



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID - TLEMCCEN

MEMOIRE

Présenté à :

FACULTE DES SCIENCES – DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

Pour l'obtention du diplôme de :

MASTER EN PHYSIQUE

Spécialité : physique énergétique et énergie renouvelable

Par :

M^{elle} Arras Aida

Sur le thème

**Caractérisation des cellules photovoltaïques à
base d'hétérojonction de silicium a-Si/c-Si**

Soutenu publiquement le 25 /06/2018 devant le jury composé de :

Mr. Merad Laarej	Président	Université de Tlemcen
Mr. Bouzaki Mohammed Moustafa	Encadreur	Université de Blida
Mme. Rahmoune khadidja	Examinatrice	Université de Tlemcen
Mr. Benmoussa Nasr-Eddine	Examinateur	Université de Tlemcen

Remerciements

Je remercie tout d'abord Dieu tout puissant de m'avoir donné la force, la patience, la volonté et le courage et la connaissance afin d'accomplir ce modeste travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon encadreur Monsieur **Dr. Bouzaki Mohammed Moustafa** pour son encadrement efficace, ses conseils précieux et sa patience.

J'exprime toute ma gratitude à **Dr. Merad laarej**, Professeur à l'Université de Tlemcen, pour l'honneur qu'il m'a fait de présider le jury.

Nous tenons à remercier les membres du jury **Pr. Rahmoune Khadidja** et **Pr Benmoussa Nasr-Eddine** d'avoir acceptés de juger ce modeste travail.

Je voudrais aussi adresser mes plus vifs remerciements à **Dr. Allam Zehor** qui m'aide beaucoup dans tous mon cursus universitaire.

Je remercie toute personne m'ayant aidé de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à :

Mes parents :

Ma très chère mère **Naim Fatima**, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, je t'aime et je te souhaite une longue vie.

Mon cher père **Abd El Baki** qui n'a pas arrêté de m'encourager et de de sacrifier pour que je puisse franchir tout obstacle durant mes années d'études, que dieu me le garde en très bonne santé.

A mes chers frères **Mohammed, Samir** pour leur appui et leur encouragement.

A mes chères sœurs **Naima, Farida, Ilham** et **Manel** pour leurs encouragements permanents et leur soutien moral.

Les petits, **Ayoub, Zaki, Chahrazed, Ferial**.

A tous mes amis en particulier mes sœurs **Anissa, Zineb, Siham, Samia et Amina**.

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre I : généralité sur les cellules PV.....	5
I. Introduction :.....	5
II. Principe de fonctionnement des cellules photovoltaïque :	5
III. Irradiation solaire	6
IV. Caractérisation électrique des cellules photovoltaïques.....	7
Le courant de court-circuit I_{CC}	7
La tension en circuit ouvert V_{CO}	8
Le facteur de forme FF.....	8
Le rendement.....	9
La réponse spectrale	9
La photoluminescence.....	10
V. Circuits électriques équivalentes d'une cellule photovoltaïque :.....	11
Modèle a une diode	11
Modèle à deux diodes.....	12
VI. Filière photovoltaïque	12
VI.1 Filière de silicium cristallin.....	13
Silicium monocristallin	13
Silicium polycristallin	14
VI.2 Filière des couches minces.....	14
VI.2.1 Cellules à base de silicium couche mince.....	15
<i>Combinaison entre silicium amorphe et silicium cristallin</i>	16
VI.2.2 Cellules à base de Tellurure de cadmium (CdTe).....	17
VI.2.3 Cellules à base cuivre-indium-gallium-sélénium (CIGS).....	18

VI.3	Filière des cellules à très haut rendement (GaAs).....	18
VI.4	Filière des cellules organique.....	19
VI.5	Cellules à colorant.....	19
VII.	Conclusion.....	20
chapitre 2 : cellules PV à hétérojonction de silicium a-Si/c-Si.....		21
I.	Introduction.....	22
II.	Combinaison entre a-Si :H/c-Si.....	22
II.1	Principe.....	22
II.2	Historique.....	22
III.	Technique de dépôt du silicium amorphe hydrogéné a-Si: H:.....	26
IV.	Les composants principaux de la cellule à hétérojonction de silicium.....	27
IV.1	L'oxyde transparent conducteur (TCO).....	27
IV.2	La couche tampon.....	27
IV.3	La couche absorbante.....	28
V.	Diagramme des bandes.....	28
VI.	Propriétés électriques :.....	29
VI.1	Concentration des porteurs de charge libres :.....	29
VI.2	Mobilité des porteurs :.....	30
VI.3	Conductivité et résistivité :.....	30
VI.4	Recombinaisons des porteurs libres.....	30
VII.	Présentation de logiciel de simulation AFORS-HET.....	32
VIII.	Conclusion.....	33
Chapitre 3 : modélisation des performances des cellules PV à hétérojonction de silicium.....		35
I.	Introduction.....	35
II.	Modélisation des performances des cellules PV à base de a-Si/c-Si.....	35
II.1	Caractéristique J-V.....	36
II.2	Influence de l'épaisseur de la couche a-Si.....	36
II.2	Influence de l'épaisseur de la couche c-Si.....	38

III.3 Influence de dopage de la couche a-Si	39
III.4 Influence de dopage de la couche c-Si	40
III. L'effet de l'insertion de la couche BSF	41
III.1 caractérisation J(V)	42
III.2 Influence de dopage de la couche BSF	43
III.3 L'influence de l'énergie de gap de la couche BSF	44
III.3 L'influence de l'énergie de gap de la couche émettrice	45
IV. Les performances de la cellule photovoltaïque HIT	46
IV.1 Caractérisation J-V	47
IX. Conclusion.....	48
Conclusion générale	50
Références	51

Liste des figures

➤ *Introduction générale*

Figure 1 : Évolution des réserves de pétrole par zone géographique en 1994, 2004 et 2014 **2**

➤ *Chapitre I*

Figure I.1 : représentation en coupe d'une cellule photovoltaïque..... **5**

Figure I. 2 : Conditions de mesures de quelques rayonnements AMx..... **7**

Figure I. 3 : répartition spectrale du rayonnement solaire **7**

Figure I. 4 : Caractéristique d'une cellule photovoltaïque. **8**

Figure I.5: Réponse spectrale d'une cellule amorphe et d'une cellule cristalline..... **10**

Figure I.6 : schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à une diode..... **11**

Figure I.7 : Schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à deux diodes..... **12**

Figure I.8 : développement du rendement des cellules photovoltaïques (pour des diffèrent filière) **13**

Figure I.9 : Plaque de silicium monocristallin..... **14**

Figure I.10 : Plaque de silicium multicristallin..... **14**

Figure I.11 : Structure d'une cellule au silicium amorphe **15**

Figure I.12 :Diagramme de bande à l'équilibre d'une hétérojonction (p)a-Si:H/(n)c-Si.... **16**

Figure I. 13 : Schéma d'une cellule solaire à hétérojonction de silicium amorphe/cristallin (SHJ) **17**

Figure I.14: Structure d'une cellule photovoltaïque au CdTe. **17**

Figure I.15 : Composition couche par couche d'une cellule photovoltaïque au CIGS. **15**

➤ *Chapitre II*

Figure II 1: a) Structure schématique des cellules solaires à hétérojonction a-Si: H / c-Si faites par Sanyo b) performance de la cellule solaire en fonction de l'épaisseur de a-Si: H de type p..... **23**

Figure II 2: a) Structure schématique des cellules solaires ACJ-HIT fabriquées par Sanyo b) performance de la cellule solaire en fonction de l'épaisseur a-Si: H intrinsèque..... **24**

Figure II 3: a) Structure schématique et b) caractéristique I-V de la cellule solaire HIT avec surface texturé et BSF.....	25
Figure II 4: a) Structure symétrique schématique de la cellule solaire HIT avec passivation recto-verso. b) sa caractéristique I-V.....	25
Figure II 5: diagramme des bandes type d'une hétérojonction à l'équilibre 1) a-Si:H(p)/ c-Si(n) ; 2) a-Si:H(n)/ c-Si(p).....	28
Figure II 6: Schéma des principaux processus de recombinaisons dans les semi-conducteurs. Les directions des flèches indiquent la transition des électrons.....	31
Figure II 7 : La fenêtre principale AFORS-HET.....	32
 ➤ <i>Chapitre III</i>	
Figure III.1 : structures des cellules PN/NP.....	35
Figure III.2 : caractéristique J-V (PN/NP).....	36
Figure III.3 : l'effet de l'épaisseur de a-Si sur les performances de la cellule – HIT.....	37
Figure III.4 : l'effet de l'épaisseur de c-Si sur les performances de la cellule – HIT.....	38
Figure III.5 : influence de la concentration de dopage de a-Si sur les performances des cellules PV.....	39
Figure III.6 : influence de la concentration de dopage de c-Si sur les performances des cellules PV.....	40
Figure III.7 : caractérisation J-V.....	41
Figure III.8 : structures des cellule solaires avec couche BSF (PN-NP).....	41
Figure III.9 : caractérisation des deux cellules étudiées.....	42
Figure III.10 : effet de concentration de dopage sur les performances des cellules.....	43
Figure III.11 : l'effet de E_g de la couche BSF sur les performances de la cellule PV.....	44
Figure III.12 : l'influence de E_g de la première couche sur les performances.....	45
Figure III.13 : structures des cellule solaires avec couche intrinsèque.....	46
Figure III.14 : caractérisation J-V.....	47

