

Faculté des Sciences Exactes et d'Informatique
Département de Physique
Filière : Physique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES
Pour l'Obtention du Diplôme de Master en Physique
Option : **Physique des Matériaux**

THEME :

**Optimisation De La Face Arrière D'une Cellule
Solaire A Hétérojonction De Silicium**

Etudiant(e) : Fatma MAHI

Encadrant(e) : Wassila Leïla RAHAL

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

A l'homme de ma vie, mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, que Dieu te garde dans son vaste paradis, à toi mon père.

A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur ; maman que j'adore.

*Je voudrais dédier ce travail à mon ami **Abd el Azize**.*

*Aux personnes dont j'ai bien aimé la présence dans ce jour, à tous mes frères : **Abd el Hamid et charef** et ma sœur **Wahida**.*

*A tous les membres de ma grande famille **MAHI**.*

A tous mes enseignants.

A tous mes amis.

A tous ceux qui me reconnaîtront.

Fatima

Remerciements

Avant tout je remercie Dieu le tout puissant de m'avoir donné le courage, la force, la volonté, la patience, et la santé durant toutes ces années et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé et réussi.

Je remercie également les êtres les plus chers au monde, mes parents pour tous les efforts et sacrifices qu'ils ont entrepris afin de nous voir réussir.

*Un grand merci à mon encadreur M^{me} **RAHAL Wassila Leila** de m'avoir guidé tout au long de ce travail de recherche. Pour sa compréhension, sa patience, ses précieuses remarques et son soutien dans les moments difficiles, je vous dis vraiment merci !*

*Je voudrais remercier tous mes enseignants de la Faculté des Sciences Exactes et de l'Informatique, sans oublier notre chef département Mr **ABBES Charef** et tous les employés du département qui nous aidés, conseillés et guidés afin de finaliser ce travail dans de bonnes conditions.*

Je remercie chaleureusement les membres de jury d'avoir accepté d'expertiser mon travail.

*Un grand merci à mes amis avec qui j'ai partagé des moments formidables, et surtout à mon ami **Abd el Aziz**.*

Si je devais citer individuellement chaque personne qui compte dans ma vie, mille pages n'y suffiront pas. C'est pourquoi, je voudrais remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste Projet de Fin d'Etudes.

Liste des abréviations

Acronyme et Symbole	Définition [unité]
AM	Air masse
PV	photovoltaïque
BSF	Back Surface Field
HIT	Heterojunction with Intrinsic Thin Layer
BSF	Back Surface Field
STC	Conditions du Test Standard
Eg	Energie de gap [eV]
C	Célérité de la lumière dans le vide (3.10^8) [m/s]
λ	Longueur d'onde de la lumière [μm]
Jcc	Courant de court-circuit [A]
Vco	Tension de circuit-ouverte [V]
I	Courant [A]
K	Constante de Boltzmann ($1,38.10^{-23}$) [J/K]
q	Charge de l'électron ($1,602.10^{-19}$) [C]
T	Température de la cellule PV [K]
Is	Courant de saturation de la diode [A]
Iph	Photo courant [A]
Id	Courant traversant la diode [A]
Rs	Résistance série [Ω]
Rsh	Résistance shunt [Ω]
Pmax	Point de puissance maximale [W]
Pin	Puissance incidente [W]
FF	Facteur de forme [%]
η	Rendement énergétique [%]

I_d	Courant traversant la diode [A]
A	Facteur d'idéalité de la diode
I_{sh}	Courant traversant la résistance shunt [A]
I_{obsc}	Courant d'obscurité [A]
I_s	Courant de saturation de la diode [A]

Liste des figures

Figure 1.1: Les débuts du photovoltaïque: (a) expérience électrochimique de A.E. Becquerel, (b) la première cellule solaire d'Adams et Day.....	4
Figure 1.2 : Spectres Solaires relevés dans plusieurs conditions AM. Source NREL solar Spectrum.....	6
Figure 1.3 : Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la convention AM.....	7
Figure 1.4: Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	7
Figure 1.5. Rendements de laboratoires de cellules photovoltaïques, toutes filières confondues, mis à jour régulièrement par le National Renewable Energy Laboratory (NREL) 2018.....	9
Figure 1.6 : Cellule en Si monocristallin.....	9
Figure 1.7 : Cellule à base de silicium polycristallin.....	10
Figure 1.8 : Procédé de fabrication du silicium ruban.....	10
Figure 1.9. Cellules solaire en silicium amorphe.....	11
Figure 1.10. Exemple de chaîne de production de cellules photovoltaïques en silicium.....	12
Figure 1.11 : les composantes de la cellule solaire CdTe (Tellurure de Cadmium).....	12
Figure 1.12 : les composantes de la cellule solaire CIS.....	13
Figure 1.13 : les composantes de la cellule solaire CIGS.....	13
Figure 1.14: les composantes la cellule pérovskite.....	14
Figure 1.15 : Les composantes de la cellule solaire de GRÄTZEL.....	14
Figure 2.1: Les trois grandes familles des matériaux.....	16
Figure 2.2: Structure cristalline des semi-conducteurs.....	16
Figure 2.3: (a) Structure de bande à gap direct, (b) Structure de bande à gap indirect.....	17
Figure 2.4: Représentation des différents mécanismes de recombinaison.....	18
Figure 2.5 : Jonction pn.....	19
Figure 2.6: Jonction PN (abrupte) à l'équilibre: a) distribution des impuretés ionisées; b) distribution du champ électrique; c) variation du potentiel; d) diagramme des bandes d'énergie.....	20

Figure 2.7 : Diagramme de bande à interface a-Si:H (p)/C-Si (n).....	21
Figure 2.8 : structure du silicium cristallin.....	22
Figure 2.9 : Procédé de Fusion de Zone.....	23
Figure 2.10: Procédé « Czochralski » (Schutz-kuchly 2011).....	23
Figure 2.11: Production du silicium multicristallin.....	24
Figure 2.12 : Diagramme de bande du silicium cristallin et du silicium amorphe hydrogéné. D+, D0 et D- représentent les liaisons pendantes respectivement positives, neutres et négatives.....	26
Figure 2.13 : Structure du Silicium amorphe hydrogéné.....	27
Figure 2.14 : Figure: L'hétérostructure ITO/p-a-Si:H/i-a-Si:H/n-c-Si/Al utilisée dans nos simulations.....	28
Figure 3.1 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	31
Figure 3.2 : Influence théorique de la résistance série (Rs) et la résistance parallèle (Rsh) d'une cellule photovoltaïque sur sa courbe I(V).....	32
Figure 3.3 : Schéma équivalent à deux diodes.....	32
Figure 3.4 : Caractéristiques densité de courant en fonction de la tension d'une cellule PV dans l'obscurité et sous illumination.....	34
Figure 3.5 Influence de l'éclairement sur la caractéristique I(V) et P(V).....	38
Figure 3.6 Influence de la température sur la caractéristique I(V) et P(V).....	39
Figure 4.1: L'hétérostructure TCO/p-a-Si:H/i-a-Si:H/n-c-Si/BSF utilisée dans nos simulations.....	41
Figure 4.2: Réponse spectrale de la cellule étudiée pour deux valeurs de gap différentes (rouge pour $E_g=1.7$ eV et le bleu pour $E_g=2$ eV).....	44
Figure 4.3: Influence de l'épaisseur de la couche BSF sur les paramètres PV de la cellule étudiée :(a) J_{cc} , (b) V_{co} , (c) FF, (d) η	46
Figure 4.4: Taux de recombinaison à l'interface n-c-Si/n ⁺⁺ -a-Si : H pour une épaisseur $d=5$ nm et $D=1$ μ m.....	47
Figure 4.5 : Influence du dopage de la couche BSF sur les paramètres PV de la cellule étudiée.....	48
Figure 4.6 : Champ électrique induit au niveau de la face arrière de la cellule avec et sans couche BSF.....	52
Figure 4.7 : Champ électrique induit au niveau de la face avant de la cellule avec et sans couche BSF.....	53

Liste des tableaux

Tableau 2.1 : Terminologie pour les différents types de silicium cristallin (c-Si).....	22
Tableau 2.2: Evolution des performances de cellules HIT fabriquées par Sanyo sur substrat n ces résultats ont été obtenus sur des cellules de 1 cm ²	28
Tableau 4.1: paramètres caractéristiques de la cellule HIT étudiée.....	42
Tableau 4.2 : Effet du gap du BSF sur les paramètres PV de la cellule étudiée.....	44
Tableau 4.3: Variation des paramètres Jcc, Vco, FF, η en fonction de l'épaisseur du BSF (n ⁺⁺ -a-Si : H) de gap 1.7 eV.....	45
Tableau 4.4 : Effet du dopage du BSF sur les paramètres PV de la cellule étudiée.....	48
Tableau 4.5 : Effet du dopage du BSF sur les paramètres PV pour une épaisseur de 40nm...	49
Tableau 4.6 : Effet du dopage du BSF sur les paramètres PV pour une épaisseur de 80nm...	49
Tableau 4.7: Effet du dopage du BSF sur les paramètres PV pour une épaisseur de 100nm...	50
Tableau 4.8 : Effet du dopage du BSF sur les paramètres PV pour une épaisseur de 200nm.....	50
Tableau 4.9 : Effet du dopage du BSF sur les paramètres PV pour une épaisseur de 1 μ m.....	51
Tableau 4.10 : Paramètres optimisés des différentes couches de la cellule.....	5

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre 1 : Généralités sur les cellules photovoltaïques.....	3
1. Introduction	3
2. Historique du solaire photovoltaïque.....	3
3. Le rayonnement solaire	5
a. Le soleil.....	5
b. spectre solaire.....	5
c. L'Aire masse	6
4. Le principe de conversion photovoltaïque.....	7
5. Les différentes filières photovoltaïques.....	8
5.1. Les cellules solaires à base de silicium.....	9
5.2. Les autres matériaux.....	12
6. Conclusion	14
Chapitre 2 : les cellules solaires à base de silicium d'h hétérojonction silicium amorphe /silicium cristallin.....	15
1. Introduction	15
2. Principe de conversion photovoltaïque.....	15
2.1. Les semi conducteurs	15
2.1.1. Structure cristalline.....	16
2.1.2. Transition directe et.....	16
2.1.3. Densité de porteurs à l'équilibre thermodynamique.....	17
2.1.4. Mécanisme de recombinaison	18
2.2. jonction pn	18
La densité de charge	19
Le champ électrique interne	19
La barrière de potentiel.....	19
2.3. le modèle de base d'Anderson	20
3. le silicium cristallin et ses caractéristiques.....	21
3.1. Silicium monocristallin.....	22
3.2. Silicium multi cristallin (mc-Si)	23
4. Silicium amorphe et ses caractéristiques.....	24
4.1. Méthodes d'élaboration de silicium amorphe	24
4.2. Structure de silicium amorphe	24

4.3.	Métastabilité de silicium amorphe.....	25
4.4.	Diagramme de bande	25
4.5.	Le rôle de l'hydrogène.....	26
5.	Etat de l'art des cellules HIT	27
6.	Les composantes de la cellule silicium à hétérojonctions.....	28
6.1.	La couche antireflet TCO.....	28
6.2.	Le silicium amorphe hydrogéné de type p (a-Si :H(p)) ou l'émetteur.....	29
6.3.	Le silicium amorphe hydrogéné intrinsèque (a-Si :H(i)) ou la couche tampon	29
6.4.	Le silicium cristallin (C-Si) ou la couche active	29
6.5.	Le back surface field (BSF)	30
6.6.	Les contacts métalliques	30
7.	Conclusion	30
	Chapitre 3: Modélisation et simulation des cellules solaires	31
1.	Introduction	31
2.	Modèle mathématique équivalent à une cellule solaire photovoltaïque.....	31
3.	Caractéristiques $I=f(V)$	33
4.	Les paramètres photovoltaïques	35
4.1.	Tension de circuit ouvert V_{co}	35
4.2.	La densité de courant de court circuit J_{cc}	35
4.3.	Facteur de forme	35
4.4.	Le rendement	36
5.	Les équations à base de semi conducteurs	36
5.1.	Equation de poisson	36
5.2.	Equation de continuité.....	36
5.3.	Phénomènes de transport dans les semi conducteurs.....	37
6.	Facteurs influençant le fonctionnement d'une cellule PV.....	38
7.	Description du modèle de simulation et de résolution	39
7.1.	Logiciel de simulation	39
7.2.	Présentation du logiciel SCAPS	40
8.	Conclusion	40
	Chapitre 4 : Résultats de simulation et discussion	41
1.	Introduction	41
2.	Présentation de la cellule HIT et de ses paramètres caractéristiques.....	41
3.	Optimisation de la couche BSF	43
3.1.	Effet du gap de la couche BSF sur la performance de la cellule	44

3.2.	Effet de l'épaisseur de la couche BSF sur la performance de la cellule	45
3.3.	Effet du dopage de la couche BSF sur la performance de la cellule	47
3.4.	Choix de la structure finale optimisé	51
3.5.	Mise en évidence de l'apport de la couche BSF sur la qualité de la cellule étudié.....	52
4.	Conclusion.....	53
	Conclusion générale	55
	Références bibliographiques	57

Introduction générale

Introduction générale

L'énergie est à la base de toute activité industrielle. De nos jours, une grande partie de la demande mondiale en cette énergie est assurée par des ressources d'origine fossiles ou fissiles (pétrole, charbon, gaz naturel). La croissance démographique et de la demande énergétique mondiale, l'épuisement inévitable des ressources fossiles, et la détérioration de l'environnement causée par l'utilisation de ces types d'énergies (gaz à effet de serre et déchets nucléaires), ont incité au développement de nouvelles sources d'énergie dites renouvelables ou propres.

Aujourd'hui on distingue plusieurs sources d'énergies renouvelables, L'avantage principal de ces énergies renouvelables est quelle sont gratuites, leurs utilisations ne polluent pas l'atmosphère et elles ne produisent pas de gaz à effet de serre comme le dioxyde de carbone et les oxydes d'azote qui sont les premiers responsables du réchauffement climatique.

Parmi ces énergies, nous pouvons citer l'énergie éolienne (issue du vent), l'énergie marémotrice (issue des vagues et des mouvements des marées), l'énergie géothermique, l'énergie de la biomasse ou encore l'énergie solaire. Ce dernier terme recouvre en réalité de nombreuses technologies, parmi lesquelles l'énergie photovoltaïque (qui sera étudiée dans ce projet). Le principe de base de ce dernier type d'énergie repose sur la transformation directement la lumière du soleil en électricité, sans intermédiaire, directement grâce à un matériau semi-conducteur.

Les matériaux utilisés dans un premier temps par ces cellules photovoltaïques étaient essentiellement inorganiques : aujourd'hui encore le matériau le plus couramment utilisé reste le silicium, malgré la concurrence toujours plus rude des tellurures de cadmium, des chalcogénures et autres Arséniure de Gallium.

Les systèmes photovoltaïques sont particulièrement utiles pour les sites isolés pour les besoins domestiques et les besoins communautaires (centres de santé, écoles, ...etc.), et même pour les villes, on peut économiser la consommation d'énergie par l'utilisation des panneaux sur le toit ou sur les façades des bâtiments.

Ce travail de master est rassemblé dans un mémoire de quatre chapitres, organisé comme suit :

Dans le premier chapitre, nous présenterons des généralités sur les cellules solaires, nous commencerons par un bref historique, ensuite nous décrirons le rayonnement solaire, puis, nous expliquerons le principe de la conversion photovoltaïque et nous citerons les différentes filières photovoltaïques.

Dans le deuxième chapitre, nous présenterons le principe de fonctionnement de l'hétérojonction HIT, nous citerons les caractéristiques de base des semi conducteurs et des jonctions pn, puis nous expliquerons le modèle d'Anderson utilisé pour décrire le diagramme d'énergie dans les hétérojonctions. Nous établirons par la suite l'état de l'art des cellules HIT et nous détaillerons les filières de silicium (cristallin et amorphe) en présentant leurs propriétés et procédés de fabrication, Enfin, nous détaillerons les différentes couches constituant la structure HIT en décrivant le rôle de chaque couche.

Introduction générale

Dans le troisième chapitre nous aborderons le modèle mathématique équivalent à une cellule photovoltaïque et la caractéristique $I=f(V)$ à partir de laquelle nous définirons les paramètres photovoltaïques tels que : le courant de court circuit, la tension de circuit ouvert, le facteur de forme et le rendement. Nous présenterons ensuite les phénomènes de transport dans les semi-conducteurs et les équations qui régissent la modélisation et la simulation des cellules solaires. Nous allons aussi décrire quelques logiciels de simulation disponibles tels que : AFORS-HET, AMPS-1D, ASDMP, PC-1D et enfin SCAPS-1D qui est le logiciel que l'on a exploité pour effectuer nos simulations.

Dans le quatrième et dernier chapitre nous présenterons la structure HIT que nous avons utilisé pour réaliser notre étude, en détaillant les paramètres de chaque couche. Nous nous intéresserons à l'optimisation de la face arrière de l'hétérojonction de type n, particulièrement à la couche BSF pour laquelle nous étudierons l'influence de gap, de l'épaisseur et du dopage de cette couche sur les paramètres photovoltaïques de la cellule HIT. Enfin nous interpréterons les résultats de nos simulations.

Enfin nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale et des perspectives dans le but de l'amélioration de ce travail.

Chapitre 1 :

Généralités sur les cellules solaires photovoltaïques

1. Introduction

L'énergie est, au même titre que l'eau et la nourriture, une ressource indispensable à la vie [1]. La problématique de l'énergie est au centre de l'actualité mondiale ; avec une consommation et une demande croissantes liées au développement industriel, la production de l'énergie est une question centrale de notre société avec des implications économique, géopolitique, environnementale et sociale. La production mondiale d'énergie est largement dominée par les énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz). Ces sources d'énergie fossiles non renouvelables qui sont néfastes à l'environnement disposent de stocks encore disponibles pour quelques décennies. La grande majorité des experts mondiaux s'accorde à travers le GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) sur le fait que l'augmentation des gaz à effet de serre issus de la combustion de ces énergies fossiles est à l'origine du réchauffement climatique [2]. Pour cela l'être humain se tourne vers d'autres sources d'énergie qui sont les énergies renouvelables.

L'énergie solaire photovoltaïque est l'une des plus récentes énergies renouvelables et la plus prometteuse, particulièrement pour l'Algérie qui bénéficie d'un potentiel solaire très important.

Dans ce premier chapitre, nous allons aborder des généralités sur l'énergie photovoltaïque, en présentant le spectre solaire et ses caractéristiques, puis en expliquant le principe de fonctionnement des photopiles, et enfin en faisant une énumération non exhaustive des différents matériaux utilisés pour l'élaboration des cellules solaires.

2. Historique du solaire photovoltaïque

Parmi les dates importantes dans l'histoire du photovoltaïque, citons les suivantes :

1839 : Le physicien français Edmond Becquerel découvre l'effet photovoltaïque [3].

1875 : Ernst Werner Von Siemens ingénieur et industriel allemand, expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.

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

Chapitre 1 : Généralités sur les cellules solaires photovoltaïques

Albert Einstein, physicien allemand, publie "Sur un point de vue heuristique concernant la production et la transformation de la lumière". En 1921, il reçoit le prix Nobel de physique pour son apport à la physique théorique et particulièrement son explication de l'effet photoélectrique.

1939 : Russel Ohl, ingénieur américain, découvre la jonction p-n et ses travaux le conduisent à développer la première cellule solaire en silicium [4].

1954 : Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement (4%) au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites

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

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

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

1995 : Des programmes de toits photovoltaïques raccordés au réseau ont été lancés au Japon et en Allemagne et se généralisent depuis 2001[3].

Ce résumé historique laisse malheureusement dans l'ombre de nombreux chercheurs qui ont directement ou indirectement fait naître la technologie photovoltaïque.

