



**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem

Faculté Des Sciences Exactes et de l'Informatique

Domaine des Sciences de la Matière

Département de physique

Projet de Fin d'Etudes

Pour obtenir le diplôme de Master en Physique

Option : Modélisation et Caractérisation des Matériaux

Présenté par :

BELGHOUL Hanifa

Sujet :

**EFFET DE L'ÉPAISSEUR DE LA COUCHE FENÊTRE SUR
LES CARACTÉRISTIQUES D'UNE CELLULE
PHOTOVOLTAÏQUE A HÉTÉROJONCTION.**

Soutenue le : 23/05/2017

Devant le jury composé de :

M ^f	BEGHDAD Mohammed	MCA	Université de Mostaganem	Président
M ^f	BOURAHLA Ahmed	MCA	Université de Mostaganem	Examineur
M ^{me}	RAHAL Wassila Leïla	MCB	Université de Mostaganem	Encadreur

Année Universitaire: 2016/2017



Dédicace

À mes parents qui me sont les plus chers

Mes sœurs et mes frères

Toute ma famille

Tous mes amis

Tous les enseignants qui m'ont aidé de près ou de loin .

Et à tous ceux que j'aime.

Remerciements

je tiens tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui m'a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

J'exprime ma reconnaissance et ma gratitude à mes très chers parents et toute ma famille pour leurs soutien et encouragements .

*Je remercie mon encadreur **M^{me} RAHAL Wassila Leïla** pour sa disponibilité et ses précieux conseils durant toute la période du travail .*

*Mes vifs remerciements vont également aux membres du jury **M^r BEGHADAD Mohamed, M^r BOURAHLA Ahmed** pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail en acceptant de l'examiner et de l'enrichir par leurs propositions .*

J'exprime toute ma reconnaissance et gratitude à l'administration et à l'ensemble du corps enseignant de l'Université de Mostaganem pour leurs efforts à nous garantir la continuité et l'aboutissement de ce programme de Master .

Je remercie aussi tous les camarades de ma promotion et tous ceux que j'aime .

Listes des Figures et des Tableaux

LISTES DES FIGURES

Figure 1.1 : Cellule photovoltaïque	04
Figure 1.2 : Spectre solaire de Air Masse AM0 et AM1.5.....	05
Figure 1.3 : Air Masse (AM) selon la position du soleil	05
Figure 1.4 : L'influence des nuages sur l'intensité du rayonnement solaire reçu	06
Figure 1.5 : Schéma simplifié d'une cellule solaire sous éclairement	07
Figure 1.6 : Transitions inter-bandes d'électrons dans un semi-conducteur.cas(a). correspond à un semi-conducteur à gap direct, le cas (b) à un gap indirect	08
Figure 1.7 : Diagramme de bande d'un même semi-conducteur dopé de type n et p	09
Figure 1.8 : Formation de la ZCE	10
Figure 1.9 : Création d'un champ électrique dans la ZCE	10
Figure 1.10 : Formation théorique d'une jonction p-n. « homo-jonction »	12
Figure 1.11 : La maille élémentaire du silicium cristallin	13
Figure 1.12 : Méthode de Czochralski	15
Figure 1.13 : Méthode de la zone flottante	15
Figure 1.14 : Du Silicium au système photovoltaïque	16
Figure 1.15 : Structure du silicium amorphe hydrogéné	17
Figure 1.16 : Diagrammes de bande du silicium cristallin et amorphe	18
Figure 1.17 : Le processus de cristallisation des couches minces a-Si :H déposées par PECVD	19
Figure 1.18 : Cellule en silicium cristallin	20
Figure 1.19 : Cellule en Silicium poly (ou multi-)cristallin	20
Figure 1.20 : Cellule en Silicium amorphe	21
Figure 1.21 : Cellule à hétérojonction en silicium amorphe et cristallin	21
Figure 2.1 : Structure HIT fabriqué SANYO	24
Figure 2.2 : Comparaison du budget thermique et du temps de procédé pour les technologies associées aux classique et aux hétérojonctions amorphe /cristallin	27
Figure 2.3 : Diagramme de bande avant (a) et après (b) la formation de l'hétérojonction	27

Figure 2.4 : Diagramme de bande d'une hétérojonction a-Si:H(p)/c-Si(n) à en utilisant le modèle d'Anderson	29
Figure 2.5 : L'influence de l'épaisseur de l'émetteur sur l'absorption	29
Figure 2.6 : Schéma électrique équivalent d'une cellule solaire	31
Figure 2.7 : Les caractéristiques sous obscurité et sous éclairage d'une cellule solaire.....	32
Figure 2.8 : Cellule photovoltaïque en court circuit.....	33
Figure 2.9 : Cellule photovoltaïque en circuit ouvert.....	34
Figure 2.10 : Distribution des états localisés dans le gap utilisée dans le programme (a) Modèle en(U-shaped), (b) Modèle en deux gaussienne.....	36
Figure 3.1 : L'hétéro-structure ITO/p-a-Si:H/i-a-Si:H/n-c-Si/Al utilisée dans nos simulations	41
Figure 3.2 : Caractéristique J(V) pour deux valeurs de l'épaisseur de l'émetteur p-a-Si:H ...	43
Figure 3.3 : Variation du courant de court-circuit J_{cc} en fonction de l'épaisseur de la couche p-a-Si :H.....	44
Figure 3.4 : Variation de la tension en circuit ouvert V_{co} en fonction de l'épaisseur de la couche p-a-Si :H.....	45
Figure 3.5 : Variation du facteur de forme FF en fonction de l'épaisseur de la couche p-a-Si :H	46
Figure 3.6 : Variation du rendement η en fonction de l'épaisseur de la couche p-a-Si:H	46
Figure 3.7 : Champ électrique dans la zone de déplétion en fonction de la position dans le dispositif pour 3 épaisseurs de p-a-Si :H (50, 155 et 215 Å)	47
Figure 3.8 : Taux de recombinaison en fonction de la position dans le dispositif pour 3 épaisseurs de p-a-Si :H (50, 155 et 215 Å).....	48

Listes des Tableaux

Tableau 3.1 : Principaux paramètres de simulation de la structure HIT ITO/p-a-Si:H/i-a-Si:H/n-c-Si/Al	41
Tableaux 3.2 : Variation des paramètres de sortie de la cellule en fonction de l'épaisseur de la couche p-a-Si:H	42

CHAPITRE .1 :

***Généralités sur les cellules
photovoltaïques***

CHAPITRE .2 :

***Cellule à Hétérojonction de type
HIT « Heterojunction with
Intrinsic Thin »***

CHAPITRE .3 :

***Effet de l'épaisseur de la couche
fenêtre sur les performances de la
cellule HIT***

Effet de l'épaisseur de la couche fenêtre sur les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque à hétérojonction.

RESUME :

Le recours aux énergies renouvelables ne cesse d'augmenter avec la prise de conscience universelle des problématiques environnementales. En particulier, l'énergie solaire (photovoltaïque) qui consiste à produire de l'électricité à partir de la lumière du soleil en utilisant des panneaux photovoltaïques constitués par l'assemblage de plusieurs photopiles.

L'essentiel de la recherche se dirige principalement vers l'amélioration des rendements des cellules photovoltaïques, tout en réduisant leurs coûts de fabrication.

Le travail réalisé dans ce mémoire de Master consiste en l'étude de l'influence de l'épaisseur de la couche fenêtre sur les caractéristiques photovoltaïques des cellules HIT (Heterojunctions with Intrinsic Thin layer), à base de silicium amorphe/ silicium cristallin.

Les simulations réalisées par le logiciel ASDMP (Amorphous Semiconductor Device Modeling Program) nous ont permis de conclure qu'il faut faire un compromis dans le choix de l'épaisseur de l'émetteur : Pas trop mince pour avoir un champ électrique suffisant au niveau de la jonction p-a-Si :H/n-c-Si, et pas trop épais, afin qu'un maximum de photons soient transmis dans la base cristalline, et que la longueur de diffusion des porteurs de charge soit au moins égale à l'épaisseur de l'émetteur.

Une épaisseur de la couche p-a-Si :H de 155Å a permis d'atteindre les meilleurs valeurs des paramètres de la cellule, avec un rendement de 18.78%.

Mots-clés : Cellule photovoltaïque, épaisseur, couche fenêtre, silicium cristallin, silicium amorphe, logiciel ASDMP, caractéristique $J=f(V)$.

Remerciements

Dédicace

Listes des Figures et des Tableaux

Sommaire

Introduction Générale 01

Chapitre.1 : GENERALITES SUR LES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES

1.1 INTRODUCTION	03
1.2 HISTORIQUE	03
1.3 DEFINITION D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE	04
1.4 RAYONNEMENT SOLAIRE	04
1.5 EFFET PHOTOVOLTAÏQUE	06
1.5.2 Définition	06
1.5.2 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	06
1.5.2.1 Absorption du rayonnement	07
1.5.2.2 Interaction rayonnement/semi-conducteur	07
1.5.3 jonction pn	08
1.5.3.1 Définition	08
1.5.3.2 Le dopage de type N et P	09
1.5.3.3 Zone de Charge d'Espace « ZCE »	09
1.5.3.4 Potentiel de diffusion	11
1.6 CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES A BASE DE SILICIUM CRISTALLIN /SILICIUM AMORPHE	13
1.6.1 Silicium cristallin	13
1.6.1.1 Caractéristiques générales du silicium cristallin	13
1.6.1.2.1 De la silice au silicium métallurgique	14
1.6.1.2.2 Du silicium métallurgique au silicium électronique	14
1.6.1.2.3 Cristallisation des lingots de silicium	14
1.6.1.2.3.1 Méthode de Czochralski	14
1.6.1.2.3.2 Méthode de la zone Flottante (FZ)	15
1.6.1.2.3.3 Elaboration des wafers	15
1.6.2 Silicium amorphe hydrogéné	16
1.6.2.1 Silicium amorphe	16
1.6.2.2 Silicium amorphe hydrogéné	17
1.6.2.3 Le rôle de l'hydrogène	17
1.6.2.4 Métastabilité du silicium amorphe	17
1.6.2.5 Diagramme de bande	18
1.6.2.6 Les Processus de dépôt du silicium amorphe hydrogéné en couche mince	19
1.6.3 Cellules en filières silicium	19

Sommaire

1.6.3.1 Cellule en Silicium monocristallin	20
1.6.3.2 Cellule en Silicium poly (ou multi-) cristallin	20
1.6.3.3 Cellule en Silicium amorphe	21
1.6.3.4 Les cellules à hétérojonction en silicium amorphe et cristallin	21
1.7 LES AVANTAGES ET LES INCONVENIENTS D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE	22
1.7.1 AVANTAGES	22
1.7.2 INCONVENIENTS	22
1.8 COCLUSION	22
Chapitre.2 : CELLULE A HETEROJONCTION DE TYPE HIT « HETEROJUNCTION WITH INTRINSIC THIN LAYER »	
2.1 INTRODUCTION	24
2.2 DESCRIPTION DU CELLULE HIT	24
2.3 LES COMPOSANTS IMPORTANTS DANS LA CELLULE SILICIUM A HETEROJONCTION HIT	25
2.3.1 L'Oxyde Transparent Conducteur« TCO »	25
2.3.1.1 Rôle de l'ITO dans la performance des cellules	25
2.3.2 Emetteur a-Si :H « couche fenêtre »	25
2.3.3 Couche intrinsèque a-Si :H(i)	25
2.3.4 Absorbeur c-Si « substrat »de type n ou p	26
2.3.5 BSF (Back Surface Field).....	26
2.3.6 Contacts	26
2.4 AVANTAGES DE LA STRUCTURE HIT	26
2.5 PRINCIPE DE BASE DE L'HETEROJONCTION a-Si:H/c-Si	27
2.5.1 Généralités	27
2.5.2 Modèle d'Anderson	28
2.6 CARACTERISTIQUES DE L'EMETTEUR a -Si :H	29
2.7 INFLUENCE DE LA COUCHE INTRINSEQUE SUR LA QUALITE DE CELLULE HIT	30
2.8 MODELISATION DES CELLULES HIT	30
2.8.1 Modèle mathématique équivalent a une cellule	30
2.8.2 Caractéristique J(v)	32
2.8.3 Paramètres des cellules photovoltaïques	33
2.8.3.1 Courant de court circuit I_{cc}	33
2.8.3.2 Tension de circuit ouvert V_{co}	33
2.8.3.3 Facteur de forme FF	34
2.8.3.4 Rendement de conversion η	34
2.8.3.5 Réponse spectrale	34
2.8.4 Modèle pour la simulation des dispositifs a base de semi-conducteur	35
2.8.4.1 Calcul des états localisés continus dans le gap	36
2.8.4.1.1 Distribution dans les queues de bandes	36
2.8.4.1.2 Distribution au milieu du gap	37

Sommaire

2.8.4.2 Expressions des courants d'électrons et de trous	37
2.8.4.3 Méthode de résolution	38
2.8.5 Logiciel de simulation	38
2.8.5.1 Présentation du logiciel ASDMP	38
2.9 CONCLUSION	39

Chapitre.3 : EFFET DE L'ÉPAISSEUR DE LA COUCHE FENETRE SUR LES PERFORMANCES DE LA CELLULE HIT

3.1 INTRODUCTION	40
3.2 PRESENTATION DE LA STRUCTURE	40
3.3 RESULTATS DE LA SIMULATION	42
3.3.1 Caractéristique $J(V)$ pour deux valeurs de l'épaisseur de l'émetteur	43
3.3.2 Effet de l'épaisseur de l'émetteur sur la densité de courant de court circuit J_{cc} ...	44
3.3.3 Effet de l'épaisseur de l'émetteur sur la tension en circuit ouvert V_{co}	45
3.3.4 Effet de l'épaisseur de l'émetteur sur le facteur de forme FF	45
3.3.5 Effet de l'épaisseur de l'émetteur sur le rendement η	46
3.3.6 Variation du champ électrique au niveau de la jonction p-a-Si :H /n-c-Si en fonction de l'épaisseur de l'émetteur	47
3.3.7 Variation du taux de recombinaisons dans la couche p-a-Si :H en fonction de l'épaisseur de son épaisseur	48
3.4 CONCLUSION	49
Conclusion Générale et perspectives	50
Bibliographie	

Introduction Générale

En raison du développement de l'industrie, du transport et des moyens de communication, une croissance de la consommation mondiale d'électricité a été observée pendant les dernières décennies. Cependant, la plupart de l'énergie électrique est produite par combustion de ressources non renouvelables (carbone, pétrole, gaz, nucléaire...), dégageant des problèmes d'environnement croissants et augmentant les coûts d'exploitation. La solution à ces problèmes réside en la maîtrise des énergies renouvelables et parmi elles, l'énergie solaire à conversion photovoltaïque, inépuisable et propre, occupe une place prépondérante. Cette forme d'énergie est une transformation directe de l'énergie solaire en énergie électrique. Elle est assurée fondamentalement par des cellules solaires au silicium, dont la fabrication est de plus en plus maîtrisée. Le principal facteur qui freine encore l'utilisation massive de ce procédé de production d'énergie concerne les coûts de fabrication jugés excessifs face aux énergies fossiles ou nucléaires.

A cet effet, le défi auquel doit répondre l'industrie photovoltaïque est d'augmenter le rapport rendement physique/rendement économique des cellules solaires, par l'introduction de moyens technologiques permettant d'améliorer le rendement de conversion, en utilisant de nouveaux matériaux et structures qui peuvent augmenter les performances des dispositifs photovoltaïques tout en réduisant les coûts de fabrication par des techniques de mise en œuvre faciles et peu coûteuses.

L'entreprise japonaise Sanyo a commencé une production de masse de modules photovoltaïques à hétérojonctions. Les cellules sont obtenues par la mise en contact de matériaux d'énergie de gap différente. L'hétérojonction consiste à mettre en contact le silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H) avec le silicium cristallin (c-Si) de type n, en introduisant une fine couche de silicium amorphe hydrogéné intrinsèque a-Si:H(i). Ces structures sont nommées HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin layer). Suite aux succès des japonais, de nombreux laboratoires européens et américains ont entamé des recherches sur les HIT, en travaillant sur des substrats dopés p.

Le travail de ce mémoire est une étude qui portera sur la simulation électrique d'une cellule solaire à hétérojonction « HIT » en c-Si de type n et a-Si:H de type p, en utilisant le simulateur ASDMP « Amorphous Silicon Device Modeling program » dans le but d'étudier comment l'épaisseur de la couche fenêtre influence les performances des cellules de ce type .

Pour mener à bien notre étude nous avons structuré ce travail en trois chapitres :

Le premier chapitre sera partagé en deux parties, en premier lieu nous allons présenter un aperçu sur l'histoire de l'énergie photovoltaïque, puis nous donnerons la définition d'une cellule photovoltaïque, nous décrirons le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque et nous présenterons le rayonnement solaire qui est la source d'énergie incidente. Par la suite, nous aborderons les phénomènes mis en jeu lors de la formation de la jonction p-n qui constitue le fondement de la cellule solaire. En deuxième lieu nous rappellerons les propriétés électroniques des matériaux semi-conducteurs tels que le silicium cristallin (c-Si) et le silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H) ainsi que leurs procédés de fabrication. Et enfin nous exposerons les différents types de cellules fabriquées à base de silicium.

Le deuxième chapitre sera consacré à l'étude de la cellule solaire à hétérojonction a-Si:H/c-Si et à la présentation du modèle mathématique utilisé pour la modélisation des cellules photovoltaïques ainsi qu'au logiciel de simulation ASDMP utilisé dans ce travail.

Dans le troisième chapitre, nous étudierons l'influence de l'épaisseur de la couche fenêtre p-a-Si:H sur les paramètres photovoltaïques (J_{CC}, V_{CO}, FF, η) d'une cellule solaire HIT de type n en face avant, puis nous interpréterons les résultats obtenus par simulation .

Enfin, nous terminerons notre travail par une conclusion générale et les perspectives envisagés pour la continuité de ce travail.

1. GENERALITES SUR LES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES

1.1. INTRODUCTION

L'énergie solaire photovoltaïque est l'une des énergies renouvelables et la plus utilisée. Cette dernière est l'une des formes non polluantes et silencieuses de conversion de l'énergie solaire, elle se produit au moyen d'un dispositif de conversion appelée « cellule solaire » basé sur l'effet photovoltaïque.

Cellule solaire et photopile sont des termes équivalents qui désignent généralement des capteurs de petite taille, utilisés soit tels quels soit en assemblage dans un panneau solaire ou module photovoltaïque, ce dernier terme est un composant de conversion d'énergie qui produit de l'électricité lorsqu'il est exposé à la lumière. [1]

Le silicium est le matériau semi-conducteur le plus utilisé dans la technologie dominante photovoltaïque pour la production des cellules solaires. Car le silicium est le deuxième élément chimique le plus abondant dans la croûte terrestre puisqu'il représente environ 27% de sa masse. Il fait partie de la famille des cristallogènes. Il existe dans deux types principaux d'état solide, l'état dans lequel l'arrangement des atomes est aléatoire « amorphe » et celui dans lequel les atomes sont arrangés régulièrement aux nœuds d'un réseau « cristallin » [2]. Les deux types nous intéressent car ils sont utilisés pour l'élaboration des cellules HIT que nous allons étudier.