Liste des tableaux

Chapitre III

Tableau III.1 : Différents paramètres pour les deux couches des cellules modélisées.....	35
Tableau III.2 : paramètres des deux cellules utilisé.....	36
Tableau III.3 : tableau des performances obtenus	41
Tableau III.4 : Différents paramètres pour les deux couches des cellules modélisées.....	42
Tableau III.5 : tableau des résultats obtenus	43
Tableau III.6 : différents paramètres de la couche intrinsèque.....	46



Introduction générale

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. En effet, les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter puisque nous sommes de plus en plus nombreux et nous consommons de plus en plus. Lors de la dernière décennie, nous avons vu le prix de certaines énergies, tel le pétrole. Cette augmentation du prix du pétrole peut être expliquée par une demande croissante des pays émergents comme le Brésil, la Chine, l'Inde [1] et ce ne sont plus les pays développés qui en sont les consommateurs principaux.

Nous sommes amenés à nous poser la question de l'utilisation des énergies fossiles et de l'épuisement des réserves d'énergies fossiles (Figure 1). En effet, les réserves d'énergies fossiles ne sont pas inépuisables alors que ces énergies fossiles constituent actuellement les ressources principales de notre économie.

Les 3 combustibles fossiles dont nous parlons le plus sont le charbon, le gaz et le pétrole. En 2015, les réserves de pétrole ont été estimées à 1.698 milliards de barils. Nous disposerions de réserves de pétrole jusqu'en 2050 si nous continuons à en consommer comme nous le faisons aujourd'hui. Chaque année, nous consommons plus de pétrole que nous n'en découvrons ce qui conduit à un épuisement des réserves actuelles. [2]

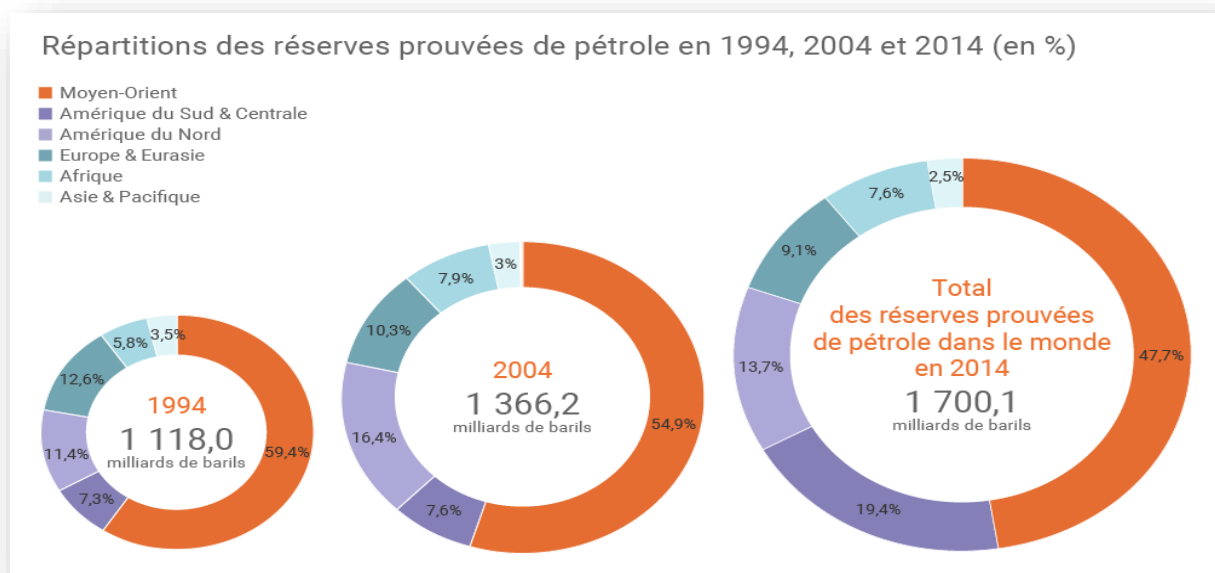


Figure 1 Évolution des réserves de pétrole par zone géographique en 1994, 2004 et 2014 [3]

Donc La diminution des sources énergétiques traditionnelles telle que (pétrole, gaz...) due à une utilisation croissante, entraîne que l'étude des énergies renouvelables met une importance cruciale pour les années à venir [1]. Les énergies renouvelables peuvent être classées en trois grandes familles, l'énergie d'origine mécanique (la houle, éolien), l'énergie sous forme de la chaleur (géothermie, solaire thermique...etc.) ou énergie électrique (panneaux photovoltaïques) en sachant qu'à la racine de toutes ces énergies est l'énergie en provenance du soleil transformée ensuite par l'environnement terrestre. [4]

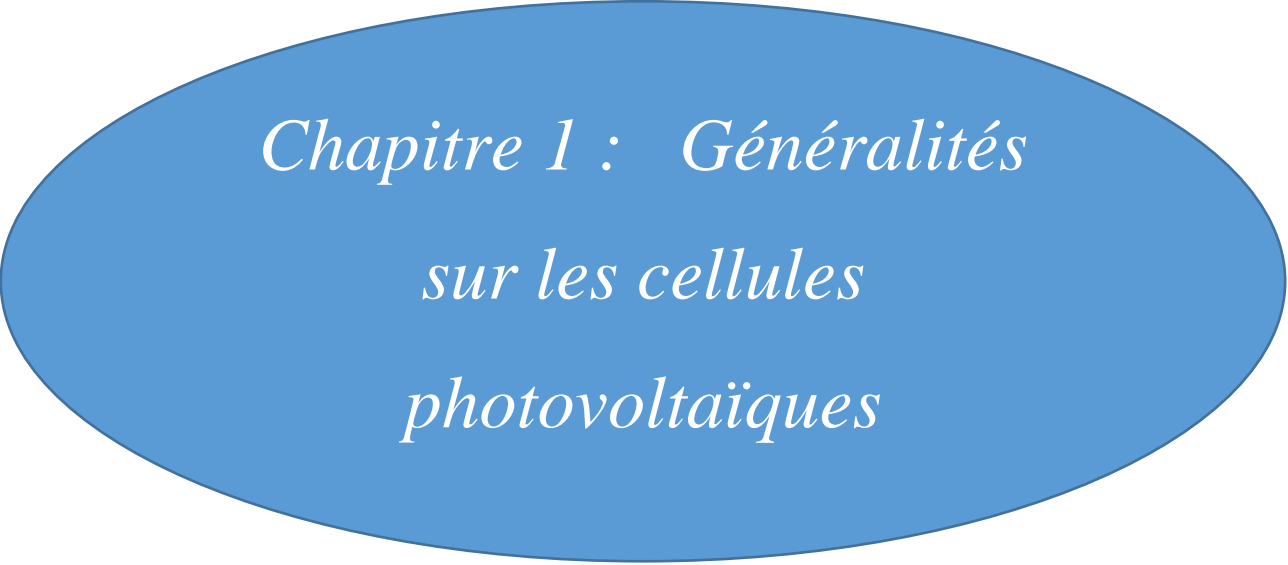
L'énergie photovoltaïque est une source d'énergie qui dépend du soleil. Cette énergie permet de la production de l'électricité à partir des panneaux photovoltaïques. Ces panneaux sont fabriqués à partir des matériaux semi-conducteurs.

Dans ce contexte, nous avons proposé ce projet de fin d'étude visant l'optimisation des performances des cellules PV à base d'hétérojonction de Si.

Dans le premier chapitre, on va présenter des généralités sur les cellules photovoltaïques, le principe de fonctionnement, les caractéristiques électriques d'une cellule et les filières des cellules photovoltaïques.

Dans le second chapitre on va étudier théoriquement les cellules PV à hétérojonctions de silicium a-Si :H/c-Si.

Le but du troisième chapitre sera la modélisation numérique des performances des cellules PV à hétérojonction de silicium à l'aide de logiciel AFORS-HET.