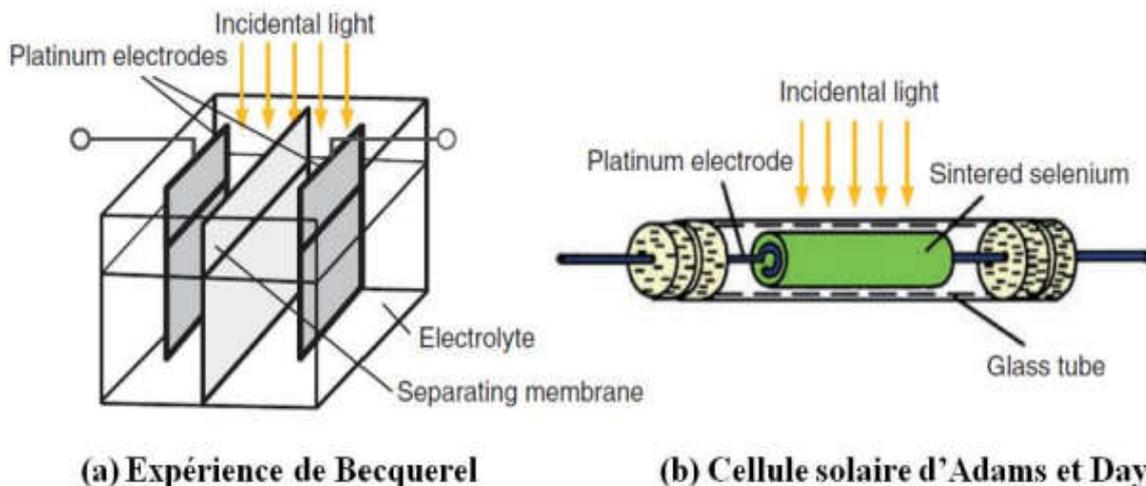


Figure 1.1: Les débuts du photovoltaïque: (a) expérience électrochimique de A.E. Becquerel, (b) la première cellule solaire d'Adams et Day [5].

3. Le rayonnement solaire

a. Le soleil

Le soleil est une étoile sphérique qui est source de vie car elle nous fournit la plus grande partie de l'énergie. Le soleil a un rayon de 696 000 km et une masse de l'ordre de 1.99×10^{30} kg. Sa température en surface est de 5 780 K. Selon le « modèle standard solaire », admis par l'ensemble de la communauté scientifique, elle augmente fortement lorsque l'on s'enfonce dans le soleil pour atteindre 15,6 millions de degrés Celsius au centre. Cette étoile s'est formé il y a 4,55 milliards d'années de la contraction gravitationnelle d'un nuage constitué (en masse) de 71 % d'hydrogène, 27 % d'hélium et 2 % d'autres éléments chimiques comme le carbone, l'oxygène et le fer. La densité et la pression au centre sont respectivement de 148 000 kg/m^3 pour la première et $2,29 \times 10^{16}$ Pa pour la seconde ($2,3 \times 10^{11}$ fois la pression atmosphérique) [1].

b. Le spectre solaire

Le soleil émet un spectre dans des longueurs d'onde de 290 à 2770 nm qui comprend les rayons ultraviolets, les couleurs de l'arc-en-ciel et les rayons infrarouges. L'atmosphère terrestre joue le rôle de filtre et ne laisse passer qu'une partie de ce spectre. Outre l'absorption dans les différentes couches de l'atmosphère, la latitude du lieu d'observation, les conditions climatiques (saison, temps) et aussi les gaz présents dans l'atmosphère (l'ozone O_3 , le dioxyde de carbone CO_2 et l'eau H_2O) constituent des obstacles limitant la diffusion de la lumière [8].

Le principe des convertisseurs photovoltaïques consiste à transformer l'énergie du spectre solaire en une énergie électrique. La connaissance du spectre solaire qui arrive sur la terre est donc indispensable. On appelle constante solaire, la densité d'énergie qui atteint la frontière externe de l'atmosphère. Sa valeur est communément prise égale à 1360W/m^2 . Mais à la traversée de cette atmosphère, le spectre solaire subit une atténuation et une déformation. En effet, la couche d'ozone absorbe une grande partie du rayonnement ultraviolet. Le spectre solaire subit également l'influence d'autres molécules présentes dans l'atmosphère. Lorsqu'il arrive à la surface de la terre, le rayonnement dépend de la couche d'air qu'il a traversé et de l'angle d'incidence.

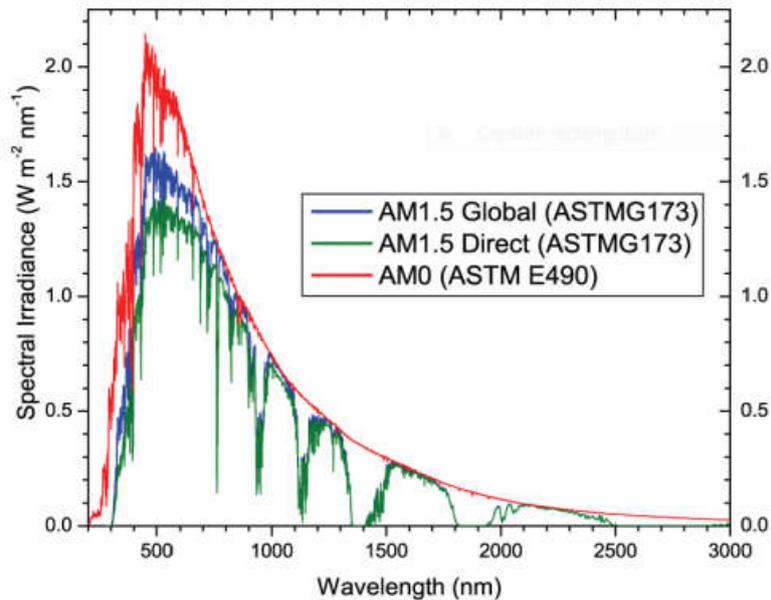


Figure 1.2 : Spectres Solaires relevés dans plusieurs conditions AM. Source NREL solar Spectrum [6].

c. L'Air Mass (AM)

La notion AM pour Air Mass est utilisée afin de caractériser le spectre solaire en termes d'énergie émise. L'énergie totale transportée par le rayonnement solaire sur une distance soleil-terre est de l'ordre de 1360 W/m^2 (AM0) dans l'espace hors atmosphère terrestre (Figure 1.3). Lorsque le rayonnement solaire traverse l'atmosphère, il subit une atténuation et une modification de son spectre, à la suite de phénomènes d'absorption et de diffusion dans les gaz, l'eau et les poussières. Ainsi, la couche d'ozone absorbe une partie du spectre lumineux provenant du soleil, et en particulier une partie des ultraviolets dangereux pour la santé. Le rayonnement solaire direct reçu au niveau du sol (à 90° d'inclinaison) atteint 1000 W/m^2 du fait de l'absorption dans l'atmosphère (AM1). Cette valeur change en fonction de l'inclinaison des rayons lumineux par rapport au sol. Plus l'angle de pénétration θ est faible, plus l'épaisseur atmosphérique que les rayons auront à traverser sera grande, d'où une perte d'énergie conséquente. Par exemple, l'énergie directe transportée par le rayonnement solaire atteignant le sol avec un angle de 48° avoisine les 833 W/m^2 (AM1.5) [6].

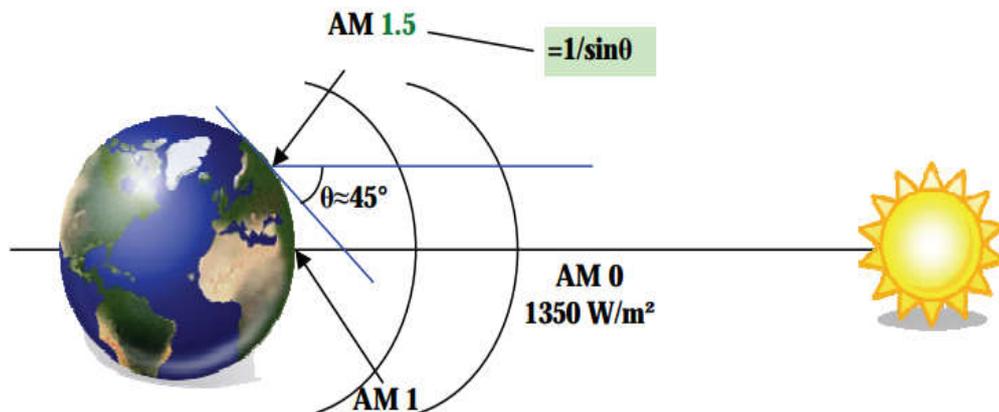


Figure 1.3 : Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la convention AM [6].

Pour connaître le rayonnement global reçu au sol, il faut ajouter à ce dernier le rayonnement diffus. Le rayonnement diffus concerne tout le rayonnement dont la trajectoire entre le soleil et le point d'observation n'est pas géométriquement rectiligne et qui est dispersé ou réfléchi par l'atmosphère ou bien le sol. En considérant ceci, on obtient une référence du spectre global notée AM1.5G avec une puissance de 1000W/m^2 .

4. Le principe de la conversion photovoltaïque

Nous allons maintenant tenter de comprendre comment est produite l'électricité à partir de la lumière, et comment sont fabriqués les photogénérateurs.

Chacun sait que : « Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme ». Convertir l'énergie lumineuse en électricité, telle est la fonction d'une photopile ou d'une cellule solaire.

La conversion photovoltaïque, aujourd'hui largement utilisée, peut être simplement définie comme la transformation de l'énergie des photons en énergie électrique grâce à trois étapes:

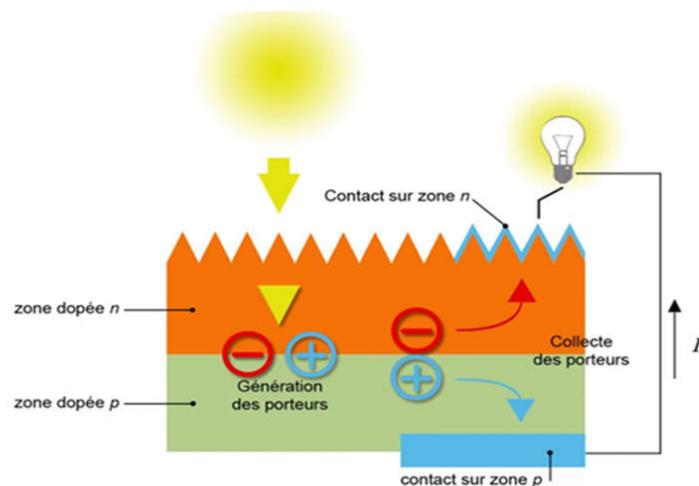


Figure 1.4: Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [5].

Chapitre 1 : Généralités sur les cellules solaires photovoltaïques

- **Absorption de la lumière par la matière et création de paires électron-trou**

Lorsqu'un photon est absorbé par le matériau, il passe une partie de son énergie par collision à un électron l'arrachant littéralement de la matière. Ce dernier étant précédemment à un niveau d'énergie inférieur où il était dans un état stable passe alors vers un niveau d'énergie supérieur, créant un déséquilibre électrique au sein de matériau se traduisant par une paire électron-trou qui modifie localement la conductivité du matériau.

Pour que le photon puisse être absorbé avec une transition possible, il faut que l'énergie de photon incident soit supérieure ou égale à l'énergie de gap de matériau semi-conducteur ($h\nu \geq E_g$). Le gap étant l'écart entre le maximum de la bande de valence et le minimum de la bande de conduction du matériau.

- **Le transfert de l'énergie des photons aux charges électriques**

Les photons absorbés vont transférer leur l'énergie lumineuse en énergie électrique en créant des charges électriques qui doivent être séparées par un champ électrique permanent. Ce champ électrique est engendré au niveau d'une jonction de deux semi-conducteurs, l'un de type n et l'autre de type p. Une telle jonction crée un champ électrique élevé et permanent qui entraîne les charges mobiles vers le côté N pour les électrons et le côté P pour les trous.

- **La collecte des charges**

Lorsque les porteurs de charge se trouvent dans leur zone respective, ils ne risquent plus de se recombiner autrement que par les défauts du réseau ou de surface. Ils peuvent donc être collectés à travers une charge extérieure grâce à des contacts métalliques de part et d'autre de la cellule.

5. Les différentes filières photovoltaïques

Comme nous pouvons le constater sur la figure 1.5., il existe plusieurs technologies et matériaux pour le développement et la fabrication de cellules solaires, avec des rendements en laboratoire variant de 10% pour les cellules organiques à 46% pour les cellules solaires à multijonctions sous concentrateur.

Chapitre 1 : Généralités sur les cellules solaires photovoltaïques

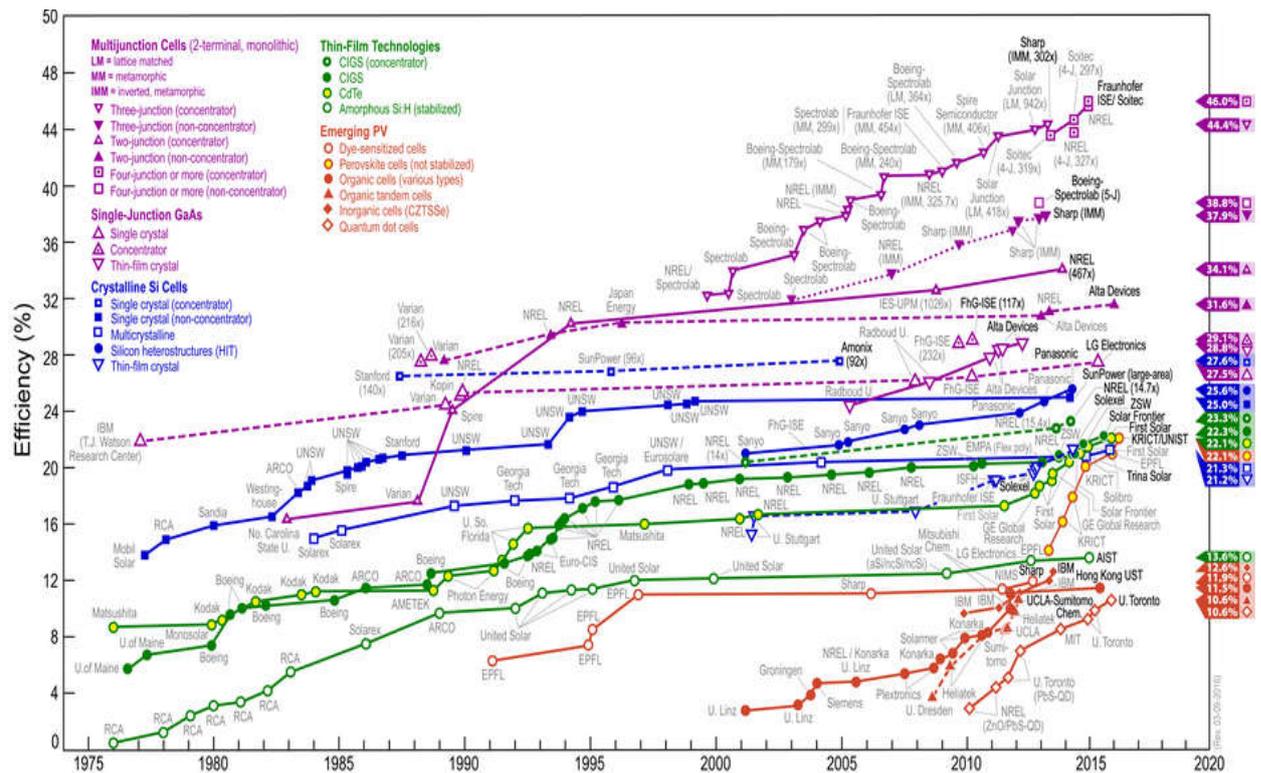


Figure 1.5. Rendements de laboratoires de cellules photovoltaïques, toutes filières confondues, mis à jour régulièrement par le National Renewable Energy Laboratory (NREL) 2018 [7].

Nous pouvons diviser ces technologies en deux principales familles : la première à base de silicium (monocristallin, le multi-cristallin, le silicium amorphe et le silicium en ruban). La deuxième famille est celle des cellules solaires à couches minces (tellurure de cadmium, cuivre indium sélénium, arséniure de gallium et les cellules organiques...etc.)

5.1. Les cellules solaires à base de silicium

La filière silicium représente aujourd'hui l'essentiel de la production mondiale de panneaux photovoltaïques. Il s'agit d'un matériau extrêmement abondant, stable et non toxique. Cette filière est elle-même subdivisée en plusieurs technologies distinctes de part la nature du silicium employé et d'autre part ou sa méthode de fabrication.

❖ Le silicium monocristallin

Les photopiles à base de silicium monocristallin présentent un bon rendement à fort et moyen éclairage et sont parmi les plus performantes (après celles à l'arséniure de gallium) [8].

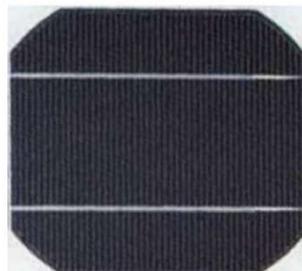


Figure 1.6 : Cellule en Si monocristallin [9].

Chapitre 1 : Généralités sur les cellules solaires photovoltaïques

Le silicium monocristallin est constitué d'un seul cristal ordonné, sa fabrication est relativement complexe, ce qui justifie son coût élevé.

❖ Le silicium multicristallin

Il est constitué de cristaux assemblés appelé grains. Il est un peu moins performant que le précédent, aussi moins onéreux et il est moins coûteux d'un point de vue énergétique. La société japonaise Mitsubishi a établi en février 2010 un nouveau record pour ce matériau (cellule 15*15cm) avec un rendement de 19,6% obtenu en laboratoire. Ces cellules sont généralement utilisées pour les applications de type toiture car elles sont moins onéreuses que les cellules monocristallines et possèdent un meilleur retour sur investissement [8,10].

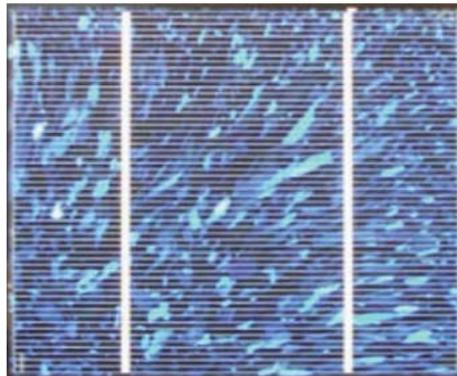


Figure 1.7 : Cellule à base de silicium polycristallin [9].

❖ Le silicium en ruban

Séduisant d'un point de vue technologique, ce mode de production consiste à faire croître un film de silicium entre deux feuilles de carbone par capillarité ou sur un film. Largement pénalisée par une vitesse de croissance très lente imposée par des critères de solidification permettant la ségrégation des impuretés et la maîtrise de la taille des cristaux.

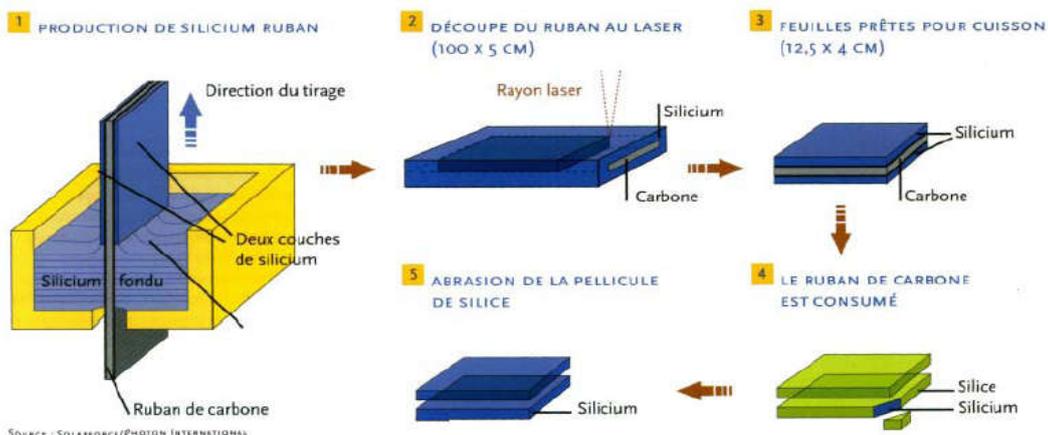
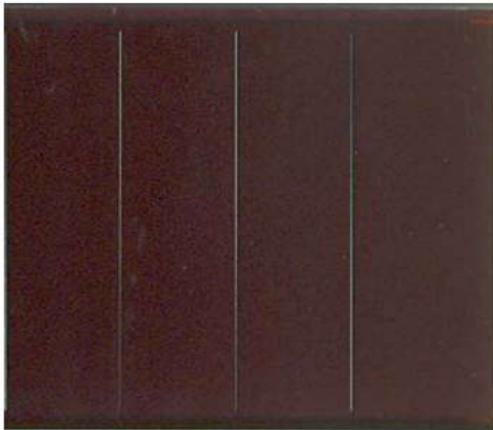


Figure 1.8 : Procédé de fabrication du silicium ruban [11].

