurs dans un fichier de données.

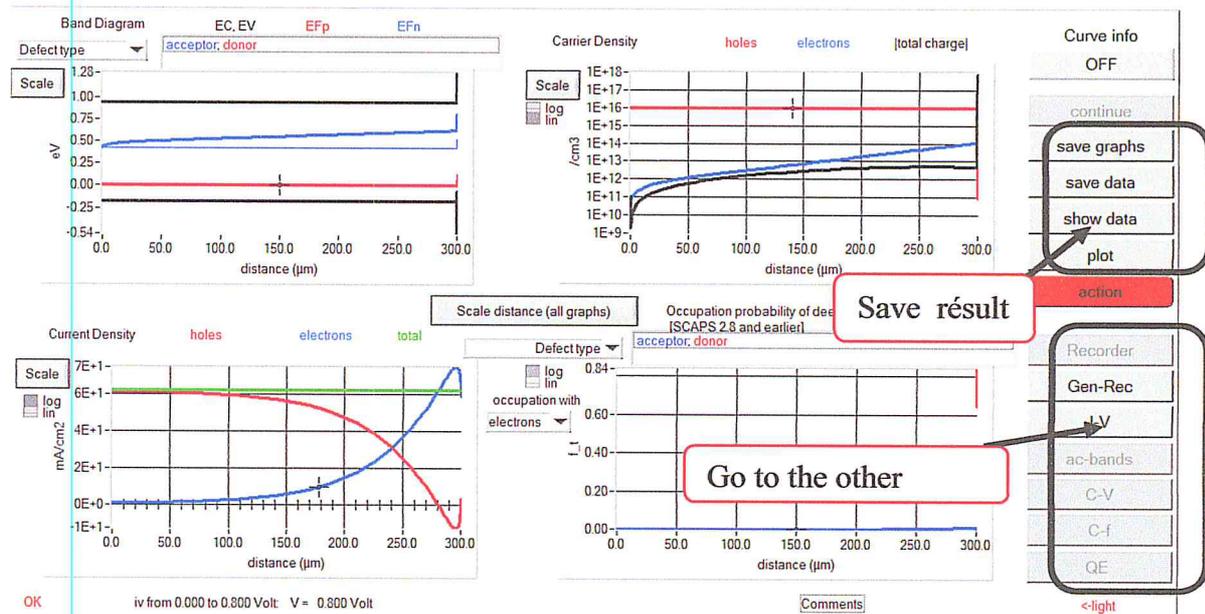


Figure III.2 : Panneau des bandes d'énergie.

B- Les courbes I-V

La figure III.3 montre le panneau d'affichage des courbes I-V à l'obscurité et sous éclairage. Les courbes des taux de recombinaison sont affichées seulement pour la dernière simulation. La couleur de la légende correspond à la couleur de la courbe. Si CURVE INFO est sur ON et si on clique sur une courbe du graphe, un panneau pop-up apparaîtra, avec des informations concernant le graphe, la courbe ainsi que le point cliqué. Le bouton SCALE aide à changer la gamme et l'échelle des axes.