*Chapitre 1 : Généralités
sur les cellules
photovoltaïques*

I. Introduction :

Dans ce chapitre, on va faire une présentation des cellules et matériaux photovoltaïques. On y trouvera le principe de fonctionnement, l'irradiation solaire, les grandeurs caractéristiques et les modèles d'une cellule solaire ainsi les différentes filières photovoltaïques.

II. Principe de fonctionnement des cellules photovoltaïque :

Elle a été découverte en 1839 par Antoine Becquerel, [5] ce phénomène est basé sur le comportement des matériaux semi-conducteurs lorsqu'ils reçoivent un rayonnement solaire. En effet, lorsque les photons de la lumière du soleil rentrent en contact avec ces matériaux particuliers, ils transmettent leur énergie aux électrons des semi-conducteurs qui génèrent alors une tension électrique.

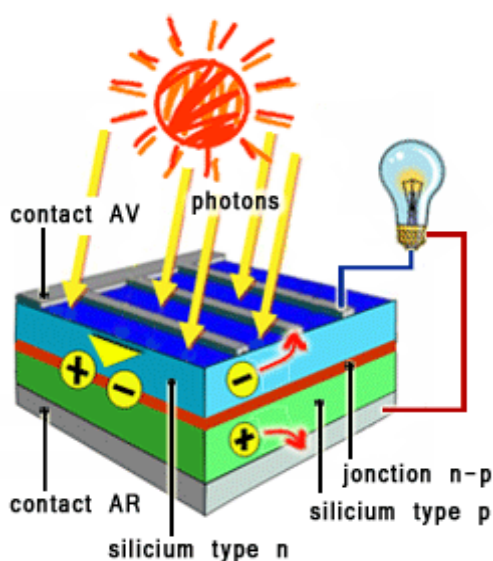


Figure I.1 : représentation en coupe d'une cellule photovoltaïque.

L'effet photovoltaïque se manifeste quand un photon est absorbé dans un matériau composé de semi-conducteurs dopés p (positif) et n (négatif), dénommé comme jonction p-n (ou n-p). Sous l'effet de ce dopage, un champ électrique est présent dans le matériau de manière permanente. Quand un photon incident (grain de lumière) interagit avec les électrons du matériau, il cède son énergie $h\nu$ à l'électron qui se retrouve libéré de sa bande de valence et subit donc le champ électrique intrinsèque. Sous l'effet de ce champ, l'électron migre vers la face supérieure laissant place à un trou qui migre en direction inverse. Des électrodes placées

sur les faces supérieure et inférieure permettent de récolter les électrons et de leur faire réaliser un travail électrique pour rejoindre le trou de la face antérieure. [6]

III. Irradiation solaire

Le calcul et les mesures par satellite montrent que la terre qui est située à environ 150 millions de kilomètres du soleil - reçoit une valeur moyenne du flux solaire à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre, sa valeur est estimée à 1367 W [7].

Le rayonnement reçu sur l'atmosphère terrestre est caractérisé par des longueurs d'ondes comprises entre 0.2 et 2.5 μm , il inclut le domaine du visible (ondes lumineuses de 0.4 et 0.8 μm).

L'irradiation solaire totale (noté TSI pour *total solar irradiance*) est la quantité d'énergie radiative provenant du Soleil (intensité totale du rayonnement) reçue par une surface de 1 m^2 du sommet de l'atmosphère terrestre, lorsque celui-ci se situe à une unité atmosphérique ($1,496 \cdot 10^8 \text{ km}$) du Soleil et que la trajectoire du rayon est perpendiculaire à cette surface. [8]

Le soleil émet continuellement une énergie radiative considérable dans toutes les directions du système solaire. Celle-ci absorbe et reflète une partie de ce rayonnement solaire de telle sorte que l'énergie reçue au niveau de la surface de la mer (altitude 0 m), par ciel clair et quand le soleil est au zénith, vaut 1 000 W/m^2 . Cette situation a été définie par la communauté scientifique comme une situation de référence décrite par l'indicateur Air-Masse, notée AM 1. Le coefficient Air-Masse évalue la masse atmosphérique traversée par le rayonnement solaire. En moyenne au sol et dans toute la zone tempérée de l'hémisphère nord et donc en France-Europe et en Algérie-Maghreb, on utilise AM1.5 [9].

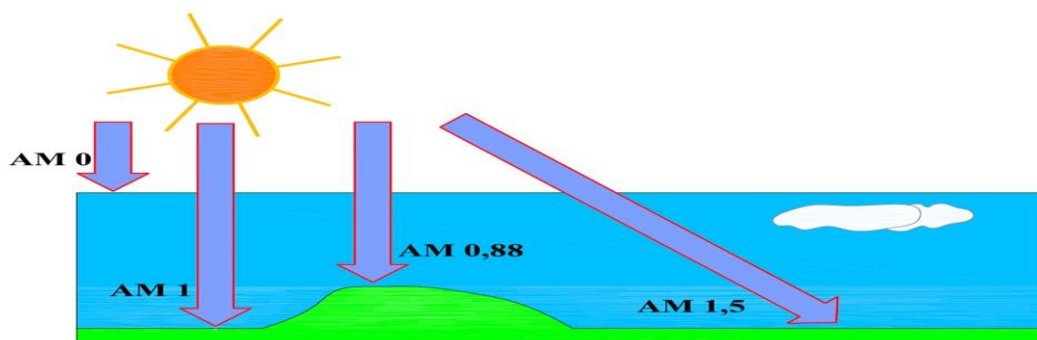


Figure I. 2 conditions de mesures de quelques rayonnements AMx.

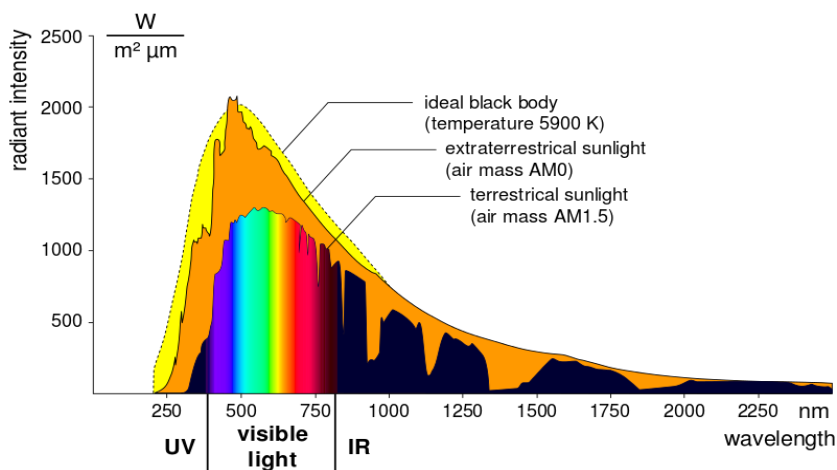


Figure I. 3 répartition spectrale du rayonnement solaire

IV. Caractérisation électrique des cellules photovoltaïques

Les performances de la cellule solaire sont représentées à travers la caractéristique courant-tension I(V). Cette dernière apporte une lecture claire des paramètres caractérisant la cellule solaire comme le rendement de la cellule, les différents types des résistances parasites et le facteur de forme. Le courant est mesuré en fonction de la tension appliquée sous obscurité et sous ensoleillement, la lumière permet de décaler la courbe I-V vers le bas dans le quatrième quadrant, car le courant photoélectrique provoque la production de l'énergie [10].

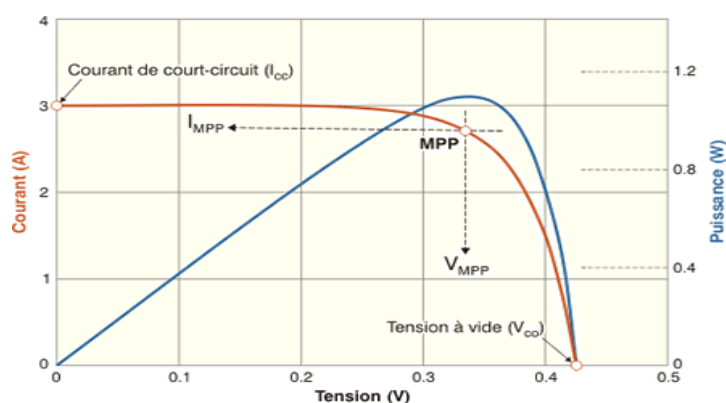


Figure I. 4 Caractéristique I(V) d'une cellule photovoltaïque.