Chapitre 1 : Généralités sur les cellules solaires photovoltaïques

❖ Le silicium nanocristallin et amorphe :

C'est le seul type de silicium donnant accès aux applications flexibles. Le silicium amorphe est étudié depuis les années 70 et connaît pendant longtemps son application principale dans les cellules présentes dans les calculatrices, destinées à rallonger la durée de vie des piles. Il offre l'avantage d'être facilement déposable sur de grandes surfaces, d'avoir un fort coefficient d'absorption (et donc de nécessiter de faibles épaisseurs pour fonctionner, limitant l'utilisation des ressources en silicium), de pouvoir fonctionner sous faible éclairage (et donc en intérieur contrairement au silicium multi et mono cristallin) et enfin d'utiliser très peu d'énergie lors de sa fabrication, raccourcissant ainsi son retour sur investissement énergétique [10].



(a) Cellule en Si amorphe de petites dimensions.



(b) Cellule Si amorphe en rouleaux.

Figure 1.9. Cellules solaire en silicium amorphe [9].

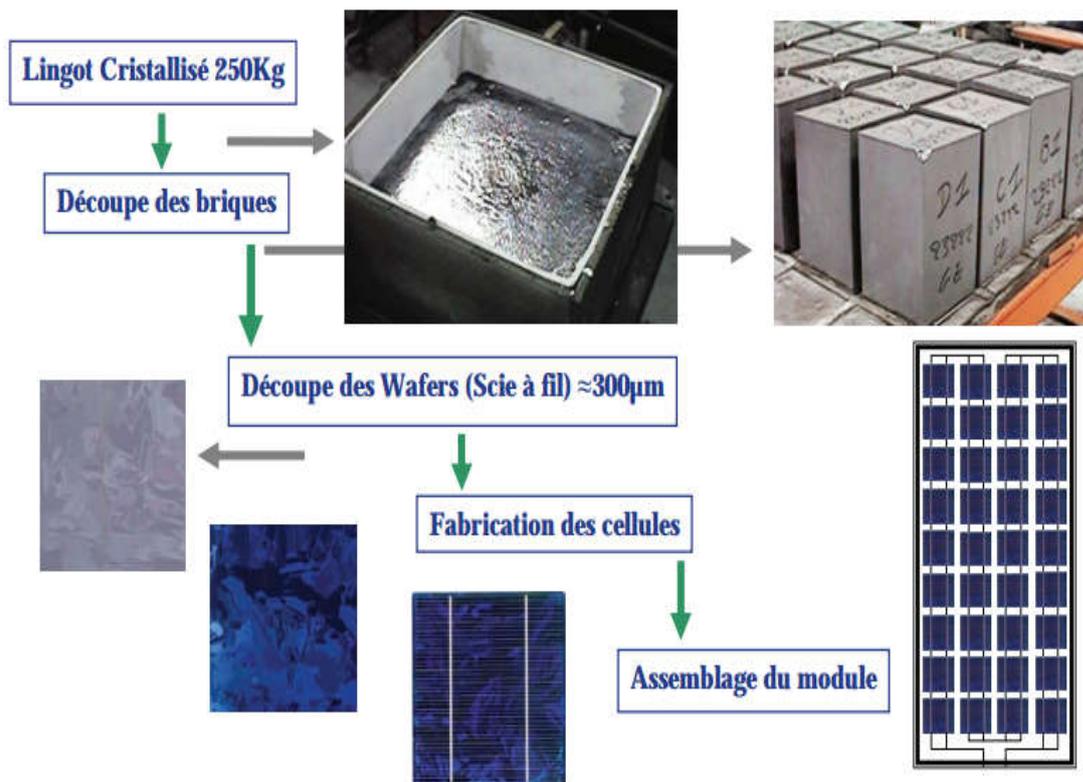


Figure 1.10. Exemple de chaîne de production de cellules photovoltaïques en silicium [6].

5.2. Les autres matériaux

D'autres matériaux sont également utilisés pour fabriquer des cellules solaires.

❖ Le tellure de cadmium (CdTe)

Le tellure de cadmium (CdTe) ou encore appelé hétérojonction cadmium telluride - sulfure de cadmium. Ces composés poly-cristallins sont déposés sur substrat de verre. Les premières cellules ont été développées en 1972. Il y a quelques années, cette technologie semblait être la plus adaptée pour les couches minces. Mais les problèmes de coût et de toxicité posés par le cadmium ont pesé lourdement sur son développement [12].

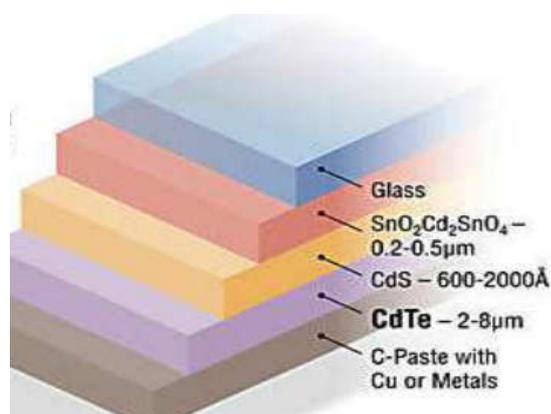


Figure 1.11 : les composants de la cellule solaire CdTe (Tellure de Cadmium) [13].

Chapitre 1 : Généralités sur les cellules solaires photovoltaïques

❖ Le diséléniure de cuivre et indium CIS (CuInSe_2)

La technologie CIS, Cuivre, Indium, Sélénium, permet de décomposer le spectre lumineux de manière plus large. Par conséquent, ses performances sont légèrement supérieures aux panneaux de type amorphe. Ces panneaux ont la particularité de produire d'avantage par temps nuageux, ou faible luminosité que les panneaux polycristallins.

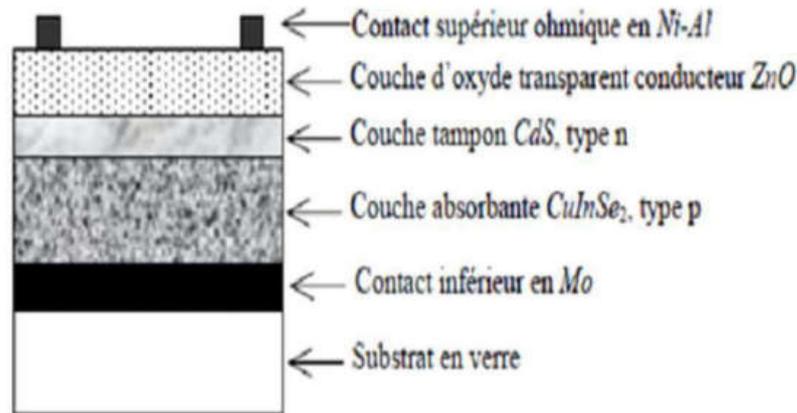


Figure 1.12 : les composantes de la cellule solaire CIS [13].

❖ Le diséléniure de Cuivre et Indium CIGS (Cuivre, Indium, Gallium et Sélénium)

Matériau composé de cuivre, indium, gallium et sélénium. Cette technologie de couches minces, qui permet d'atteindre des épaisseurs inférieures au micromètre, est présente aujourd'hui dans de nombreux projets industriels.

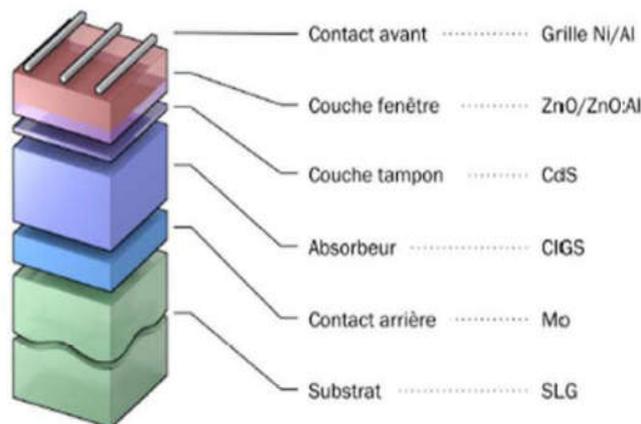


Figure 1.13 : les composantes de la cellule solaire CIGS [13].

❖ L'arséniure de gallium (GaAs)

Matériau monocristallin combiné avec différents matériaux. Les cellules photovoltaïques en couches minces qui intègrent cette technologie sont caractérisées par un haut rendement mais leur coût étant encore très élevé, leur utilisation reste cantonnée à des applications très spécifiques comme le domaine spatial.

❖ Cellules pérovskite

Matériaux hybride comprenant à la fois des composés organiques et inorganiques ou un halogénure d'étain, dans sa couche active. Le rendement de conversion des cellules solaires à pérovskite a progressé très vite en relativement peu de temps dans les laboratoires, depuis les 3,8% au Japon en 2009 jusqu'à 21,1% en mars 2016. Bon marché, elles sont en développement industriel. Mais il reste encore à résoudre certains de leurs défauts, notamment

Chapitre 1 : Généralités sur les cellules solaires photovoltaïques

leur instabilité : les pérovskites sont des cristaux fragiles et solubles et notamment parce qu'elles contiennent du plomb ou de l'étain, matériau toxique [12 et 13].

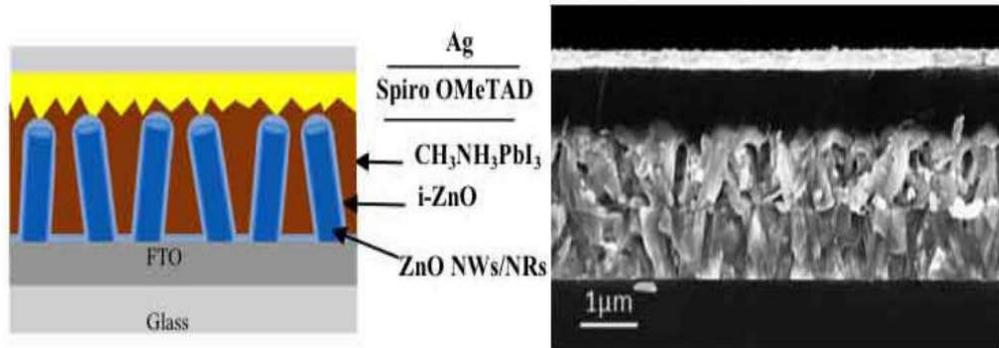


Figure 1.14: les composants la cellule pérovskite [13].

❖ Les cellules organiques à colorant - GRÄTZEL (TiO_2)

Une cellule Grätzel est un système photoélectrochimique inspiré de la photosynthèse végétale. Ces cellules inventées en 1991 par le chimiste suisse Michael Graetzel sont composées d'une poudre de cristaux TiO_2 associée à un électrolyte et à un colorant qui absorbe la lumière. Cette technologie en est encore au stade expérimental. Le rendement est moyen et la stabilité à long terme est mauvaise, mais sa fabrication est en théorie plus facile que les autres cellules et la matière première est bon marché [12].

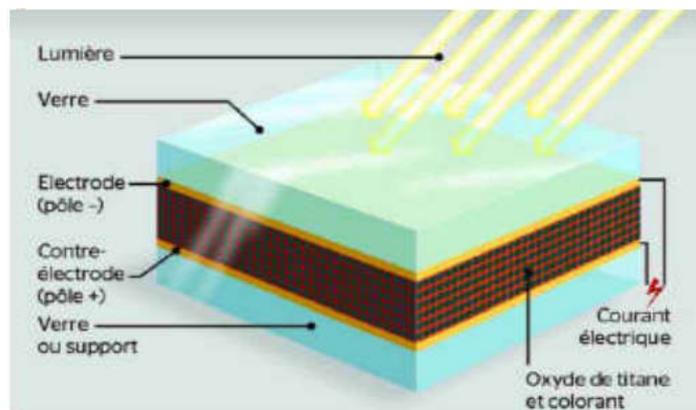


Figure 1.15 : Les composants de la cellule solaire de GRÄTZEL [13].

6. Conclusion

La conversion photovoltaïque est l'un des modes les plus intéressants de l'utilisation de l'énergie solaire. Elle permet d'obtenir de l'électricité de façon directe et autonome à l'aide d'un matériel fiable et de durée de vie relativement élevée, permettant une maintenance réduite. Les pays à fort ensoleillement, comme l'Algérie, pourraient devenir les grands bénéficiaires de cette forme d'énergie.

Chapitre 2 :

Les cellules solaires à base d'hétérojonction silicium amorphe/silicium cristallin

1. Introduction

L'élément le plus utilisé pour la fabrication des cellules solaires est le silicium. Le silicium cristallin est d'une grande performance. La technologie qui se base sur ce matériau permet de fabriquer des cellules avec de hauts rendements (~24%), mais avec un coût de production élevé. Par ailleurs, la qualité du matériau nécessaire pour réaliser des cellules solaires doit être d'une grande pureté, et représente une grande partie du prix de revient total.

Le silicium amorphe est beaucoup moins cher que le silicium cristallin. Mais il est aussi bien moins performant à cause de sa structure désordonnée qui conduit à des défauts dans le gap. La technologie se basant sur le silicium amorphe permet de réduire le coût de production des cellules (matériau moins cher, faible budget thermique, possibilité d'utiliser des couches minces). Mais les rendements obtenus sont faibles relativement à ceux obtenus avec le silicium cristallin.

En octobre 1997, l'entreprise japonaise Sanyo a commencé une production de masse de modules photovoltaïques nommés 'structure HIT. En combinant la bonne performance du silicium cristallin et le bas coût de production du silicium amorphe, cette technologie a permis d'atteindre de hauts rendements tout en diminuant le prix de revient (budget thermique plus bas, épaisseur des couches plus mince, ce qui conduit à un prix du matériau moins cher etc..). Sanyo a ensuite perfectionné ses cellules jusqu'à atteindre des valeurs records du rendement de conversion (22,3% avec 21,85% pour une surface de 100,4 cm² et 17,3% en module) [8].

2. Principe de fonctionnement d'une Hétérojonction

2.1. Les semi conducteurs

Dans un atome isolé, les électrons prennent des niveaux d'énergie discrets. Lorsque, les atomes sont rassemblés pour former un solide, les niveaux discrets de chaque atome se différencient pour former des bandes continues d'énergie. Cette structure électronique de bandes nous permet de classer les matériaux en trois grandes familles : les métaux, les isolants et les semi-conducteurs (Figure 2.1). Pour un métal, tous les niveaux supérieurs au niveau de Fermi étant autorisés et la quasi totalité de ces niveaux étant inoccupés à température ambiante, toutes les longueurs d'onde peuvent être alors absorbées, mais cette énergie absorbée est convertie en phonons. Dans un isolant, le rayonnement solaire ne peut être absorbé par ce dernier car son gap (8-10 eV) est plus grand que les énergies de ce spectre. Par contre, un semi-conducteur a un gap plus faible que celui d'un isolant (0.6-2 eV). A titre d'exemple, le silicium cristallin (Si) a un gap de 1.12 eV, le germanium (Ge) de 0.7 eV,

Chapitre 2 : Les cellules solaires à base d'hétérojonction silicium amorphe/silicium cristallin

l'arsenic de gallium (GaAs) de 1.42 eV. Par conséquent, le spectre solaire absorbé par les semi-conducteurs fournit de l'énergie aux électrons et les libère dans le cristal pour participer à la conduction [5].

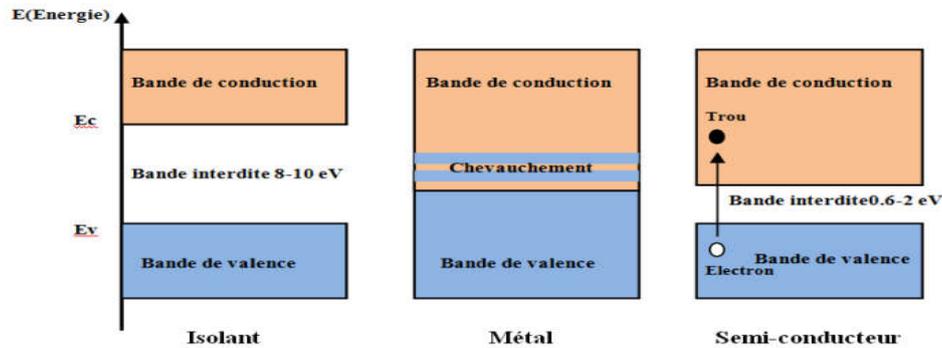


Figure 2.1: Les trois grandes familles des matériaux [5].

2.1.1. Structure cristalline

La plupart des semi-conducteurs cristallisent dans la structure « Diamant » comme le Si et Ge ou « Zinc blende » comme le GaAs. Les deux structures possèdent des liaisons covalentes tétraédriques où chaque atome est entouré de quatre atomes proches voisins situés sur les sommets d'un tétraèdre régulier. Les deux structures peuvent être considérées comme deux structures cubiques à face centrées décalées l'une par rapport à l'autre d'un quart ($a/4$) suivant les trois directions. Pour la structure « Diamant », les deux structures cubiques sont constituées des mêmes atomes (exemple Si), tandis que pour la structure « Zinc blende », les deux structures cubiques sont constituées d'atomes différents (exemple Ga et As) (Figure 2.2).

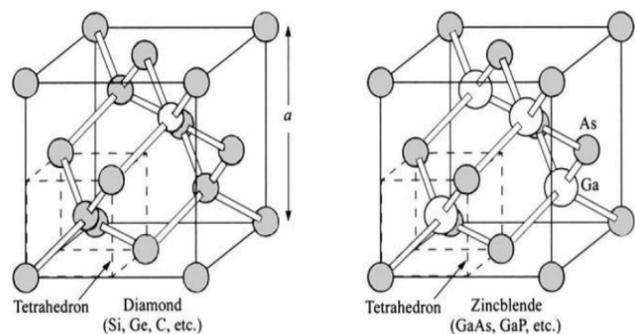


Figure 2.2: Structure cristalline des semi-conducteurs [5].

2.1.2. Transitions directe et indirecte

Il existe deux types de gap : le gap direct et le gap indirect (figure 2.3). Lorsque le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence correspondent à la même valeur du vecteur d'onde (k), le gap est direct (figure 2.3.a). Les transitions inter bandes s'effectuent verticalement, et sont donc radiatives. Le GaAs, le CdTe sont des exemples des semi-conducteurs à gap direct. Par contre, dans le cas des semi-conducteurs à gap indirect, la transition des extrema des bandes ne se fait pas verticalement mais de façon oblique donc le

Chapitre 2 : Les cellules solaires à base d'hétérojonction silicium amorphe/silicium cristallin

passage se fait par le changement de vecteur d'onde, assisté par des phonons (figure 2.3.b). Le silicium(Si) et le germanium(Ge) sont des semi-conducteurs à gap indirect.

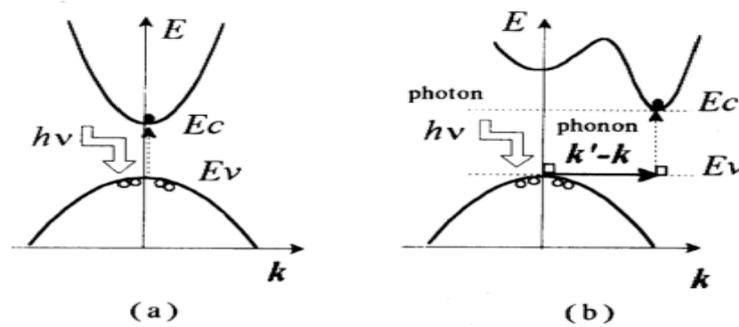


Figure 2.3: (a) Structure de bande à gap direct, (b) Structure de bande à gap indirect [5].