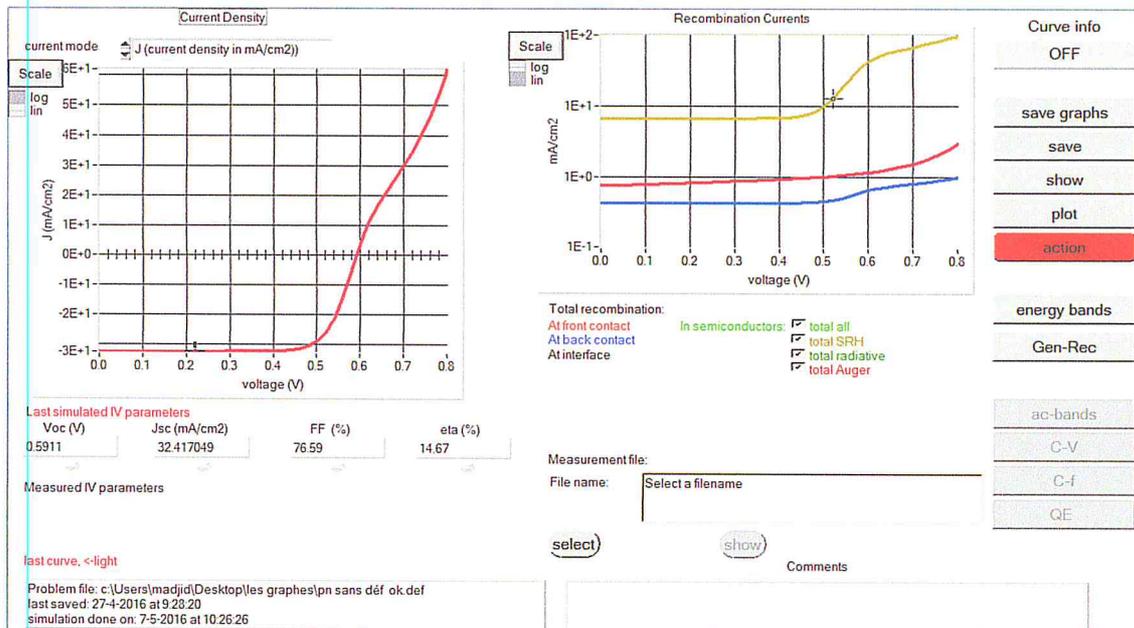


Figure III.3 : Panneau d'affichage des courbes I-V à l'obscurité et en éclaircissement.

III.2.3 Définition des différents matériaux d'une cellule à hétérojonctions de silicium amorphe/ silicium cristallin

La méthode recommandée pour introduire une cellule solaire est d'utiliser l'interface graphique du programme. De cette façon on peut introduire interactivement tous les paramètres qui seront contrôlés par SCAPS de manière à ne pas obtenir des valeurs impossibles ou incohérentes.

III.2.3.1 Edition de la structure d'une cellule solaire

Quand on clique sur le bouton 'SET PROBLEM' sur le panneau d'action, le panneau 'SOLAR CELL DEFINITION' s'affichera. Ce dernier permettra de créer ou de modifier les structures des cellules solaires et de les enregistrer, ou bien de les charger à partir d'autres fichiers. Ces fichiers de définition sont des fichiers standards ASCII (American Standard Code for Information Interchange) d'extension *.def* qui peuvent s'ouvrir avec Notepad.exe ou Wordbad.exe. Les propriétés des couches, contacts et de l'interface peuvent être modifiées en cliquant sur le bouton approprié. De la même manière, des couches peuvent être rajoutées en cliquant 'ADD LAYER'.

III.2.3.2 Contacts

Les propriétés des contacts peuvent être introduits soit en cliquant sur le bouton du contact avant ou celui du contact arrière sur le panneau de définition de la cellule. Un panneau des propriétés de contact 'CONTACT PROPERTIES PANEL' s'ouvre. Les propriétés des contacts, se divisent en propriétés électriques et optiques. Dans les propriétés électriques, on définit :

- Les vitesses de recombinaison surfaciques des électrons et des trous libres.
- Si le contact a un travail de sortie, ou il est idéal (régime de bande plates).
- La barrière des porteurs majoritaires.
- L'effet tunnel (si on veut en tenir compte).

Pour les propriétés optiques, on peut définir la transmission ou la réflexion, par une valeur ou un fichier de données dans le SCAPS.

III.2.3.3 Définition des couches

En cliquant sur le bouton « add layer », une fenêtre s'ouvre qui contient les différents paramètres du matériau à introduire. Ces paramètres peuvent avoir des distributions uniformes ou non uniformes, selon la physique du matériau. Dans la première case, on introduit le nom de la couche (qui correspond au type du dopage). Dans la deuxième case, l'épaisseur de la couche est introduite. Le troisième block, concerne la pureté du matériau et son profile. Dans le quatrième block, on introduit : le gap d'énergie, l'affinité électronique, la permittivité diélectrique, les densités effectives des bandes de conduction et de valence, les vitesses thermiques des électrons et des trous libres, les mobilités des électrons et des trous. Finalement, une case, qui permet d'ajouter les masses effectives des électrons et des trous si on tient compte du transport des porteurs par effet tunnel. Si le matériau est un composé d'éléments avec des concentrations non uniforme, on peut introduire des variations graduelles des précédents paramètres. Dans le cinquième block, on introduit le dopage (uniforme ou des variations graduelles).

L'absorption de la couche peut être définie par le modèle analytique fourni par SCAPS, comme elle peut être introduite sous forme de données. SCAPS fournit un nombre de données de l'absorption pour plusieurs types de semi-conducteurs. On peut également utiliser d'autres données de l'absorption pour des semi-conducteurs non disponibles dans SCAPS, à condition que le fichier ait la même extension des fichiers de l'absorption fournis par SCAPS. Le type des recombinaisons en volume présent est indiqué dans le côté droit du panneau des

propriétés de la couche. Tous les types des recombinaisons sont présents ; directs ou à travers les pièges. Si on introduit les défauts (pièges) ; ils peuvent être uniformes ou non uniformes, discrets, avec des distributions gaussiennes, donneurs, accepteurs, neutres, monovalents ou divalents. On peut même définir des transitions de porteurs entre les différents niveaux d'énergie des pièges.