Ce premier chapitre est destiné à constituer une généralité sur les cellules solaires afin d'aider à la compréhension des chapitres suivants.

1.2. HISTORIQUE

C'est en **1839** que le physicien français Edmond Becquerel découvre que certains matériaux délivraient une petite quantité d'électricité quand ils étaient exposés à la lumière. [3]

1875 : Werner Von Siemens expose devant l'académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs, mais jusqu'à la seconde guerre mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire. [4]

1912 : Albert Einstein expliqua le phénomène photoélectrique. [3]

1954 : Trois chercheurs américains du laboratoire Bell aux USA, Chapin, Pearson et Prince mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites [5]. Cette première cellule solaire était en silicium et avait un rendement de 4,5%. [3]

1958 : Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.[5]

1973 : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware.

1983 : La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 km en Australie.[4]

1995 : Des programmes de toits photovoltaïques raccordés au réseau ont été lancés au Japon et en Allemagne et se généralisent depuis 2001.

1.3. DEFINITION D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE

Une cellule photovoltaïque 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. La tension obtenue est continue et fonction de la lumière incidente.

Il existe une multitude de matériaux utilisés pour la fabrication des cellules photovoltaïques. Les plus répandues sont constituées de semi-conducteurs principalement à base de silicium (Si) et plus rarement d'autres semi-conducteurs : Arséniure de Gallium (GaAs), séléniure de cuivre et d'indium gallium (Cu(In.Ga)(Se)₂) ou tellure de cadmium (CdTe) etc. Elles se présentent généralement sous la forme de fines plaques d'une dizaine de centimètres de coté. [4]



Figure 1.1 : Cellule photovoltaïque

1.4. RAYONNEMENT SOLAIRE

La distance de la Terre au Soleil est d'environ 150 millions de kilomètres et la vitesse de la lumière est d'un peu plus de 300 000 km/s, les rayons du soleil mettent donc environ 8 minutes à nous parvenir. La constante solaire est la densité d'énergie solaire qui atteint la frontière externe de l'atmosphère faisant face au Soleil. Sa valeur est communément prise égale à 1367 W/m². [1]

Lors de la traversée de l'atmosphère, ce rayonnement subit des déperditions du fait de son absorption partielle par les gaz atmosphériques et la vapeur d'eau. [1]

On représente ce rayonnement par un spectre d'irradiance fonction de la longueur d'onde. Ce spectre est comparable à celui d'un corps noir à une température de 5800K. Dans l'espace, ce spectre est différent du spectre solaire à la surface de la Terre pour lequel les molécules présentes dans l'atmosphère (O_3 , O_2 , H_2O , CO_2) ont absorbé une partie du rayonnement (Figure 1.2). [6]

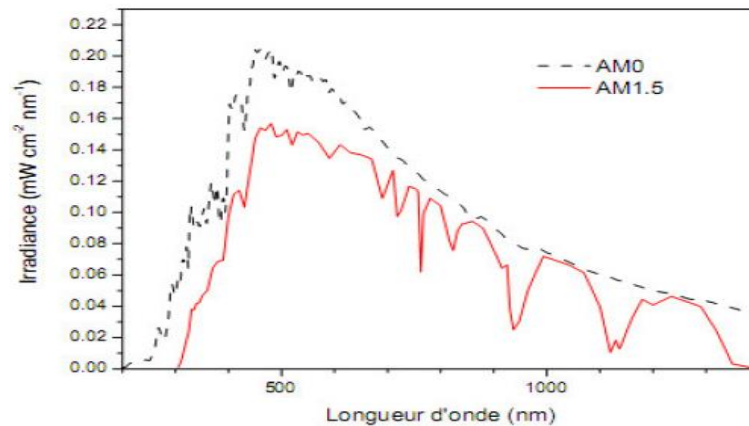


Figure 1.2: Spectre solaire d'Air Masse AM0 et AM1.5

Afin de comparer et d'unifier les performances des cellules photovoltaïques élaborées dans les différents laboratoires du monde, il a été institué la notion d'Air Masse (AM). Elle quantifie la quantité de puissance absorbée par l'atmosphère en fonction de l'angle θ du soleil par rapport au zénith. [3]

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

AM : Air masse quand le rayonnement traverse l'atmosphère.

AM₀ : Air masse hors atmosphère.

θ : L'angle que fait le soleil avec le zénith.

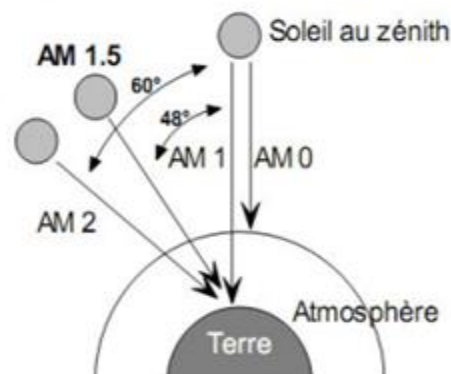


Figure 1.3 : Air Masse (AM) selon la position du soleil.

Quant aux conditions normalisées de test des panneaux solaires, elles sont caractérisées par un rayonnement instantané de $1\,000\text{ W/m}^2$, un spectre solaire AM 1,5 et 25 °C de température ambiante. Ces conditions sont appelées STC (Standard Test Conditions). [1] La figure 1.4 montre l'influence des nuages sur l'intensité du rayonnement solaire.

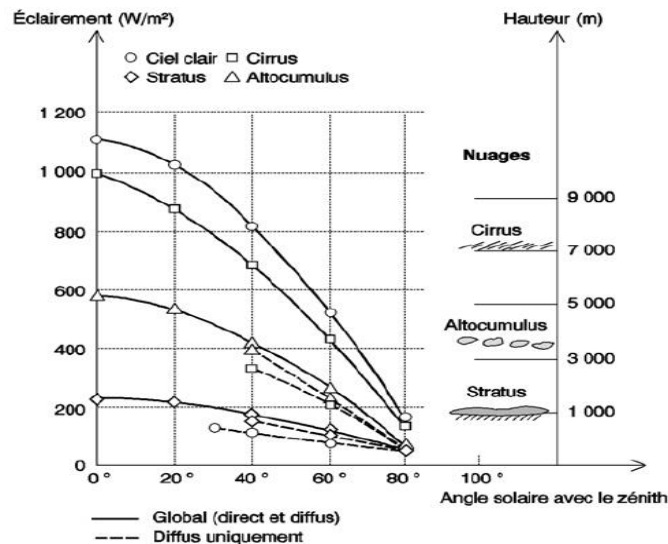


Figure 1.4 : L'influence des nuages sur l'intensité du rayonnement solaire reçu.

1.5. EFFET PHOTOVOLTAÏQUE

1.5.1. Définition

L'effet photovoltaïque est le phénomène physique permettant la transformation de l'énergie solaire en énergie électrique [7]. Il provoque sur certains matériaux l'émission d'une petite quantité d'électricité lorsqu'ils sont exposés à la lumière. Pour cela il faut d'abord que l'énergie des photons incidents crée des porteurs de charge (électrons ou trous) dans le matériau [6]. Plusieurs types de composants peuvent être créés à partir de ce principe. [8]

1.5.2. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque est essentiellement basée sur :

- La génération d'une paire électron-trou dans un semi conducteur suite à l'absorption du rayonnement solaire avec un processus de type interaction rayonnement/semi-conducteur. Cependant, il faut que l'énergie du photon soit supérieure ou égale à l'énergie de la bande interdite du semi-conducteur utilisé.
- L'existence d'une jonction p-n qui induit différents phénomènes comme la diffusion, la recombinaison et la séparation des porteurs de charges (électrons et trous).

- La collecte des porteurs de charge dans un circuit électrique extérieure.

La figure ci-dessous présente le schéma simplifié d'une cellule solaire.

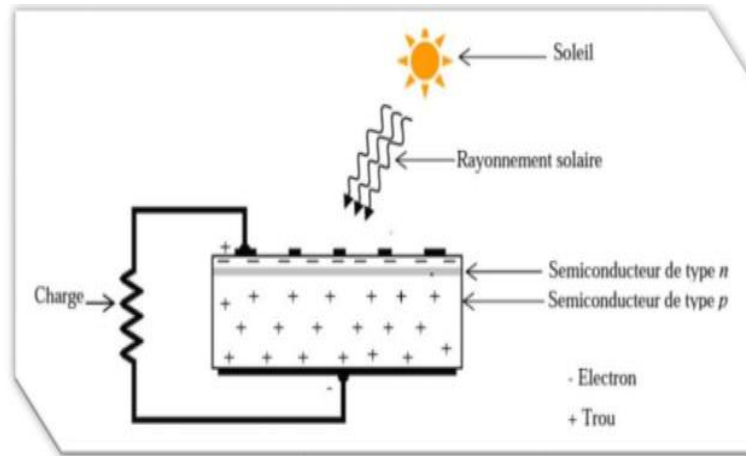


Figure 1.5 : Schéma simplifié d'une cellule solaire sous éclairage.

Dans ce qui suit, nous allons expliquer les phénomènes cités ci-dessus.

1.5.2.1. Absorption du rayonnement

Un photon d'énergie $E = h\nu$ pénétrant dans la cellule solaire est absorbé par le matériau semi-conducteur. Si l'énergie du photon incident est suffisamment élevée, le photon va pouvoir faire passer un électron de la bande de valence à la bande de conduction du matériau semi-conducteur et créer ainsi une paire électron - trou. [9]

1.5.2.2. Interaction rayonnement/semi-conducteur

L'écart entre les bandes de valence et de conduction appelé gap représente une caractéristique fondamentale des semi-conducteurs. La figure 1.6 représente les différentes transitions possibles selon la nature du gap.

Quand le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence coïncident dans l'espace des k , il s'agit d'un gap direct. Les transitions inter bandes s'effectuent verticalement. Dans le cas du silicium, le gap est indirect : les transitions électroniques entre les extrema des bandes sont obliques, donc non radiatives puisqu'elles impliquent un changement du vecteur d'onde de l'électron. [10]

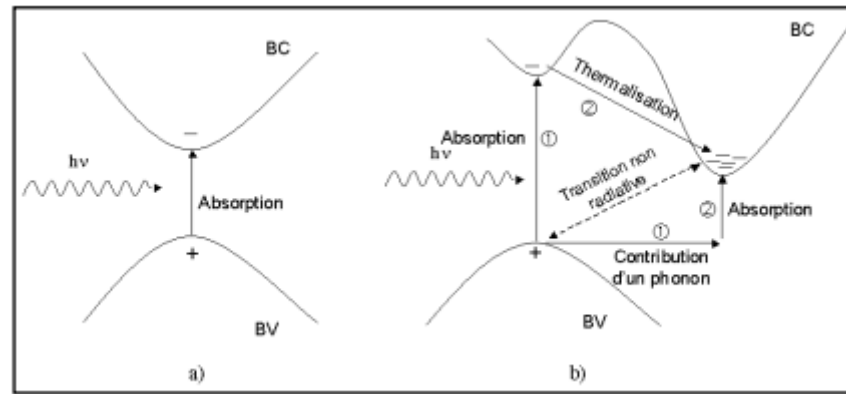


Figure 1. 6 : Transitions inter-bandes d'électrons dans un semi-conducteur. Le cas(a) correspond à un semi-conducteur à gap direct, le cas (b) à un gap indirect.

L'interaction photon/électron au sein du semi-conducteur se traduit par la génération d'une paire électron-trou qui modifie localement la conductivité du matériau. Notons que nous nous situons dans un régime de faible injection, c'est à dire que la densité de porteurs photo générées est faible devant celle des porteurs majoritaires au sein du matériau. Ainsi cet excès de porteurs est plus sensible dans le cas des porteurs minoritaires (trous dans la région dopée n et électrons dans celle dopée p). La cellule photovoltaïque se comportant comme un générateur.

Remarque : Si la température augmente, les électrons remplissent progressivement tous les états d'énergie et peuvent pour une température donnée annuler la bande interdite (cas du silicium à 400 °C). Cette remarque est importante pour les cellules photovoltaïques à jonction p-n dont le rendement diminue avec l'élévation de la température.[3]

1.5.3. Jonction p-n

1.5.3.1. Définition

Une jonction p-n est réalisée par la juxtaposition de deux régions de semi-conducteur de types différents l'une n et l'autre p.

L'homojonction : jonction p-n utilisant le même semi conducteur et donc ayant la même largeur de la bande interdite.

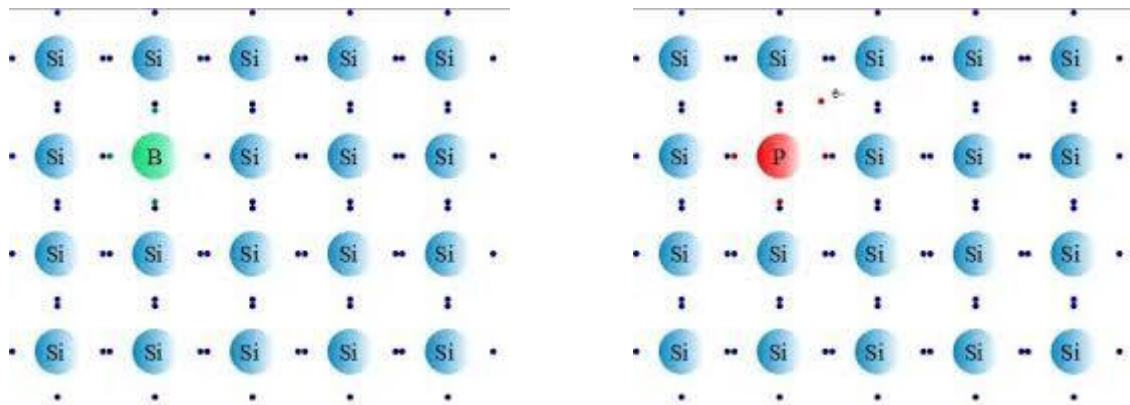
L'hétérojonction : jonction p-n entre deux semi-conducteurs différents et donc de gap différent.

1.5.3.2. Le dopage de type N et P

Le dopage de type N : Si nous introduisons dans un cristal de silicium des atomes qui possèdent 5 électrons de valence comme le phosphore, ce dernier remplace un atome de silicium dans le réseau et forme quatre liaisons covalentes avec les atomes de silicium voisins, il reste un électron qui participera à la conduction. L'atome de phosphore est donneur d'électron.

Le dopage de type P : un atome de bore B possédant trois électrons introduit dans un réseau de silicium va produire un déficit d'électrons donc un excès de trous. L'atome de Bore est accepteur d'électron.

Les schémas suivants représentent des exemples de dopage du silicium.



Dopage de type P

dopage de type N

1.5.3.3. Zone de Charge d'Espace « ZCE »

Soient deux semi-conducteurs de type n et p. Si on réalise un contact intime entre ces deux semi-conducteurs, on obtient ce que l'on appelle une jonction p-n. Il faut noter que ce contact n'est pas une simple juxtaposition du cristal de type n avec un cristal de type p. En pratique, le contact doit être à une échelle atomique. [11]

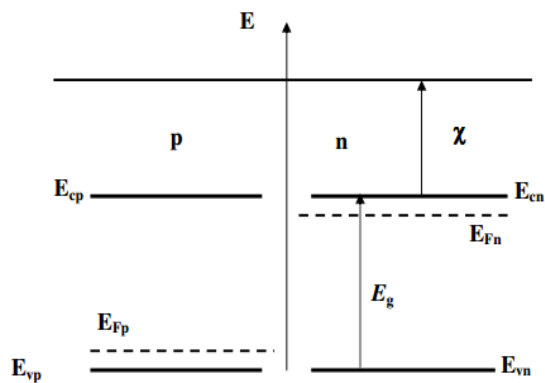


Figure 1.7 : Diagramme de bande d'un même semi-conducteur dopé de type n et p.

Tant que les deux semi-conducteurs sont isolés l'un de l'autre chacun est électriquement neutre. Mais lorsque le contact est établi un gradient de concentration en électrons et en trous apparaît de part et d'autre de la surface de contact [11]. A l'interface, les porteurs libres majoritaires sont diffusés et se

sont recombines entre eux pour former une zone dans laquelle on ne trouve pas de charges libres à l'équilibre, c'est la zone de charge d'espace (ZCE) ou zone de déplétion (figure 1.8). Cette zone s'étend de $x = w_p$ dans le matériau dopé p et jusqu'à $x = w_n$ dans la région dopée n [12]. Un champ électrique apparaît dans la ZCE s'opposant la diffusion des porteurs majoritaires de chacune des deux zones (figure 1.9). [13]

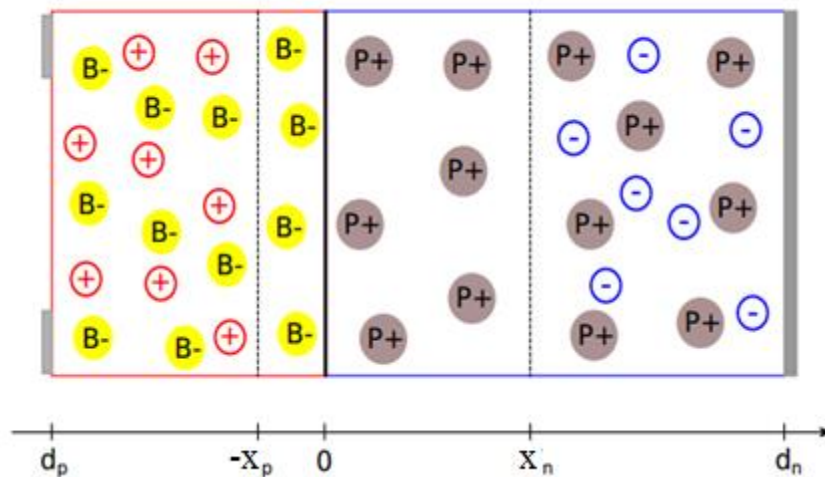


Figure 1.8 : Formation de la ZCE.