2.1.3. Densité de porteurs à l'équilibre thermodynamique

Dans un semi-conducteur, l'énergie de l'agitation thermique permet le passage d'un électron de la bande de valence à la bande de conduction laissant une lacune appelée «trou», un électron d'un atome voisin peut combler cette lacune, laissant à son tour un trou. Cette notion de trou permet d'introduire un deuxième mécanisme de conduction de charges positives (+e). Le nombre d'électrons libres dans la bande de conduction est donné par le produit de la densité d'états $N_c(E)$ par la fonction de distribution de Fermi Dirac $f_n(E)$ intégrée sur toute la bande de conduction :

$$n = \int_{E_c}^{\infty} N_c(E) f_n(E) dE \quad (2.1)$$

$$\text{Où } N_c(E) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m_c^*}{\hbar^2} \right)^{3/2} (E - E_c)^{1/2} \quad (2.2)$$

$$\text{Et } f_n(E) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E-E_F}{k_B T}}} \quad (2.3)$$

Cette intégrale donne :

$$n = N_c e^{\frac{E_F - E_c}{k_B T}} \quad (2.4)$$

$$\text{Où } N_c = \frac{1}{4} \left(\frac{2m_c^* k_B T}{\pi \hbar^2} \right)^{3/2} \quad (2.5)$$

D'une façon analogue, le nombre de trous libres dans la bande de valence est donné par le produit de la densité d'états $N_v(E)$ par la fonction $f_p(E)$ égale à $(1 - f_n(E))$ intégrée sur toute la bande de valence où $f_p(E)$ exprime la probabilité de trouver une place vacante de niveau d'énergie E :

$$p = \int_{-\infty}^{E_v} N_v(E) f_p(E) dE \quad (2.6)$$

$$\text{Où } N_v(E) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m_v^*}{\hbar^2} \right)^{3/2} (E_v - E)^{1/2} \quad (2.7)$$

Chapitre 2 : Les cellules solaires à base d'hétérojonction silicium amorphe/silicium cristallin

Le calcul donne alors:

$$p = N_v e^{\frac{E_v - E_F}{k_B T}} \quad (2.8)$$

$$\text{Où } N_v = \frac{1}{4} \left(\frac{2m_v^* k_B T}{\pi h^2} \right)^{3/2} \quad (2.9)$$

E_F est le niveau de Fermi qui est l'énergie de référence pour laquelle la probabilité d'occupation $f(E_F)$ est égale à 0.5 ; m_c^* et m_v^* sont respectivement les masses effectives de l'électrons et du trou ; E_c est le niveau du bas de la bande de conduction ; E_v est le niveau du haut de la bande de valence ; T est la température absolue du matériau (en K) ; k_B est la constante de Boltzmann et h la constante de Planck ($\hbar = h/2\pi$) [5, 14].

2.1.4. Mécanismes de recombinaison

Dans les semi-conducteurs les porteurs de charge libre se recombinent par des mécanismes principaux, tels que la recombinaison Shockley-Read Hall introduite par les défauts cristallin dus aux atomes d'impuretés (piège pour les électrons), la recombinaison radiative des photons et enfin la recombinaison d'Auger ou l'excès d'énergie peut être transféré à un électron ou un trou [15].

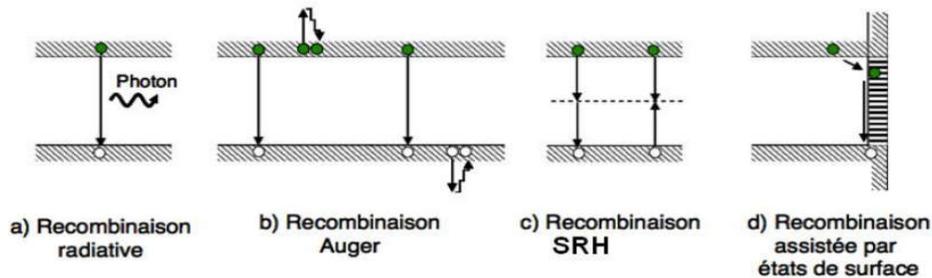


Figure 2.4: Représentation des différents mécanismes de recombinaison [5].

2.2. Jonction pn

Une jonction pn est constituée par la juxtaposition de deux régions de types différents (type n et type p) d'un matériau semi-conducteur (figure 2.5). Lorsque le contact est réalisé, les électrons de la région n, où ils sont majoritaires, vont diffuser vers la région p où ils sont minoritaires. De même, les trous de la région P vont diffuser de la même façon vers la région n. Les déplacements de ces électrons et de ces trous vont provoquer l'apparition, de part et d'autre de la jonction, de deux zones non neutres l'une comprenant des impuretés ionisées positivement (zone n) et l'autre comprenant des impuretés ionisées négativement (zone p). La présence de ces charges positives et négatives donne naissance à un champ électrique interne dont le sens est tel qu'il s'oppose à la diffusion des porteurs majoritaires. À l'équilibre, tout se passe comme si deux courants identiques et opposés se superposaient, donnant un courant résultant nul: l'un est provoqué par la diffusion de gradient de concentration et l'autre de conduction dû à la présence de ce champ électrique interne. La zone comprenant des charges

Chapitre 2 : Les cellules solaires à base d'hétérojonction silicium amorphe/silicium cristallin

non compensées est dite zone de charge d'espace (ZCE) ou zone désertée, les autres zones sont dites neutres.

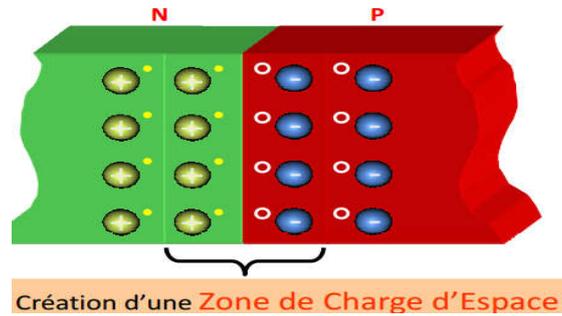


Figure 2.5 : Jonction pn [13].

La densité de charge

Pour le modèle simple de la jonction abrupte (Figure 2.6), la densité de charge d'espace à travers la structure est :

$$\rho(x)=0 \quad \text{pour } x < -x_p \text{ et } x > x_n \quad (2.10)$$

$$\rho(x)= -e N_A \quad \text{pour } -x_p < x < 0 \quad (2.11)$$

$$\rho(x)= e N_D \quad \text{pour } 0 < x < x_n \quad (2.12)$$

En intégrant l'équation de Poisson $dE_n(x)/dx = \rho(x)/\epsilon$ pour une dimension, on obtient le champ électrique E et le potentiel électrique V à travers la structure.

Le champ électrique interne

Le champ électrique interne est déterminé sur deux côtés.

-Le champ électrique du côté "N" : $(0 < x < x_n)$

Équation de GAUSS : $\frac{dE_n(x)}{dx} = \frac{\rho(x)}{\epsilon} = \frac{eN_D}{\epsilon}$

En intégrant et en tenant compte de la condition limite : $E_n(x_n)=0$, on trouve :

$$E_n = \frac{eN_D(x - x_n)}{\epsilon} \quad (2.13)$$

Champ électrique du côté "P" : $(-x_p < x < 0)$

Équation de GAUSS : $dE_p(x)/dx = \rho(x)/\epsilon = -e N_A/\epsilon$.

En intégrant et en tenant compte de la condition limite : $E_p(-x_p) = 0$ on trouve :

$$E_p = \frac{-eN_A(x + x_p)}{\epsilon} \quad (2.14)$$

Ainsi, l'existence du champ électrique dans la ZCE laisse sous-entendre la présence d'une barrière de potentiel qui vaut 0,7 V dans les jonctions au silicium.

Chapitre 2 : Les cellules solaires à base d'hétérojonction silicium amorphe/silicium cristallin

La barrière de potentiel

$$V_b = \frac{KT}{e} \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right) \quad (2.15)$$

Où :

n_i : Densité intrinsèque de porteurs (cm^{-3}).

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

e : Charge élémentaire $1,6 * 10^{-19}$ (C).

T : Température (K).

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

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

A partir de cette formule, V_b varie linéairement avec T [17].

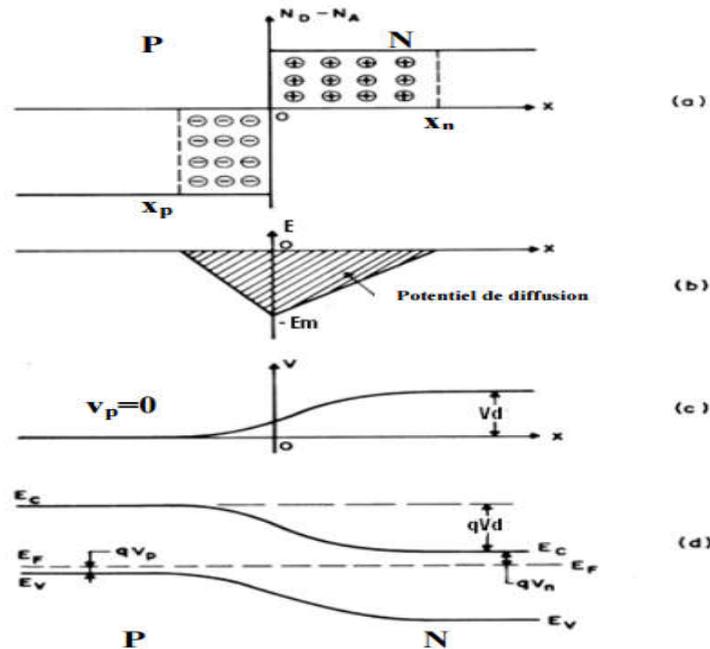


Figure 2.6: Jonction pn (abrupte) à l'équilibre: a) distribution des impuretés ionisées; b) distribution du champ électrique; c) variation du potentiel; d) diagramme des bandes d'énergie [5].

2.3. Le modèle de base d'Anderson

Le modèle d'Anderson (1960) sert de point de départ aux autres modèles d'hétérojonction. Le principe du modèle repose sur la prise en compte des propriétés électroniques des matériaux utilisés : permittivité électrique, affinité électronique et largeur de la bande interdite E_g . Les différences entre les valeurs de E_{g1} , E_{g2} et les affinités électroniques χ_1, χ_2

Chapitre 2 : Les cellules solaires à base d'hétérojonction silicium amorphe/silicium cristallin

engendrent une discontinuité au niveau du raccordement des bandes de conduction et de valence ΔE_C et 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 homojonction, on obtient les relations suivantes : Les discontinuités de bandes ΔE_C et ΔE_V sont données par :

$$\Delta E_C = (\chi_1 - \chi_2)q \quad (2.16)$$

$$\Delta E_V = (\chi_2 - \chi_1)q + E_{g2} - E_{g1} \quad (2.17)$$

Calcul du potentiel induit :

$$qV_d = qV_{d1} + qV_{d2} = E_{g1} - \delta_n - \delta_p + \Delta E_C \quad (2.18)$$

Avec :

V_{d1}, V_{d2} : Tensions de diffusion de chaque région

δ_n, δ_p : Différence d'énergie entre le niveau de fermi et la bande de conduction ($\delta_n = E_C - E_f$) et la bande de valence ($\delta_p = E_f - E_V$) [16].

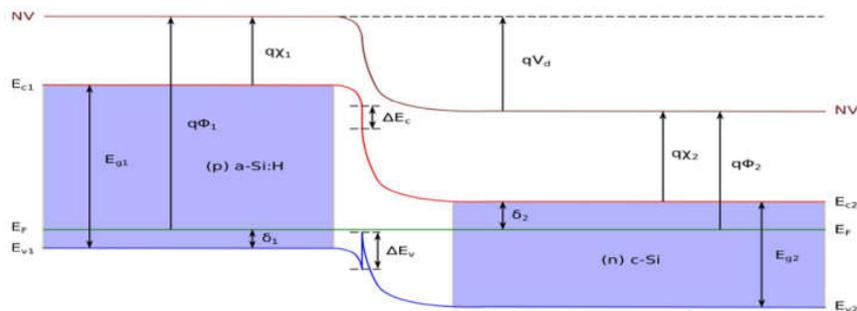


Figure 2.7 : Diagramme de bande à interface a-Si:H (p)/C-Si (n) [17].

3. Le silicium cristallin et ses caractéristiques

Le silicium reste le matériau le plus utilisé dans l'industrie photovoltaïque. L'intérêt de semi-conducteur à base de silicium est multiple à cause de ses avantages : abondance dans la nature, non toxique, son dopage est assez facile avec du bore ou du phosphore. Le silicium bénéficie aussi de son implantation dans l'industrie de la microélectronique. Cette industrie utilise du silicium cristallin de très bonne qualité (grande pureté) et

Chapitre 2 : Les cellules solaires à base d'hétérojonction silicium amorphe/silicium cristallin

chimiquement stable dans le temps. Il existe différents types du silicium cristallin qui est classés selon la taille de leurs grains. Le tableau (2.1) présente ces types.

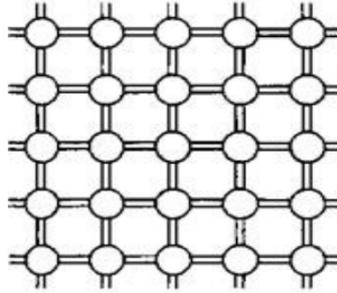


Figure 2.8 : Structure du silicium cristallin [5].

Tableau 2.1 : Terminologie pour les différents types de silicium cristallin (c-Si) [5].

Description	Symbole	Taille des grains	Techniques de croissance
Monocristallin	sc-Si	> 10 cm	Cz, FZ
Multicristallin	mc-Si	1 mm-10 cm	Moulage, sphéral, feuille, ruban
Polycristallin	pc-Si	1 μm -1 mm	Dépôt chimique en phase vapeur
Microcristallin	$\mu\text{c-Si}$	< 1 μm	Dépôt par plasma

3.1. Silicium monocristallin

Plusieurs techniques sont utilisées pour cristalliser le silicium purifié, les plus connues sont, le procédé « Czochralski » (Cz) et le procédé Fusion de Zone « Float Zone » (FZ) qui produisent du silicium monocristallin.

❖ La méthode de la zone fondue flottante :

Le silicium monocristallin (c-Si) élaboré avec la technique Float zone (Fz) (figure 2.9) qui permet d'obtenir des matériaux avec une durée de vie des porteurs allant de 500 μs à 5 ms. Le Silicium FZ obtenu est d'une plus grande pureté, par rapport à la méthode Czochralski, en évitant la contamination par le creuset. Le processus consiste à produire une zone liquéfiée en chauffant un bâton de silicium polycristallin. Le bâton est déplacé verticalement suivant une lente rotation. Cette méthode est plus longue et plus chère.

Chapitre 2 : Les cellules solaires à base d'hétérojonction silicium amorphe/silicium cristallin

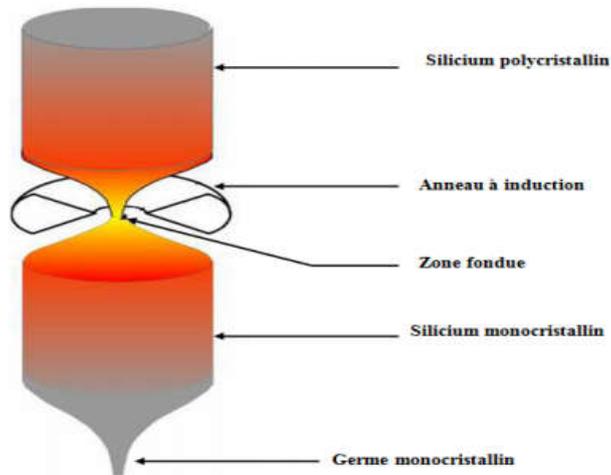


Figure 2.9 : Procédé de Fusion de Zone [5].

❖ Le procédé « Czochralski » (Cz)

Cette méthode qui a été inventée par Jan Czochralski (1916), consiste à fondre le silicium polycristallin dans un creuset en quartz à 1450 °C, des dopants (bore et phosphore) peuvent alors être ajoutés pour doper le silicium de type p ou de type n. Un germe de silicium monocristallin avec une orientation cristallographique précise (100 par exemple) est placé en contact avec la surface du bain en fusion. Le silicium solidifié et tiré lentement vers le haut, prend l'orientation cristallographique du germe. (Figure 2.10). Ensuite la vitesse de tirage est augmentée jusqu'à atteindre la vitesse spécifique à laquelle le cristal croît avec le diamètre désiré. Le lingot obtenu peut atteindre 30 cm de diamètre et 2 m de longueur. Pour le photovoltaïque, les diamètres finaux des cellules actuelles, obtenues à partir des lingots, se situent généralement entre 12.5 et 15.6 cm.

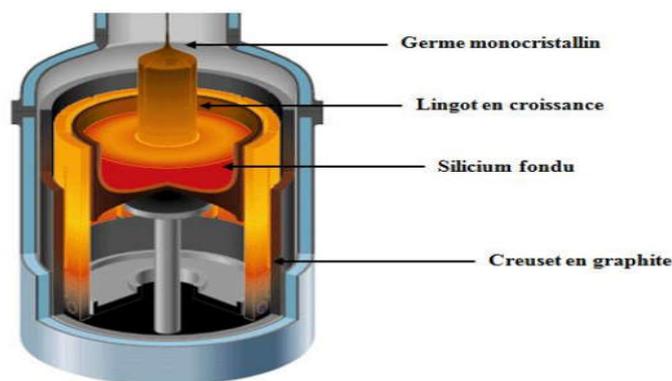


Figure 2.10: Procédé « Czochralski » (Schutz-kuchly 2011) [5].

3.2. Le silicium multi-cristallin (mc-Si)

Les lingots de silicium multicristallin (mc-Si) sont produits par solidification unidirectionnelle d'un bain de silicium en fusion. Des morceaux de silicium polycristallin sont versés dans un creuset en graphite puis fondus par un chauffage à induction. Ensuite, le

Chapitre 2 : Les cellules solaires à base d'hétérojonction silicium amorphe/silicium cristallin

creuset est laissé refroidir depuis son fond par une bague chauffante, lentement tirée vers le haut. En divers endroits sur le fond du creuset se forment de petits monocristaux qui poussent latéralement jusqu'à ce qu'ils se touchent. Ce processus de refroidissement vertical permet aux cristaux de pousser vers le haut dans une colonne (croissance colonnaire). Enfin, le bloc de silicium multicristallin est divisé en lingots sous forme de cubes de 5 ou 6 pouces (12.70 ou 15.24 cm) le long des bords (Figure 2.11). En raison de sa qualité dégradée, le rendement de conversion des cellules solaires fabriquées avec le silicium multicristallin est typiquement 2-3% inférieur à celui des cellules solaires monocristallines [5].

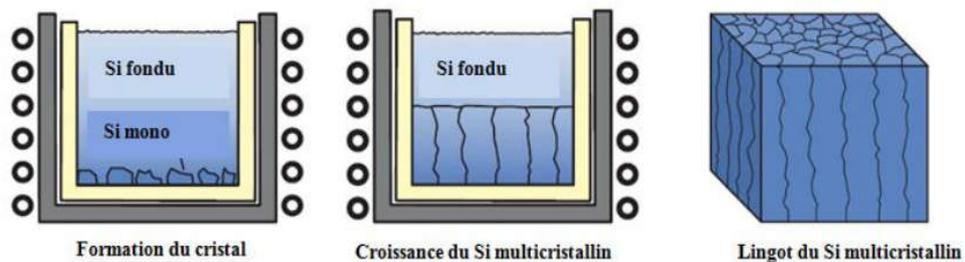


Figure 2.11: Production du silicium multicristallin [5].

4. Silicium amorphe et ses caractéristiques

Le silicium amorphe (a-Si) est la forme non-cristalline du silicium. Ce matériau possède un important coefficient d'absorption de la lumière, particulièrement dans l'ultraviolet. Pour des énergies supérieures à 1.7eV (0.7 μ m), ce coefficient croit beaucoup plus rapidement que celui du silicium cristallin lorsque l'énergie des photons augmente. En conséquence, des couches minces en silicium amorphe peuvent être suffisantes pour réaliser un convertisseur photovoltaïque avec une efficacité acceptable.

4.1. Méthodes d'élaboration de silicium amorphe

Il existe plusieurs méthodes de dépôt de silicium en couche mince, dont celles du type CVD sont certainement les plus utilisées. Le terme « CVD » (Chemical Vapor Deposition) signifie toute technique de dépôt de film à partir de précurseurs en phase gazeuse, où le film résulte de la décomposition des substances en phase gazeuse initiales via des réactions chimiques. Nous citons quelques méthodes chimiques comme : PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition), PACVD (Photo Assisted CVD), LICVD (Laser Assisted CVD), HVCVD (High Vacuum CVD), MOCVD (Metal Organique CVD) et Sol-Gel. Les méthodes physiques utilisées sont l'évaporation et EBPVD (Electron Beam Physical Vapor Deposition)...etc.