III.3 Etude de l'hétérojonction a-Si:H (n)/c-Si (p)

III.3.1 Structure simulée a-Si:H(n)/c-si(p)

La figure III.4 représente la structure d'une cellule photovoltaïque à simple hétérojonction HJ : TCO/a-Si:H(n)/c-si(p). Sur un substrat du silicium cristallin c-Si de type p avec une épaisseur de 300 μm , est placé un émetteur de silicium amorphe de type n-a-Si:H(n) de 10 nm. Cette structure a été simulée en introduisant les paramètres pour les couches de silicium cristallin et de silicium amorphe dopé p dans le logiciel SCAPS. Une couche antireflet (TCO) de 80 nm reproduisant les propriétés optiques de ITO (d'oxyde d'indium et d'étain) est déposée sur la face avant au dessus de la couche de silicium amorphe a-Si:H(n). Les contacts ohmiques sont placés aussi bien sur la face avant que sur la face arrière.

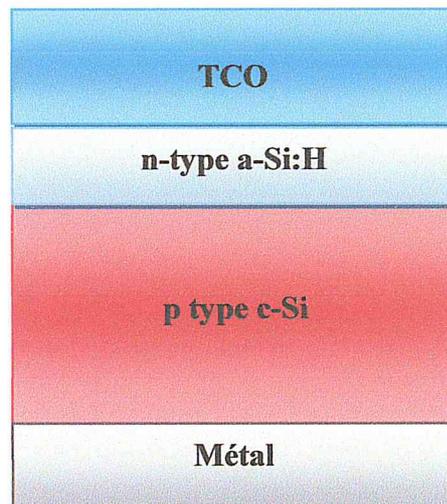


Figure III.4: Structure d'une cellule photovoltaïque à simple hétérojonction HJ : TCO/a-Si:H(n)/c-si(p).

III.3.2 Paramètres de la structure simulée

Pour simuler le fonctionnement de la structure HJ de type TCO/a-Si:H(n)/c-Si(p), il faut préciser les paramètres d'entrée de cette structure tel que les épaisseurs, le dopage des deux régions p et n, le gap d'énergie du Si, les densités effectives des électrons et des trous, la température ambiante (300 K), les mobilités des électrons et des trous, les vitesses thermiques des électrons et des trous, ainsi que les conditions aux limites et le spectre du soleil. Le spectre solaire utilisé pour l'éclairage est l'AM1.5G (100 Mw/cm², 300K). Les propriétés optiques du semi conducteur sont prises en compte en introduisant un fichier texte data dans SCAPS.

Les paramètres utilisés pour simuler la cellule à hétérojonction a-Si:H/c-Si sont présentés dans le tableau III.1. Les contacts métalliques sont pris sur deux faces de la cellule. Nous savons que les contacts peuvent être à l'origine de pertes résistives. On considère que les contacts sont parfaits : conditions de bandes plates, pas de résistances de contacts, les deux surfaces sont entièrement couvertes par le métal. Le choix de nos paramètres repose sur les données générales que l'on peut trouver dans la référence [9].

Paramètres	a-Si :H(p ⁺)	a-Si :H(i)	a-Si :H(n)	c-Si(p)	ITO
Epaisseur (nm)	10	3	10	300μm	80
Constante diélectrique	11.9	11.9	11.9	11.9	-
Affinité électronique (eV)	3.9	3.9	3.9	4.05	4.5
Energie de gap (eV)	1.72	1.72	1.72	1.12	3.7
Densité de la bande de conduction (cm ⁻³)	1.10 ¹⁹	1.10 ¹⁹	1.10 ¹⁹	2.810 ¹⁹	3.0 10 ¹⁸
Densité de la bande de valence (cm ⁻³)	1.10 ¹⁹	1.10 ¹⁹	1.10 ¹⁹	2.8 10 ¹⁹	1.16 10 ¹⁹
Mobilité d'électron (cm ² /Vs)	7	7	7	1140	60
Mobilité du trou (cm ² /Vs)	1	1	1	420	20
Accepteur (cm ⁻³)	8.2 10 ¹⁹	0	0	1.5 10 ¹⁶	-
Donneur (cm ⁻³)	0	0	5.0 10 ¹⁹	0	1.0 10 ¹⁹
Vitesse thermique des électrons (cm/s)	1.10 ⁷	1.10 ⁷	1.10 ⁷	1.10 ⁷	-
Vitesse thermique des trous (cm/s)	1.10 ⁷	1.10 ⁷	1.10 ⁷	1.10 ⁷	-

Tableau III.1: Principaux paramètres de simulation de la structure de la cellule photovoltaïque à hétérojonction HIT [9].