Le courant de court-circuit I_{cc}

Il s'agit du courant qui traverse la cellule photovoltaïque lorsque celle-ci est court-circuit, c'est-à-dire lorsque le pôle + est relié au pôle - (la tension à ses bornes est alors nulle). Dans ce cas, la puissance fournie par la cellule $P = V \times I$ est nulle.

$$I_{cc} = I_{ph} / \left[1 + \left(\frac{R_s}{R_{sh}} \right) \right] \quad (I.1)$$

Où :

I_{ph} : Photo-courant [A], proportionnel à l'irradiance F, avec correction selon T.

R_s : Résistance série [W].

R_{sh} : Résistance shunt (ou parallèle) [W].

La tension en circuit ouvert V_{co}

Il s'agit de la tension aux bornes de la cellule lorsque celle-ci est en circuit ouvert, c'est-à-dire lorsque le pôle + et le pôle – sont isolés électriquement de tout autre circuit électrique (le courant la traversant est alors nul). Dans ce cas, la puissance fournie par la cellule $P = V \times I$ est nulle.

Dans le cas idéal, elle est déterminée à partir de l'équation de la caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque par l'expression :

$$V_{co} = \frac{kt}{q} \ln \left[\frac{I_{cc}}{I_0} + 1 \right] \quad (I.2)$$

Avec :

q : Charge de l'électron = $1,602 \cdot 10^{-19}$ Coulomb

k : Constante de Boltzmann = $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K

T : Température effective de la cellule [Kelvin].

I_0 : courant de saturation.

Le facteur de forme FF

Le facteur de forme est un paramètre important pour définir la qualité d'une cellule. C'est le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule et la puissance formée par le rectangle $I_{cc} \times V_{co}$:

$$FF = \frac{P_M}{I_{cc}V_{co}} = \frac{I_M V_M}{I_{cc}V_{co}} \quad (I.3)$$

Avec :

P_M : puissance maximale.

Ce paramètre compris entre 0 et 1, on l'exprime en % qualifie la forme plus ou moins rectangulaire de la caractéristique I-V de la cellule solaire.

Le rendement

Le rendement de conversion est défini comme le rapport entre la puissance maximale produite par la cellule PV et la puissance du rayonnement solaire incident :

$$\eta = \frac{P_M}{P_0} \quad (I.4)$$

Avec :

P_0 : Puissance incident.

Si S est la surface de la cellule (en m^2) et E est l'éclairement -irradiance- (en W/m^2).

Le rendement énergétique s'écrit :

$$\eta = \frac{P_M}{E * S} \quad (I.5)$$

Ou d'après (I.3) :

$$P_M = FF * V_{co} * I_{cc} \quad (I.6)$$

$$\eta = \frac{FF * V_{co} * I_{cc}}{E * S} \quad (I.7)$$

La réponse spectrale

Les photons ayant une énergie supérieure au gap du semi-conducteur pourront créer une paire électron-trou. L'énergie excédentaire sera perdue, elle aussi en fonction de la longueur d'onde de la lumière. Une autre technique fondamentale de caractérisation est la réponse

spectrale. Elle permet d'apporter des informations sur la capacité de la cellule à produire un photo-courant en fonction de la longueur d'onde du rayonnement incident.

Par exemple, les RS de cellules au silicium cristallin et au silicium amorphe sont représentées sur Figure I.5 [11]

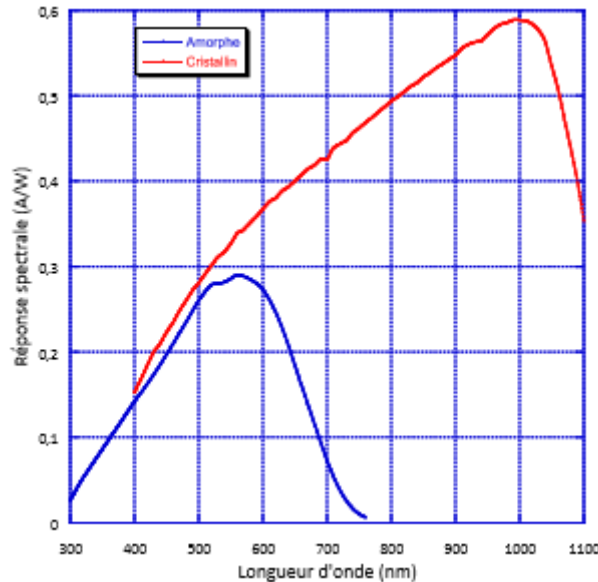


Figure I.5: Réponse spectrale d'une cellule amorphe et d'une cellule cristalline.

Donc la réponse spectrale est la valeur du courant de court-circuit de la cellule par unité de flux monochromatique incident.

$$RS(\lambda) = \frac{J_{sc}(\lambda)}{P_g(\lambda)} \quad (I.8)$$

Où $RS(\lambda)$ est la réponse spectrale, exprimée en A/W ; $P_g(\lambda)$ l'éclairement monochromatique global, exprimé en W/m^2 et $J_{sc}(\lambda)$ désigne le courant de court-circuit, exprimé en A/cm^2 . [12]

La photoluminescence

La photoluminescence PL peut être définie comme la radiation photonique produite par un semiconducteur à la suite d'une excitation lumineuse [13]. C'est un processus par lequel une substance absorbe des photons puis réémet des photons. Dans le cas d'un semiconducteur, le principe est d'exciter des électrons de la bande de valence avec un photon d'une énergie supérieure à l'énergie de gap du composé, de telle sorte qu'ils se retrouvent dans

la bande de conduction. L'excitation fait donc passer les électrons vers un état d'énergie supérieure avant qu'ils ne reviennent vers un niveau énergétique plus bas avec émission d'un photon. Après un temps très court, l'électron se recombine et retourne dans la bande de valence avec émission d'un photon (lorsque le matériau est à gap indirect), d'un photon ou dans certains cas d'un électron Auger. La PL s'intéresse au cas d'un photon émis.

V. Circuits électriques équivalentes d'une cellule photovoltaïque :

Modèle à une diode

Le fonctionnement d'un module photovoltaïque est décrit par le modèle standard pour une diode. Il est généralisé à un module PV en le considérant comme un ensemble de cellules identiques branchées en série ou en parallèle. Ce modèle comprend une diode. [14]

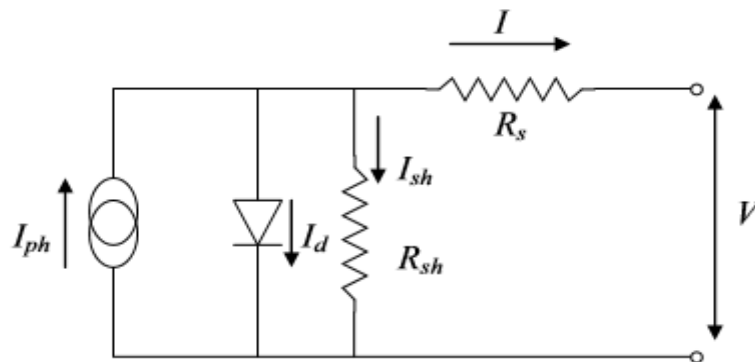


Figure I.6 : schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à une diode

Le courant fourni par la cellule est donné par la relation (I.9)

$$I = -I_{PH} + \frac{V-R_S I}{R_{SH}} + I_S \left[\exp \left\{ \frac{q(V-R_S I)}{AKT} \right\} - 1 \right] \quad (I.9)$$

Avec :

\$I_s\$: Courant de saturation de la diode [A], dépendant de la température [A]

\$A\$: Facteur de qualité de la diode, normalement compris entre 1 et 2.

\$I\$: Courant fourni par la cellule.

\$V\$: Tension à la borne de la cellule [V].

Il faut noter que ces deux résistances sont liées à la technologie d'élaboration des électrodes. Il faut minimiser R_s de telle sorte que R_{sh} soit très important.

Modèle à deux diodes

Le circuit équivalent du modèle à deux diodes est le plus proche du comportement réel de la cellule solaire, du fait qu'il tient compte du mécanisme de transport des charges électriques à l'intérieur de la cellule (deux diodes) [15]. Ces diodes symbolisent la recombinaison des porteurs minoritaires, d'une part sur la surface du matériau et d'autre part sur le volume du matériau [14]. Le schéma du circuit équivalent (figure I.7) pour un modèle en deux diodes devient :

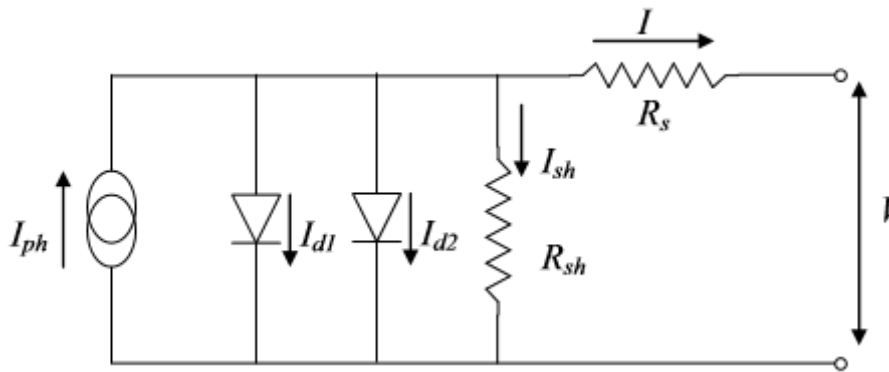


Figure I.7 : Schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à deux diodes.