4.2. Structure du silicium amorphe

Le silicium amorphe a une structure désordonnée, il possède la structure tétraédrique, mais il présente des distorsions aléatoires. En conséquence de ce désordre, certaines liaisons se cassent pour former des 'liaisons pendantes'. Juste après sa découverte vers la fin du 19^{ème} siècle, le silicium amorphe ne présentait pas des propriétés intéressantes. En fait, lors du dopage, les porteurs préfèrent se fixer sur les liaisons pendantes, énergétiquement plus

Chapitre 2 : Les cellules solaires à base d'hétérojonction silicium amorphe/silicium cristallin

intéressantes. Mais en 1975, Chittik, Spear et LeComber ont réussi à doper des couches de silicium amorphe contenant près de 10% d'hydrogène, montrant par là le caractère semi-conducteur de cet alliage. L'hydrogène a saturé les liaisons pendantes, formant un matériau présentant un grand intérêt technologique : le silicium amorphe hydrogéné noté a-Si:H [8].

4.3. 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 d'autres phénomènes. On dit qu'il vieillit. L'effet le plus connu et le plus handicapant de la métastabilité est la création de défauts par éclairage prolongé. On désigne ce phénomène par 'effet Staebler-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 pendant 1 heure [8,13].

4.4. Diagramme de bande

Le diagramme de bande du silicium amorphe est représenté dans la figure (2.12). Il découle du modèle de Davisson Mott. Dans les bandes, les états sont étendus (les porteurs participent à la conduction) et une queue de bande se prolonge dans la bande interdite. Les états dans ces queues sont localisés. Ils participent à l'absorption. Pour cela, le gap optique est légèrement inférieur au gap de mobilité. Toutefois, la différence n'est que de l'ordre de 0,1eV. Les queues de bandes sont modélisées par une exponentielle. 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 $D0^-$, l'autre de caractère donneur $D+/0$). Un autre modèle a été développé, le modèle du réservoir de défauts (defect-pool model). Il a été développé par Winer, Powel et Drane. Ce modèle n'impose pas un seul type de défaut à un niveau d'énergie donné, mais considère que les défauts peuvent être chargés $+,0,-$ sur toute une gamme d'énergie[8].

Chapitre 2 : Les cellules solaires à base d'hétérojonction silicium amorphe/silicium cristallin

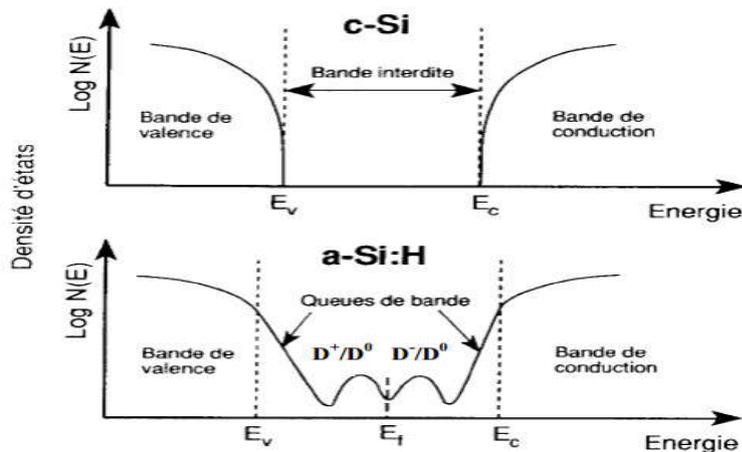


Figure 2.12 : Diagramme de bande du silicium cristallin et du silicium amorphe hydrogéné. D^+ , D^0 et D^- représentent les liaisons pendantes respectivement positives, neutres et négatives [8].

4.5. Le rôle de l'hydrogène

Comme il a déjà été mentionné plus haut, c'est l'hydrogène qui en saturant les liaisons pendantes rend le silicium amorphe utilisable. Sans hydrogène, la densité des liaisons pendantes serait de l'ordre de $10^{19}/\text{cm}^3$, le gap optique de 1,2eV environ et il est impossible de le doper. En effet, le niveau de Fermi reste inchangé lors du dopage et les atomes dopants sont inactifs. L'hydrogène permet de réduire les liaisons pendantes de 99,99%. Il n'y a donc presque plus d'états profonds qui agissent comme des centres recombinants. De plus, en se liant aux atomes de silicium (liaisons covalentes), il entraîne la disparition d'une partie des états localisés. Ceci se traduit par une diminution de la pente des queues de bande et une augmentation du gap optique. Mais, une incorporation excessive de l'hydrogène peut entraîner la rupture des liaisons faibles et l'introduction de nouvelles liaisons pendantes. Un équilibre donc se met en place. La concentration d'hydrogène doit varier entre 6% et 35%, ce qui dépasse largement la densité nécessaire à la passivation des liaisons pendantes. Des travaux récents ont montré que l'hydrogène atomique introduit d'autres effets que la passivation des liaisons pendantes. Le plus important concerne les hétérojonctions a-Si:H/c-Si. La concentration d'hydrogène dans le silicium amorphe a une influence sur les discontinuités de bande. Elle peut nettement les modifier et celles-ci ont une grande influence sur les caractéristiques de la cellule [8].

Chapitre 2 : Les cellules solaires à base d'hétérojonction silicium amorphe/silicium cristallin

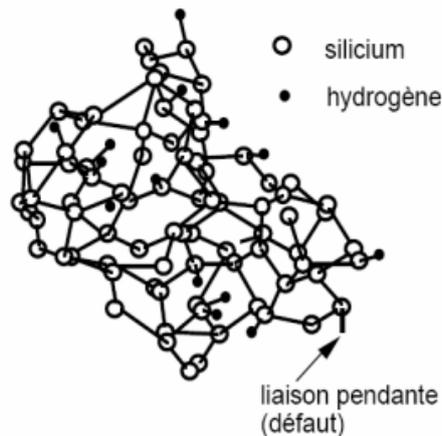


Figure 2.13 : Structure du Silicium amorphe hydrogéné [8].

5. Etat de l'art des cellules HIT

La cellule HIT a été développée depuis les années 90 et depuis elle connaît de plus en plus de succès. Des centres de recherches et de développement (R&D) de différents départements s'investissent de plus en plus. Le tableau 2.2 représente l'évolution des performances de cellules HIT fabriquées par Sanyo.

Au début, Une cellule composée d'une couche de silicium dopé « n » (n-C-Si), d'un film mince de silicium amorphe hydrogéné dopé « p » (p-a-Si:H), d'une couche antireflet (TCO) et un métal pour la collecte des porteurs de charges. la cellule donne un rendement de 12.3% qui est largement inférieur au rendement d'une cellule conventionnelle.

D'après le tableau, nous remarquons que l'ajout d'une couche de silicium amorphe hydrogéné intrinsèque (i-a-Si:H) entre le p-a-Si:H et le n-c-Si, a amélioré les résultats obtenus. Un rendement de 14,8% est atteint. Le rôle de cette couche intrinsèque est de passer les états d'interface de la jonction pn.

Un autre succès remarqué avec l'insertion des surfaces de texturation et de la base (BSF pour Back Surface Field). La texturation des surfaces aide à réduire la réflexion et par conséquent à faciliter l'absorption du rayonnement. Quant à la couche BSF, elle réduit les recombinaisons des porteurs de charges à l'arrière de la cellule. Dans ce cas, le rendement est augmenté jusqu'à 18.7%. L'ajout d'une couche de passivation à base de silicium intrinsèque a permis d'atteindre un rendement de 20%.

Sanyo est avancé plus loin. Les recherches de perfectionnement se poursuivent, parmi lesquelles la symétrisations de la cellule et la double illumination qui ont vu le jour. Ce qui a permis d'atteindre 21, 3% de rendement, et 22,3% en 2008. En mai 2009, en se basant sur l'optimisation des matériaux, Sanyo annonce une efficacité de 23% [17].

Chapitre 2 : Les cellules solaires à base d'hétérojonction silicium amorphe/silicium cristallin

Tableau 2.2: Evolution des performances de cellules HIT fabriquées par Sanyo sur substrat n ces résultats ont été obtenus sur des cellules de 1 cm^2 [16].

Substrat de type c-Si(n) (cz)	V_{co} (mV)	I_{cc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)	Ref
ITO/a-Si : H(p) /c-Si(n)/métal	570	30.0	72.0	12,3	[18]
ITO/a-Si : H(p)/a-Si : H(i) /c-Si(n)/métal	600	33.5	74.0	14,8	[18]
ITO/a-Si : H(p)/a-Si : H(i) /c-Si(n)/BSF/métal + Texturation	638	37.9	77.5	18,7	[19]
ITO/a-Si:H(p)/a-Si:H(i) /c-Si(n)/a-si:H(i)/a-Si:H(n+)/métal + Texturation	644	39.4	79.0	20,0	[18]

6. Les composants de la cellule silicium à hétérojonctions

La cellule HIT est composée en plusieurs couches. Chaque couche a une fonction et importance pour améliorer le rendement (figure 2.14).

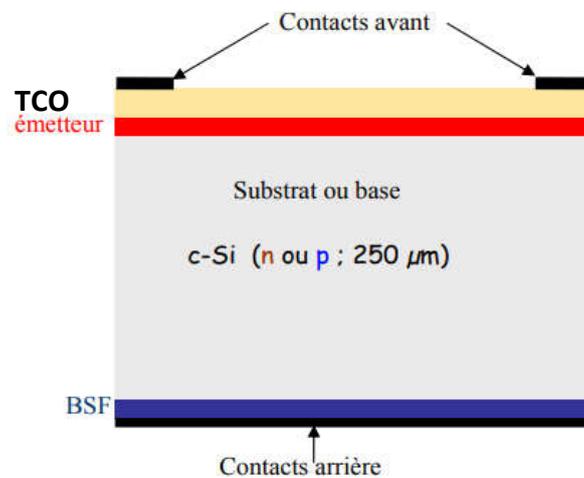


Figure 2.14 : Structure d'une cellule photovoltaïque silicium à hétérojonctions [20].

6.1. La couche antireflet TCO

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

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

Chapitre 2 : Les cellules solaires à base d'hétérojonction silicium amorphe/silicium cristallin

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

L'oxyde d'indium dopé à l'étain nommé ITO (Indium Tin Oxide) est l'oxyde transparent conducteur le plus connu et aussi le plus utilisé. L'ITO possède en effet d'excellentes propriétés : transparence supérieure à 80 % voire 90 % sur le spectre visible, résistivité faible de $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ pour les meilleurs ITO, et une très bonne adhérence sur une multitude de substrats. Pour les cellules à contact arrière, les TCO en face avant sont remplacés par des matériaux qui joueront à la fois le rôle de couche antireflet et de couche de passivation de la surface du substrat c-Si. Le nitrure de silicium (SiN_x) est généralement utilisé pour ce type de structure.

6.2. Le Silicium amorphe hydrogène de type p (a-Si:H (p)) ou l'émetteur

C'est une couche fine (quelques nanomètres) et très résistive qui contribue à réduire considérablement le coût du PV car elle consomme moins de matériaux et assure une économie thermique (faible température lors de sa fabrication ; environ 250°C par PECVD).

L'émetteur est connu pour sa forte absorption et aussi pour la rapidité de sa réalisation (environ 2 minutes). Son rôle principal rentre dans la formation de la jonction pn pour ainsi favoriser la collecte et le transport des charges.

6.3. Le Silicium amorphe hydrogéné intrinsèque (a-Si:H (i)) ou la couche tampon

Le Silicium amorphe hydrogéné intrinsèque est déposé entre le Silicium amorphe hydrogéné de type p et le wafer de silicium cristallin (c-Si). Son rôle est de permettre la passivation à l'interface p-a-Si:H/n-c-Si et bien entendu de limiter aussi les recombinaisons au niveau de la même interface.

Le Silicium amorphe hydrogéné intrinsèque est connu sous le nom de couche tampon car il ne perturbe pas le champ électrique à l'interface. Il diminue considérablement la densité des défauts au niveau de l'interface. Son épaisseur doit être contrôlée à cause de sa forte résistivité.

6.4. Le Silicium cristallin (C-Si) ou la couche active

Tout comme dans les homojonctions, le silicium cristallin joue le même rôle : générateur d'électrons et de trous suite à l'absorption de la lumière dans le matériau. Les électrons diffusent naturellement de côté « n » vers le côté « p » et donc dans notre cas du C-Si vers l'émetteur.

Chapitre 2 : Les cellules solaires à base d'hétérojonction silicium amorphe/silicium cristallin

6.5. Le Back Surface Field (BSF)

Le BSF, comme son nom l'indique, se situe à l'arrière du silicium cristallin. Il a pour objectif de créer un champ électrique à l'arrière de la cellule afin de repousser les trous minoritaires de la couche cristalline vers l'émetteur, de réduire les recombinaisons à l'arrière du silicium cristallin, ainsi que d'améliorer la collecte des porteurs photogénérés. Cette couche sera l'objet principal de notre étude dans le dernier chapitre.

6.6. Les contacts métalliques

Les électrodes de contact avant et arrière contribuent à la collecte de charges photogénérées (électrons). Ces contacts sont généralement réalisés par sérigraphie à base d'Aluminium ou de cuivre.

7. Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'aborder les propriétés et le fonctionnement d'une cellule à hétérojonction de type HIT.

D'abord, nous avons traité les cellules photovoltaïques à hétérojonctions qui sont obtenues par la mise en contact de matériaux d'énergie de gap différente. L'hétérojonction en silicium consiste à mettre en contact le silicium amorphe hydrogéné (a-Si: H) avec le silicium cristallin (c-Si). Ensuite nous avons présenté la distribution de la densité d'états dans le silicium amorphe hydrogéné (a : si : H), et nous avons mis en évidence l'effet de la distorsion de son réseau et des liaisons pendantes sur la création d'états localisés dans le gap.

Enfin, Nous avons aussi présenté le modèle d'Anderson et nous avons défini les composantes de la cellule HIT en décrivant chaque couche avec leur fonction.

Chapitre 3 :

Modélisation et simulation des cellules solaires

1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons étudier un modèle mathématique équivalent à une cellule photovoltaïque. Cette modélisation permet de définir les quatre paramètres de la cellule qui sont le courant de court-circuit I_{CC} , la tension de circuit ouvert V_{CO} , le facteur de forme FF et le rendement de conversion η . Nous citerons les équations de base du semi-conducteur tel l'équation de poisson et les équations de continuité. Nous terminerons ce chapitre par un rappel sur les logiciels de simulation disponibles comme SCAPS, AMPS-1D, AFROS-HET et ASDMP. Nous présenterons le modèle de simulation utilisé ainsi que le logiciel SCAPS que nous utiliserons pour réaliser nos simulations.

2. Modèle mathématiques équivalent à une cellule photovoltaïque

Une photopile peut être modélisée par un schéma électrique équivalent, il existe plusieurs modèles de la cellule photovoltaïque qui diffèrent entre eux par le nombre de paramètres intervenant dans le calcul de la tension et de l'intensité de courant de sortie.

❖ Modèle équivalent à une diode

Le cas simple d'une cellule idéale à jonction donneur-accepteur soumise à un flux lumineux, celle-ci fonctionne comme un générateur de courant. Son schéma équivalent (Figure 3.1) est représenté par une diode idéale montée en parallèle avec une source de courant.

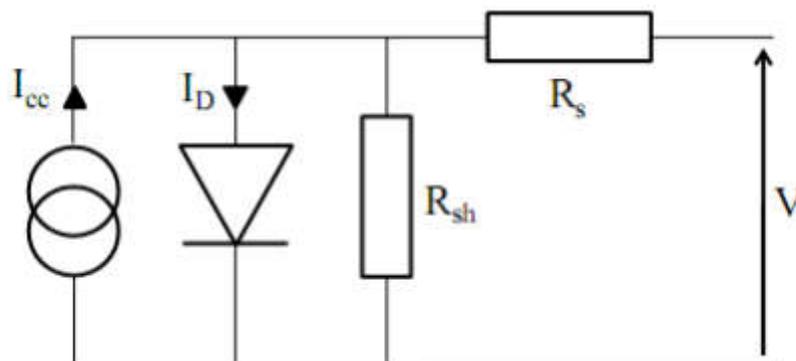


Figure 3.1 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque [10].

R_s est une résistance série liée à la résistivité volumique et à l'impédance des électrodes et des matériaux.

La pente de la courbe $I(V)$ au point V_{co} représente l'inverse de la résistance série ($1/R_s$).

R_{sh} est une résistance parallèle liée aux effets de bord et aux recombinaisons volumiques. La pente de la courbe $I(V)$ au point I_{cc} représente l'inverse de la résistance shunt ($1/R_{sh}$).

Chapitre 3 : Modélisation et simulation des cellules solaires

Pour minimiser les pertes, il faut diminuer R_s et augmenter R_{sh} . Le cas idéal est représenté par R_{sh} égale à l'infini et R_s égale à zéro.

Les valeurs de ces résistances peuvent être déterminées grâce à l'inverse de la pente de la courbe $I(V)$ à $V = 0$ ($p^{-1} = R_{sh}$) et à $I = 0$ ($p^{-1} = R_s$).

L'influence de ces deux paramètres sur les courbes $I(V)$ est résumée dans la Figure (3.2).

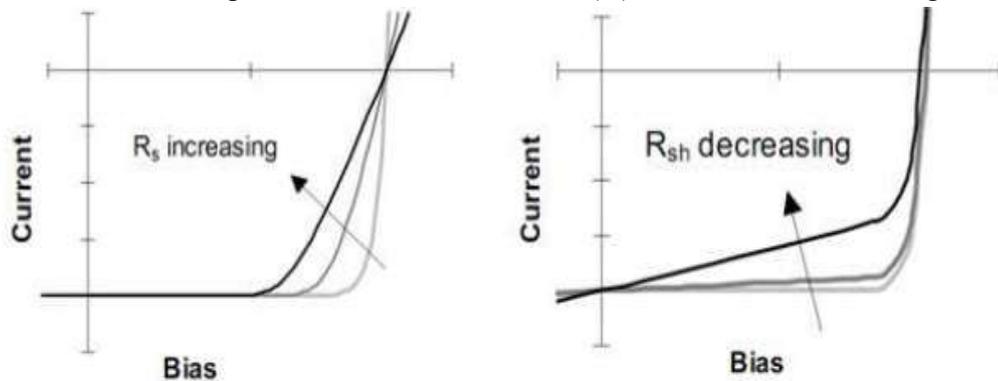


Figure 3.2 : Influence théorique de la résistance série (R_s) et la résistance parallèle (R_{sh}) d'une cellule photovoltaïque sur sa courbe $I(V)$ [10].

Plus la pente de la courbe intensité tension à $V = V_{co}$ est grande, plus la résistance série est faible et plus la valeur du facteur de forme sera élevée, entraînant une amélioration des performances globales du dispositif. A contrario, plus la pente de la courbe intensité tension à $I = I_{cc}$ est grande, plus la résistance parallèle est faible et plus la valeur du facteur de forme sera basse, entraînant une détérioration des performances globales du dispositif [10].

❖ Modèle à deux diodes

La cellule photovoltaïque est représentée par le circuit électrique de la figure (3.3), qui se compose d'une source de courant modélisant le flux lumineux, deux diodes pour la polarisation de la cellule, une résistance shunt et une résistance série.

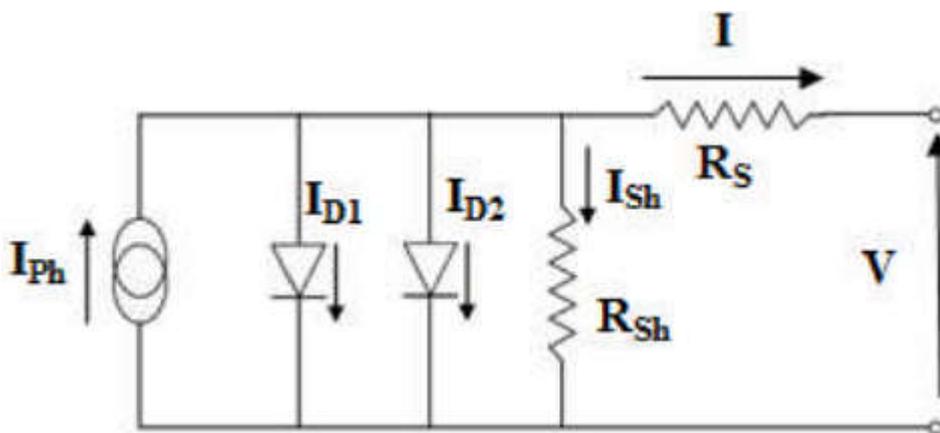


Figure 3.3 : Schéma équivalent à deux diodes [21].