III.4 La caractéristiques J(V) de la cellule simulée

III.4.1 L'effet de la couche ITO sur la cellule solaire HJ

Nous allons étudier dans cette partie l'effet de l'introduction de la couche ITO sur les caractéristiques de sortie de la cellule à hétérojonctions HJ a-Si:H(n)/c-Si(p). La figure III.5 représente la structure HJ d'une hétérojonction a-Si:H(n)/c-Si(p) sans la couche ITO « a-Si:H(n)/c-Si(p) » et avec la couche ITO « ITO/ a-Si:H(n)/c-Si(p) ».

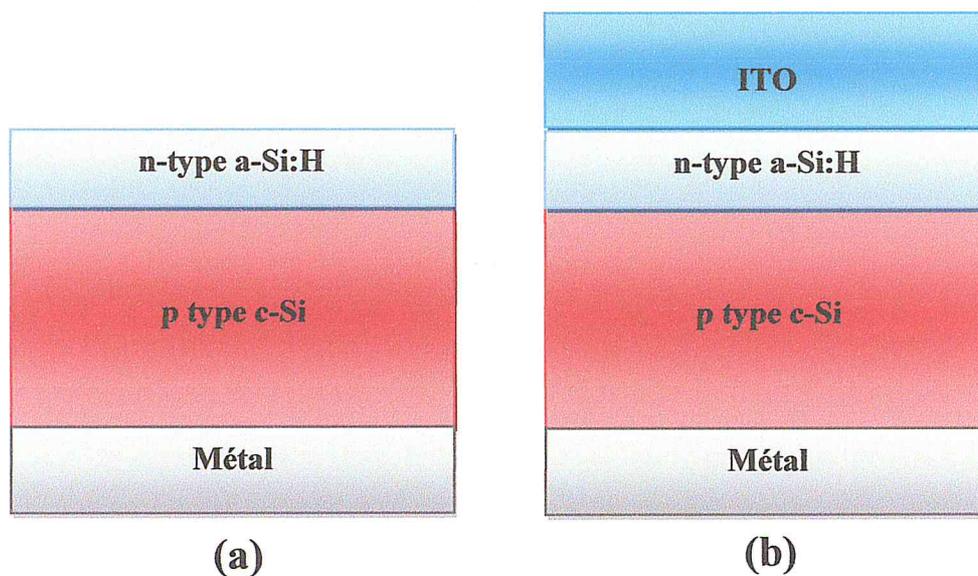


Figure III.5: Structure HJ d'une hétérojonction a-Si:H(n)/c-Si(p): (a) sans couche ITO: a-Si:H(n)/c-Si(p); (b) avec couche ITO: ITO/ a-Si:H(n)/c-Si(p).