Le courant fourni par la cellule est donné par la relation (I.10) :

$$I = -I_{PH} + \frac{V - R_S I}{R_{SH}} + I_{S1} \left[\exp \left\{ \frac{q(V - R_S I)}{AKT} \right\} - 1 \right] + I_{S2} \left[\exp \left\{ \frac{q(V - R_S I)}{AKT} \right\} - 1 \right] \quad (I.10)$$

VI. Filière photovoltaïque

Il existe plusieurs technologies de cellules qui ont toutes des propriétés différentes. Les cellules photovoltaïques les plus répandues sont constituées de semiconducteur qui sont capables de conduire l'électricité.

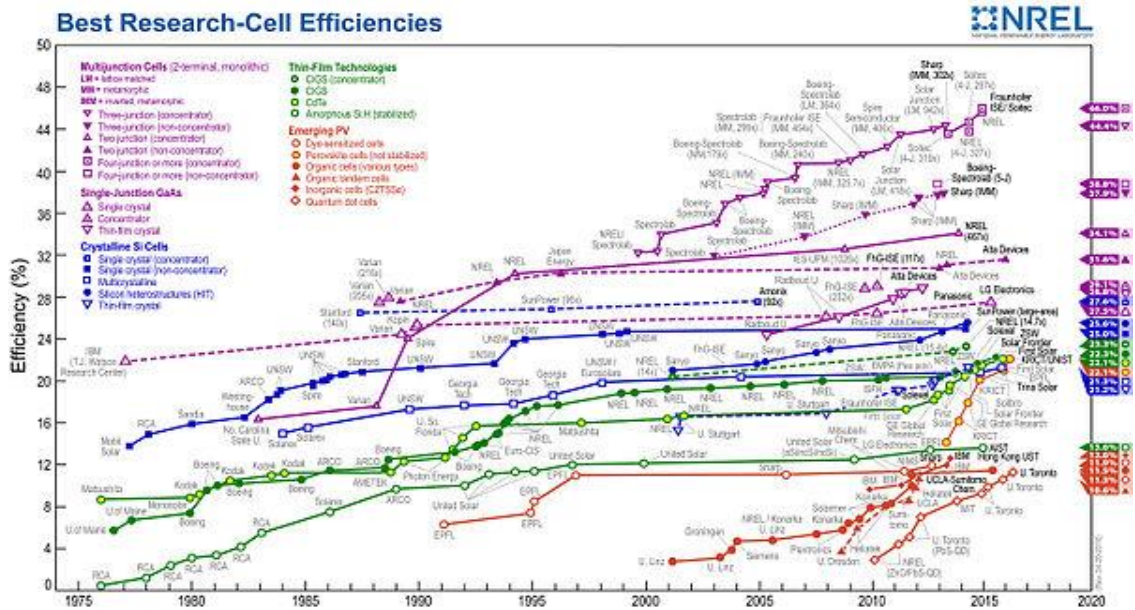


Figure I.8 développement du rendement des cellules photovoltaïques (pour des différentes filières). [16]

Dans ce qui suit, on va présenter les principales filières photovoltaïques.

VI.1 Filière de silicium cristallin

Le silicium représente le deuxième élément le plus abondant sur terre après l'oxygène et peut donc être considéré comme inépuisable [17]. La recherche sur la filière du silicium cristallin a débuté dans les années 1950 en France [11]. Les cellules cristallines se subdivisent en 2 catégories : mono- et poly- cristalline selon le type de structure. Ces deux types de cellules proviennent de procédés de purification et de solidification différents.

Silicium monocristallin

Le silicium monocristallin est difficile à obtenir. En effet, il nécessite un taux de pureté très élevé et donc plusieurs étapes de purification. Les cellules monocristallines ont un taux de rendement excellent (16 à 24%) mais leur méthode de production est laborieuse et délicate, et donc, très chère ; il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir du cristal pur. [18]



Figure I.9 Plaque de silicium monocristallin.

Silicium polycristallin

Le silicium multi cristallin (Polycristallin) est devenu aujourd'hui la technologie la plus utilisée. A-t-elle seule elle représente près de 50% du marché [15]. Les cellules polycristallin ont un coût de production moins élevé et un rendement qui varie entre 14 à 18% [18].

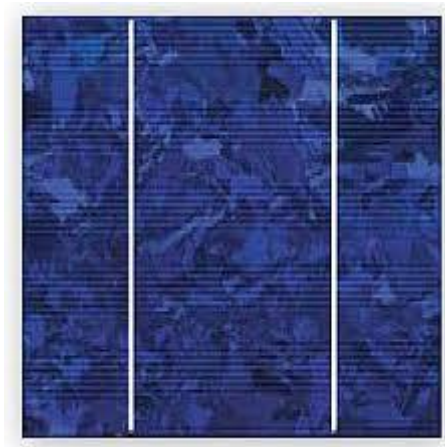


Figure I.10 Plaque de silicium multicristallin.

VI.2 Filière des couches minces

La deuxième génération des cellules repose sur la déposition de matériaux semi-conducteurs en couches minces (thin film). Ces matériaux sont déposés par des procédés tels que PE-CVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) sur un substrat. L'épaisseur de la couche varie entre quelques nanomètres à des dizaines de micromètres. [19] Parmi les

technologies en couches minces qui sont exploitées industriellement (production de masse), on distingue :

VI.2.1 Cellules à base de silicium couche mince

Le silicium amorphe :

La technologie à couche mince dont la plus mure est le silicium amorphe (Sia) représentait un Rendement de 14 % (module 5 – 7% stabilisé) L'avantage de cette technique est l'utilisation de substrats à bas coût. [15] Les cellules au silicium amorphe sont des cellules à couche mince, c'est-à-dire qu'elles sont fabriquées en déposant une fine couche de silicium sur un support (ou "substrat"), par exemple du verre. L'épaisseur de silicium utilisée est beaucoup plus faible que pour les cellules mono ou polycristallines qui sont réalisées à partir de tranches de silicium.

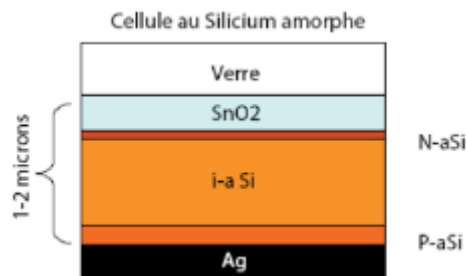


Figure I.11 : Structure d'une cellule photovoltaïque à base de silicium amorphe.

Les porteurs de charges minoritaires dans les cellules sur couches minces de silicium amorphe ne peuvent pas aller très loin dans le silicium amorphe et donc une structure de jonction p-n comme dans le cristallin ne pourrait, en aucun cas, collecter les porteurs des photons générés dans une très petite couche près de la surface illuminée. D'autre part les couches dopées p et n du silicium amorphe sont très défectueuses et présentent des taux de recombinaison importants. C'est pourquoi on place une zone intrinsèque beaucoup moins défectueuse entre deux couches dopées extrêmement minces. Ces couches dopées créent un champ interne qui doit s'étendre sur toute l'épaisseur de la cellule afin de collecter les porteurs engendrés dans la zone intrinsèque. [11]

Combinaison entre silicium amorphe et silicium cristallin

Les cellules PV à hétérojonction (HJ) sont obtenues par la mise en contact de matériaux d'énergie de gap (EG) différente. La première hétérojonction entre silicium cristallin et silicium amorphe hydrogéné a été proposée en 1974 par Fuhs et al. [20], qui ont montré que cette structure pouvait générer un photo-courant. Une cellule photovoltaïque réalisée à partir de ces matériaux avec un rendement de 12,4 % a été fabriquée en 1983 par Okuda. Par la suite, les chercheurs de l'entreprise japonaise Sanyo se sont intéressés à cette structure, et ont continué à l'améliorer, notamment en ajoutant une très fine couche de silicium amorphe intrinsèque à l'interface des matériaux dopés. Cette configuration, connue sous le nom de cellule HIT (pour Heterojunction with Intrinsic Thin layer) a démontré sa capacité à rivaliser avec les hauts rendements des meilleures cellules à homo-jonctions de silicium. [21] L'hétérojonction de silicium (Si-HJ) consiste à mettre en contact le silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H) avec le silicium cristallin (c-Si). L'énergie de gap du a-Si:H, entre 1.5eV et 1.9eV, est en effet plus élevée que celle du c-Si (1.12eV). [22]