Le courant généré par la cellule PV est donné par la loi :

$$I = I_{ph} - (I_{D1} + I_{D2}) - I_{Sh} \quad (3.1)$$

Le courant de la diode est donné par :

$$I_{D1} = I_{S1} \left(\exp \left(\frac{q(V+R_S I)}{AKT} \right) - 1 \right) \quad (3.2)$$

$$I_{D2} = I_{S2} \left(\exp \left(\frac{q(V+R_S I)}{AKT} \right) - 1 \right) \quad (3.3)$$

Avec :

I_{S1} , I_{S2} courant de saturation des diodes.

$$I = I_{Ph} - I_{S1} \left(\exp \left(\frac{q(V+R_S I)}{AKT} \right) - 1 \right) - I_{S2} \left(\exp \left(\frac{q(V+R_S I)}{AKT} \right) - 1 \right) - \left(\frac{V+R_S I}{R_{Sh}} \right) \quad (3.4)$$

I : intensité de courant fournie par la cellule [A].

q : Charge de l'électron [$1,6 \cdot 10^{-19}$ C].

K : Constant de Boltzmann [$1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K].

T : Température effective de la cellule [K].

I_{Ph} : Photo courant créé par la cellule (proportionnel au rayonnement incident).

I_D : Courant de la diode.

V : Tension aux bornes de la cellule [V].

A : Facteur d'idéalité de la jonction pn compris entre 1 et 2 [21].

3. Caractéristiques $I=f(V)$

La relation liant le courant et la tension est obtenue à partir de la caractérisation d'une diode idéale. Ce qui s'accorde beaucoup plus avec l'homo-jonction.

A l'obscurité :

$$I_{obsc} = I_s \left(e^{\frac{V}{V_t}} - 1 \right) \quad (3.5)$$

Où :

I_{obsc} : Courant d'obscurité (A)

I_s : Courant de saturation de la diode (A)

V : tension à travers la diode (V)

$V_t = kT/q$ (V)

Chapitre 3 : Modélisation et simulation des cellules solaires

K : constante de Boltzmann (J/K)

T : température (K)

Ce qui permet de déduire le courant délivré sur une charge par la cellule PV éclairée

$$I = I_{ph} - I_{obsc} \quad (3.6)$$

Où :

I_{ph} : Courant photo généré, proportionnel à l'intensité lumineuse I_{ph0} dans les STC.

$$I_{ph} = I_{ph0} * \frac{I_r}{I_{r0}} \quad (3.7)$$

Avec I_r l'intensité lumineuse éclairant la cellule et I_{r0} celle dans les STC.

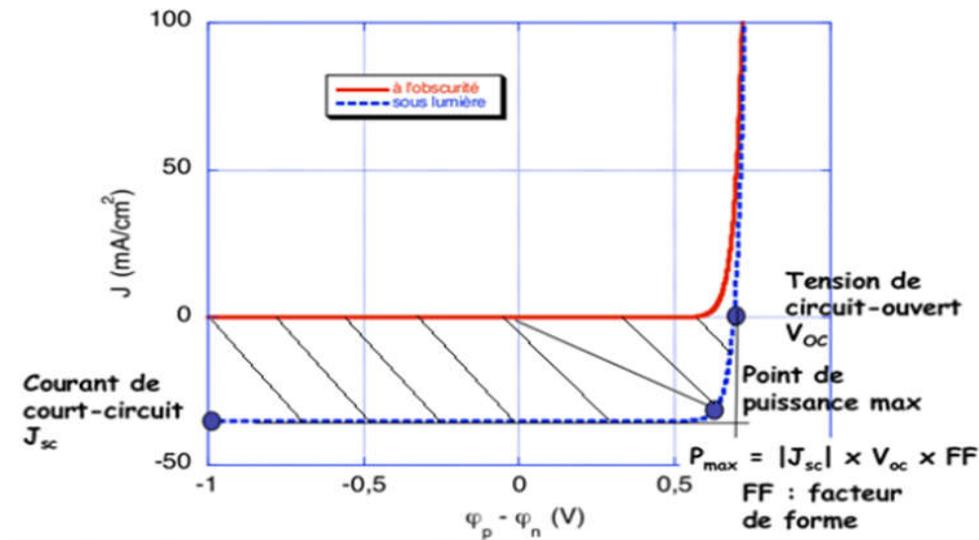


Figure 3.4 : Caractéristiques densité de courant en fonction de la tension d'une cellule PV dans l'obscurité et sous illumination [17].

A partir de la figure 3.4, il est clair que la lumière déplace la courbe, du rouge au bleu, ce qui est caractéristique d'un générateur de puissance. Le courant est décalé d'une valeur de I_{sc} ; le courant de court-circuit c'est-à-dire le courant délivré par la cellule lorsqu'elle est court-circuitée.

Un autre paramètre important est le V_{oc} qui représente la tension de circuit ouvert au moment où la cellule ne délivre aucun courant.

La partie hachurée est l'intégrale de la courbe sans lumière ou autrement la puissance délivrée.

Une puissance maximale peut aussi être définie :

$$P_{max} = V_{max} * I_{max} \quad (3.8)$$

Remarque : lorsque $V=0, I_{sc} = I_{ph}$

Lorsque $I = 0, V_{co} = V$. En prenant I_{ph} très grand par rapport à I_s , cela entraîne :

$$V_{co} = V_t * \ln \frac{I_{ph}}{I_s} \quad (3.9)$$

Où
$$V_t = \frac{KT}{q}$$

Donc le V_{co} croit avec le logarithme de I_{ph} et linéairement avec la température T [17].

4. Les paramètres photovoltaïques

Les paramètres caractérisant les cellules PV peuvent être déterminés à partir des courbes courant-tension, ou de l'équation caractéristique. Les plus usuels sont :

4.1. Tension du circuit ouvert V_{CO}

C'est la tension V_{CO} pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul (C'est la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque).

4.2. La densité de courant de court-circuit J_{CC}

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle par unité de surface, c'est donc la densité de courant maximale que peut délivrer la cellule. Celui-ci est fonction de la température, de la longueur d'onde du rayonnement, de la surface active de la cellule, de la mobilité des porteurs et est linéairement dépendant de l'intensité lumineuse reçue.

4.3. Facteur de Forme

Le facteur de forme est défini ainsi par :

$$FF = \frac{I_{max} * V_{max}}{I_{cc} * V_{co}} \quad (3.10)$$

C'est un paramètre essentiel car il détermine la qualité de la cellule. Il indique la qualité de la jonction dans la cellule, ainsi que l'influence ou l'apport des résistances série R_s et parallèle R_{sh} qui interviennent dans la cellule.

Plus le FF tend vers 1, plus la qualité de la cellule est meilleure.

4.4. Le rendement

Le rendement de conversion est défini par le rapport entre l'énergie maximale délivrée par la cellule P_{max} et l'énergie lumineuse incidente P_{in} :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{P_{max}}{E \times S} = \frac{I_{cc} V_{co}}{P_{in}} \quad (3.11)$$

Chapitre 3 : Modélisation et simulation des cellules solaires

Où E (W/m^2) l'énergie incidente et S (m^2) la surface sur laquelle tombe le rayonnement.

5. Les équations à base de semi conducteurs

Les équations principales dans un semi-conducteur sont les équations de continuité, l'équation de Poisson et les équations de transports, nous citons qui sont le de nos travaille.

5.1. Equation de Poisson

L'équation de Poisson s'écrit :

$$\text{div}(\vec{E}) = \frac{\rho(x)}{\epsilon} \quad (3.12)$$

Où \vec{E} est le champ électrique

Avec $\rho(x)$ la densité de charge électrique donnée par :

$$\rho = e[N_d^+ + p - N_a^- - n] \quad (3.13)$$

Où ϵ représente la constante diélectrique, n et p les concentrations des porteurs libres et N_{D^+} et N_{A^-} sont les densités des accepteurs et donneurs ionisés.

Cette dernière équation détermine les propriétés de la zone de charge d'espace pour une jonction pn, en particulier son épaisseur totale.

5.2. Equations de continuité

Les équations de continuité des électrons et des trous à une dimension, en régime stationnaire, sont données respectivement par :

$$G(x) - R(p(x), n(x)) - \frac{1}{q} \frac{\partial j_n(x)}{\partial x} = 0 \quad (3.14)$$

$$G(x) - R(p(x), n(x)) - \frac{1}{q} \frac{\partial j_p(x)}{\partial x} = 0 \quad (3.15)$$

Où j_n et j_p sont les densités de courants des électrons et des trous, R est le taux de recombinaison et G le taux de génération électron-trou.

5.3. Phénomènes de transport dans les semi-conducteurs

Dans les semi-conducteurs, le courant résulte du déplacement des porteurs libres (électrons ou trous) sous l'action d'une force extérieure. L'origine de cette force peut être soit une excitation par champ électrique soit par un gradient de concentration dans le semiconducteur. Dans le premier cas, le courant est dit de conduction ou d'entraînement, et dans le second cas, le courant est dit de diffusion.

❖ Le courant de conduction

Le courant de conduction apparaît lorsqu'on applique au semi-conducteur un champ électrique (ou magnétique), on a tendance à déplacer les porteurs de charge, électrons et trous.

La densité de courant de conduction totale J_{cond} est donnée par :

$$J_{cond} = e(n\mu_n + p\mu_p)E = \sigma E \quad (3.16)$$

La densité de courant de conduction totale J_{cond} est proportionnelle au champ électrique et à la conductivité du cristal.

μ_n, μ_p : La mobilité des trous et les électrons respectivement.

σ : La conductivité électrique.

❖ Le courant de diffusion

Le courant de diffusion apparaît lorsque la densité des porteurs libres est modifiée localement à l'intérieur du semi-conducteur, soit par des variations de température ou de lumière, soit généralement par une technologie appropriée comme un dopage non uniforme. Ce gradient de concentration va provoquer un déplacement des porteurs de la région la plus peuplée à la région la moins peuplée, ce phénomène est appelé processus de diffusion.

La densité de courant de diffusion J_{diff} est donnée par le flux multiplié par la valeur de la charge.

La densité de courant de diffusion des trous s'écrit sous la forme :

$$J_{difp}(x) = eF_p(x) \quad (3.17)$$

$$\overrightarrow{J_{difp}}(x) = -eD_p \overrightarrow{gradp} \quad (3.18)$$

La densité de courant de diffusion des électrons:

$$J_{difn}(x) = -eF_n(x) \quad (3.19)$$

$$\overrightarrow{J_{difn}}(x) = eD_n \overrightarrow{gradn} \quad (3.20)$$

Dans le cas général, le courant résulte des deux phénomènes (présence d'un champ électrique et d'un gradient de concentration) en régime stationnaire est la somme du courant de conduction et du courant de diffusion $J = J_p + J_n$.

A 3 dimensions :

$$\overrightarrow{J_n} = en\mu_n \overrightarrow{E} + eD_n \overrightarrow{gradn} \quad (3.21)$$

$$\vec{J}_p = en\mu_p\vec{E} - eD_p\overrightarrow{\text{grad}}p \quad (3.22)$$

Ou

J_n, J_p : Le courant total des trous et des électrons respectivement.

D_n et D_p sont les coefficients de diffusion des trous et des électrons respectivement.

6. Facteurs influençant le fonctionnement d'une cellule PV

La caractéristique courant-tension d'un panneau photovoltaïque varie selon les conditions climatiques et dépend principalement de l'atmosphère et les lieux des installations :

❖ L'ensoleillement (Irradiation)

Ce facteur est variable le long de la journée et on ne peut pas agir pour l'augmenter, la meilleure solution est de choisir un endroit bien ensoleillé pour exposer les modules PV. La Figure (3.5) montre des courbes pour différents niveaux de rayonnement pour un panneau photovoltaïque choisi :

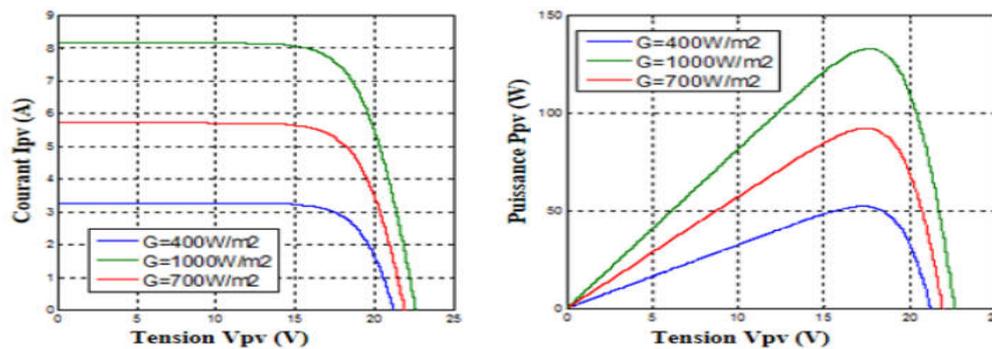


Figure 3.5 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ [22].

On note que la tension en circuit ouvert ne varie pas fortement avec la variation de l'éclairement. Même à faible éclairement, on obtient presque la même valeur. Par contre, le courant de court-circuit varie proportionnellement avec l'intensité du rayonnement.

❖ La température

Contrairement à l'ensoleillement, la température a une influence notable sur la tension à vide, alors que le courant de court-circuit varie peu avec ce paramètre (une légère augmentation) figure (3.6).

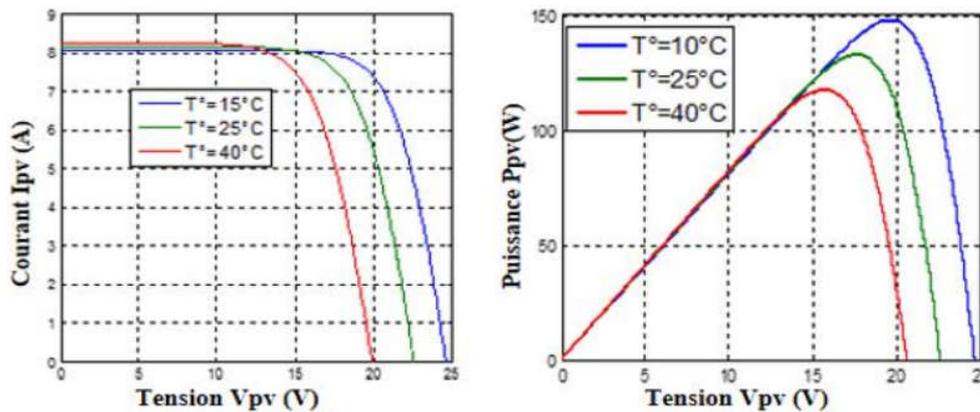


Figure 3.6 : Influence de la température sur la caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ [22].

L'augmentation de la température influe directement sur le comportement de la photopile, elle engendre la diminution de la tension de l'ordre de 2 mV par degré, cette augmentation de la température se traduit aussi par une diminution de la puissance maximale disponible, donc, sur le rendement de la cellule [22].

7. Description du modèle de simulation et de résolution

Pour analyser les propriétés optoélectroniques d'un dispositif, ses propriétés électriques et optiques doivent être étudiées. Le modèle de simulation utilisé est constitué d'un modèle électrique et d'un modèle optique.

La partie électrique du modèle, résout simultanément l'équation de Poisson (3.12) et les équations de continuité des trous (3.15) et des électrons (3.14) qui sont 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 à tout point dans le dispositif.

7.1. Logiciels de simulation

La simulation des cellules en couches minces est devenue de plus en plus utilisée ces dernières années, à cause des coûts élevés de l'expérimentation (techniques de fabrication des cellules) ainsi, plusieurs logiciels de calcul et de simulation ont été développés par la communauté des chercheurs dans ce domaine. On peut citer le logiciel AFORS-HET, AMPS-1D, ASDMP, PC-1D et SCAPS-1D etc.

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

7.2. Présentation du logiciel SCAPS

SCAPS-1D acronyme de « Solar Cell Capacitance Simulator one Dimension » est un programme développé à l'université de Gent en Belgique avec Windows/CVI National Instruments par Marc Burgelman et al. Ce programme est conçu spécialement pour la

Chapitre 3 : Modélisation et simulation des cellules solaires

simulation des dispositifs photoniques tels que les cellules au CdTe et CIGS. Parmi les principaux avantages de SCAPS-1D :

- Les fichiers d'entrée sont accessibles à l'utilisateur en format texte tel que les données spectrales et les paramètres décrivant le dispositif.
- Possibilité d'introduire des interfaces et prise en compte du phénomène de recombinaison en celle-ci.
- Introduction de résistances en série, et obtention des caractéristiques capacité-tension et capacité – fréquence.
- C'est un logiciel qui présente une grande vitesse d'exécution.

8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le modèle mathématique d'une cellule photovoltaïque et les principales équations dans un semi-conducteur qui permettent de calculer le rendement d'une cellule photovoltaïque, donc il est concédé le cœur même de notre recherche.

Puis 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 SCAPS que nous utiliserons pour effectuer la simulation d'une cellule HIT de type n, afin d'étudier l'influence de l'épaisseur, le gap et le dopage de la couche BSF sur son rendement. Les résultats seront donnés et interprétés dans le chapitre suivant.

Chapitre 4 : **Résultats de simulation et discussion**

1. Introduction

Ce dernier chapitre sera le cœur de notre recherche. Dans le but d'améliorer la qualité d'une cellule solaire à hétérojonction HIT de type n, nous allons nous intéresser à l'optimisation de la couche BSF (Back Surface Field) par simulation de certains paramètres de la couche arrière afin d'obtenir un rendement maximal.

Dans un premier temps, nous présenterons la structure de la cellule que nous avons étudiée, ainsi que les différents paramètres utilisés dans la simulation. Nous étudierons ensuite l'effet de la variation du gap, l'épaisseur et la densité de dopage de la couche BSF sur les différents paramètres photovoltaïques (V_{co} , J_{cc} , FF et η). Enfin, nous interpréterons les résultats obtenus et expliquerons l'influence des différents paramètres sur la performance de la cellule étudiée.

2. Présentation de la cellule HIT et de ses paramètres caractéristiques

La cellule solaire que nous avons simulée, représentée dans la figure 4.1., est une cellule HIT de type n, constituée de 5 couches successives : un substrat en silicium cristallin dopé n sur lequel est déposé en face avant une couche mince de silicium amorphe hydrogéné intrinsèque permettant de réduire les défauts d'interface avec la couche suivante constituant l'émetteur. Une couche d'Oxyde Transparent Conducteur est déposée sur l'émetteur formant la couche fenêtre. Sur la face arrière du substrat est déposée la couche BSF que nous allons optimiser.

Les paramètres que nous avons utilisés pour simuler notre structure sont résumés dans le tableau 4.1.

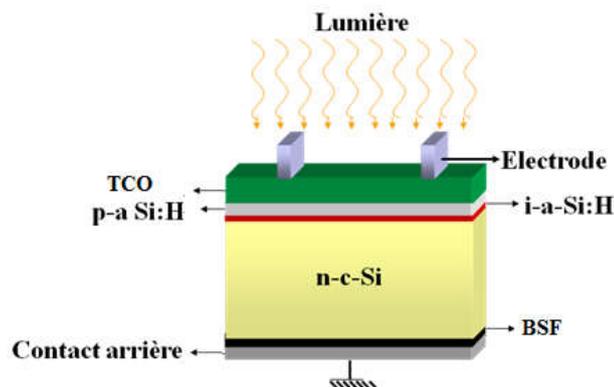


Figure 4.1: L'hétérostructure TCO/p-a-Si:H/i-a-Si:H/n-c-Si/BSF utilisée dans nos simulations.

Notre structure est composée de haut en bas de :

Chapitre 4 : Résultats de simulation et discussion

- L'Oxyde Transparent Conducteur qui est une couche anti-réfléchissante permettant d'établir le contact entre le silicium amorphe dopé et les contacts métalliques. Ces derniers sont placés sur les deux faces de la cellule constituant les électrodes.

- L'émetteur à base de silicium amorphe dopé p (p-a-si : H) sur 50Å d'épaisseur.

- La couche tampon composée de silicium amorphe intrinsèque sur une épaisseur de 50 Å. Cette couche intrinsèque représente la spécificité des cellules HIT et permet de passiver les défauts de surface existant à l'interface p-a-Si:H/n-c-Si.