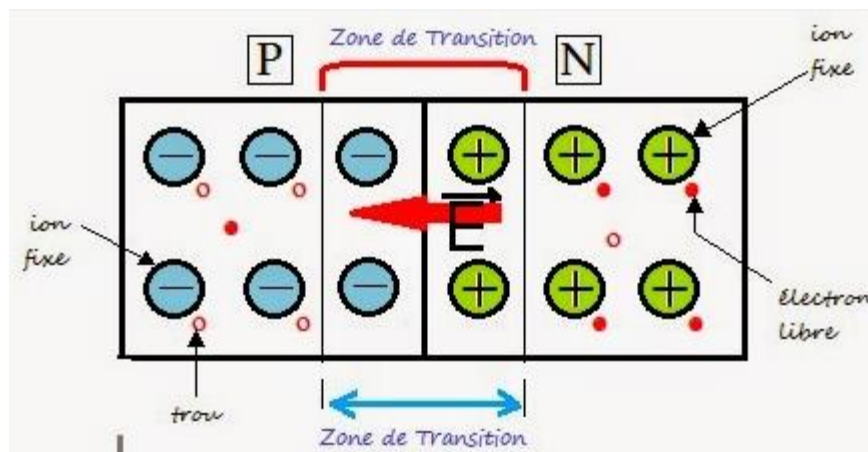


Figure 1.9: Création d'un champ électrique dans la ZCE .

Les densités des porteurs de charges libres dans le semi-conducteur à l'équilibre thermodynamique sont données par les expressions :

$$n_n = N_C e^{\frac{-(E_C - E_F)}{kT}} \quad (1.2)$$

$$P_P = N_V e^{\frac{(E_V - E_F)}{kT}} \quad (1.3)$$

Où N_C et N_V sont respectivement les densités d'états possibles aux bords de la bande de conduction et de valence, E_C et E_V sont respectivement les niveaux d'énergie du bas de la bande de conduction et du haut de la bande de valence tel que $E_g = E_C - E_V$, E_F le niveau de Fermi, k la constante de Boltzmann et T la température. [12] :

Les densités de charges dans les différentes régions à l'équilibre s'écrivent respectivement : [14]

$$\rho(x) = 0 \quad \text{pour } x < -x_p \text{ et } x > x_n \quad (1.4)$$

$$\rho(x) = -eN_A \quad \text{pour } -x_p < x < 0 \quad (1.5)$$

$$\rho(x) = eN_D \quad \text{pour } 0 < x < x_n \quad (1.6)$$

Le champ électrique est dirigé de la zone n vers la zone p et il est donné par :

$$\frac{dE}{dx} = \frac{\rho(x)}{\varepsilon} \quad (1.7)$$

$$\text{Côté p pour } -x_p < x < 0 \quad E = \frac{-e N_A(x + x_p)}{\varepsilon} \quad (1.8)$$

$$\text{Côté n pour } 0 < x < x_n \quad E = \frac{e N_D(x - x_n)}{\varepsilon} \quad (1.9)$$

Au niveau de la jonction métallurgique, c-à-d pour $x = 0$, $E_p(x) = E_n(x)$

$$\frac{eN_D(x - x_n)}{\varepsilon} = \frac{-eN_A(x + x_p)}{\varepsilon} \quad (1.10)$$

$$N_D x_n = N_A x_p \quad (1.11)$$

Donc on conclue que la zone désertée s'étend du côté le moins dopé de la jonction.

1.5.3.4. Potentiel de diffusion

Le champ électrique provoque une barrière de potentiel qui s'oppose à la diffusion des porteurs majoritaires et permet aussi la collecte des porteurs minoritaires libres vers la zone où ils sont majoritaires [6], en raison du fait que c'est la barrière qui équilibre les forces de diffusion.

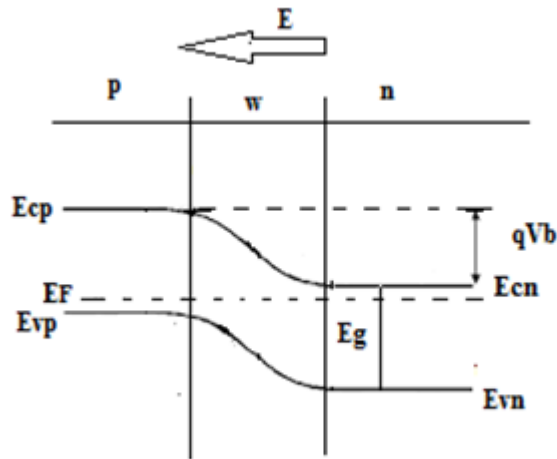


Figure 1.10 : Formation théorique d'une jonction p-n. « homo-jonction ».

La hauteur de la barrière de potentiel peut être déduite de la figure 1.10: [15]

$$qV_b = E_{cp} - E_{cn} = E_{vp} - E_{vn} \quad (1.12)$$

Sachant que :

$$n_n = N_C e^{\frac{-(E_{cn} - E_F)}{kT}} \quad (1.13)$$

$$n_p = N_C e^{\frac{-(E_{cp} - E_F)}{kT}} \quad (1.14)$$

La tension de diffusion (barrière de potentiel) est donnée par :

$$V_b = \frac{KT}{e} \ln \frac{N_D N_A}{n_i^2} \quad (1.15)$$

Avec :

n_i : Densité intrinsèque de porteurs ($10^{10} \text{at.cm}^{-3}$ pour le silicium) .

k : Constante de Boltzmann (J.K^{-1}).

e : Charge élémentaire $1,6.10^{-19}(\text{C})$.

T : Température (K).

N_D : Densité d'impuretés de type donneur (cm^{-3}) .

N_A : Densité d'impuretés de type accepteur (cm^{-3}).

1.6. CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES A BASE DE SILICIUM CRISTALLIN /SILICIUM AMORPHE

1.6.1. Silicium cristallin

Le silicium, de symbole « Si », est le deuxième élément le plus abondant dans la croûte terrestre (~27%). Il présente un bon rendement. Il est constitué d'un seul cristal ordonné [16]. Il peut exister sous différentes formes selon la nature, l'arrangement et la dimension des grains qui le constituent.

La réalisation des nombreux dispositifs commence par la production d'une matière monocristalline de grande pureté, en particulier pour la fabrication de puces microélectroniques. [17]

1.6.1.1. Caractéristiques générales du silicium cristallin

- Le silicium appartient à la quatorzième colonne du tableau de Mendeleïev.
- Sa maille élémentaire est cubique à faces centrées avec la moitié des sites tétraédriques occupés.
- Dans les conditions normales de pression et de température, le paramètre de la maille du cristal de silicium est de 5.43Å.[2]
- Le silicium forme des cristaux covalents comme tous les éléments de la quatorzième colonne du tableau périodique
- L'énergie de la bande interdite « gap » du silicium est de 1.12 eV et sa nature est indirecte.[17]

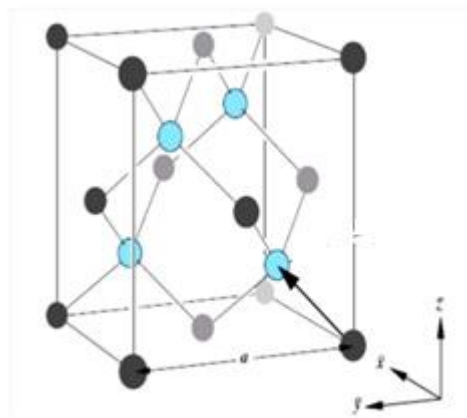


Figure1.11 : La maille élémentaire du silicium cristallin.

1.6.1.2. Les processus de fabrication du silicium cristallin

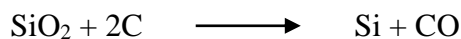
Le silicium extrait des mines n'est pas assez pur pour une application photovoltaïque ; il a besoin d'être purifié. De nombreuses techniques existent pour cela et permettent d'obtenir une qualité de

silicium dite **grade métallurgique (MG-Si)** avec une pureté de 98-99% , puis la purification du silicium métallurgique en silicium de **grade solaire (SoG-Si)** d'une pureté de 99.999% ou **électronique (EG-Si)** d'une plus grande pureté.

La technique de cristallisation consiste à solidifier progressivement le silicium fondu de manière contrôlée.

1.6.1.2.1. De la silice au silicium métallurgique

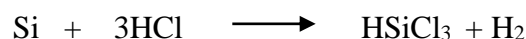
Le silicium n'existe pas à l'état naturel en tant que corps pur mais en tant que silice (SiO_2) sous forme granuleuse (sable,...) ou solide (quartz,...). La carbo-réduction de la silice à des températures supérieures à 1900°C permet d'obtenir le MG-Si. L'opération est réalisée dans un four à arcs électriques où des composés fortement carbonés utilisés comme réducteur sont mélangés au SiO_2 :



A ce stade, le MG-Si obtenu contient des impuretés en grande quantité dont des carbures de silicium (SiC) du SiO_2 ou encore des impuretés métalliques. Pour la fabrication de matériaux destinés aux cellules solaires une étape de purification supplémentaire est nécessaire. [18]

1.6.1.2.2. Du silicium métallurgique au silicium électronique

La méthode la plus fréquemment utilisée pour diminuer les impuretés dans le silicium est le procédé SIEMENS. Cette voie de purification est dite chimique (opposée à la voie métallurgique). Elle consiste à la réduction de trichlorosilane ($\text{HSiCl}_3=\text{TCS}$). Le TCS est formé à partir d'une réaction d'hydro-chloration entre le MG-Si et de l'acide Chlorhydrique (HCl) à des températures comprises entre $300-350^\circ\text{C}$:



Ensuite, HSiCl_3 est purifié par distillation, puis réduit par l'hydrogène (H_2) à $1000-1100^\circ\text{C}$.



Le silicium est alors obtenu sous une forme poly cristalline et il est prêt à être utilisé pour la cristallisation des lingots. [18]

1.6.1.2.3. Cristallisation des lingots de silicium

1.6.1.2.3.1. Méthode de Czochralski

Le silicium est placé dans un creuset de quartz et maintenu liquide à l'aide d'éléments chauffants. Lorsque la surface est à la température limite de solidification, on y plonge un germe monocristallin « A ». Le silicium se solidifie sur ce germe selon la même orientation cristallographique « B ». On tire

lentement le germe vers le haut avec un mouvement de rotation « C », tout en contrôlant minutieusement la température et la vitesse. [19]

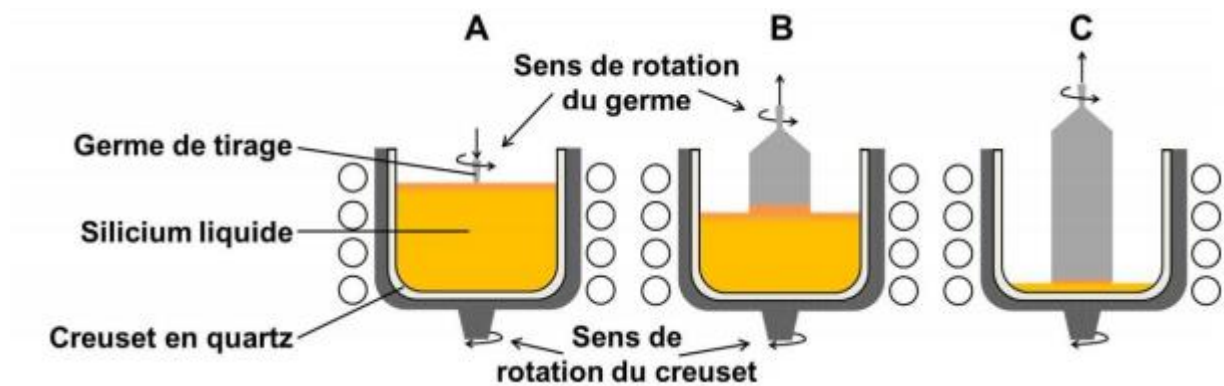


Figure 1.12 : Méthode de Czochralski.

1.6.1.2.3.2. Méthode de la Zone Flottante (FZ)

Un barreau poly cristallin du matériau semi-conducteur silicium disposé verticalement est chauffé localement par induction jusqu'à ce que soit formée une étroite zone fondue. Celle-ci reste stable entre les deux parties solides du barreau. Le déplacement lent de l'enroulement chauffant s'accompagne de celui de la zone flottante par fusion du silicium poly-cristallin d'un côté, par cristallisation de l'autre, comme dans les méthodes précédentes, un germe convenablement taillé placé à l'extrémité du barreau permet d'amorcer et d'orienter la croissance du cristal selon la direction cristallographique voulue. [20]

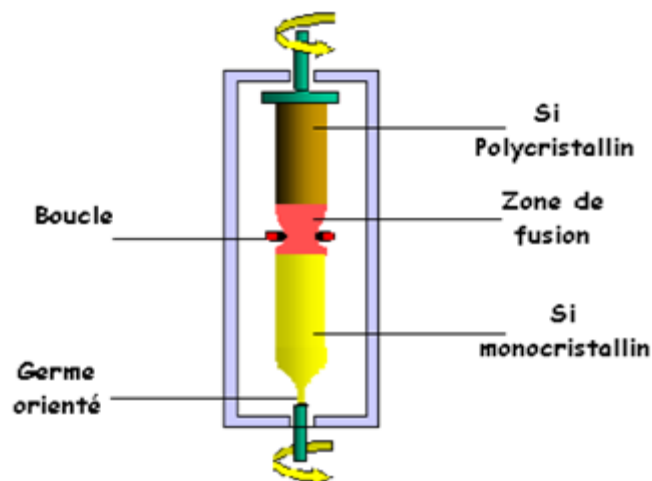


Figure 1.13 : Méthode de la zone flottante .

1.6.1.2.4. Elaboration des wafers

Après refroidissement, les lingots cylindriques (silicium monocristallin) de silicium obtenus à l'issue de l'étape de solidification sont ensuite sciés en fines plaques de 200 micromètres d'épaisseur qui

sont appelées « wafers » ("wafer" signifie "galette") à partir desquelles seront produits les composants présents dans tous les appareils électroniques. La coupe des lingots est effectuée par une scie à fil. [19]

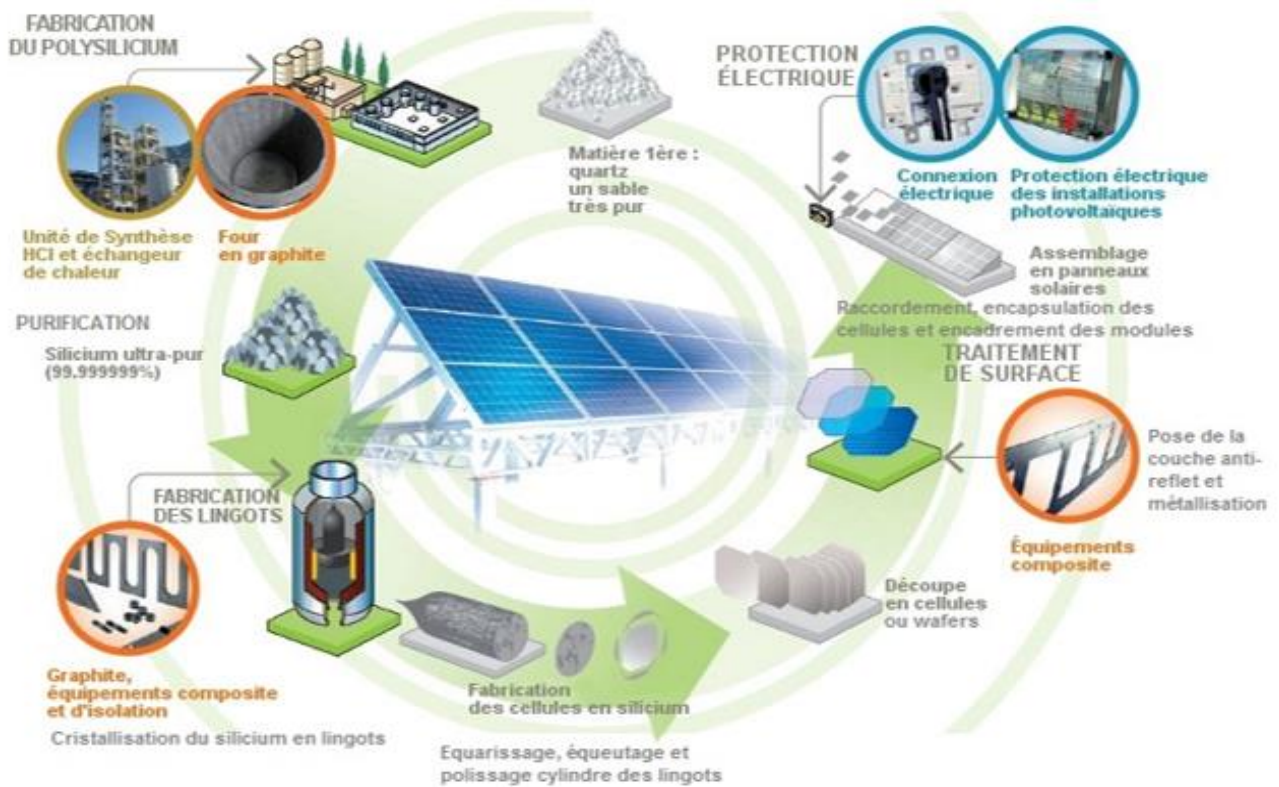


Figure 1.14 : Du Silicium au système photovoltaïque.

1.6.2. Silicium amorphe hydrogéné

1.6.2.1. Silicium amorphe

Le silicium amorphe a une structure tétraédrique comme le cas du silicium cristallin mais il présente des distorsions aléatoires. Les défauts sont également présents sous forme d'atomes de silicium qui ont seulement trois liens covalents avec des voisins. Le quatrième lien non satisfait s'appelle liaison pendante (figure 1.15). La concentration des liaisons pendantes dans le silicium amorphe non hydrogéné est de l'ordre de 10^{19} à 10^{20}cm^{-3} . Ces liaisons pendantes créent des états électroniques dans la région centrale du gap qui rendent le matériau difficilement utilisable pour des applications électroniques [21]. On trouve des atomes de silicium avec un électron célibataire d'où la liaison pendante qui peut constituer un piège à électron comme elle peut constituer un piège à trous. [16]

1.6.2.2. Silicium amorphe hydrogéné

Le silicium amorphe a été découvert vers la fin du 19^{ième} siècle, mais il ne présentait aucun intérêt [16]. En effet il était impossible de le doper car les porteurs se fixaient sur les liaisons pendantes. En 1975, Chittick et al, ont observé qu'en déposant le silicium amorphe par un plasma de silane et l'incorporation de 10% de l'hydrogène plus de 99.9% de défauts étaient saturés par l'hydrogène [22], ce qui rend ce matériau utilisable comme semi-conducteur car on pouvait le doper.

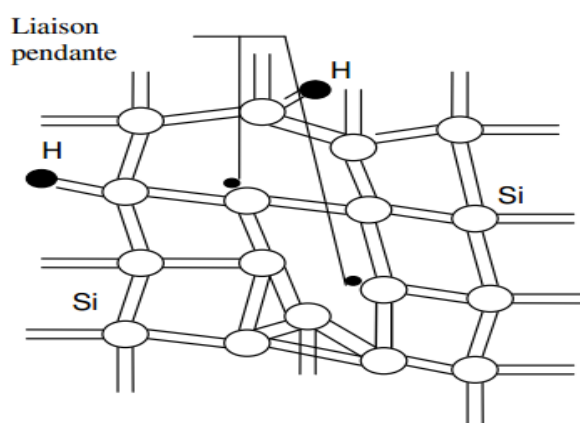
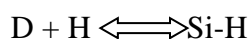


Figure 1.15 : Structure du silicium amorphe hydrogéné.