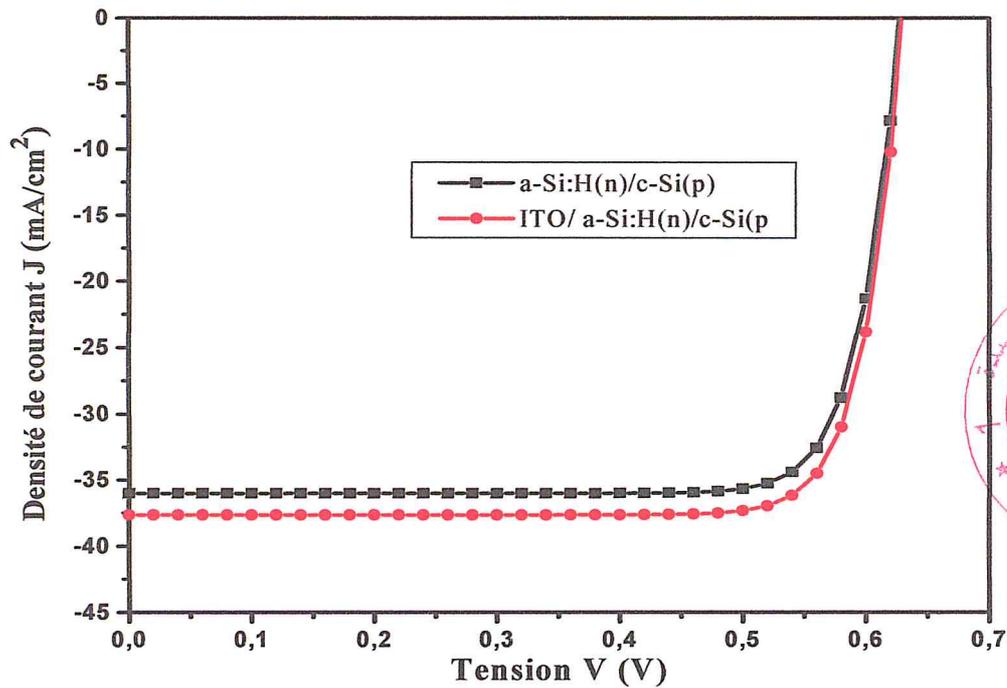


Figure III.5 : Caractéristique $J(V)$ de la cellule de référence HJ : sans couche ITO « $a\text{-Si:H}(n)/c\text{-Si}(p)$ » et avec couche ITO « $\text{ITO}/a\text{-Si:H}(n)/c\text{-Si}(p)$ ».

La figure III.5 représente la caractéristique de courant-tension $J(V)$ de la cellule HJ : sans ITO « $a\text{-Si:H}(n)/c\text{-Si}(p)$ » et avec ITO « $\text{ITO}/a\text{-Si:H}(n)/c\text{-Si}(p)$ ». Pour cette cellule en utilisant les paramètres du tableau III.1, les performances obtenues (tension de circuit ouvert, densité de courant, facteur de forme et rendement) sont regroupées dans le tableau III.2.

Structure	V_{co} (mV)	J_{cc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
HJ (sans ITO)	628,49	36,00	82,03	18,56
HJ(avec ITO)	629,89	37.64	82.37	19.53
HJ [31]	630.6	37.28	82.48	19.39

Tableau III.2 : Paramètres éclectiques de la cellule HJ avec et sans couche ITO. Cellule de référence [31].

Le tableau III.2 montre que tous les paramètres (le rendement η , la densité de courant de court-circuit J_{cc} et la tension de circuit ouvert V_{oc}) augmentent pour la cellule HJ de type $ITO/a-Si:H(n)/c-Si(p)$. On observe que les résultats obtenus se rapprochent de ceux obtenus par N. Dwivedi et al. [31]. L'amélioration du rendement (19.53 %) correspond à l'augmentation de J_{cc} par l'introduction de la couche ITO. Cette couche d'ITO constitue une couche antireflet pour certaines longueurs d'onde, augmentant l'intensité transmise à la couche active. Elle permet de réduire les coefficients de réflexion à l'interface $ITO/a-Si:H(n)$.

III.4.2 L'effet de la couche intrinsèque de silicium amorphe

Nous avons effectué des simulations de la cellule à hétérojonction HJ en introduisant une fine couche (10 nm) de silicium amorphe intrinsèque $a-Si:H(i)$. La structure HIT de la cellule à hétérojonctions de silicium de type $ITO/a-Si:H(n)/a-Si:H(i)/c-Si(p)$ est représentée sur la figure III.6.

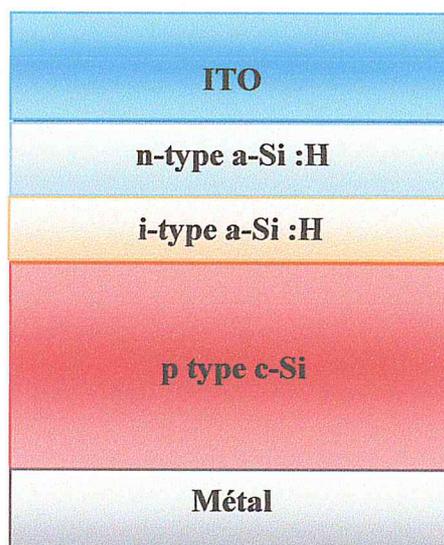


Figure III.6: Structure HIT d'une hétérojonction $ITO/a-Si:H(n)/a-Si:H(i)/c-Si(p)$.