- La couche active constituée de silicium cristallin dopé n (n-c-Si) sur une épaisseur de 300 µm.

- La dernière couche représentant la face arrière de la cellule à base de silicium fortement dopé n⁺⁺. Cette couche constitue le BSF qui crée une barrière de potentiel sur la face arrière de la cellule et qui repousse les porteurs minoritaires vers la base permettant ainsi une meilleure collecte des porteurs photogénérés.

Notre étude s'est focalisée sur cette dernière couche. Nous avons étudié l'effet de paramètres physiques et géométriques (Epaisseur, gap et le dopage) de cette couche sur les paramètres PV de la cellule étudiée.

Tableau 4.1: paramètres caractéristiques de la cellule HIT étudiée.

	p-a Si:H	i-a-Si:H	n-c-Si	BSF	Référence
D	50 Å	50 Å	300µm	Variable	[23]
E _g (eV)	1,72	1,72	1,12	1,12/ 1.7-2	[23]
N _D (cm ⁻³)	0	0	10 ¹⁴	10 ¹⁵ -10 ²⁰	[23]
N _A (cm ⁻³)	10 ¹⁹	0	0	0	[23]
χ (eV)	3,9	3,9	4,05	4,05/3.9	[23]
Nt(cm ⁻³)	10 ²¹	10 ¹³	10 ¹¹	10 ¹¹ /10 ²¹	[23]
μ _n (cm ² /Vs)	20	30	1450	1450/20	[23]
μ _p (cm ² /Vs)	5	10	450	450/5	[23]
N _C (cm ⁻³)	10 ²⁰	10 ²⁰	10 ¹⁹	10 ¹⁹ /10 ²⁰	[23]
N _V (cm ⁻³)	10 ²⁰	10 ²⁰	10 ¹⁹	10 ¹⁹ /10 ²⁰	[23]
ε	11.9	11.9	4.05	4.05/11.9	[23]

Chapitre 4 : Résultats de simulation et discussion

V_{thn} (cm/s)	10^7	10^7	10^7	10^7	[23]
V_{thp} (cm/s)	10^7	10^7	10^7	10^7	[23]

Avec :

- 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_t : Densité de défauts donneurs et accepteurs.
- ϵ : Constante diélectrique.
- N_C : Densité d'états effective des électrons dans la bande de conduction.
- N_V : Densité d'états effective des trous dans la bande de valence.
- μ_n : Mobilité des électrons.
- μ_p : Mobilité des Trous.
- V_{thn} : Vitesse thermique des électrons.
- V_{thp} : Vitesse thermique des trous.

3. Optimisation de la couche BSF

Nous avons effectué une série de simulations sur notre cellule, sous conditions STC (25°C, 1000W/m², AM1.5G), en utilisant le logiciel SCAPS.

Afin d'optimiser la cellule utilisée, nous avons d'abord travaillé avec les paramètres donnés dans le tableau 4.1 afin d'obtenir les caractéristiques de la cellule (densité de courant de court-circuit J_{cc} , tension de circuit ouvert V_{co} , facteur de forme FF et le rendement de conversion η). Nous avons ensuite étudié l'effet de 3 paramètres de la couche BSF : le gap, l'épaisseur et le dopage.

La simulation s'est faite en variant un seul paramètre et en gardant les autres paramètres constants, puis en fixant le paramètre étudié à sa valeur optimale pour les simulations suivantes.

3.1. Effet du gap de la couche BSF sur la performance de la cellule

Nous allons d'abord choisir le matériau adéquat pour l'élaboration du BSF ; silicium cristallin ou silicium amorphe hydrogéné ? Nous fixons l'épaisseur de la couche BSF à 40 nm et son dopage à 10^{15} cm⁻³ et nous modifions le gap.

Chapitre 4 : Résultats de simulation et discussion

Le gap $E_g=1.12$ eV correspond au silicium cristallin, et le gap variant de 1.7eV à 2 eV correspond au silicium amorphe hydrogéné. Nous résumons les résultats obtenus dans le tableau 4.2.

Tableau 4.2 : Effet du gap du BSF sur les paramètres PV de la cellule étudiée.

Le gap (eV)	V_{co} (V)	J_{cc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
1.12	0.58	38.07	75.78	16.87
1.7	0.67	39.17	73.27	19.27
1.8	0.67	39.17	73.26	19.27
1.9	0.67	39.17	73.26	19.27
2	0.67	39.17	73.26	19.26

D'après le tableau 4.2., le silicium amorphe hydrogéné donne de meilleurs résultats par rapport au silicium cristallin avec un rendement de 19.27% pour le a-Si : H au lieu de 16.87% pour le c-Si.

Nous remarquons également que la variation du gap entre 1.7 eV et 2 eV n'affecte pas la performance de la cellule, car la couche BSF constitue la face arrière de la cellule et l'absorption des photons ne joue pas un rôle important à ce niveau.

Nous avons tracé, sur la figure 4.2, la réponse spectrale pour les deux valeurs extrêmes du gap (1.7 eV et 2 eV) afin de vérifier que cette variation n'affecte pas le rendement quantique externe de la cellule.

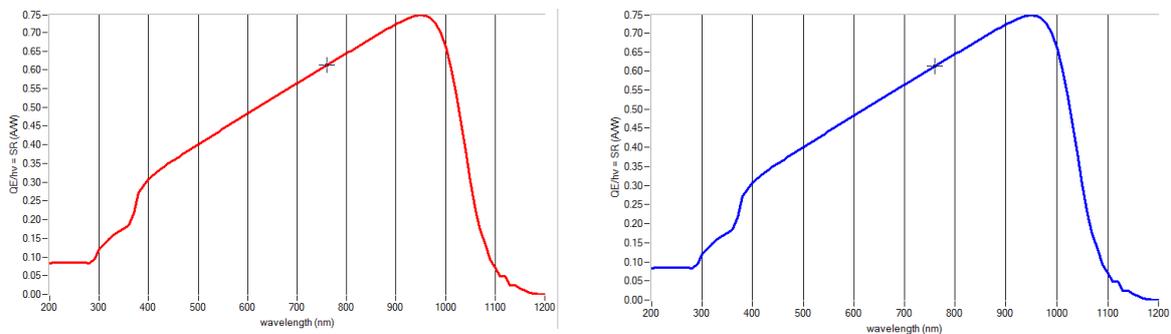


Figure 4.2: Réponse spectrale de la cellule étudiée pour deux valeurs de gap différentes (rouge pour $E_g=1.7$ eV et le bleu pour $E_g=2$ eV).

Nous constatons que les deux réponses spectrales sont identiques, ce qui confirme l'interprétation donnée précédemment.

Nous avons donc choisi de fixer la valeur du gap du BSF à 1.7 eV pour la suite de nos simulations, car c'est la valeur habituellement utilisée pour le silicium amorphe hydrogéné.

3.2. Effet de l'épaisseur de la couche BSF sur la performance de la cellule

Nous allons maintenant nous intéresser à l'effet de l'épaisseur de la couche BSF sur l'efficacité de la cellule. Etant donné que cette couche va être déposée sur le substrat de silicium cristallin, généralement en utilisant le procédé de dépôt PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition), l'épaisseur du BSF peut varier de quelques nm à quelques μm .

Nous avons donc fait varier l'épaisseur du BSF de 5 nm à $1\mu\text{m}$ tout en fixant la densité de dopage des donneurs $N_D=10^{15}\text{cm}^{-3}$ et l'énergie du gap $E_g=1.7\text{eV}$.

Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau 4.3.

Tableau 4.3: Variation des paramètres J_{cc} , V_{co} , FF , η en fonction de l'épaisseur du BSF (n^{++} -a-Si : H) de gap 1.7 eV.

L'épaisseur (nm)	V_{co} (V)	J_{cc} (mA/cm ²)	FF(%)	η (%)
5	0.67	39.17	73.27	19.27
10	0.67	39.17	73.27	19.27
15	0.67	39.17	73.27	19.27
20	0.67	39.17	73.27	19.27
40	0.67	39.17	73.26	19.26
60	0.67	39.17	73.25	19.26
80	0.67	39.17	73.23	19.26
100	0.67	39.17	73.22	19.25
200	0.67	39.17	73.15	19.23
400	0.67	39.17	73.05	19.21
600	0.67	39.17	73.01	19.20
800	0.67	39.17	72.98	19.19
1000	0.67	39.17	72.95	19.18

Nous avons tracé la variation des paramètres photovoltaïques en fonction de l'épaisseur de la couche BSF et nous avons obtenu les courbes de la figure 4.3.

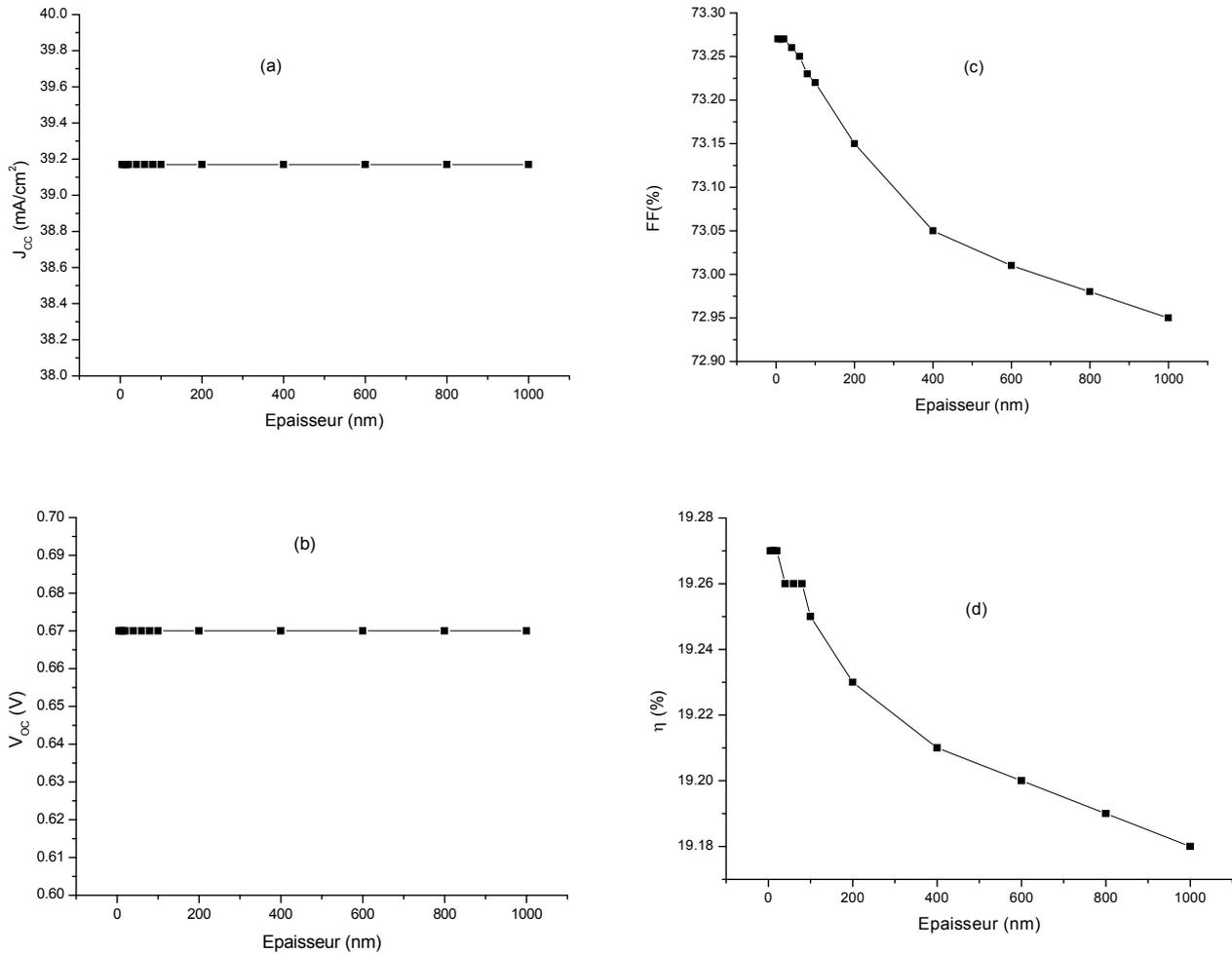


Figure 4.3: Influence de l'épaisseur de la couche BSF sur les paramètres PV de la cellule étudiée : (a) J_{cc} , (b) V_{co} , (c) FF, (d) η .

D'après les graphes obtenus sur la figure 4.3., nous ne remarquons aucun changement des valeurs des paramètres photovoltaïques J_{CC} et V_{CO} ; La densité de courant de court-circuit est égale à 39.2 mA/cm³, et la tension en circuit ouvert est stabilisée à 0.67V quelque soit l'épaisseur la couche du BSF.

Cela peut être expliqué par le fait que c'est le champ électrique au niveau des jonctions p-a-Si:H/n-c-Si et n-c-Si/n⁺⁺-a-Si:H qui influence la collecte des porteurs photogénérés, et cela se fait au niveau de la jonction métallurgique (x=0) et l'épaisseur des couches constituant la jonction n'a pas une influence sur le champ électrique.

D'un autre côté, nous constatons que le Facteur de Forme diminue avec l'augmentation de l'épaisseur, en effet, il passe de 73.27% pour une épaisseur de 5 nm à 72.95% pour une épaisseur de 1 μ m. Cela peut être expliqué par la variation de la résistance série du dispositif, car plus l'épaisseur du matériau augmente (a-Si-H) plus la résistance série augmente, étant

Chapitre 4 : Résultats de simulation et discussion

donné qu'elle est liée à la résistivité du matériau, entraînant une détérioration des performances globales du dispositif.

D'un autre côté, comme le BSF est élaboré à partir de silicium amorphe hydrogéné qui contient beaucoup de défauts, lorsque l'épaisseur de la couche BSF augmente la densité de défauts est plus importante, induisant ainsi un fort taux de recombinaisons qui dégrade l'efficacité de la cellule. Nous avons à cet effet tracé le taux de recombinaisons au niveau de la face arrière de la cellule afin de vérifier si effectivement le taux de recombinaisons augmente avec l'épaisseur de la couche BSF. Nous avons obtenu les graphes de la figure 4.4.

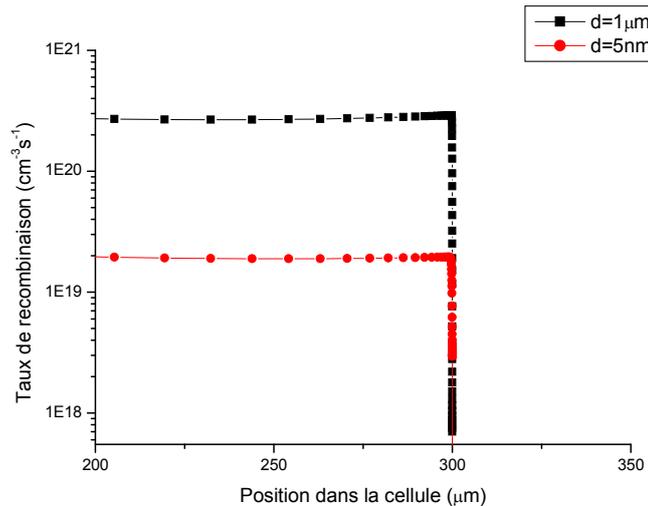


Figure 4.4: Taux de recombinaison à l'interface $n\text{-c-Si}/n^{++}\text{a-Si:H}$ pour une épaisseur $d=5\text{nm}$ et $D=1\mu\text{m}$.

A partir de la figure ci-dessous, nous constatons que le taux de recombinaison passe de $2.10^{19}\text{cm}^{-3}\text{s}^{-1}$ pour une épaisseur de 5 nm à $3.10^{20}\text{cm}^{-3}\text{s}^{-1}$ pour une épaisseur de 1 μm.

Comme nous l'avons mentionné au chapitre 3 (Eq. 3.11) le rendement en puissance dépend de la puissance incidente, du J_{CC} , V_{CO} et du FF. Par conséquent, le rendement de puissance suit la courbe du FF et diminue de 19.27% à 19.18% lorsque l'épaisseur de la couche BSF augmente de 5 nm à 1 μm.

Nous avons choisi de prendre la valeur optimale de la couche BSF égale à 10 nm.

3.3. Effet du dopage de la couche BSF sur la performance de la cellule

Nous allons dans ce qui suit étudier l'influence de dopage de la couche BSF sur les paramètres PV de la cellule.

Pour une épaisseur $D=10\text{nm}$ avec le dopage de la couche active $N_D=10^{14}\text{cm}^{-3}$, nous obtenons les résultats résumés dans le tableau 4.4.

Chapitre 4 : Résultats de simulation et discussion

Tableau 4.4 : Effet du dopage du BSF sur les paramètres PV de la cellule étudiée.

Le dopage (cm^{-3})	V_{co} (V)	J_{cc} (mA/cm^2)	FF (%)	η (%)
10^{15}	0.67	39.17	73.27	19.27
10^{16}	0.67	39.17	73.28	19.27
10^{17}	0.67	39.17	73.28	19.27
10^{18}	0.67	39.17	73.28	19.27
10^{19}	0.67	39.17	73.28	19.27
10^{20}	0.67	39.17	73.28	19.27
10^{21}	0.67	39.17	73.28	19.27

Nous avons tracé la variation des paramètres photovoltaïques en fonction du dopage de la couche BSF et nous avons obtenus les courbes de la figure 4.5. Nous remarquons que le dopage du BSF n'a pas d'effet sur la performance de la cellule étudiée. Les valeurs des paramètres PV restent constantes et le rendement en puissance est maintenu à 19.27%.

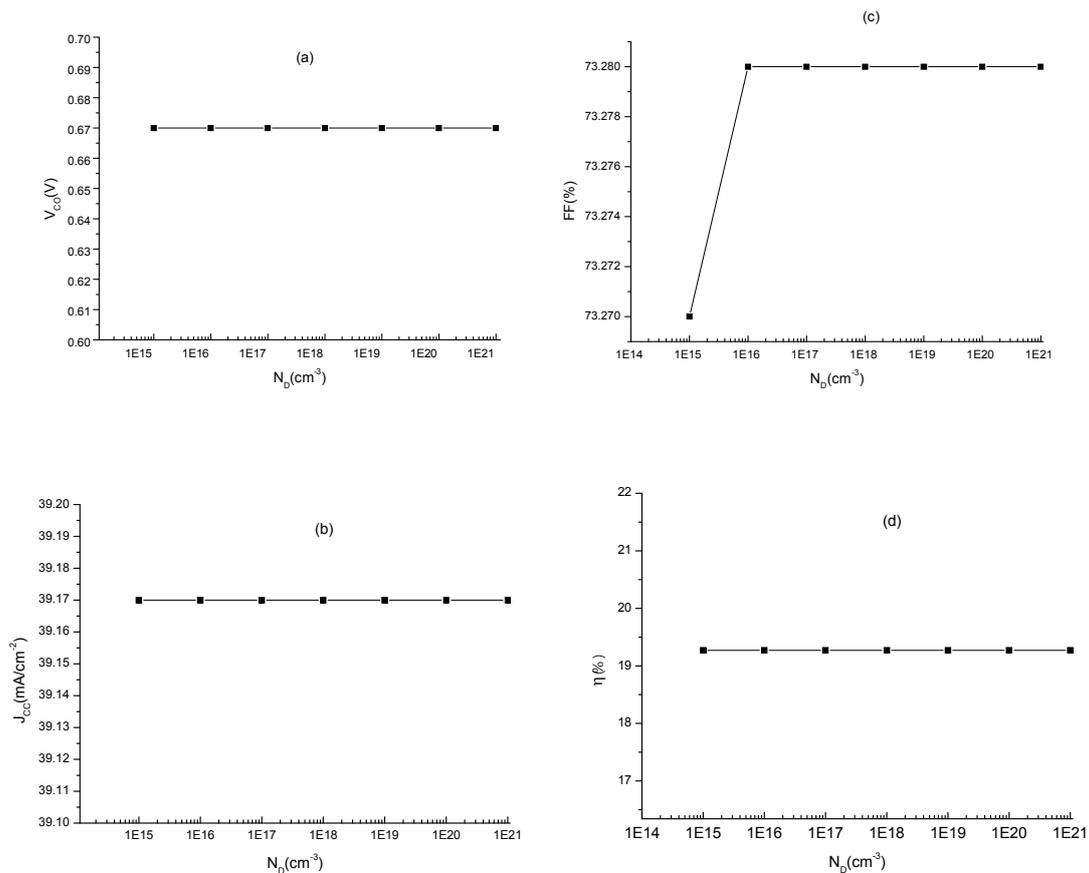


Figure 4.5 : Influence du dopage de la couche BSF sur les paramètres PV de la cellule étudiée (a) J_{cc} , (b) V_{co} , (c) FF, (d) η .