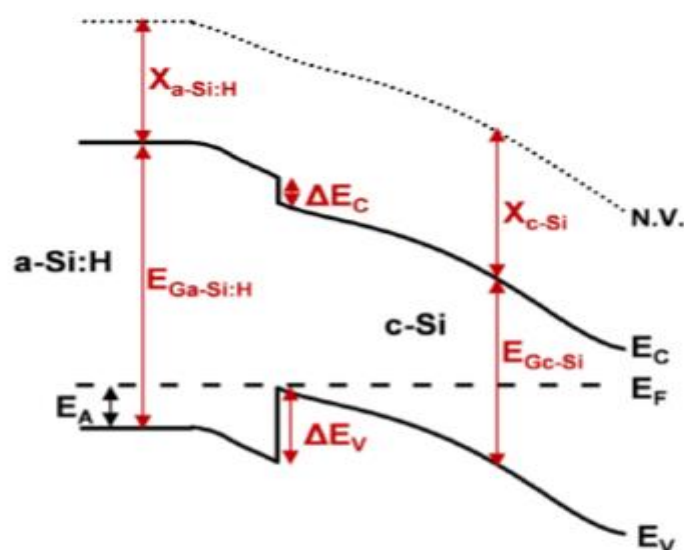


Figure I.12 Diagramme de bande à l'équilibre d'une hétérojonction (p)a-Si:H/(n)c-Si. [23]

La simplicité de la structure Si-HJ en comparaison avec les structures à contacts localisés en fait une candidate très pertinente pour atteindre des hauts rendements. De plus, l'utilisation exclusive de procédés à basse température (inférieure à 250°C) permet, en plus d'économiser de l'énergie, de diminuer l'impact des recuits thermiques pour certains matériaux sensibles aux étapes à haute température (mc-Si de type n, substrats minces). [22]

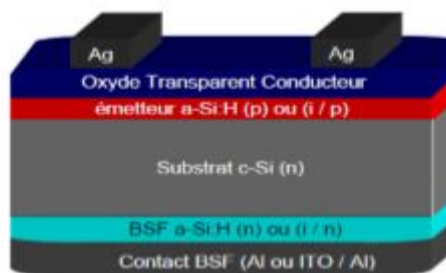


Figure I. 13 Schéma d'une cellule solaire à hétérojonction de silicium amorphe/cristallin (SHJ). [24]

VI.2.2 Cellules à base de Tellure de cadmium (CdTe)

La technologie à base de CdTe présente des rendements en dessous du cristallin, de l'ordre de 9 – 17 % (module 13% - record à 18,2%) mais bénéficie d'un faible coût à la production. Sa capacité d'absorption de la lumière et son coefficient thermique avantageux lui permettent d'être en adéquation presque parfaite avec le spectre solaire. Son principal inconvénient est sans nul doute la limitation naturelle de la quantité de tellure sur terre qui oblige la recherche à réduire au maximum son épaisseur, qui avoisine aujourd'hui 3 μm . De plus, le cadmium est toxique. Il faut tout de même préciser que celui-ci est dangereux seulement lors de la fabrication et qu'un module PV ne contient que très peu de cadmium : un module CdTe de 60W (~12 kg) contient environ 2g de Cd. [11]

L'emploi du tellure de cadmium procure plusieurs avantages aux cellules. Seuls 1 à 8 μm de CdTe suffisent pour absorber une grande quantité de lumière. Les panneaux solaires rigides se comportent également mieux que les autres lorsque leur température monte, ce qui survient aux plus chaudes heures de la journée.

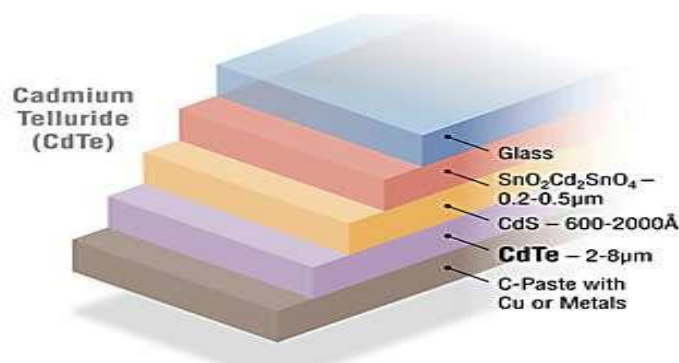


Figure I.14: Structure d'une cellule photovoltaïque au CdTe.

VI.2.3 Cellules à base cuivre-indium-gallium-sélénium (CIGS)

Le CIS partage des points communs avec le CdTe : la faible disponibilité de l'indium (une centaine d'années selon Indium Corporation) oriente la recherche à travailler sur la réduction de l'épaisseur de ce composant (2 μm aujourd'hui). Il nécessite également une couche de CdS pour former une jonction p-n. On peut associer une quantité limitée de gallium (CIGS) pour améliorer ses propriétés d'absorption. Il présente le plus fort coefficient d'absorption des semi-conducteurs PV. Sa stabilité, son haut rendement par rapport aux autres couches minces (11 – 18 % (max 21,7%)) ainsi que son coût de fabrication relativement peu onéreux permettent à cette technologie de croître rapidement. [11]

Les cellules CIGS peuvent être construites sur des supports en plastique, en verre de 1 à 3 mm d'épaisseur, ou sur des feuilles métalliques.

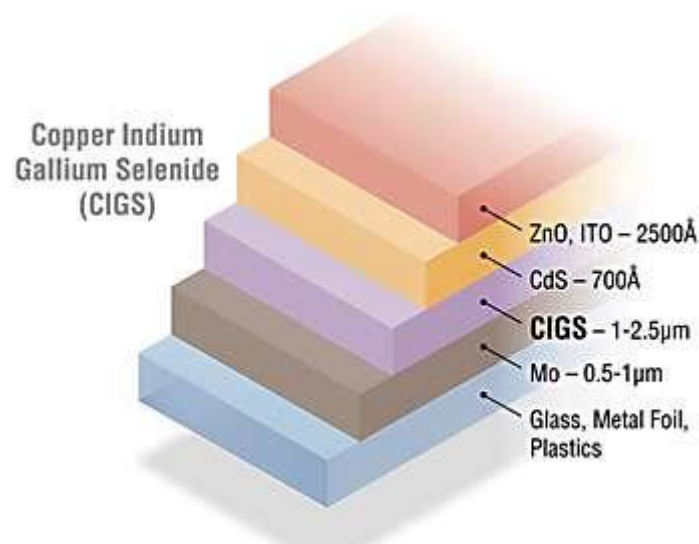


Figure I.15 : Composition couche par couche d'une cellule photovoltaïque au CIGS.

VI.3 Filière des cellules à très haut rendement (GaAs)

Le problème de GaAs est que c'est un matériau composé de deux éléments qui ont des propriétés très différentes (température de fusion (T_f) et température de vaporisation(T_V)). La température de fusion T_f de Gallium est supérieure à celle de l'arsenic donc ; quand le Ga se fusionne, l'arsenic s'évapore [25]. En plus l'As est un élément toxique. Donc des préparations très particulières sont nécessaires lors de la préparation du GaAs massif. [26]

Ces cellules, dont le prix est très élevé, sont très appréciées dans l'aérospatiale. Leurs principaux avantages sont : [18]

- Une absorption très élevée. Ces cellules ne pas épaisses, ce qui traduit un gain en volume et en masse pour les sondes sur lesquelles le moindre gramme superflu est traqué.
- Leur puissance est, par rapport aux cellules simples au silicium, peu affectée par leur augmentation de température que les sondes peuvent rencontrer.

La société américaine Alta Devices, spécialisée dans le PV pour des applications de haut de gamme, dévoile un rendement de conversion de 31,6% obtenu en laboratoire pour ses cellules solaires en technologie GaAs à double jonction sans concentration.