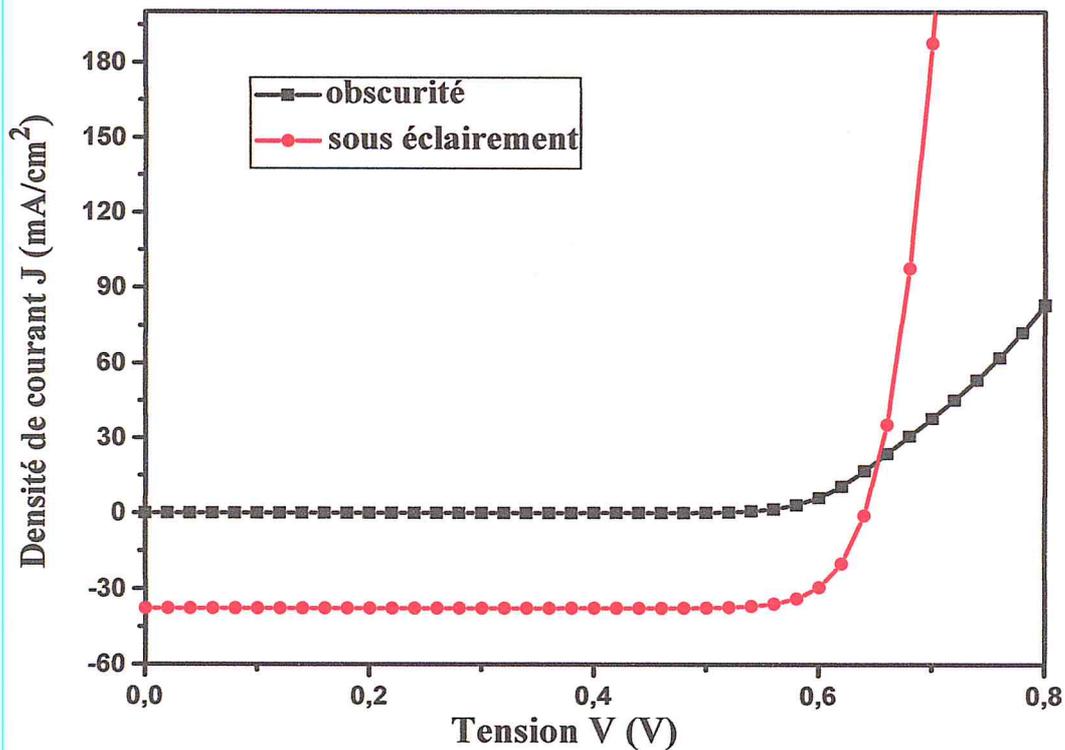


Figure III.7 : Caractéristique $J(V)$ en l'obscurité et sous éclairage de la cellule photovoltaïque à hétérojonction ITO /a-Si:H(n)/a-Si :H(i)/c-Si(p).

La figure III.7 représente la caractéristique $J(V)$ en l'obscurité et sous éclairage de la cellule photovoltaïque à hétérojonction ITO/a-Si:H(n)/a-Si:H(i)/c-Si(p). Le tableau III.3 présente les valeurs de tension en circuit ouvert V_{co} , densité de courant de court-circuit J_{cc} , facteur de forme FF et rendement η de la cellule HIT avec et sans la couche intrinsèque a-Si:H(i).

Structures	$V_{co}(mv)$	$J_{cc}(mA/cm^2)$	FF (%)	$\eta(\%)$
HJ	629,89	37.64	82.37	19.53
HIT	640.59	37.68	83.21	20.08

Tableau III.3: Paramètres électiques de la cellule HIT avec et sans la couche intrinsèque.

Dans le tableau III.3, nous remarquons une amélioration apportée par la couche intrinsèque de silicium amorphe a-Si:H(i). On observe que la tension en circuit ouvert augmente de 629,89% à 640.59%. Cette augmentation est due à la réduction du nombre de recombinaisons à l'interface et le courant de fuite est aussi réduit. Par conséquent, le rendement de la cellule HIT augmente de 19,53% à 20,08%.

II.4.3 L'effet du champ arrière (Back Surface Field : BSF)

La figure III.8 représente la structure de la cellule de silicium à hétérojonction de type HJBSF « ITO/a-Si:H(n)/c-Si(p)/a-Si:H(p+) » et HITBSF « ITO/a-Si:H(n)/a-Si:H(i)/c-Si(p)/a-Si:H(p+) ». En face arrière de la cellule solaire, nous retrouvons la couche a-Si:H dopée (P+) afin de former le champ arrière BSF. Nous avons réalisé la simulation de la cellule solaire ITO/a-Si:H(n)/a-Si:H(i)/c-Si(p)/a-Si:H(p+)BSF afin d'analyser l'influence du BSF sur les caractéristiques de la cellule solaire HIT. Les paramètres du BSF sont regroupés dans le tableau III.1.