Chapitre 4 : Résultats de simulation et discussion

Nous avons cependant remarqué lors de nos simulations que le dopage n'a pas le même effet selon l'épaisseur de la couche BSF.

Pour cette raison, nous avons étudié l'effet du dopage pour différentes épaisseurs de la couche étudiée.

Tableau 4.5 : Effet du dopage du BSF sur les paramètres PV pour une épaisseur de 40nm.

D (nm)	Le dopage (cm⁻³)	V_{co} (V)	J_{cc} (mA/cm²)	FF (%)	η (%)
40	10 ¹⁵	0.67	39.17	73.26	19.26
	10 ¹⁶	0.67	39.17	73.28	19.27
	10 ¹⁷	0.67	39.17	73.28	19.27
	10 ¹⁸	0.67	39.17	73.28	19.27
	10 ¹⁹	0.67	39.17	73.28	19.27
	10 ²⁰	0.67	39.17	73.28	19.27
	10 ²¹	0.67	39.17	73.28	19.27

Tableau 4.6 : Effet du dopage du BSF sur les paramètres PV pour une épaisseur de 80nm.

D (nm)	Le dopage (cm⁻³)	V_{co} (V)	J_{cc} (mA/cm²)	FF (%)	η (%)
80	10 ¹⁵	0.67	39.17	73.23	19.26
	10 ¹⁶	0.67	39.17	73.27	19.27
	10 ¹⁷	0.67	39.17	73.28	19.27
	10 ¹⁸	0.67	39.17	73.28	19.27
	10 ¹⁹	0.67	39.17	73.28	19.27
	10 ²⁰	0.67	39.17	73.28	19.27
	10 ²¹	0.67	39.17	73.28	19.27

Chapitre 4 : Résultats de simulation et discussion

Tableau 4.7: Effet du dopage du BSF sur les paramètres PV pour une épaisseur de 100nm.

D (nm)	Le dopage (cm⁻³)	V_{co} (V)	J_{cc} (mA/cm²)	FF (%)	η (%)
100	10 ¹⁵	0.67	39.17	73.22	19.25
	10 ¹⁶	0.67	39.17	73.27	19.27
	10 ¹⁷	0.67	39.17	73.28	19.27
	10 ¹⁸	0.67	39.17	73.28	19.27
	10 ¹⁹	0.67	39.17	73.28	19.27
	10 ²⁰	0.67	39.17	73.28	19.27
	10 ²¹	0.67	39.17	73.28	19.27

Tableau 4.8 : Effet du dopage du BSF sur les paramètres PV pour une épaisseur de 200nm.

D (nm)	Le dopage (cm⁻³)	V_{co} (V)	J_{cc} (mA/cm²)	FF (%)	η (%)
200	10 ¹⁵	0.67	39.17	73.15	19.23
	10 ¹⁶	0.67	39.17	73.27	19.27
	10 ¹⁷	0.67	39.17	73.28	19.27
	10 ¹⁸	0.67	39.17	73.28	19.27
	10 ¹⁹	0.67	39.17	73.28	19.27
	10 ²⁰	0.67	39.17	73.28	19.27
	10 ²¹	0.67	39.17	73.28	19.27

Chapitre 4 : Résultats de simulation et discussion

Tableau 4.9 : Effet du dopage du BSF sur les paramètres PV pour une épaisseur de $1\ \mu\text{m}$.

D (nm)	Le dopage (cm^{-3})	V_{co} (V)	J_{cc} (mA/cm^2)	FF (%)	η (%)
1000	10^{15}	0.67	39.17	72.95	19.18
	10^{16}	0.67	39.17	73.26	19.26
	10^{17}	0.67	39.17	73.28	19.26
	10^{18}	0.67	39.17	73.28	19.27
	10^{19}	0.67	39.17	73.28	19.27
	10^{20}	0.67	39.17	73.28	19.27
	10^{21}	0.67	39.17	73.28	19.27

Nous pouvons conclure à partir des 5 tableaux précédents que le dopage influence la performance de la cellule lorsque l'épaisseur du BSF augmente.

En effet, la couche BSF crée un champ électrique arrière qui rétrodiffuse les porteurs minoritaires (trous) vers la zone où ils sont majoritaires, c'est-à-dire vers la couche active, donc plus l'épaisseur de la couche BSF augmente plus la densité des trous augmente, ce qui implique que le champ électrique augmenté par le dopage aura plus d'effet sur la performance de la cellule.

3.4. Choix de la structure finale optimisée

Pour améliorer encore plus le rendement de notre cellule, nous avons optimisé les paramètres de toutes les couches constituant la cellule (Emetteur, couche tampon et couche active) et nous les avons résumé les valeurs optimisées dans le tableau 4.10.

Tableau 4.10 : Paramètres optimisés des différentes couches de la cellule.

	L'épaisseur (nm)	Le dopage (cm^{-3})	Le gap (eV)	La densité de défauts (cm^{-3})
a- Si:H(p)	5	10^{19}	1.72	10^{21}
i-a-Si:H	5	0	1.72	10^{13}
n-c-Si	$3 \cdot 10^5$	10^{18}	1.12	10^{11}
BSF	10	10^{21}	1.7	10^{21}

Chapitre 4 : Résultats de simulation et discussion

En utilisant les paramètres donnés dans le tableau 4.10 nous avons obtenu les résultats de simulation suivants :

V_{co} (V)	J_{CC} (mA/cm ²)	FF	η (%)
0.84	38.75	83.51	27.44

Le rendement en puissance de la cellule optimisée atteint la valeur de 27.44%.

3.5. Mise en évidence de l'apport de la couche BSF sur la qualité de la cellule étudiée

Dans le but de mettre en évidence l'importance de la couche BSF sur l'efficacité de la cellule, nous avons simulé la cellule étudiée avec et sans couche BSF. Tous les paramètres photovoltaïques (V_{CO} , J_{CC} , FF et η) diminuent lorsque la couche BSF est supprimée.

	V_{co} (V)	J_{CC} (mA/cm ²)	FF(%)	η (%)
La cellule avec BSF	0.84	38.75	83.51	27.44
La cellule sans BSF	0.80	37.08	85.76	25.57

Nous avons tracé le champ électrique au niveau de la face arrière de la cellule sur la figure 4.6 avec et sans couche BSF.

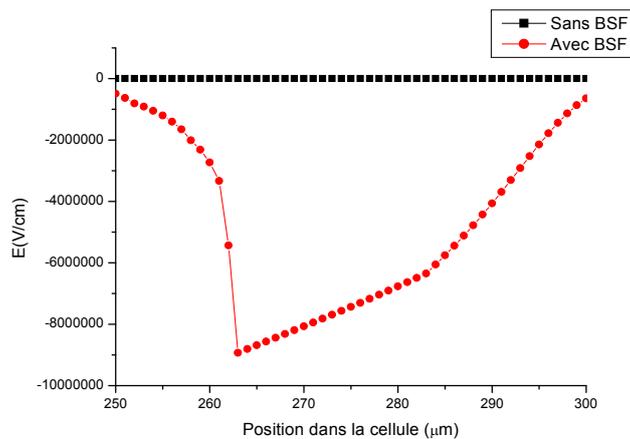


Figure 4.6 : Champ électrique induit au niveau de la face arrière de la cellule avec et sans couche BSF.

Chapitre 4 : Résultats de simulation et discussion

Lorsque la couche BSF est supprimée, la jonction n/n+ au niveau de la face arrière de la cellule n'existe plus, et par conséquent il n'existe aucun champ électrique ($E=0$ V/cm).

En présence de la couche BSF, un champ électrique puissant est observé au niveau de la jonction n-c-Si/BSF, ce champ est négatif car il est dirigé de la couche BSF vers la couche active. Il atteint une valeur maximale de 9.10^6 V/cm. C'est grâce à ce champ électrique que la performance de la cellule est améliorée.

Nous avons également tracé le champ électrique au niveau de la jonction de la face avant de la cellule (p-a-Si : H/n-c-Si) sur la figure 4.7 avec et sans couche BSF.

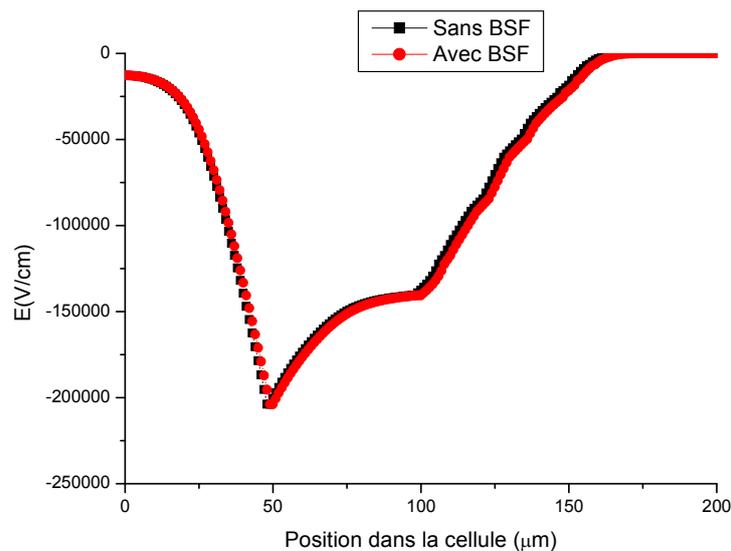


Figure 4.7 : Champ électrique induit au niveau de la face avant de la cellule avec et sans couche BSF.

Nous percevons clairement que le champ électrique est le même avec ou sans couche BSF, car le BSF n'affecte pas la face avant de la cellule. Nous pouvons également remarquer que l'intensité du champ électrique est moindre par rapport à celle relevée sur la figure 4.6. La valeur maximale atteinte est de l'ordre de 2.10^5 V/cm. Le champ électrique est négatif, car dirigé de la couche active n-c-Si vers l'émetteur p-a-Si : H.

4. Conclusion

L'objectif principal de ce chapitre a été d'étudier l'influence des caractéristiques de la couche BSF sur les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire et de comprendre comment améliorer le rendement de la cellule en optimisant cette couche très importante.

Les simulations que nous avons réalisées avec le logiciel SCAPS, nous ont montré que pour obtenir des cellules photovoltaïques de bonne qualité, il est important de :

Chapitre 4 : Résultats de simulation et discussion

Choisir du silicium amorphe hydrogéné pour constituer la couche BSF, au lieu d'utiliser du silicium cristallin. Cela revient à la création d'une discontinuité de bande importante au niveau de la bande de valence lorsqu'on est en présence d'une hétérojonction (n-c-Si/n⁺⁺a-Si :H) au lieu d'une homojonction (n-c-Si/n⁺⁺c-Si). Cette discontinuité de bande va empêcher les trous minoritaires de passer de la couche n à la couche BSF et de se recombinaison.

Diminuer l'épaisseur de la couche BSF afin de diminuer la densité de défauts et de diminuer par conséquent les recombinaisons. Le rendement de puissance diminue de 19.27% à 19.18% lorsque l'épaisseur de la couche BSF augmente de 5nm à 1µm.

Choisir un dopage élevé lorsque l'épaisseur de la couche est réduite. En effet, nous avons remarqué que le dopage du BSF n'a pas d'effet sur la performance de la cellule étudiée lorsque l'épaisseur de la couche est prise égale à 10nm ; Le rendement en puissance est maintenu à 19.27%. Cependant, lorsque l'épaisseur de cette couche augmente, le rendement chute à 19.18% lorsque le dopage est faible.

Nous avons pu atteindre un rendement de 27.44% lorsque nous avons optimisé toutes les couches constituant la cellule, à savoir la couche active, la couche tampon et l'émetteur.

Conclusion générale et perspectives

L'amélioration des performances de la cellule solaire, principalement son rendement de conversion, avec réduction de son coût de production est l'objectif majeur des recherches photovoltaïques.

En raison du coût élevé de l'expérience, l'outil de simulation est devenu primordial pour prédire le développement des recherches notamment en photovoltaïque, gagnant du temps et de l'argent. Dans notre étude nous avons utilisé le logiciel SCAPS pour réaliser nos simulations.

Notre étude se résume en quatre chapitres complémentaires qui nous ont permis d'aller à l'essentiel pour comprendre et expliquer notre thème : Des généralités sur les cellules solaires PV, les cellules solaires à base d'hétérojonction silicium amorphe /silicium cristallin, modélisation et simulation des cellules solaires, et enfin résultats obtenus et leur interprétation.

L'étude menée dans ce mémoire est principalement basée sur l'étude de l'influence du gap, de l'épaisseur et du taux de dopage de la couche BSF sur les paramètres PV d'une cellule HIT de type n.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté des généralités sur les cellules photovoltaïques. Nous avons cité les filières PV et nous avons conclu que le marché du PV est principalement alimenté par les photopiles en silicium cristallin et le silicium monocristallin grâce à ses propriétés structurales et les bons rendements qu'il donne. 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, avec un meilleur coefficient d'absorption, 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.

Dans le deuxième chapitre nous avons présenté l'évolution de la structure des cellules HIT ainsi que l'amélioration des performances des cellules fabriquées par Sanyo. Nous avons vu que le rendement obtenu par une hétérojonction dépend de la combinaison des matériaux qui forment cette structure. Puis nous avons expliqué le rôle de chaque composante de la structure HIT.

Dans le troisième chapitre, nous avons donné les schémas équivalents de la cellule photovoltaïque idéale et réelle, nous avons défini la caractéristique $I = f(V)$ qui est la principale technique utilisée pour caractériser une cellule solaire, ensuite nous avons défini les paramètres photovoltaïques : la tension de circuit ouvert, le courant de court circuit, le facteur de forme et le rendement de conversion. Nous avons par la suite rappelé les phénomènes de transport dans les semi-conducteurs. A la fin de ce chapitre, nous avons donné quelques

Conclusion générale et perspectives

logiciels utilisés pour la simulation et modélisation des cellules solaires, parmi ces logiciels nous avons décrit le logiciel SCAPS que nous avons choisi pour réaliser nos simulations.

Les principaux résultats issus de la simulation ont été présentés dans le quatrième et dernier chapitre de ce mémoire, et ils peuvent être résumés dans les points suivants :

- Tout d'abord, sur la base d'une recherche bibliographique, nous avons proposé une structure de la cellule solaire à étudier constituée d'un dispositif à hétérojonction p-a-Si/ n-c-Si au niveau de la face avant et une jonction n-c-Si/ n⁺⁺Si constituant le BSF au niveau de la face arrière.
- A partir de cette étude, nous avons déduit qu'il était plus intéressant d'élaborer la couche BSF à base de silicium amorphe hydrogéné avec un gap optique $E_g=1.7$ eV.
- Nous nous sommes intéressés à l'étude de l'influence de l'épaisseur et de dopage de la couche BSF et nous avons déduit que de bonnes performances de la cellule pourraient être obtenues pour une couche BSF fortement dopée ($N_D=10^{18}$ cm⁻³) et de faible épaisseur ($D=10$ nm). Après optimisation de la couche BSF, nous avons atteint un rendement de 19.27%
- En optimisant les différents paramètres électriques et optiques des autres couches constituant notre photopile (émetteur, couche tampon, couche active), nous avons pu atteindre un rendement de 27.44% avec les paramètres photovoltaïques suivants :
 - Densité de courant de court-circuit $J_{cc}=38.75$ mA/cm²
 - Tension de circuit ouvert $V_{co}=0.84$ V
 - Facteur de forme $FF=0.83$

Le rendement en puissance que nous avons obtenu dépasse le rendement expérimental de 26.6% atteint par l'entreprise Sanyo. Cela est dû au fait que lors de nos simulations, nous n'avons pas pris en compte toutes les pertes qui peuvent détériorer la performance de la cellule. Comme perspectives, il serait intéressant de modéliser la résistance série et la résistance parallèle, ainsi que les défauts d'interface lors des simulations afin de se rapprocher le plus des résultats expérimentaux.

Grâce à toutes les avancées technologiques, il ne fait aucun doute que des cellules photovoltaïques HIT ont encore beaucoup de potentiel et peuvent être améliorées à l'avenir.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] CH. NGO, "L'énergie Ressources, technologies et environnement", 3^{ème} édition 2008.
- [2] Global Market Outlook for Photovoltaic until 2013, EPIA, April 2009.
- [3] A. RICAUD, "Photopiles Solaires", Presses Polytechniques et Universitaires romandes, Paris, 1996.
- [4] E. BECQUEREL, "Mémoire sur les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires", C.R. Acad. Sci. 9, 561, 1839.
- [5] A. MEKEMECHÉ, "Modélisation à deux dimensions des propriétés physiques de cellules solaires au silicium à base de substrat de type n. Étude de quelques cas particuliers de cellules innovantes", thèse de doctorat, Université Abdelhamid Ben Badis - Mostaganem, 2017.
- [6] S. PETIBON, "Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques", thèse de doctorat, l'Université de Toulouse III - Paul Sabatier, 2009.
- [7] www.energy.gov/eere/solar/downloads/research-cell-efficiency-records.2018. Consultée le 30/01/2019.
- [8] M. RAHMOUNI, "Etude des cellules photovoltaïques HIT en vue d'améliorer leur rendement", thèse de doctorat, Université Mohamed Boudiaf- d'Oran, 2010.
- [9] P. PETIT, "Optimisation du transfert d'énergie dans les systèmes photovoltaïques", thèse de doctorat, Université Paul Verlaine Metz, 2011.
- [10] L. BAILLY, "Cellules photovoltaïques organiques souples à grande surface", thèse de doctorat, Université Bordeaux I, 2010.
- [11] S. MARTINUZZI, "Les cellules solaires au silicium cristallin", Revue Reflets de la Physique, n°5, pp8-12, 2007.
- [12] R. DOUMANE, "Modélisation du vieillissement d'une cellule photovoltaïque au silicium et de ses matériaux d'encapsulation", thèse de doctorat, Université M'hamed Bougara-Boumerdes, 2018.
- [13] W.L. RAHAL, cours " Photopile solaire", UMAB ,2017 .
- [14] H. MATHIEU, H. FANET, "Physiques des semi conducteurs et des composantes électroniques", 6^{ème} édition, 2009.
- [15] N. BENLOUCIF, "Potentialités de films de silicium polycristallin LPCVD destinés à l'étude d'une cellule solaire multicouches", Université des frères MENTOURI- Constantine.

Références Bibliographiques

- [16] Y.VESCHITTI, "Modélisation, caractérisation et réalisation de nouvelles structures photovoltaïques sur substrat de silicium mince", thèse de doctorat, Université Louis Pasteur Strasbourg I, 2005.
- [17] W.R.SAWADOGO, "Etude de l'influence du dopage sur le rendement d'une cellule solaire de type HIT a base de silicium amorphe /silicium cristallin", Université Abdelhamid Ben Badis - Mostaganem, 2017.
- [18] T. SAWADA, N. TEREDA, S. TSUGE, T.BABA,T. TAKAHAMA, K. WAKISAKA, S. TSUDA, S.NAKANO , "Higt-efficiency a-Si :H/c-Si heterojonction solar cell" ,Proceedings of the 1st WCPEC,Hawai,Dec 1994.
- [19] TAKAHAMA, TAGUSHI, MATSUYAMA, TANAKA, TSUDA, NAKANO, KUWANO," High Efficiency Single and poly-crystalline Silicon Solar Sells using ACJ-HIT structure", 11th E.C.photovoltaics solar energy conference, Montreux, October 1992.
- [20] DJ. DIOUF, " Cellules photovoltaïques silicium à hétérojonctions et à structure interdigitée en face arrière", thèse de doctorat, Université de Paris sud 11,2010.
- [21] N.KEHOUL, K.KHENTACHE, "Etude comparatives des modèles d'une cellule photovoltaïque", Université Abderrahman Mira- Bejaia, 2012.
- [22] A .CHARIF, "Commande tolérante aux défauts d'un dc-dc multiniveaux pour les GPV", École polytechnique, Alger ,2017.
- [23] L .JIAN, H.SHIHUA, H.LU, journal of semiconductors, "Simulation of a high-efficiency silicon-based heterojunction solar cell", Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China, vol.36, No.4, April 2015.