VI.4 Filière des cellules organique

Le solaire organique est considéré comme une nouvelle technologie basée sur les colorants et leurs propriétés physiques et en particulier optiques. [18]

Initialement donnant des valeurs très faibles de rendement de conversion, cette application particulière des semi-conducteurs organiques commence à attirer l'attention en 1986 lorsque l'équipe de Tang montre que les rendements proches du pourcent sont atteignables, conformément aux prédictions de Merritt en 1978. La cellule, composée alors d'une bicouche de molécules évaporées sous vide, atteint 0,95% de rendement de conversion. Ces cellules comprennent deux voies : la voie des cellules « humides » et la voie des cellules polymères organiques dites aussi cellules « plastiques ». Les progrès de ces technologies sont très rapides, des records de rendement sont très fréquemment battus (actuellement près de 6%). Le principal frein à ces technologies est actuellement la stabilité de leurs performances ainsi que leur durée de vie (actuellement environ 1000 heures). [15]

VI.5 Cellules à colorant

Les cellules à base de colorant s'inspirent du mécanisme de la photosynthèse qui consiste en la libération d'un électron suite à l'absorption du rayonnement solaire par la chlorophylle (un colorant). Diverses réactions chimiques permettent par la suite la régénération de la chlorophylle. [27] Le rendement de cette dernière est de 8 – 12 % (modules commerciaux 3 – 5%)

VII. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque, l'irradiation solaire, les grandeurs caractéristiques et les paramètres d'une cellule photovoltaïque ainsi les différentes filières photovoltaïques.

Parmi les filières photovoltaïques nous pouvons citer la filière des couches minces ayant une grande place dans le marché photovoltaïque actuel. L'intérêt pour cette technologie est lié d'une part à son faible coût du fait de l'utilisation des couches minces donc une diminution de la quantité de matériau utilisé pour la fabrication des cellules photovoltaïques, d'autre part due au fait de la disponibilité de la plupart des matériaux de base concernant cette filière et finalement due au fait que les rendements, liés aux recherches intensives, sont en constante progression contrairement à ceux des filières traditionnelles à base de silicium. C'est dans ce contexte que se situe mon projet de fin d'étude de Master.

*Chapitre 2 : Cellules PV à
hétérojonctions de silicium*

α -Si :H/c-Si

I. Introduction

Dans ce chapitre, on étudiera, théoriquement, les cellules photovoltaïques à hétérojonction de silicium où on va aborder la définition, le développement, les différentes couches de là ce type de cellules. D'autre part, les concentrations des porteurs, la mobilité, la conductivité et les différents types de recombinaisons seront traités. A la fin de ce chapitre, on va présenter de logiciel AFORS-HET :

II. Combinaison entre a-Si :H/c-Si

II.1 Principe

Les cellules photovoltaïques à hétérojonction sont obtenues lorsque on entre en contact deux matériaux de différente énergie de gap (E_g) [28]. L'hétérojonction de silicium résulte par la mise en contact le silicium amorphe hydrogéné (a-Si : H) qui a une énergie de gap entre 1.5 eV et 1.9 eV avec le silicium cristallin (c-Si) qui a une énergie de gap égale à 1.12 eV [22] tel que chaque région de l'hétérojonction (amorphe/cristallin) est d'un dopage différent d'un l'autre.

Généralement de nombreux centre de recherche et laboratoires ont entrepris des recherches utilisent un substrat en silicium cristallin dopé p. Ils se basant sur le même type de structure utilisé par les japonais mais avec un substrat de type différent. Jusqu'à présent, ces sont les rendements obtenus par les japonais sur un substrat de type n qui restent les meilleurs. [29]

II.2 Historique

Les premières idées de fabriquer une cellule solaire à hétérojonction à partir d'utilisation de silicium a été proposée en 1972 par Fuhs et Al [30].

En 1983, à utilisation de silicium amorphe hydrogéné et silicium cristallin, la première cellule photovoltaïque a été fabriquée par Okuda avec un rendement de 12.4% [21].

Les chercheurs de l'entreprise japonaise « SANYO » se sont intéressées à cette structure telle qu'elle a été la première entité qui a appliqué l'idée avec succès. Elle a commencé ces

premiers travaux en 1980, et sa première publication a été en 1991 [31]. En octobre 1997 la production industrielle a débuté pour des cellules de 100 cm² avec un rendement de 17.3% [30].

Sanyo a réussi avec cette technologie à prendre 8% de la vente mondiale. Cette réussite industrielle est due aux multiples avantages de la structure HIT [31].

La première cellule solaire à hétérojonction de silicium réalisée par l'entreprise Sanyo, comportée une couche de silicium amorphe hydrogéné (a-Si : H) de type p qui été déposée directement sur une tranche de silicium cristallin (c-Si) de type n pour former la cellule solaire à hétérojonction (figure II.1).

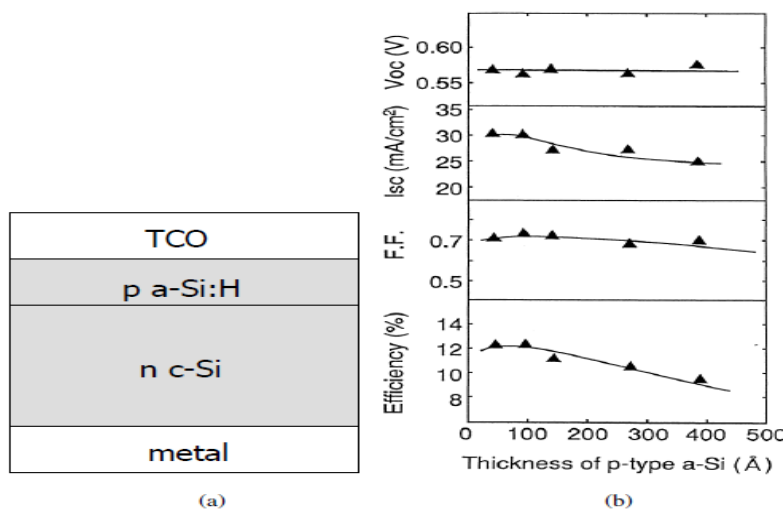


Figure II 1: a) Structure schématique des cellules solaires à hétérojonction a-Si: H / c-Si faites par Sanyo et
b) performance de la cellule solaire en fonction de l'épaisseur de a-Si: H de type p

Avec cette cellule solaire, Sanyo a atteint un rendement de 12,3%. La figure II.1b montre l'effet de l'épaisseur de la couche a-Si: H de type p sur les paramètres externes de la cellule solaire à hétérojonction. La cellule présentait un V_{co} et FF relativement bas en raison de sa densité d'état de défaut à l'interface a-Si : H / c-Si. Une augmentation de l'épaisseur de la couche a-Si : H de type p entraîne une diminution de J_{sc} , due à l'absorption pertes dans le a-Si : H.

Dans le but d'améliorer cette cellule, Sanyo a incorporé une mince couche a-Si: H intrinsèque entre la plaquette c-Si de type n et l'a-Si: H de type p (figure II.2) pour but de passer les liaisons pendantes sur la surface c-Si. En conséquence, la densité de l'état de défaut de l'interface a-Si: H / c-Si était significativement réduite, ce qui a entraîné une amélioration

du V_{co} et du FF. Sanyo a appelé cette structure la cellule solaire ACJ-HIT (jonction-hétérojonction artificielle avec film mince intrinsèque).

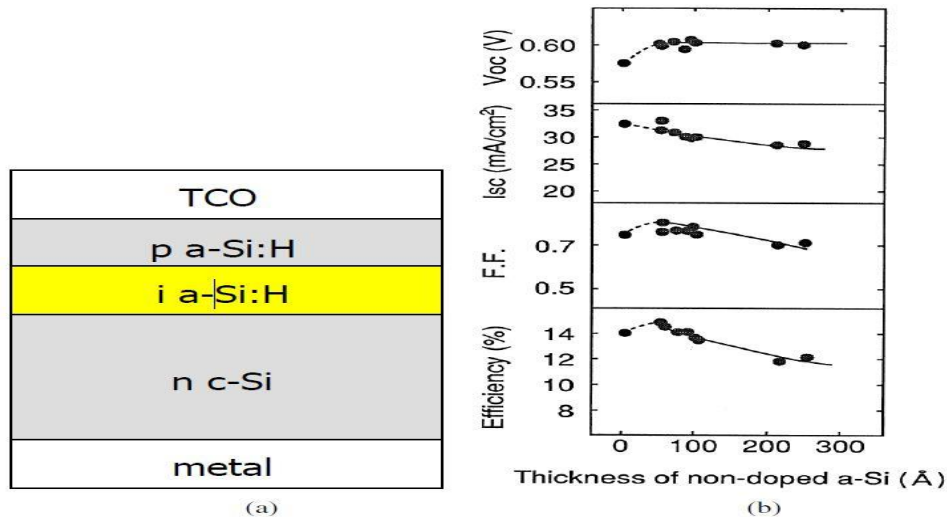


Figure II 2: a) Structure schématique des cellules solaires ACJ-HIT fabriquées par Sanyo

b) performance de la cellule solaire en fonction de l'épaisseur a-Si: H intrinsèque.