1.6.2.3. Le rôle de l'hydrogène

L'Hydrogène incorporé passive une grande partie des liaisons pendantes, via l'équilibre suivant :



D est le symbole introduit pour désigner la liaison pendante portée par un atome de Silicium en coordination « 3 ». Le a-Si:H non dopé en possède en général moins de 10^{16}cm^{-3} . L'hydrogène contribue également à réduire le désordre et à diminuer la largeur des queues de bande.

Cependant, pour certaines conditions de dépôt, l'hydrogène peut aussi casser des liaisons. En réalité, il existe un équilibre de rupture des liaisons faibles Si-Si et de formation des liaisons pendantes assisté par l'Hydrogène [22].

1.6.2.4. Métastabilité du silicium amorphe

Les propriétés du silicium amorphe hydrogéné évoluent défavorablement lorsque le matériau est soumis à un éclairage prolongé, un passage du courant, une injection de porteurs ou à certains autres phénomènes. On dit qu'il vieillit. L'effet le plus connu de la métastabilité est la création de défauts par éclairage prolongé. On désigne ce phénomène par 'effet Staebler et Wronski' du nom des premiers

auteurs l'ayant étudié. Ce phénomène est heureusement réversible en soumettant le matériau à un recuit à une température de l'ordre de 170°C. [16]

1.6.2.5. Diagramme de bande

Le diagramme de bande de la figure 1.16 représente la différence entre les densités d'états du silicium cristallin et silicium amorphe hydrogéné.

Dans le cas du silicium amorphe les états sont étendus (les porteurs participent à la conduction) et des queues de bande, modélisées par une exponentielle, se prolonge dans la bande interdite. Les états dans ces queues sont localisés. La largeur de la queue de bande de valence est plus large que celle de la queue de bande de conduction, ce qui explique le fait que le dopage de type p est plus difficile dans le a-Si:H (il y'a plus d'états localisés dans lesquels les trous libérés par les atomes trivalents préfèrent se mettre). Les défauts profonds dus aux liaisons pendantes peuvent être modélisés par deux gaussiennes (l'une pour les défauts de caractère accepteur D^{0-} , l'autre de caractère donneur D^{+0}) [16]. L'état neutre D^0 est occupé par un électron célibataire, l'électron célibataire qui quitte l'atome forme un défaut chargé positivement D^+ ou bien l'atome reçoit un électron pour former un défaut chargé négativement D^- . [22]

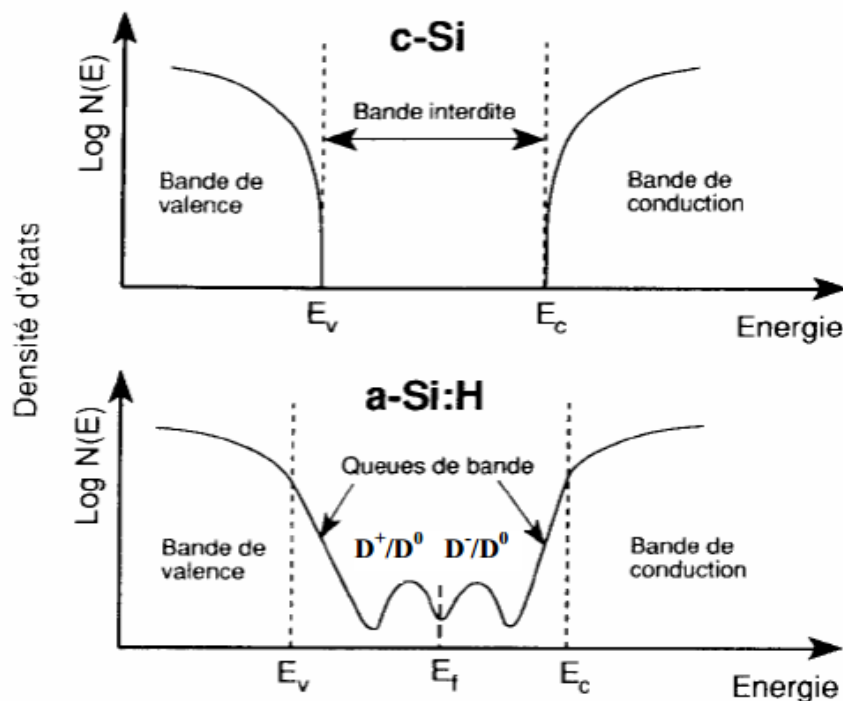


Figure 1.16 : Diagrammes de bande du silicium cristallin et amorphe.

1.6.2.6. Les Processus de dépôt du silicium amorphe hydrogéné en couche mince

La technique PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) ou (dépôt chimique en phase gazeuse assisté par plasma) est le procédé le plus utilisé pour déposer des couches minces de silicium amorphe. Il consiste dans la déposition des couches minces sur un substrat à partir d'un état gazeux vers un état solide. Le plasma est créé par une onde RF (Radio Fréquence) engendrant une décharge entre deux électrodes où l'espace est rempli d'un gaz réactif [23]. La fréquence la plus utilisée est celle adoptée par les industriels, elle est de 13,56MHz et permet d'avoir un plasma stable au cours du temps. [24]

Dans le plasma RF de 13,56 MHz ce sont les électrons qui ont la mobilité la plus grande. Par conséquent, seules les collisions entre les électrons et les molécules de silanes SiH_4 sont inélastiques et créent des ions (SiH_3^+ , SiH_2^+ , SiH^+) et des radicaux (SiH_3 , SiH_2 , SiH) dans le plasma (réactions primaires). Les radicaux et les ions à leur tour peuvent réagir entre eux (réactions secondaires) pour former les agrégats et les cristallites. Tout ce mélange se dirige vers l'électrode de substrat grâce au champ électrique ou simplement par diffusion. Sur cette surface, seule une petite partie de ces espèces se stabilise après la collision avec le substrat. [23]

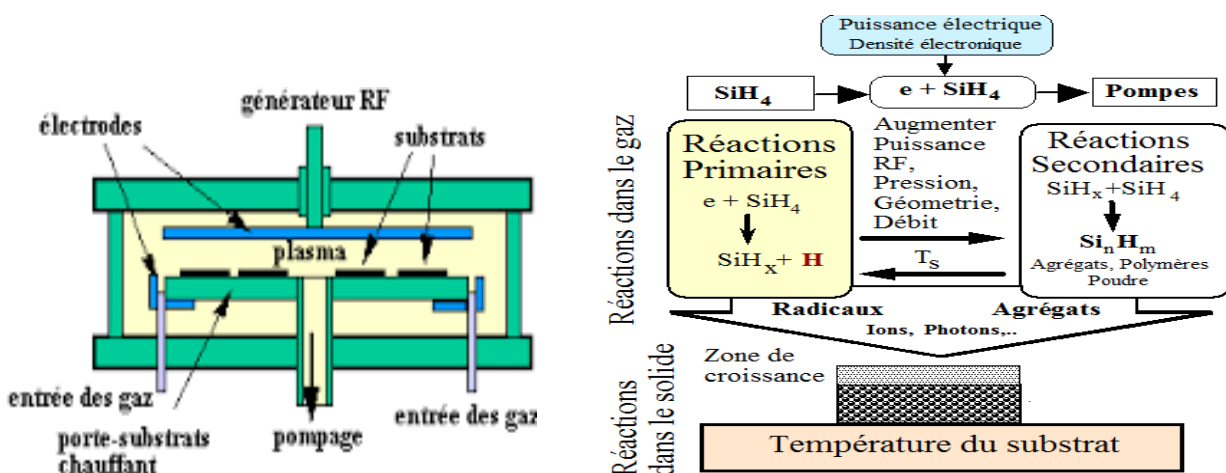


Figure 1.17 : Le processus de cristallisation des couches minces a-Si :H déposées par PECVD.

1.6.3. Cellules en filières silicium

La première technologie mettant en œuvre l'effet photovoltaïque est basée sur le silicium monocristallin ou multi-cristallin découpés en plaquettes à partir de lingots. Elle constitue actuellement l'essentiel de l'industrie photovoltaïque, voire plus de 80% de la production mondiale.

1.6.3.1. Cellule en silicium monocristallin

Matériau le plus répandu, présentant un bon rendement à fort et moyen éclairement, il est à la base des panneaux « terrestres » les plus performants après ceux à l'arséniure de gallium.

- Rendement des cellules : jusqu'à 25 % STC. [25]
- Puissance des panneaux : 5 à 300 Wc.
- Gamme d'éclairement : 100 à 1 000 W/m².
- Usage : tous usages en extérieur de forte et moyenne puissance : télécoms, centrales et toit solaires.[1]

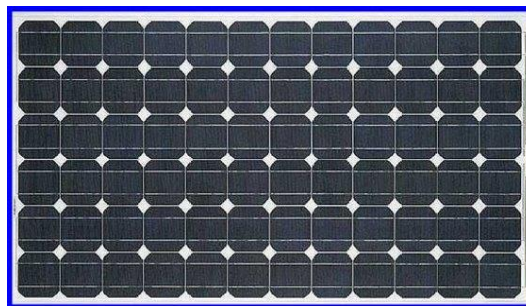


Figure 1.18: Cellule en silicium cristallin.

1.6.3.2. Cellule en Silicium poly (ou multi-) cristallin

Il est un peu moins performant, essentiellement aux éclairagements modérés, et également moins onéreux.

- Rendement des cellules : jusqu'à 21 % STC. [25]
- Puissance des panneaux : 5 à 300 Wc.
- Gamme d'éclairement : 200 à 1 000 W/m². [1]

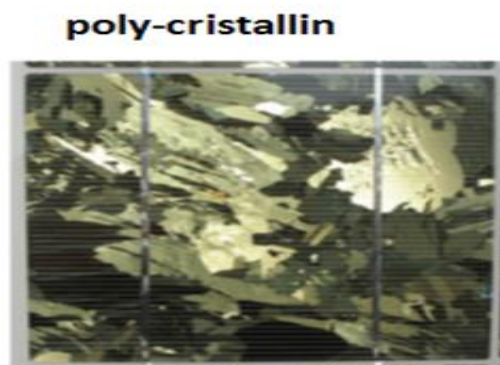


Figure 1.19 : Cellule en Silicium poly (ou multi-) cristallin.

1.6.3.3. Cellule en Silicium amorphe

Nettement moins puissant au soleil que les deux précédents, ce silicium en couche très mince répond par contre à tous les éclairagements, extérieur et intérieur. Sa technologie de fabrication est moins onéreuse.

- Rendement des cellules : jusqu'à 14 % STC. [25]
- Puissance des photopiles intérieures : 0 à 1 Wc
- Puissance des panneaux extérieurs : 0,5 à 90 Wc
- Gamme d'éclairément : 20 W/m² (en intérieur) à 1 000 W/m²(en extérieur).
- Usage : électronique de faible consommation en extérieur, baies vitrées semi-transparentes.[1]



Figure 1.20: Cellule en Silicium amorphe.

1.6.3.4. Cellules à hétérojonction en silicium amorphe et cristallin

Elles sont constituées d'une tranche de silicium cristallin, encadrée par deux couches ultrafines de silicium amorphe. Elles combinent ainsi les deux technologies photovoltaïques actuellement sur le marché, de manière à augmenter leurs rendements.[26]



Figure 1.21 : Cellule à hétérojonction en silicium amorphe et cristallin

1.7. LES AVANTAGES ET LES INCONVENIENTS D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE

1.7.1. Avantages

- ❖ Une haute fiabilité, les modules sont garantis durant 25 ans par la plupart des constructeurs .
- ❖ Les panneaux solaires ne comportent pas de pièces mobiles, ce qui les rend particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de leur utilisation sur les engins spatiaux.
- ❖ Leurs coûts de fonctionnement sont très faibles vu les entretiens réduits, et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.
- ❖ La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique, car le produit final est non polluant, peu de déchet, pas de ligne électrique supplémentaire et pas de nuisance sonore.

1.7.2. Inconvénients

- ❖ La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- ❖ L'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.
- ❖ Le rendement réel de conversion d'un module est faible.
- ❖ Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs Diesel que pour de faibles demandes d'énergie en régions isolées. [27]

1.8. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté des généralités sur les cellules photovoltaïques. Nous avons commencé par expliquer le principe de fonctionnement de ces cellules, en développant les différents phénomènes créés au niveau de la jonction p-n, qui est l'élément de base d'une cellule solaire.

Par la suite, nous avons présenté les matériaux silicium cristallin et silicium amorphe hydrogéné qui constituent les matériaux principaux utilisés dans les cellules solaires de type HIT que nous allons étudier.

Nous avons montré que le silicium cristallin, qui grâce à ses propriétés structurales, est le matériau le plus utilisé dans la filière photovoltaïque, car il donne de bons rendements mais l'inconvénient c'est qu'il coûte cher et qu'il ne peut pas être déposé en couche mince. Cependant, le silicium amorphe hydrogéné a pour avantage d'être moins cher, il est possible de le déposer sur des très grandes surfaces mais il fournit de plus faibles rendements que le silicium cristallin à cause de sa structure désordonnée.

Puis nous avons expliqué les différents phénomènes qui apparaissent lors de l'établissement d'une jonction pn qui représente le principe de base d'une photopile solaire.

Enfin, nous avons présenté les cellules utilisant la filière silicium et donné quelques informations sur le rendement et la puissance de ce type de cellules. Nous avons clôturé ce chapitre par quelques avantages et inconvénients des cellules photovoltaïques en général.

2. CELLULE A HETEROJONCTION DE TYPE HIT « HETEROJUNCTION WITH INTRINSIC THIN LAYER »

2.1. INTRODUCTION

La technologie des cellules solaires à hétérojonctions silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H)/silicium cristallin (c-Si) a attiré l'attention de la communauté photovoltaïque et suscite un grand intérêt au niveau de la recherche et développement industriel.

La première hétérojonction entre silicium cristallin et silicium amorphe hydrogéné a été proposée en 1974 par Fuhs et al qui ont montré que cette structure pouvait générer un photo-courant. Une cellule photovoltaïque réalisée à partir de ces matériaux avec un rendement de 12,4 % à été fabriquée en 1983 par Okuda [12]. Par la suite, l'entreprise japonaise Sanyo a mis en œuvre en octobre 1997 une production de masse des modules photovoltaïques à partir des structures HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin layer). [19]

La cellule solaire HIT est constituée de plaquettes hybrides monocristallines recouvertes d'une fine couche de silicium amorphe. Ce processus moderne de production permet la fabrication des cellules solaires d'une efficacité supérieure et d'un rendement d'énergie optimisé. [29]

2.2. DESCRIPTION DU CELLULE HIT

La structure d'une cellule à hétérojonction de silicium conventionnelle de type HIT Sanyo est représentée sur la figure 2.1. Le wafer de silicium cristallin de type n est recouvert en face avant par une couche mince de silicium amorphe hydrogéné non dopée puis d'une couche dopée p formant l'émetteur. En face arrière, nous retrouvons un empilement similaire ou la couche dopée est de type n+ afin de former le champ arrière BSF. Les couches supplémentaires sont l'ITO pour améliorer l'absorption des photons dans la structure et des métallisations. [7]

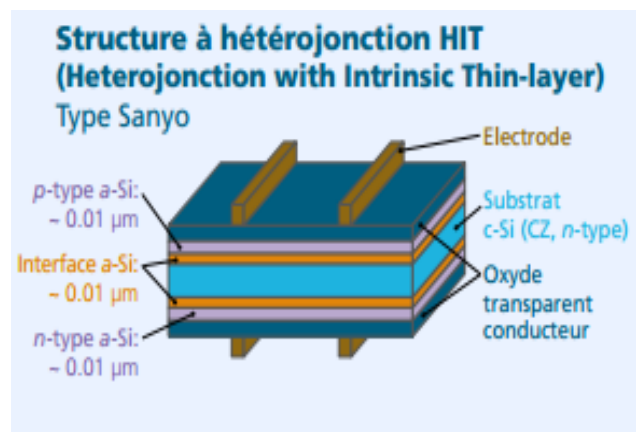


Figure 2.1 : Structure HIT fabriquée par SANYO.

Suite au succès obtenu par l'entreprise Sanyo, plusieurs laboratoires européens ont débuté des recherches en se basant sur le même type de structure mais en utilisant un substrat de type p. Un groupe est parvenu à fabriquer des cellules sur substrat d'une épaisseur de 350 μ m avec BSF, possédant un rendement de 16.2%. Ce résultat laisse penser que ce type de cellule est très susceptible d'atteindre de très hauts rendements. [11]

2.3. LES COMPOSANTS IMPORTANTS DANS LA CELLULE SILICIUM A HETEROJONCTION HIT

2.3.1. L'Oxyde Transparent Conducteur « TCO »

Dans la structure standard d'une cellule photovoltaïque, un oxyde transparent conducteur est placé sur la face avant (face éclairée) de la cellule. Il doit avoir une excellente transparence optique pour avoir le maximum de lumière qui pénètre dans la cellule afin de générer des paires électron-trou. En général, le TCO est à base de ZnO (oxyde de zinc), SnO₂ (Oxyde d'étain) ou bien ITO (Oxyde d'Indium-Etain). [30]

2.3.1.1. Rôle de l'ITO dans la performance des cellules

L'ITO est un semi-conducteur de type N à large bande interdite ($E_g > 3$ eV). La caractéristique principale de l'oxyde d'indium-étain est sa combinaison de conductivité électrique et de transparence optique, dans le cas des hétérojonctions silicium amorphe / silicium cristallin cette couche doit être très dopée afin d'assurer un bon contact avec l'émetteur amorphe et doit être la plus transparente ce qui permet à la lumière d'arriver à l'émetteur sans trop de perte. [31]

2.3.2. Emetteur a-Si :H « couche fenêtre »

L'émetteur est constitué par une fine couche de silicium amorphe hydrogéné de dopage opposé au dopage du substrat. Il permet d'avoir une hétérojonction p-n afin de séparer les paires électron-trou photo générés. L'émetteur doit être pris très mince pour minimiser l'absorption dans cette couche. [30]

2.3.3. Couche intrinsèque a-Si :H(i)

En insérant une couche a-Si:H non dopé (intrinsèque) entre le substrat c-Si et la couche de a-Si:H dopée on augmente considérablement la passivation de surface et donc la V_{co} de la cellule. La faible épaisseur de cette couche de a-Si:H intrinsèque dite « tampon » ne perturbe pas le champ électrique tout en diminuant la densité des défauts à l'interface. [6]

2.3.4. Absorbteur c-Si « substrat » de type n ou p

La plupart des cellules solaires HIT à haut rendement ont été fabriquées avec des substrats en silicium cristallin c-Si de type n. Par la suite des laboratoires Européens ont mis au point des cellules HIT de type p mais avec des rendements moins intéressants [32]. On combine une couche d'émetteur de silicium amorphe de type n ou p avec un substrat en silicium cristallin c-Si de dopage opposé au dopage de l'émetteur pour former l'hétérojonction.