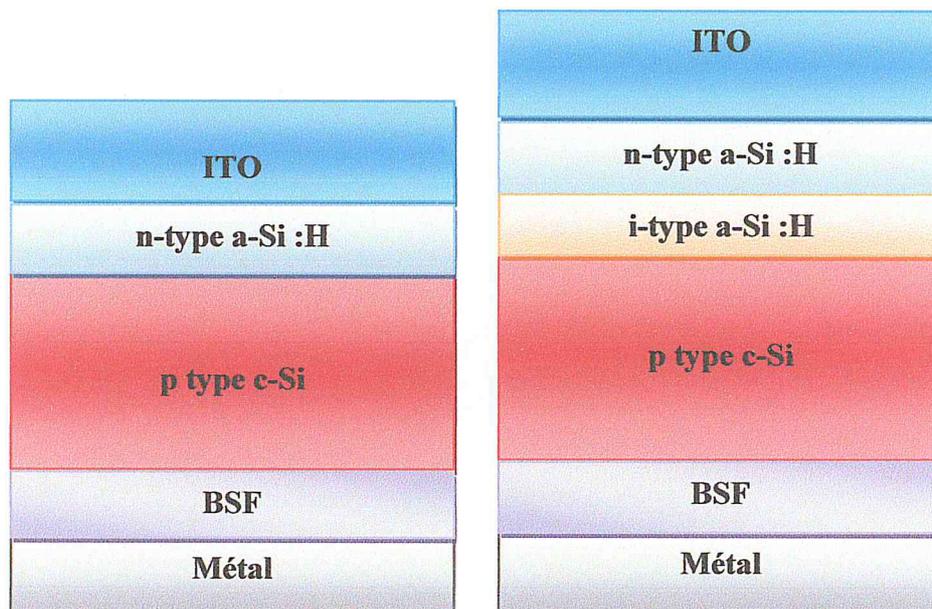


Figure III.8: Structure de l'hétérojonction de type: HJBSF « ITO/a-Si:H(n)/c-Si(p)/a-Si:H(p+) » et HITBSF « ITO/a-Si:H(n)/a-Si:H(i)/c-Si(p)/a-Si:H(p+) ».

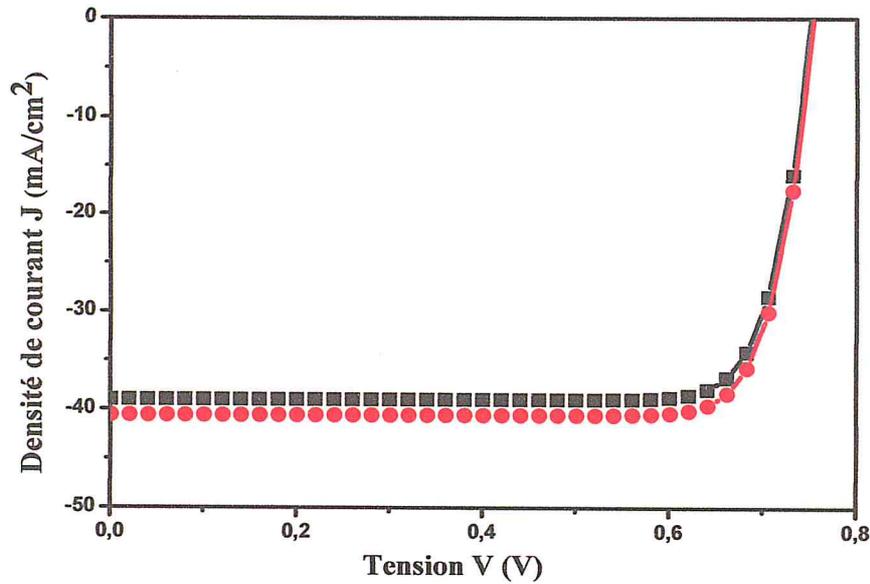


Figure III.9 : Caractéristique $J(V)$ sous éclairement pour deux types de cellules avec lacouche BSF : HJBSF «ITO/a-Si:H(n)/ c-Si(p)/ a-Si:H(p+) »et HITBSF «ITO/a-Si:H(n)/a-Si:H(i)/c-Si(p)/ a-Si:H(p+)».