2.3.5. BSF (Back Surface Field)

Le BSF est une couche qui crée un champ électrique arrière. Cette couche étant fortement dopée (p+ou n+) avec le même type de dopage que le substrat, 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 [7]. La structure BSF permet d'assurer une meilleure collecte des porteurs majoritaires. [30]

2.3.6. Contacts

Les contacts métalliques sont placés sur les deux faces de la cellule pour les structures standards. Ces contacts permettent de collecter le courant photo- généré.

2.4. AVANTAGES DE LA STRUCTURE HIT

- ❖ Le principal avantage de cette technologie est un excellent rendement et un meilleur comportement en température (la cellule perd moins de son efficacité lorsque la température augmente).
- ❖ Le procédé de fabrication HIT est relativement plus simple, il ne nécessite pas d'étape à très haute température coûteuse en énergie et exige moins de temps que d'autres procédés de fabrication. [33]
- ❖ L'effet Staebler-Wronski portant sur l'instabilité du silicium amorphe dopé n'est pas observé pour les cellules HIT.
- ❖ La structure HIT répond aux problèmes de manque de matière première et le procédé de fabrication s'effectue entièrement à basse température diminuant les phénomènes de stress mécanique et thermique. Une utilisation de substrat mince est donc possible. [28]

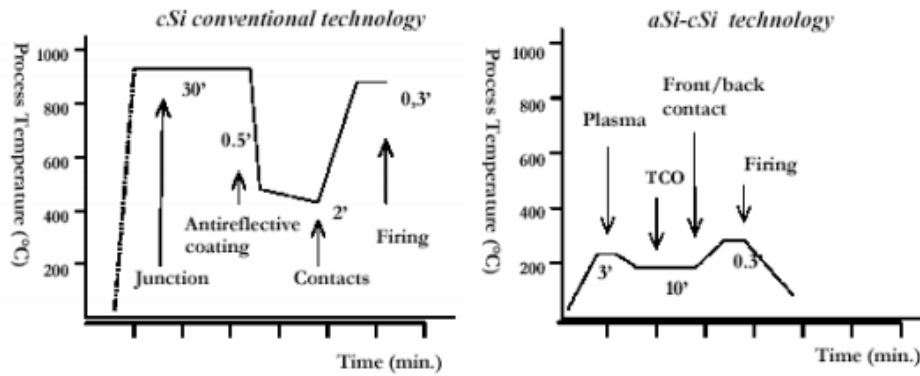


Figure 2.2 : Comparaison du budget thermique et du temps de procédé pour les technologies associées aux cellules classique et aux hétérojonctions amorphe /cristallin.

2.5. PRINCIPE DE BASE DE L'HETEROJONCTION a-Si:H/c-Si

2.5.1. Généralités

Une hétérojonction est une jonction pn correspondant au contact de deux semi-conducteurs différents dont l'un est dopé p et l'autre n [28]. Lorsque le contact est établi, il se produit un échange de charges qui fait tendre le système vers l'équilibre thermodynamique.

L'émetteur qui est la zone fortement dopée dans le cas d'une homo-jonction est remplacé par un matériau à grand gap (ici le silicium amorphe, a-Si:H) [30], la discontinuité de bande empêche les électrons de rétrodiffuser et diminue ainsi les pertes par recombinaison [11].

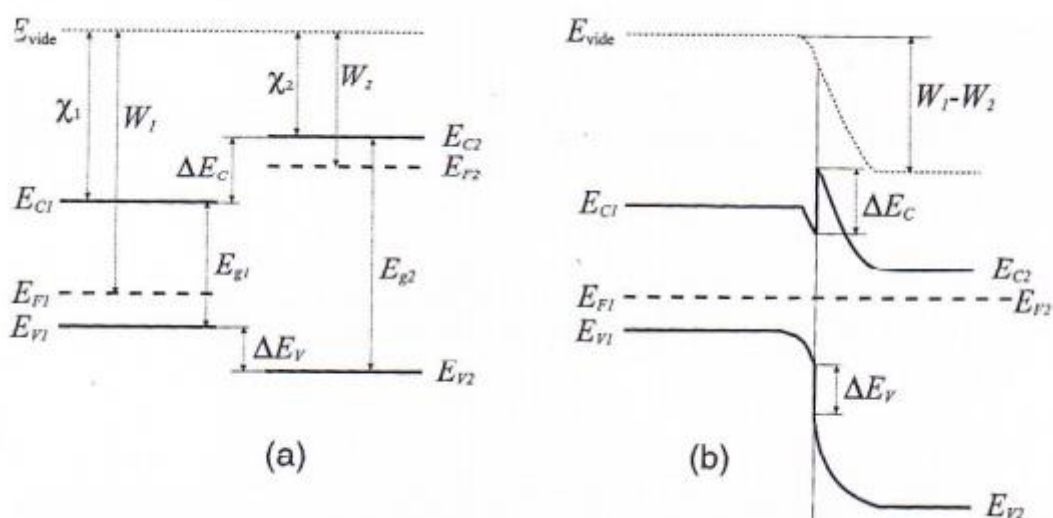


Figure 2.3 : Diagramme de bande avant (a) et après (b) la formation de l'hétérojonction.

Le diagramme de bande dépend des paramètres suivants:

Le travail d'extraction w_i , l'affinité électronique $^1\chi_i$, l'énergie de Fermi E_{Fi} , le maximum de la bande de valence E_{Vi} , le minimum de la bande de conduction E_{Ci} et le gap E_{gi} . Le niveau du vide est noté E_{vide} .

2.5.2. Modèle d'Anderson

Le modèle d'Anderson (1960) est le modèle de base pour décrire les conditions de mise en contact de deux matériaux semi-conducteurs[30]. Le principe du modèle repose sur la prise en compte des propriétés électroniques des matériaux utilisés:

Les différences entre les valeurs de E_{g1} , E_{g2} , et les affinités électroniques χ_1 , χ_2 engendrent des discontinuités au niveau du raccordement des bandes de conduction et de valence ΔE_C , ΔE_V . Le modèle d'Anderson ne prend pas en considération les états d'interface et s'appuie sur l'hypothèse que le transport du courant se fait par injection dans les régions quasi-neutres ou bien par recombinaison /génération dans la zone de charge d'espace (ZCE).

En faisant l'hypothèse que les quasi- niveaux de fermi ne varient pas à travers la zone de déplétion comme pour une homo-jonction .on obtient les relations suivantes [11]:

$$\Delta E_C = q(x_2 - x_1) \quad (2.1)$$

$$\Delta E_V = (x_1 - x_2)q + E_{g1} - E_{g2} \quad (2.2)$$

A partir du diagramme de bandes (Figure 2.4), nous pouvons calculer le potentiel induit :

$$E_{g1} = qV_{d1} + \Delta E_C + qV_{d2} + \delta_{n2} + \delta_{p1} \Rightarrow qV_d = qV_{d1} + qV_{d2} = E_{g1} - \Delta E_C - \delta_{n2} - \delta_{p1}$$

De l'équation (2.2) on trouve $\Delta E_C = E_{g1} - E_{g2} - \Delta E_V$

En remplaçant ΔE_C dans l'expression de qV_d on trouve :

$$qV_d = E_{g2} - \delta_{n2} - \delta_{p1} + \Delta E_V \quad (2.3)$$

¹ L'affinité électronique représente la quantité d'énergie nécessaire pour qu'un électron passe de la bande de conduction au niveau du vide.

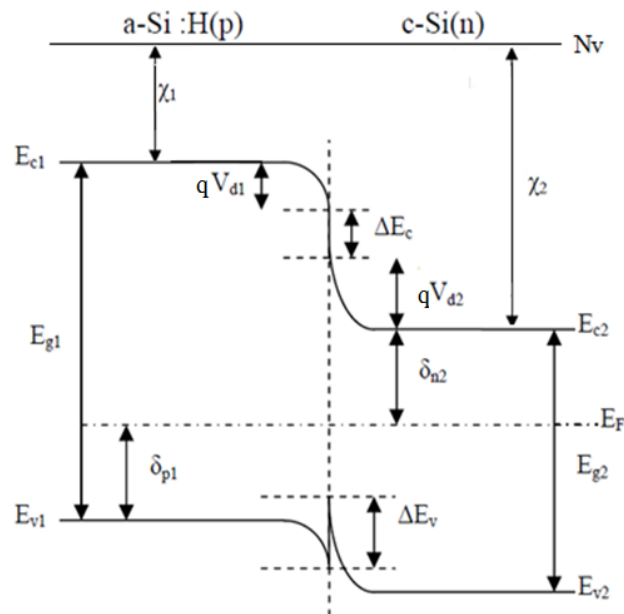


Figure 2.4 : Diagramme de bandes d'une hétérojonction a-Si:H(p)/c-Si(n) à en utilisant le modèle d'Anderson.

2.6. CARACTERISTIQUES DE L'EMETTEUR a-Si:H

Il est préférable que la couche de silicium amorphe hydrogéné constituant l'émetteur soit la plus fine possible (quelques nm) pour deux raisons : la forte absorption de la lumière et la faible longueur de diffusion des porteurs. Le coefficient d'absorption du silicium amorphe est plus élevé que celui du silicium cristallin dans le domaine compris entre 400 nm et 690 nm.[31]

La figure 2.5 illustre l'influence de l'épaisseur de l'émetteur sur l'absorption des photons de haute énergie (énergie supérieure à la bande interdite). Ainsi, plus les deux couches amorphes (émetteur + intrinsèque) seront minces plus de photons seront transmis au substrat cristallin.[31]

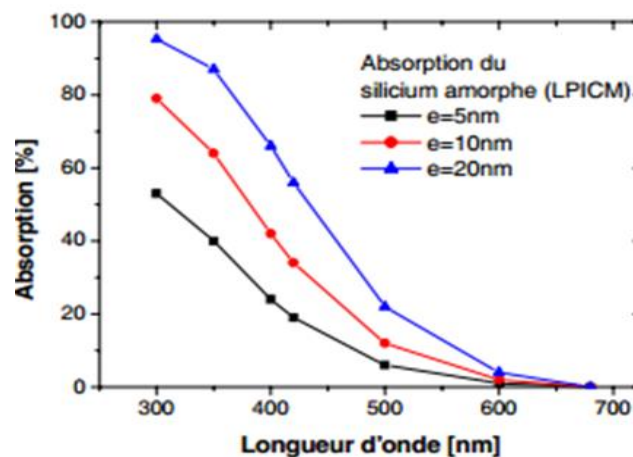


Figure 2.5 : L'influence de l'épaisseur de l'émetteur sur l'absorption.[31]

2.7. INFLUENCE DE LA COUCHE INTRINSEQUE SUR LA QUALITE DE CELLULE HIT

L'introduction d'une couche de silicium amorphe intrinsèque (a-Si :H(i)) est le point clé du succès des cellules HIT .

Une étude théorique a montré que les défauts à l'interface a-Si / c-Si affectent la performance de la cellule. La discontinuité de la bande de valence dans l'interface entre l'émetteur de type p et le c-Si de type n conduit à une perte significative des porteurs photo-générées. Il a été montré que l'insertion de la couche a-Si: H(i) entre la plaquette de c-Si et la couche de silicium hydrogéné donne une meilleure surface de passivation et diminue les défauts à l'interface, elle donne un meilleur résultat pour les paramètres des cellules. [32]

2.8. MODELISATION DES CELLULES HIT

La modélisation est un outil puissant permettant de reproduire mathématiquement le fonctionnement d'objets et de systèmes. Par fonctionnement, on entend l'évolution des variables électriques externes et des grandeurs physiques internes sous l'effet de différentes contraintes.[9]

2.8.1. Modèle mathématique équivalent à une cellule

Le modèle mathématique associé à une cellule se trouve à partir de celui d'une jonction p-n.

❖ Jonction p/n sous polarisation :

Une polarisation inverse de la diode ($V < 0$ appliquée en zone p) entraîne une augmentation de la hauteur de barrière. Le flux de majoritaire est alors réduit au seul courant de fuite, ou courant de saturation de la diode qui injecte les électrons de l'émetteur dans la base pour compenser les pertes en minoritaires dues aux recombinaisons. On dit que la jonction est sous obscurité et on donne la relation de la densité de courant d'obscurité J_{obsc} :[6]

$$J_{obsc} = J_0 \left(e^{\frac{qV}{nkT}} - 1 \right) \quad (2.4)$$

V : Tension aux bornes de la jonction.

J_0 : Densité de courant de saturation de la diode ($A.cm^{-2}$).

n : Facteur d'idéalité de la diode.

❖ **Jonction p-n sous éclaircissement :**

Sous éclaircissement, les paires électron-trou créées dans le semi-conducteur sont balayées par le champ électrique interne et produisent une densité de courant J_{Ph} . Le courant I_{Ph} passe dans le circuit extérieur à travers une résistance de charge, ce qui induit une auto polarisation V de la cellule. On donne : [20]

$$J_{\text{éclairage}} = J_{ph} - J_{obs} = J_{ph} - J_0 \left(e^{\frac{qV}{nkT}} - 1 \right) \quad (2.5)$$

J_{obs} : Densité de courant d'obscurité.

J_{ph} : Densité de courant photo-généré.

On peut ainsi exprimer la densité de courant qui circule dans le circuit en fonction de la tension appliquée à ses bornes, en prenant en compte les pertes, avec la formule générale suivante :

$$J = J_{ph} - J_0 \left(e^{\frac{qV}{nkT}} - 1 \right) - \frac{V + R_S J}{R_{Sh}} \quad (2.6)$$

R_{Sh} : Résistance shunt.

R_S : Résistance série.

Le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque sous éclaircissement est approximé au niveau électrique par le schéma équivalent de la figure 2.6.

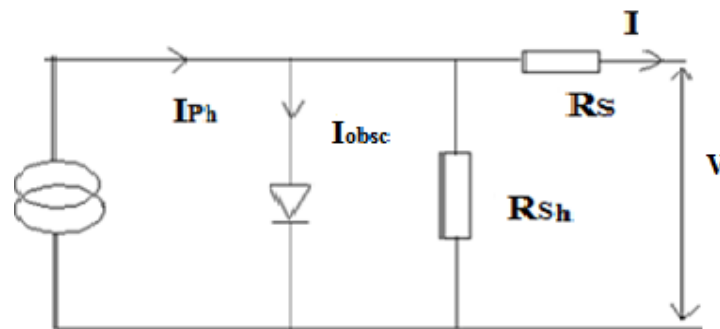


Figure 2.6: Schéma électrique équivalent d'une cellule solaire.

La diode modélise le comportement de la cellule dans l'obscurité. Le générateur de courant modélise la densité de courant photo-généré par un éclaircissement. Enfin, les deux résistances modélisent les pertes internes :

- ❖ R_{Sh} est une résistance shunt qui prend en compte les fuites inévitables de courant qui interviennent entre les bornes opposées positive et négative d'une photopile.

- ❖ R_S est une résistance série qui est due aux différentes résistances électriques que le courant rencontre sur son parcours (résistance intrinsèque des couches, résistance des contacts).[1]

2.8.2. Caractéristique $J(V)$

La caractéristique densité de courant –tension sous éclairement est la principale technique utilisée pour caractériser une cellule solaire. Elle permet de calculer la puissance fournie par la cellule ainsi que son rendement de conversion.

La densité de courant débité par la cellule photovoltaïque sous éclairement est la somme de la densité de courant d'obscurité de la diode et de la densité de courant photo- généré, il s'écrit :

$$J(V) = J_{Ph} - J_{obsc}(V) \quad (2.7)$$

Ainsi, la densité de courant J_{Ph} obtenu par éclairement contribue à la densité de courant inverse de la diode et la densité de courant d'obscurité J_{obsc} direct résulte de la polarisation du composant.[34]

Les caractéristiques sous obscurité et sous éclairement sont représentées sur la figure 2.7.

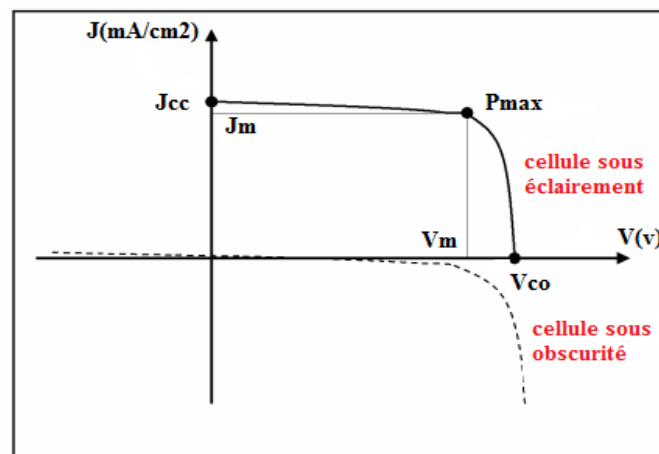


Figure 2.7 : Les caractéristiques sous obscurité et sous éclairement d'une cellule solaire.

C'est la valeur de la charge R qui va déterminer le point de fonctionnement de la cellule solaire. La puissance électrique produite sous éclairement est égale au produit de l'intensité délivrée et de la tension à ses bornes. Il faut donc adapter R à ces bornes pour la faire fonctionner à P_{max} .

2.8.3. Paramètres des cellules photovoltaïques

La caractéristique de la cellule solaire permet de déduire les paramètres photovoltaïques propres à la cellule.

2.8.3.1. Courant de court circuit I_{cc}

Il s'agit du courant qui traverse la cellule photovoltaïque lorsque celle-ci est en court circuit, c'est-à-dire lorsque le pôle positif + est relié au pôle négatif - (la tension à ses bornes est nulle). Dans ce cas, la puissance fournie par la cellule $P=U*I$ est nulle [8]. Il dépend de la surface éclairée de la longueur d'onde du rayonnement et de la température.[35]

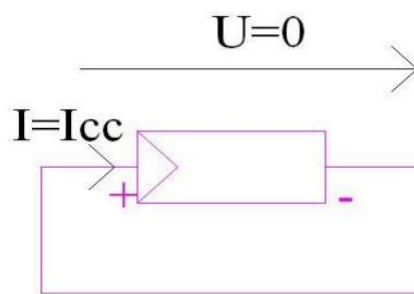


Figure 2.8: Cellule photovoltaïque en court circuit.

2.8.3.2. Tension de circuit ouvert V_{co}

La tension de circuit ouvert V_{co} est la tension maximale aux bornes d'une cellule lorsque le courant est nul.

Elle est liée au rapport entre J_{cc} et la densité de courant de saturation J_s comme indiqué dans l'équation (2.8). [13]

$$V_{co} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{J_{cc}}{J_s} + 1\right) \quad (2.8)$$

$\frac{kT}{q}$: Le potentiel thermodynamique.