La figure III.9 représente la caractéristique $J(V)$ sous éclairement pour deux types de cellules avec lacouche BSF : HJBSF «ITO/a-Si:H(n)/ c-Si(p)/ a-Si:H(p+) »et HITBSF «ITO/a-Si:H(n)/a-Si:H(i)/c-Si(p)/ a-Si:H(p+) ». L'introduction de la couche BSF donne une amélioration importante de tous les paramètres des cellules HJ et HIT (tableau III.4).

Structures	V_{co} (mV)	J_{cc} (mA/cm ²)	FF(%)	η (%)
HJ	629,89	37.64	82.37	19.53
HIT	640.59	37.68	83.21	20.08
HJBSF	753.65	39.03	83.01	24.41
HITBSF	754.67	40.63	82.94	25.43

Tableau III.4: Paramètres électiques des cellules HJ et HIT avec et sans la couche BSF.

III.6 Conclusion

La simulation numérique a été utilisée dans ce travail afin de déterminer les paramètres les plus importants pour le fonctionnement des cellules solaires à hétérojonction de silicium HIT et d'optimiser les paramètres physiques de la cellule en vue d'obtenir un bon rendement.

Références

- [1] AMPS-1D « Analysis of Microelectronic and Photonic Structures » développé à Pennsylvania State university (USA) par l'équipe du professeur Stephen Fonash [AMPS-1D web site, Pennsylvania State University, <http://psu.edu/dept/AMPS>].
- [2] ASPIN développé à l'université de Ljubljana (Slovénie) [F. Smole, M. Topi and J. Furlan, J. Non-Cryst. Solids **194**, 312 (1996).22.
- [3] ASDMP Parsathi Chatterjee , « Amorphous Silicon Device Modelling Program » ,développé à l'Indian Association for Cultivation of Science (Kolkata, Inde) [P. Chatterjee, J. Appl. Phys. **76**, 1301 (1994).
- [4] ASA <http://www.ewi.tudelft.nl/en/the-faculty/departments/electrical-sustainable-energy/photovoltaic-materials-and-devices/software-platform/asa-software/concept/>
- [5] ATLAS de Silvaco International (USA) [25Manuel d'utilisation de Silvaco, version 5.12.1.R.
- [6] AFORS-HET https://www.helmholtz-berlin.de/forschung/oe/ee/si-pv/projekte/asicsi/afors-het/index_en.html
- [7] SCAPS « A Solar Cell Capacitance Simulator » unidimensionnel développé par ELIS, à l'université de Gent en Belgique[Manuel <http://scaps.elis.ugent.be/>].
- [8] A. Niemegeers, M. Burgelman, Numerical modelling of ac-characteristics of CdTe and CIS solarcells, Proceedings of the 25th IEEE Photovoltaic Specialists Conference Washington DC, 1996, pp.901-904. M. Burgelman, P. Nollet, S. Degrave, Modelling polycrystalline semiconductor solar cells, Thin Solid. Films, 361 (2000) 527-532.
- [9] Neeraj Dwivedi, Sushil Kumar, Atul Bisht, Kamlesh Patel, S. Sudhakar. Solar Energy 88 (2013) 31–41.

Conclusion Générale

Conclusion générale

L'objectif de ce travail est d'étudier l'influence des différentes couches constituant la cellule solaire photovoltaïque à hétérojonction a-Si:H(n)/c-Si(p) (couche antireflet ITO, la couche intrinsèque en a-Si:H(i) et le champ arrière BSF : Back Surface Field) sur les paramètres éclectiques (La tension de circuit ouvert V_{co} , la densité de courant de court-circuit J_{cc} , le facteur de forme FF et le rendement de conversion η) en utilisant le logiciel SCAPS. Les résultats obtenus montrent que :

- les paramètres (le rendement η , la densité de courant de court-circuit J_{cc} et la tension de circuit ouvert V_{co}) augmentent par l'introduction de la couche antireflet ITO dans la cellule HIT .
- une amélioration apportée par la couche intrinsèque où les valeurs de tension en circuit ouvert V_{co} , la densité de courant de court-circuit, facteur de forme FF augmentent et aussi le rendement de la cellule HIT augmente de 19,53% à 20,08%.
- L'introduction de la couche du champ arrière (BSF) donne une amélioration importante de tous les paramètres des cellules HJ et HIT.

Enfin, Les paramètres électroniques ont été améliorés de sorte d'obtenir un rendement de 25.43% sur la cellule photovoltaïque à hétérojonction HIT après l'introduction de la couche BSF.