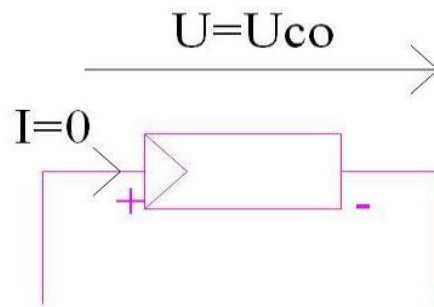


Figure 2.9: Cellule photovoltaïque en circuit ouvert.

2.8.3.3. Facteur de forme FF

Un paramètre important est souvent utilisé à partir de la caractéristique $J(v)$ pour qualifier la qualité d'une cellule ou d'un générateur : c'est le facteur de forme (facteur de remplissage) ou Fill Factor (FF) [8]. Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule notée p_{max} et la puissance formée par le rectangle $I_{cc} * V_{co}$.[35]

Le facteur de forme est défini par la relation suivante :

$$FF = \frac{p_{max}}{I_{cc} * V_{co}} \quad (2.9)$$

2.8.3.4. Rendement de conversion η

Le rendement η des cellules solaires désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente p_{in} .

$$\eta = \frac{P_{max}}{p_{in}} = \frac{FF * V_{co} * I_{cc}}{p_{in}} \quad (2.10)$$

p_{in} : La puissance incidente est égale à la puissance solaire: ($p_{solaire} = 1000 \text{ W/m}^2$).

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension en circuit ouvert. [35]

2.8.3.5. Réponse spectrale

La réponse spectrale externe (ou rendement quantique) est le rapport entre le nombre de paires électrons- trous photo générées collectées par les contacts ohmiques et le nombre de photons incidents pour une longueur d'onde donnée. La réponse spectrale interne est le nombre de paires électrons-trous collectées divisé par le nombre de photons absorbés. [10]

Soit :

$$RS_{EXT} = \frac{Jph(\lambda)}{qN(\lambda)} \quad (2.11)$$

$$RS_{INT} = \frac{Jph(\lambda)}{qN(\lambda)[1 - R(\lambda)]} \quad (2.12)$$

RS_{EXT} : La réponse spectrale externe.

RS_{INT} : La réponse spectrale interne.

$Jph(\lambda)$: La densité de courant fournie sous éclairnement pour la longueur d'onde λ .

$N(\lambda)$: Le nombre des photons incidents.

$R(\lambda)$: Le coefficient de réflexion de la surface d'une cellule solaire.

q : La charge de l'électron.

2.8.4. Modèle pour la simulation des dispositifs à base de semi-conducteur

La partie électrique du modèle résout simultanément l'équation de Poisson et les équations de continuité des trous et des électrons. Ces équations sont résolues simultanément dans des conditions d'état d'équilibre et hors équilibre (c'est à dire sous l'effet de la polarisation de la tension ou/et de la lumière). Ces équations sont :

L'équation de Poisson :
$$\frac{\partial^2 \Psi(x)}{\partial^2 x^2} = \frac{\rho(x)}{\varepsilon} \quad (2.13)$$

L'équation de continuité des trous
$$G(x) - R(p(x), n(x)) - \frac{1}{q} \frac{\partial j_p(x)}{\partial x} = 0 \quad (2.14)$$

L'équation de continuité des électrons
$$G(x) - R(p(x), n(x)) - \frac{1}{q} \frac{\partial j_n(x)}{\partial x} = 0 \quad (2.15)$$

La densité de charge effective
$$\rho(x) = q[p(x) - n(x) + p_T(x) - n_T(x) + N_{net}^+] \quad (2.16)$$

Le champ électrique :
$$E = \frac{\partial \Psi(x)}{\partial x} \quad (2.17)$$

ε représente la constante diélectrique, \mathbf{E} le champ électrique, $\Psi(\mathbf{x})$ le potentiel électrostatique, \mathbf{x} la position dans le dispositif, p et n les densités des trous et des électrons dans la bande de valence et de conduction, q la charge électronique, \mathbf{R} le taux de recombinaison, p_T et n_T . La densité des trous et des électrons piégés respectivement, N_{net}^+ la densité de dopage effective, \mathbf{G} le taux de génération de paires électron-trou, j_p et j_n les densités de courant des trous et des électrons respectivement. [11]

2.8.4.1. Calcul des états localisés continus dans le gap

Dans les semi-conducteurs amorphes ou désordonnés, pour lesquels ce modèle a été principalement élaboré, des états localisés continus dans le gap existent. Ces états proviennent des queues de bande représentées par des courbes exponentielles et des défauts ou liaisons pendantes représentées par des Gaussiennes.

La figure 2.10 exprime les deux différents types de distribution des états localisés continus dans le gap intégrés dans le programme.

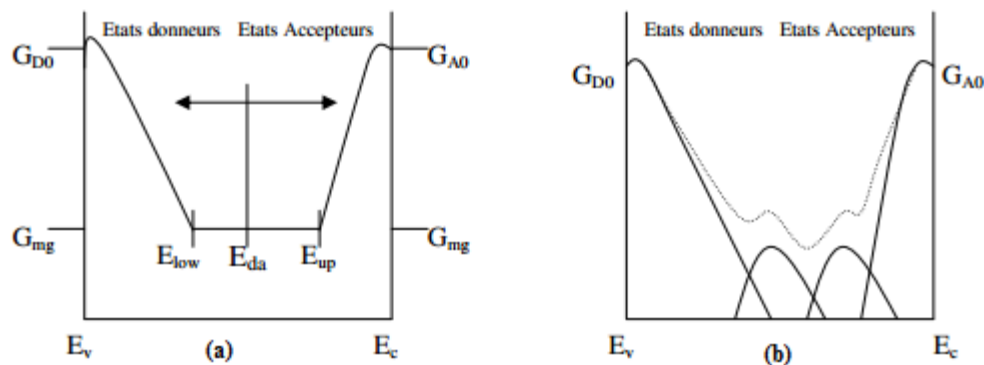


Figure 2.10 : Distribution des états localisés dans le gap utilisée dans le programme.

(a) Modèle en U (U-shaped model) (b) Modèle en deux gaussiennes.

Le symbole $p_T(x)$ représente les états accepteurs dans le gap par unité de volume. Ces états perdent leurs électrons dans la bande de valence, et donc p_T représente le nombre de trous piégés par unité de volume. De même, $n_T(x)$ représente les états donneurs dans le gap par unité de volume. Ces états gagnent des électrons de la bande de conduction, et donc n_T représente le nombre d'électrons piégés par unité de volume. Dans les deux modèles, les états donneurs dans le gap sont représentés par $(D^+/0)$. Les états accepteurs sont représentés par $(D^-/0)$. [21]

2.8.4.1.1. Distribution dans les queues de bandes

Dans le programme, les queues de bande des états donneurs sont modélisées par l'équation:

$$g_{DT}(E) = G_{D0} \exp[-E/E_D] \quad (2.18)$$

E est mesurée à partir de E_v .

Les queues de bande des états accepteurs sont modélisées par l'équation :

$$g_{AT}(E') = G_{A0} \exp[-E'/E_A] \quad (2.19)$$

E' est mesurée à partir de E_C

g représente la densité d'états (D.O.S. ($\text{cm}^{-3} \text{eV}^{-1}$)).

E_D et E_A représentent les énergies caractéristiques des queues de bande de la bande de valence et de conduction.

2.8.4.1.2. Distribution au milieu du gap

➤ Le modèle en U (U-shaped model)

Dans le modèle en U, la densité d'états dans le gap est une valeur constante égale à G_{mg} (figure 2.10(a))[6], Cette région plate est alors ajoutée à la région exponentielle des queues de bandes pour ainsi compléter le modèle en U.

➤ Le modèle en gaussiennes

Dans ce modèle, la distribution de la densité d'états dans le gap est modélisée en utilisant deux gaussiennes. Dans le cas du silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H), la séparation entre les deux pics des deux gaussiennes est prise égale à 0.5 eV

La première Gaussienne se compose d'états donneurs ($D^-/0$) de densité d'états $N_{AG} \text{ cm}^{-3}$. La deuxième Gaussienne ($D^+/0$) se compose d'états accepteurs de densité d'états $N_{DG} \text{ cm}^{-3}$. [11]

2.8.4.2. Expressions des courants d'électrons et de trous

Le courant de dérive est provoqué par l'action d'un champ électrique qui accélère les porteurs. Ils acquièrent alors une vitesse proportionnelle au champ au travers d'un facteur de mobilité μ :

$$J_n = qn\mu_n E \quad (2.20)$$

$$J_p = qp\mu_p E \quad (2.21)$$

Hors des zones de champ électrique, le courant de diffusion devient majoritaire. Il exprime la tendance des porteurs, tout comme les atomes d'un gaz à se répandre dans les zones de plus faible concentration. Le courant de diffusion est donc proportionnel au gradient de concentration dans la structure.

$$J_n = qD_n \nabla_n \quad (2.22)$$

$$J_p = -qD_p \nabla_p \quad (2.23)$$

D_n et D_p sont les coefficients de diffusion.

2.8.4.3. Méthode de résolution

A l'équilibre thermodynamique, il n'y a que l'équation de Poisson à résoudre. Il s'agit d'une équation différentielle non linéaire du second ordre.

Hors l'équilibre thermodynamique, les variables inconnues sont : $\Psi(x)$, E_{F_p} et E_{F_n} . L'équation de Poisson $\Psi = \Psi(x)$ et les équations de continuité sont ensuite résolues simultanément à partir de la méthode des différences finies et de Newton-Raphson afin d'obtenir le potentiel électrostatique et le quasi-niveau de Fermi des trous et des électrons en tout point dans le dispositif. [16]

2.8.5. Logiciel de simulation

Durant les dernières années, à cause des coûts élevés de l'expérimentation (techniques de fabrication des cellules), les chercheurs se sont orientés vers la simulation. Il existe plusieurs type de simulateurs nous citons : AFORS HET , PC1D , SILVACO , ASDMP [12].

Dans notre travail, nous nous sommes intéressés au logiciel ASDMP, car il modélise parfaitement les cellules solaires HIT que nous désirons étudier.

2.8.5.1. Présentation du logiciel ASDMP

«Amorphous Silicon Device Modeling Program » (ASDMP) est un programme de simulation monodimensionnel des cellules solaires. Le logiciel ASDMP est conçu sous Fortran et il fonctionne sous l'environnement Linux.[23]

Les différents paramètres de notre dispositif seront déterminés par ce logiciel. ASDMP a été développé par Professeur Pr. Parsathi Chatterjee. Il a été conçu pour des dispositifs basés sur des homo-jonctions ou hétérojonctions de silicium cristallin et amorphe.[36]

Ce logiciel a été conçu au début pour modéliser des dispositifs à base de silicium amorphe. Il a été ensuite généralisé au silicium cristallin et aux cellules HIT [37]. Il comprend deux parties, la partie électrique et la partie optique.

La partie électrique résout simultanément les équations de continuité des trous et des électrons ainsi que l'équation de Poisson, les queues de bandes sont représentées par des exponentielles et les liaisons pendantes par des gaussiennes. Ce profil ne dépend pas du niveau de Fermi [36]. Les caractéristiques électriques fournies par ce modèle physique sont la densité de courant en fonction de la

tension de polarisation ($J(v)$) et la réponse spectrale. Cette partie permet d'analyser l'influence de différents paramètres et leur impact sur la performance de la cellule. [23]

La partie optique : intègre le modèle semi-empirique de François Leblanc. Le facteur de génération est calculé en tenant compte des réflexions multiples et de la diffusion par les interfaces rugueuses. Le système obtenu est résolu par la méthode des différences finies et celle de Newton-Raphson. On obtient alors le potentiel électrostatique et les quasi-niveaux de Fermi en tout point du dispositif [36]. Ce modèle a également été appliqué avec succès à d'autres structures (détecteurs basés sur les semi-conducteurs). [16]

2.9. CONCLUSION

Le but de notre travail dans ce deuxième chapitre était de comprendre le fonctionnement des cellules à hétérojonction de type HIT. Parmi toutes celles disponibles dans le domaine photovoltaïques, nous sommes intéressés à celles qui sont élaborées par l'entreprise japonaise Sanyo. Celles-ci sont à base de silicium cristallin de type n et de silicium amorphe de type p et donnent les meilleurs rendements de conversion. Nous avons commencé par présenter les différentes couches de la cellule HIT.

La suite de ce chapitre a été consacré à l'étude de l'hétérojonction silicium amorphe / silicium cristallin, nous avons vu le diagramme de bandes lors de la formation d'une hétérojonction, ainsi que la présence des discontinuités aux raccordements des bandes engendrées par des gaps différents. Nous avons décrit l'influence de la couche a-Si :H intrinsèque et la caractéristique de l'émetteur constitué de silicium amorphe, qui présente un coefficient d'absorption meilleur que celui de la couche cristalline. Puis nous avons présenté le modèle mathématique d'une cellule photovoltaïque. Nous avons défini la caractéristique $J(v)$ qui est la principale technique pour caractériser une cellule et nous avons déduit à partir de $J(v)$ les paramètres importants pour l'étude d'une cellule.

Nous avons décrit par la suite le modèle de simulation utilisé. Ce dernier est constitué d'un modèle électrique ainsi que d'une modèle optique. Son principe repose sur la résolution simultanée de l'équation de Poisson et des équations de continuités des électrons et des trous.

A la fin de ce chapitre nous avons présenté le logiciel ASDMP que nous utiliserons pour effectuer la simulation d'une cellule HIT de type n, afin d'étudier l'influence de l'épaisseur de l'émetteur sur son rendement. Les résultats seront donnés et interprétés dans le chapitre suivant.

3. EFFET DE L'ÉPAISSEUR DE LA COUCHE FENÊTRE SUR LES PERFORMANCES DE LA CELLULE HIT

3.1. INTRODUCTION

En pratique, la conversion d'énergie lumineuse en énergie électrique n'est pas totale. Différentes pertes viennent influencer les paramètres de sortie d'une cellule. Elles sont dans la plupart des cas dues à la nature du matériau et à la technologie utilisée. Un des paramètres qui modifie considérablement la performance des cellules HIT est la variation de l'épaisseur de l'émetteur p-a-Si : H.

Dans ce chapitre, nous allons étudier l'influence de l'épaisseur de la couche p-a-Si :H sur les paramètres photovoltaïques (J_{CC}, V_{CO}, FF, η) d'une cellule solaire HIT de type n en face avant. Pour réaliser nos simulations, Nous allons utiliser le logiciel ASDMP (Amorphous Semiconductor Device Modeling Program).

3.2. PRESENTATION DE LA STRUCTURE ETUDIEE

Nous allons simuler une cellule HIT en face avant, représentée dans la figure (3.1). Elle est constituée d'un substrat de silicium cristallin dopé n (n-c-Si) d'une épaisseur de 300 μm sur lequel est déposé, sur la face avant, à faible température ($\sim 250\text{ C}^\circ$) du silicium amorphe intrinsèque (i-a-Si :H) sur une épaisseur de 30 Å . Cette couche intrinsèque représente la spécificité des cellules HIT (Heterojunction with Intinsic Thin layer) et permet de passiver les défauts de surface existant à l'interface p-a-Si:H/n-c-Si. Par la suite, une couche de silicium amorphe dopé p est déposée pour constituer l'émetteur (p-a-Si :H) sur une épaisseur que nous allons faire varier du 50 Å à 215 Å au cours de nos simulations. Une couche anti réfléchissante (TCO : Transparent Conductive Oxide) à base d'ITO (Indium Tin Oxide) est déposée sur le silicium amorphe dopé p pour former l'électrode de contact avant.

En face arrière, une couche fortement dopé n^{++} -c-Si ($N_D = 5.10^{18}\text{ cm}^{-3}$) d'une épaisseur de 1 μm constitue le BSF (Back Surface Field) et enfin une couche d'aluminium est rajoutée pour constituer le contact arrière de la cellule.

Chaque couche de la cellule a ses propres paramètres (épaisseur, gap, densité de dopage donneur N_D , densité de dopage accepteur N_A , affinité électronique χ , densité de défauts donneur, densité de défauts accepteurs, mobilité des électrons, mobilité des trous,

densité d'état dans la bande de valence N_V , densité d'état dans la bande de conduction $N_D...$).

Ces paramètres sont résumés dans le tableau (3.1).

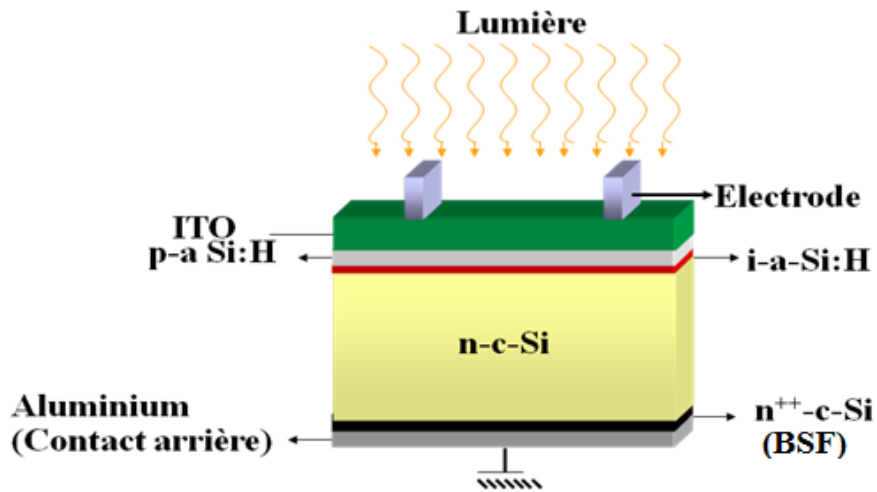


Figure 3.1: L'hétéro-structure ITO/p-a-Si:H/i-a-Si:H/n-c-Si/Al utilisée dans nos simulations.

	ITO	p-a Si:H	i-a- Si :H	n-c-Si	n-c-Si	n-c-Si	n-c-Si	BSF
D	84,5nm	50-215 A°	30 A°	32 A°	68 A°	2.99µm	296 µm	1 µm
E_g (eV)		1,9	1,9	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12
N_D (cm^{-3})		0	0	$9 \cdot 10^{14}$	$9 \cdot 10^{14}$	$9 \cdot 10^{14}$	$9 \cdot 10^{14}$	$5 \cdot 10^{18}$
N_A (cm^{-3})		$2,7 \cdot 10^{19}$	0	0	0	0	0	0
χ (eV)		3,9	3,95	4,22	4,22	4,22	4,22	4,22
$N_{D_{TOT}}$ (cm^{-3})		$1 \cdot 10^{19}$	$7 \cdot 10^{14}$	$1,7 \cdot 10^{18}$	$3 \cdot 10^{11}$	$3 \cdot 10^{11}$	$3 \cdot 10^{11}$	$3 \cdot 10^{11}$
$N_{A_{TOT}}$ (cm^{-3})		$1 \cdot 10^{19}$	$7 \cdot 10^{14}$	$1,7 \cdot 10^{18}$	$3 \cdot 10^{11}$	$3 \cdot 10^{11}$	$3 \cdot 10^{11}$	$3 \cdot 10^{11}$
μ_n (cm^2/Vs)		20	30	1450	1450	1450	1450	1450
μ_p (cm^2/Vs)		4	12	450	450	450	450	450
N_C (cm^{-3})		$1 \cdot 10^{19}$	$2 \cdot 10^{20}$	$5 \cdot 10^{18}$	$5 \cdot 10^{18}$	$5 \cdot 10^{18}$	$5 \cdot 10^{18}$	$5 \cdot 10^{18}$
N_V (cm^{-3})		$1 \cdot 10^{19}$	$2 \cdot 10^{20}$	$5 \cdot 10^{18}$	$5 \cdot 10^{18}$	$5 \cdot 10^{18}$	$5 \cdot 10^{18}$	$5 \cdot 10^{18}$

Tableau 3.1 : Principaux paramètres de simulation de la structure HIT

ITO/p-a-Si:H/i-a-Si:H/n-c-Si/Al.

- d : Epaisseur de la couche.
- E_g : Energie du Gap.
- N_D : Densité de dopage des donneurs.
- N_A : Densité de dopage des accepteurs.
- χ : Affinité électronique.
- N_{DTOT} : Densité de défauts donneurs.
- N_{ATOT} : Densité de défauts accepteurs.
- μ_n : Mobilité des électrons.
- μ_p : Mobilité des Trous.

3.3. RESULTATS DE LA SIMULATION

Le silicium amorphe hydrogéné de type p a un fort coefficient d'absorption et la lumière absorbée dans cette couche défectueuse serait perdue. Le maximum de la lumière doit donc atteindre le silicium cristallin qui représente la couche active dans les cellules solaires de type HIT. L'émetteur doit donc être le plus mince possible pour optimiser la qualité de cette cellule. Pour vérifier cela, nous avons étudié l'influence de l'épaisseur de l'émetteur sur les paramètres de sortie de la cellule. En utilisant le logiciel ASDMP, nous avons fait varier l'épaisseur de la couche p-a-Si:H de 50Å à 215Å. Les résultats de la simulation sont présentés dans le tableau 3.2.

Epaisseur Å	J_{CC} (mA/cm ²)	V_{co} (V)	FF	Rendement %
50	33.65	0.695	0.75	17.57
65	33.61	0.695	0.77	18.21
95	33.58	0.695	0.78	18.42
110	33.59	0.695	0.78	18.43
125	33.59	0.695	0.78	18.44
140	34.19	0.695	0.78	18.78
155	34.20	0.695	0.78	18.78
170	33.65	0.695	0.78	18.47
185	33.67	0.695	0.78	18.47
215	33.71	0.695	0.78	18.49

Tableaux 3.2 : Variation des paramètres de sortie de la cellule en fonction de l'épaisseur de la couche p-a-Si:H

A partir de ces résultats, nous allons étudier dans ce qui va suivre, l'effet de l'épaisseur de la couche p-a-Si :H sur chaque paramètre photovoltaïque (Courant de court-circuit, tension en circuit ouvert, facteur de forme et rendement) et la conséquence de chaque variation sur la qualité de la cellule étudiée.

3.3.1. Caractéristique J(V) pour deux valeurs de l'épaisseur de l'émetteur

La caractéristique J(V) d'une cellule solaire passe par trois points caractéristiques très importants qui sont : la densité du courant de court circuit J_{cc} qui est obtenue par l'intersection de la courbe avec l'axe vertical, la tension du circuit ouvert V_{co} qui est obtenue par l'intersection de la courbe avec l'axe horizontal et la puissance maximale P_m .

Nous avons représenté dans la figure 3.1 la caractéristique J(V) pour deux épaisseurs de l'émetteur. Nous pouvons constater que la caractéristique est légèrement meilleure pour une épaisseur de 155 Å° notamment par l'amélioration de sa densité de courant de court circuit.

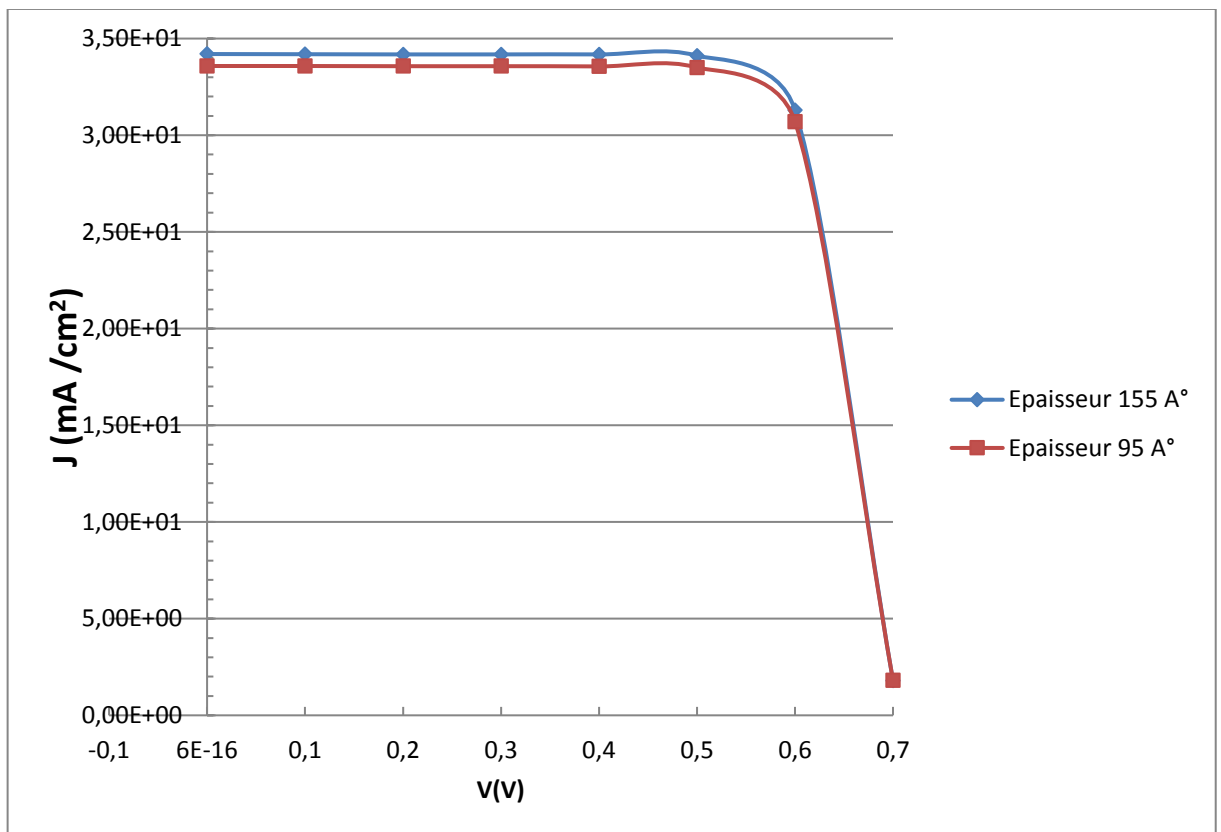


Figure 3.2 : Caractéristique J(V) pour deux valeurs de l'épaisseur de l'émetteur p-a-Si :H.

3.3.2. Effet de l'épaisseur de l'émetteur sur la densité de courant de court-circuit J_{cc}

La figure 3.2. représente la variation de la densité de courant de court-circuit J_{cc} en fonction de l'épaisseur de la couche p-a-Si:H. Nous remarquons que ce paramètre est optimal pour des épaisseurs comprises entre 140 Å et 155 Å.

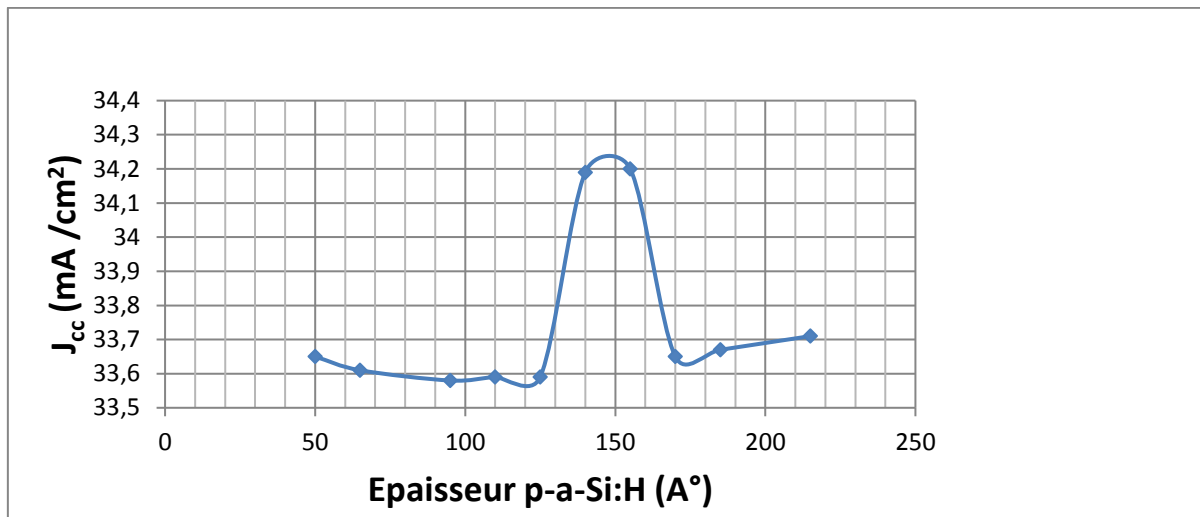


Figure 3.3 : Variation du courant de court-circuit J_{cc} en fonction de l'épaisseur de la couche p-a-Si :H.

La faible densité de courant observée pour des épaisseurs inférieures à 140 Å est due au faible potentiel induit qui est propre à la formation de la jonction p-n, et qui résulte du faible champ électrique créé au niveau de la jonction. Ce potentiel est tellement petit à cause de la faible épaisseur du côté p de la jonction, qu'il en résulte un amoindrissement de la collecte des porteurs photogénérés provoquant ainsi un faible courant de court-circuit.

Pour des valeurs de l'épaisseur de l'émetteur supérieures à 155 Å, le courant de court circuit diminue de nouveau, mais pas pour les mêmes raisons citées auparavant. Cette fois-ci, les porteurs photogénérés doivent parcourir des distances plus grandes que leurs longueurs de diffusion¹, et seront plus susceptibles de se recombiner que d'être collectés. De plus, la lumière est absorbée par la couche fenêtre qui est épaisse et n'est que faiblement transmise à la couche active.

Entre 140 Å et 155 Å d'épaisseur, un pic de densité de courant est observé, dû à un compromis entre la bonne absorption de la lumière par la couche active n-c-Si et un bon potentiel de diffusion engendré.

¹ La longueur de diffusion est la distance que peuvent parcourir les porteurs photo-générés avant de se recombiner.

3.3.3. Effet de l'épaisseur de l'émetteur sur la tension en circuit ouvert V_{co}

La figure 3.3. représente la variation de la tension en circuit ouvert V_{co} en fonction de l'épaisseur de la couche p-a-Si:H. Nous remarquons que ce paramètre n'est pas affecté par la modification de l'épaisseur de l'émetteur.

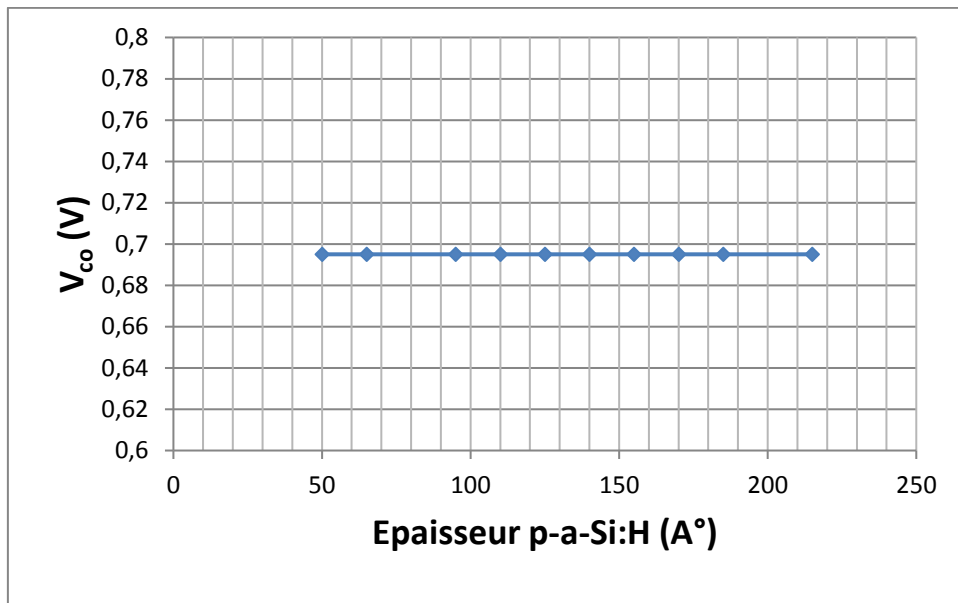


Figure 3.4 : Variation de la tension en circuit ouvert V_{co} en fonction de l'épaisseur de la couche p-a-Si:H

Comme nous pouvons le remarquer à partir de l'équation (2.8) cité dans le chapitre 2 :

$$V_{co} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{J_{cc}}{J_s} + 1 \right)$$

La tension en circuit ouvert dépend de la température, du matériau et de l'éclairement. Comme la densité de courant J_{cc} ne varie pas considérablement (de 33.58 mA/cm² à 34.20 mA/cm²), le V_{co} n'est donc pas affecté par l'épaisseur de l'émetteur.

3.3.4. Effet de l'épaisseur de l'émetteur sur le Facteur de Forme FF

La figure 3.4. représente la variation du facteur de forme FF en fonction de l'épaisseur de la couche p-a-Si:H. Nous remarquons qu'avec l'augmentation de l'épaisseur de l'émetteur, le facteur de forme passe de 0.75 pour une épaisseur de 50 A° à 0.78 pour une épaisseur de 95°A. Au-delà d'une épaisseur de 95°A, nous observons une saturation du FF à 0.78.

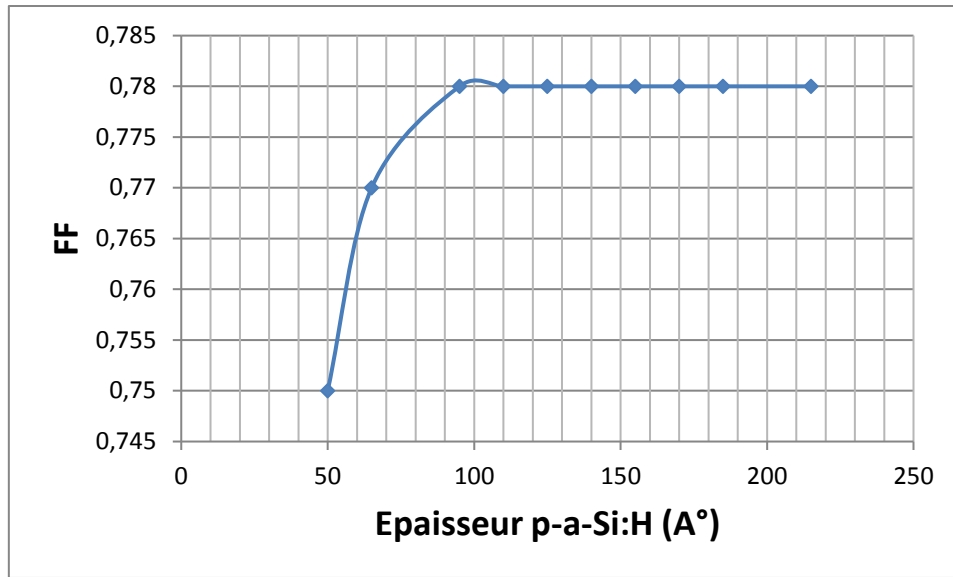


Figure 3.5 : Variation du facteur de forme FF en fonction de l'épaisseur de la couche p-a-Si :H

Le facteur de forme est un paramètre important qui sert à qualifier la qualité d'une cellule solaire, et exprime le nombre de porteurs collectés. La valeur FF=0.78 obtenue dans notre étude est correct sachant que même dans le cas d'une cellule idéale, le FF ne peut dépasser 0,89.[38]

3.3.5. Effet de l'épaisseur de l'émetteur sur le rendement η

La figure 3.3.5. représente la variation du rendement en fonction de l'épaisseur de la couche p-a-Si:H. Nous remarquons que le rendement suit la même tendance que la densité de courant de court circuit. Il augmente de 17.6% à 18.8% lorsque l'épaisseur de l'émetteur varie de 50A° à 155A°, puis décroît pour des valeurs supérieures à 155A°.

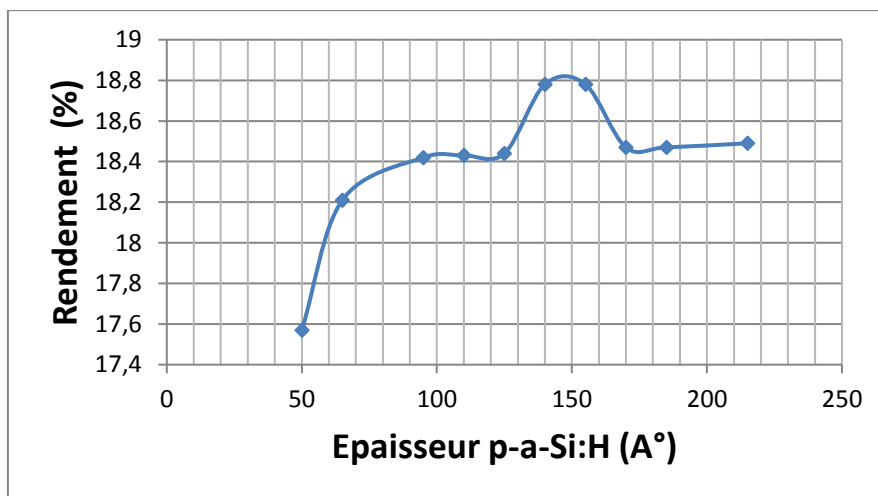


Figure 3.6 : Variation du rendement η en fonction de l'épaisseur de la couche p-a-Si:H

Le rendement étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente $\eta = \frac{P_{max}}{p_{in}} = \frac{FF * V_{co} * J_{cc}}{p_{in}}$, il dépend de la variation de la densité du courant de court-circuit, car c'est ce dernier qui est particulièrement sensible à l'épaisseur de l'émetteur.

3.3.6. Variation du champ électrique au niveau de la jonction p-a-Si :H /n-c-Si en fonction de l'épaisseur de l'émetteur

Sur la figure 3.3.6, nous avons tracé le champ électrique généré au niveau de la jonction p-a-Si :H /n-c-Si pour différentes valeurs de l'épaisseur de l'émetteur (50, 155 et 215 Å°).

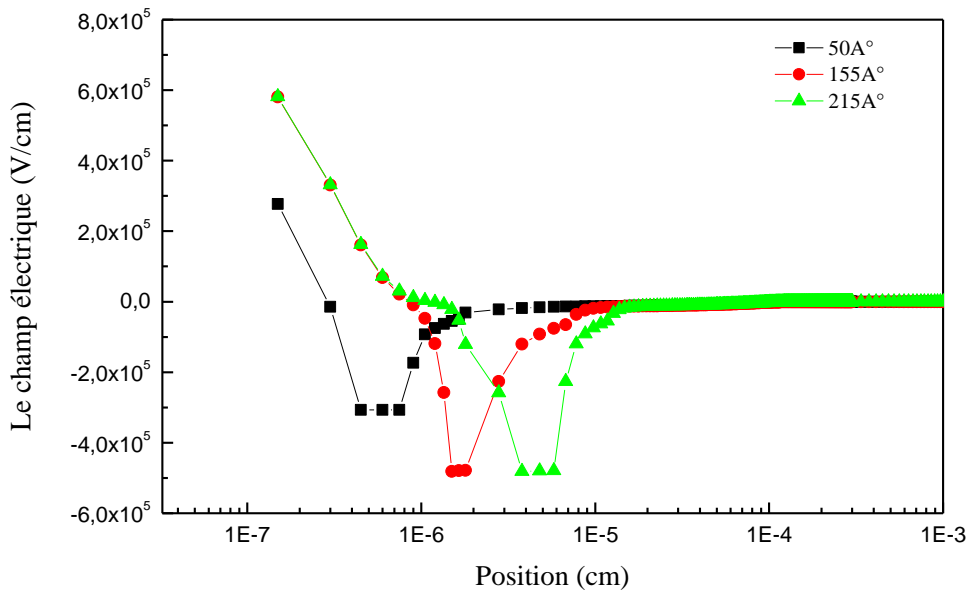


Figure 3.7 : Champ électrique dans la zone de déplétion en fonction de la position dans le dispositif pour 3 épaisseurs de p-a-Si :H (50, 155 et 215 Å°).

Les courbes obtenues confirment l'interprétation donnée dans le paragraphe 3.3.2. En effet, plus l'épaisseur de l'émetteur est faible, plus le champ électrique est faible, ce qui engendre une faible collecte des porteurs minoritaires photogénérés qui ne peuvent pas atteindre la zone où ils sont majoritaires pour être collectés.

3.3.7. Variation du taux de recombinaisons dans la couche p-a-Si :H en fonction de son épaisseur

Nous avons tracé sur la figure 3.7, ²le taux de recombinaison en fonction de la position dans la cellule pour différentes valeurs de l'épaisseur de l'émetteur (50, 155 et 215 Å°).

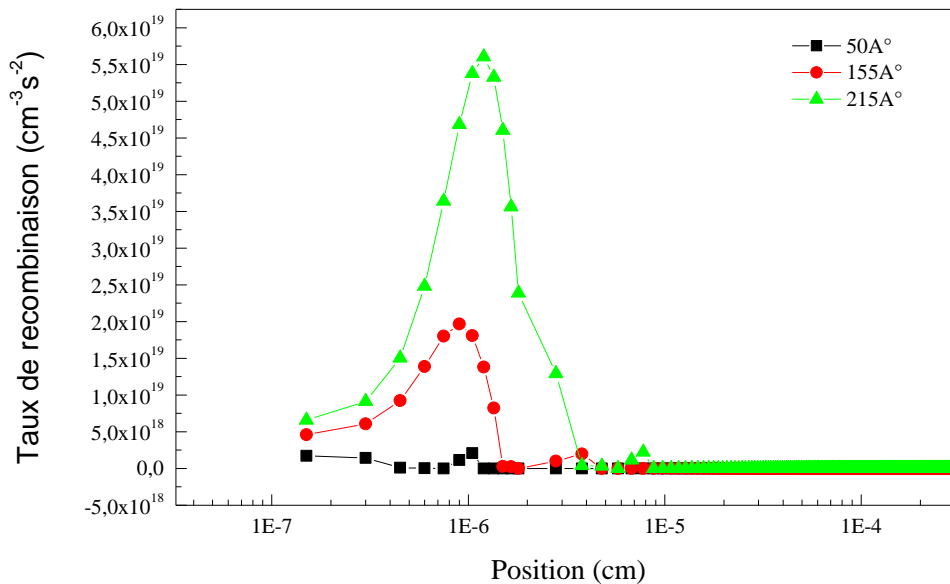


Figure 3.8: Taux de recombinaison en fonction de la position dans le dispositif pour 3 épaisseurs de p-a-Si :H (50, 155 et 215 Å°).

D'après les courbes obtenues, nous remarquons, que plus l'épaisseur de l'émetteur augmente, plus le taux de recombinaisons est important. Pour 50 Å° d'épaisseur, le taux de recombinaisons est très faible. Il croit considérablement lorsque l'épaisseur est portée à 215 Å° pour atteindre un taux de 6.10¹⁹ cm⁻³s⁻².

Ces résultats s'expliquent par le fait que la longueur de diffusion des porteurs photogénérés devient faible par rapport à l'épaisseur de l'émetteur, et par conséquent, ils se recombinent avant d'être collectés. Par ailleurs la grande densité de défauts qui existe dans le silicium amorphe hydrogéné contribue grandement à ce fort taux de recombinaison lorsque l'épaisseur de la couche p-a-Si :H augmente.

² Le taux de recombinaison est le nombre de paires électrons/ trous disparus par unité de volume et de temps.

3.4. CONCLUSION

L'objectif principal de ce chapitre est d'étudier une cellule HIT de type n en face avant de structure ITO/p-a-Si:H/i-a-Si:H/n-c-Si/Al et de trouver comment la variation de l'épaisseur de la couche fenêtre influence les caractéristiques de la cellule solaire.

Les simulations que nous avons réalisé avec le logiciel ASDMP, nous ont montré qu'une épaisseur de la couche p-a-Si :H de 155Å permet d'atteindre les meilleurs valeurs des paramètres de la cellule.

Pour une épaisseur inférieure à 155Å, la couche est trop fine générant ainsi un champ électrique faible au niveau de la jonction p-a-Si :H/n-c-Si. En effet, nous avons tracé le champ électrique en fonction de la position dans la cellule et nous avons constaté que plus l'épaisseur de l'émetteur augmente, plus le champ électrique augmente. Ce dernier a un rôle très important dans la collecte des porteurs de charge ; car c'est lui qui dissocie les porteurs minoritaires photogénérés qui atteignent la zone de charge d'espace (les trous sont accélérés vers la zone p et les électrons vers la zone n où ils seront majoritaires et pourront être collectés).

L'augmentation de la largeur de l'émetteur au-delà de 155Å provoque une chute du rendement de la cellule. Le silicium amorphe hydrogéné étant très absorbant, la transmission des photons dans la couche active n-c-Si est faible, et la majorité des porteurs photogénérés sont créés dans la zone p. Dans ce cas, ces porteurs se recombinent avant d'être collectés du fait de la présence d'une importante quantité de défauts dans la couche de l'émetteur qui deviennent des centres de recombinaisons et de la faible longueur de diffusion des porteurs minoritaires par rapport à l'épaisseur de l'émetteur. Pour vérifier cela, nous avons tracé le taux de recombinaisons en fonction de la position dans la cellule, et nous avons effectivement constaté un fort accroissement des recombinaisons lorsque l'épaisseur de l'émetteur augmente.

Il faut donc faire un compromis dans le choix de l'épaisseur de l'émetteur : Pas trop mince pour avoir un champ électrique suffisant au niveau de la jonction p-a-Si :H/n-c-Si, et pas trop épais, afin qu'un maximum de photons soient transmis dans la base cristalline, et que la longueur de diffusion des porteurs de charge soit au moins égale à l'épaisseur de l'émetteur.

Conclusion Générale et Perspectives

Les hétérojonctions à couche mince intrinsèque ou cellules solaires "HIT" sont fabriquées par l'entreprise Sanyo. Elles combinent le rendement élevé des cellules solaires en silicium cristallin (c-Si) et le faible coût de la technologie du silicium amorphe. Cette technologie a permis d'atteindre de hauts rendements tout en diminuant le coût de fabrication (budget thermique plus bas, épaisseur des couches plus mince...).

Le travail présenté dans ce mémoire consiste en l'étude des cellules solaire HIT de type n et particulièrement de l'effet de l'épaisseur de l'émetteur sur les performances de la cellule étudiée.

Nous avons présenté les résultats de nos simulations, réalisées afin de comprendre comment la variation de l'épaisseur de la couche fenêtre influence les caractéristiques de la cellule solaire HIT de type n en face avant de structure ITO/p-a-Si:H/i-a-Si:H/n-c-Si/Al .

En utilisant le logiciel ASDMP pour réaliser nos simulations, nous avons montré qu'une épaisseur de la couche p-a-Si :H de 155Å permet d'atteindre les meilleurs valeurs des paramètres de la cellule.

Pour une épaisseur inférieure à 155Å, la couche est trop fine générant un faible champ électrique au niveau de la jonction p-a-Si :H/n-c-Si. Nous avons constaté que plus l'épaisseur de l'émetteur augmente, plus le champ électrique augmente. Ce dernier a un rôle très important dans la collecte des porteurs de charge ; car c'est lui qui dissocie les porteurs photogénérés minoritaires qui atteignent la zone de charge d'espace.

Nous avons par la suite trouvé que l'augmentation de la largeur de l'émetteur au-delà de 155Å provoque une chute du rendement de la cellule. Le silicium amorphe hydrogéné étant très absorbant, la transmission des photons dans la couche active n-c-Si est faible, et la majorité des porteurs photogénérés sont créés dans la zone p. Dans ce cas, ces porteurs se recombinent avant d'être collectés du fait de la présence d'une importante quantité de défauts dans la couche de l'émetteur qui deviennent des centres de recombinaisons et de la faible longueur de diffusion des porteurs minoritaires par rapport à l'épaisseur de l'émetteur.

Il faut donc faire un compromis dans le choix de l'épaisseur de l'émetteur : Pas trop mince pour avoir un champ électrique suffisant au niveau de la jonction p-a-Si :H/n-c-Si, et pas trop épais, afin qu'un maximum de photons soient transmis dans la couche n-c-Si, et que la longueur de diffusion des porteurs de charge soit au moins égale à l'épaisseur de l'émetteur.

Comme perspectives, il serait intéressant d'étudier l'influence de l'épaisseur de la couche intrinsèque a-Si:H(i) sur la caractéristique $J=f(V)$ de la même cellule, ainsi que le choix du matériau et de l'épaisseur de la couche constituant le TCO.

Bibliographie

- [1] ANNE LABOURET, PASCAL CUMUNEL, JEAN-PAUL BRAUN, BENJAMIN FARAGGI, « Cellules Solaires : les bases de l'énergie photovoltaïque », 5^{ème} édition, France, 2010.
- [2] STEPHANE COUTANSON, « Etude du dopage laser en phases solide et liquide : Application à la formation de jonctions ultra-minces dans le silicium », Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur , Strasbourg I, 2008.
- [3] GHENNOU Ep, BAKHTI SOUAD, « Etude comparative des paramètres physiques des matériaux Photovoltaïques à base de silicium monocristallin et Poly-cristallin », Mémoire de magister, Université Abou Bekr Belkaid , Tlemcen, 2012.
- [4] TOUIL NACER EDDINE, GHENBAZI SLIMANE, « Modélisation et Simulation d'un Système Photovoltaïque », Mémoire de master, Université Echahid Hama Lakhder d'El-Oued, 2015.
- [5] JEAN-MARIE TARASCON, « Le photovoltaïque, principes et filières inorganiques, organiques, hybrides », Cours . 2011
- [6] SYLVAIN DE VECCHI, « Développement de cellules photovoltaïques à hétérojonction de silicium et contacts inter-digités en face arrière », Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2013.
- [7] OUSSIDHOUM SAMIRA, « Etude comparative des performances des cellules solaires à jonctions simple et multiple », Mémoire de magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2015.
- [8] TEBBOUB BILAL, « Etude conceptuelle des systèmes photovoltaïques à double et triple jonction », Mémoire de magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2015.

- [9] MEKELLECHE SIDI MOHAMMED, « Modélisation et Simulation de Nouveaux Matériaux Destinés à la Production d'Energie Photovoltaïque », Mémoire de master, Université Abou Bekr Belkaid , Tlemcen, 2015.
- [10] NICHIPORUK OLEKSIY, « Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières inter-digités », Thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Lyon, 2005.
- [11] RACHED DJAAFFAR, « Etude et modélisation d'une cellule HIT à base de silicium polymorphe, Thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie Mohamed Boudiaf d'Oran », 2010.
- [12] WILFRIED FAVRE, « Silicium de type n pour cellules à hétérojonctions, caractérisations et modélisations », Thèse de doctorat, École Doctorale « Sciences et Technologies de l'Informatique des Télécommunications et des Systèmes » Paris , 2011.
- [13] TOMAS BLEVIN, « Elaboration et caractérisation de solutions dopantes au bore innovantes par voie PECVD , application à la fabrication de cellules solaires à homo-jonction »,Thèse de doctorat, Université Lille Nord de France , 2015.
- [14] HENRY MATHIEU. HERVE FANET, « Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques », 6^{ème} édition , Paris ,2009.
- [15] RAHAL WASSILA LEILA, «Physique des surfaces et interfaces », Polycopié de cours, UMAB , 2015.
- [16] RAHMOUNI MAWAHIB, « Etude des cellules photovoltaïques HIT en vue d'améliorer leur rendement », Thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie Mohamed Boudiaf d'Oran, 2010.
- [17] KEFIF KHEIRA, «Elaboration et caractérisation optique des semi-conducteurs amorphe et nanocristallines de silicium (a-Si :H ,nc-Si :H) et de carbure de silicium (a-Si :H ,nc-Si :H) », Thèse de doctorat , Université Ahmed ben Bella d'Oran, 2015.
- [18] FREDERIC JAY, « Nouveaux substrats de silicium cristallin destinés aux cellules photovoltaïques à haut rendement : Cas du silicium mono-like et du dopage aux donneurs

thermiques liés à l'oxygène pour les cellules à hétérojonction », Thèse de doctorat, Université Grenoble alpes, 2016.

[19] Site internet :La fabrication des cellules photovoltaïques, http://sti2d.patgue.com/SitePV/Ressource_PV/Cellule_solaire_module_solaire.pdf, 01/02/2017.

[20] BENCHERRAT ABDENNEBI, « Etude de transfert des films minces de silicium monocristallin dans la réalisation de cellule solaire à faible budget thermique », Mémoire de master, Université Abou-Bekr Belkaid de Tlemcen, 2012.

[21] BOUGUENNA IBRAHIM FAROUK, « Modélisation et Optimisation d'une Cellule Solaire Tandem a-Si:H/a-SiGe », Mémoire de magister, Université Abou-Bekr BELKAÏD ,Tlemcen, 2012.

[22] RAPHAËL LACHAUME, « Contribution à la caractérisation électrique et à la simulation numérique des cellules photovoltaïques silicium à hétérojonction », Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes, 2014.

[23] RAZVAN NEGRU, « Conception et modélisation de pixels de photo-détection, photodiodes PIN en silicium amorphe en vue de leurs utilisations comme détecteurs de particules », Thèse de doctorat, Ecole polytechnique, France, 2008.

[24] KEZZOULA FAOUZI , « Cristallisation assistée par un métal du silicium amorphe déposé par différentes techniques » ,Thèse de doctorat, Université M'Hamed Bougara de Boumerdes , 2013.

[25] National Renewable Energy Laboratory, Best research cell efficiencies, 2016

[26] Site internet Sanyo <http://lenergie-solaire.info/accueil-topmenu-73/83-sanyo-amincit-sa-cellule-photovoltaque-hit-en-gardant-un-rendement-lev.html>, 23/02/2017.

[27] MECHERI ABDESLEM , SANDALI ABD ELAZIZ, « Simulation d'une cellule solaire photovoltaïque à base d'hétérojonction : a-Si:H(n)/c-Si(p) », Mémoire de master, Université Kasdi Merbah de Ouargla, 2015.

[28] MANSOUR HAYETTE, « Simulation numérique d'une cellule solaire à hétérojonction HIT en silicium par le logiciel TCAD-SILVACO », Mémoire de master, Université Mohamed Khider Biskra, 2013.

- [29] Fiche technique des panneaux solaire Sanyo HIT, 2012,
http://www.tritec-energy.com/images/content/10101024_Sanyo_HIT_web_frs.pdf, 10/03/2017.
- [30] DJICKNOUM DIOUF, « Cellules photovoltaïques silicium à hétérojonctions et à structure inter-digitée en face arrière », Thèse de doctorat, Ecole Doctorale «Sciences et Technologies de l'Informatique des Télécommunications et des Systèmes», Paris, 2010.
- [31] YANNICK VESCHETTI, « Modélisation, caractérisation et réalisation de nouvelles structures photovoltaïques sur substrat de silicium mince», Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur Strasbourg I, 2005.
- [32] S. M. IFTIQUAR, YOUNGSEOK LEE, VINH AI DAO, SANGHO KIM, JUNSIN Y, « High efficiency Heterojunction with intrinsic thin layer solar cell: A short review », 2013, p 59-67.
- [33] Technologies photovoltaïques, Avantages et inconvénients, <http://www.eco-energie.ch/cms2/index.php/solaire-photovoltaïque.pdf>, 06/02/2017.
- [34] SEVEK AMTABLIAN , « Du transfert de films minces de silicium monocristallin vers un procédé cellule à faible budget thermique », Thèse de doctorat, L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2008.
- [35] SERDOUK MOHAMMED RIDHA, « Etude par simulation numérique des propriétés électriques d'une cellule solaire en silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H) », Mémoire de magister, Université Mohamed Khider , Biskra, 2015.
- [36] H. MADANI YSSAAD , D.RACHED, « Etude de l'électrode de contact avant de la structure ITO/p-a-Si:H/i-pm-Si:H/n-c-Si/Al avec le logiciel ASDMP », Revue COST Communication Science & Technologie, 2012, P109-115.
- [37] ANTARA DATTA, PARSATHI CHATTERJEE, « Computer Modeling of Heterojunction with Intrinsic Thin Layer 'HIT' Solar Cells: Sensitivity Issues and Insights Gained » , Solar Cells - Thin-Film Technologies, India ,2011, P 275-302.
- [38] NICHIPORUK OLEKSIY, « Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigité », Thèse de doctorat, Lyon, 2005.