La figure II.2.b) montre qu'il existe une épaisseur optimale pour les couches a-Si: H intrinsèque et de type p. Le rendement le plus élevé de 14,8% a été obtenu pour une cellule solaire HIT avec une couche intrinsèque a-Si: H de 4 nm d'épaisseur.

La performance de la cellule solaire HIT a encore été améliorée par l'introduction de surfaces texturées pour la capture de la lumière, et l'inclusion d'un BSF sur le côté arrière de la cellule solaire (figureII.3). Les surfaces texturées aident à réduire la réflexion de surface et à augmenter la longueur moyenne du chemin optique à l'intérieur de la plaquette, ce qui augmente la densité de courant J_{cc} . Cependant, la texturation de surface augmente également la surface totale, ce qui peut entraîner une augmentation de la densité de l'état de défaut de surface, elle sera compensée par le BSF, ce qui réduit la recombinaison du support à l'arrière de la plaquette. L'inclusion de la texturation de surface et du BSF a permis des rendements de cellules solaires HIT aussi élevés que 18,1%.

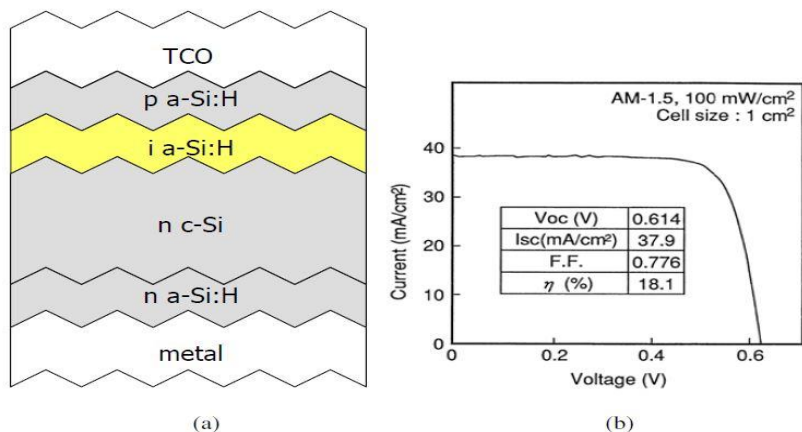


Figure II 3: a) Structure schématique et b) caractéristique I-V de la cellule solaire HIT avec surface texturé et BSF.

Au cours de l'étape suivante, Sanyo a appliqué une passivation double face à la plaquette. Cela a entraîné une augmentation du V_{co} à 0,717 V et un rendement à 21,3%. De plus, Sanyo a conçu une structure de cellule solaire HIT hautement symétrique (figure II.4). La symétrie dans la structure des cellules solaires aide à supprimer les contraintes thermiques et mécaniques dans les plaquettes pendant le processus de fabrication, comme elle permet également l'illumination de la cellule des deux côtés. Sanyo a démontré qu'un module HIT correctement orienté peut générer plus de puissance lorsqu'il est éclairé des deux côtés qu'un module éclairé d'un côté.

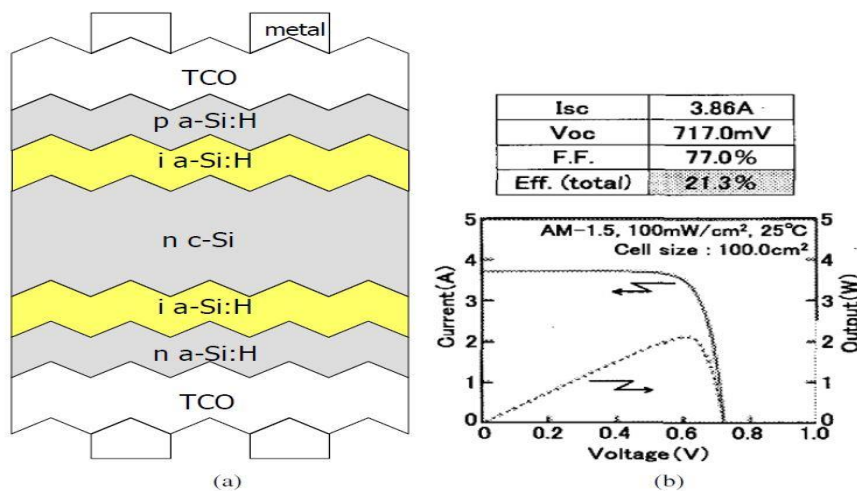


Figure II 4: a) Structure symétrique schématique de la cellule solaire HIT avec passivation recto-verso. b) sa caractéristique I-V.

En 2008, Sanyo avait atteint des rendements de cellules solaires HIT atteignant 22,3%.

Sanyo a décrit trois étapes clés qui ont contribué à cette réussite. La première étape a été l'amélioration de la qualité de l'hétérojonction a-Si: H/c-Si. Ceci a été obtenu par un nettoyage amélioré de la plaquette c-Si avant le dépôt des couches a-Si: H, l'utilisation de couches a-Si: H de haute qualité et la réduction des dommages plasmatiques et thermiques causés à la surface c-Si pendant le traitement. La deuxième étape était l'amélioration des électrodes de la grille; le rapport d'aspect des doigts de grille, qui est le rapport entre la hauteur du doigt et sa largeur, doit être le plus élevé possible afin de réduire la surface ombrée par les électrodes de grille. La troisième étape était la réduction de l'absorption dans les couches a-Si: H et TCO en appliquant des alliages a-Si: H à large gap, et en augmentant la mobilité du TCO au lieu de la concentration du porteur.

Une optimisation supplémentaire des matériaux et du traitement a donné lieu à une cellule solaire HIT avec une efficacité record de 23%, annoncée par Sanyo en mai 2009. Le traitement à basse température et la structure hautement symétrique des cellules solaires HIT permettent l'utilisation de plaquettes ultrafines.

Sanyo a commencé la production commerciale des cellules solaires HIT en 1997. Sa capacité de production continue d'augmenter, ce qui suggère un énorme potentiel de marché pour les cellules solaires HIT.

III. Technique de dépôt du silicium amorphe hydrogéné a-Si: H:

Les couches de silicium amorphes dopées par la méthode PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) sont déposées directement sur le substrat. Il est ici important de préciser que toutes les opérations de fabrications industrielles se font à une température maximale de 200°C. La symétrie permet d'obtenir un éclairage des deux côtés. Ces deux avantages (structure symétrique et fabrication à basse température) permettent l'utilisation de substrats minces. [32]

Le gaz qui est envoyé à faible pression (13 à 1 300 Pa) dans une enceinte à vide propre, contenant deux électrodes. Pour une tension suffisante, une décharge électrique s'établit entre les électrodes conduisant à la décomposition du silane en éléments chimiques très actifs : radicaux Si, Si-H, Si-H₂⁺, Si-H₃⁺ accompagnés des espèces ioniques correspondantes, Si-H₄⁺, Si-H₃⁺, et Si-H₂⁺ et Si-H₃⁺. Le plasma contient aussi des électrons et des ions négatifs qui assurent la neutralité électrique globale. [33]

IV. Les composants principaux de la cellule à hétérojonction de silicium

IV.1 L'oxyde transparent conducteur (TCO)

Les oxydes transparents conducteurs sont des matériaux à grand gap (supérieur à 3,5 eV). Ces matériaux doivent avoir certaines propriétés :

- Une excellente transparence optique, afin de laisser suffisamment de lumière à la région de jonction et la couche absorbante du dispositif.
- Une bonne conductivité, pour permettre le transport du photo-courant généré au circuit extérieur sans trop de pertes.
- Une bonne adhérence sur une variété de substrats.

La conductivité du silicium amorphe est très inférieure à celle du Silicium cristallin, il faut donc ajouter une couche conductrice sur toute sa surface afin de pouvoir collecter le courant. C'est à dire ajouter une couche TCO Sur la face illuminée de la cellule qui va permettre de collecter le courant. Elle assure également un bon contact avec les électrodes métalliques, tout en jouant le rôle de couche antireflet. [22]

Il existe une grande variété d'oxydes transparents conducteurs possibles, tels que 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). [34]

IV.2 La couche tampon

La couche tampon est une couche située entre la couche absorbante et la couche d'oxyde transparent conducteur (TCO) afin d'optimiser les performances de la cellule.

Cette couche doit avoir les propriétés suivantes :

- Une bande interdite intermédiaire permettant une transition "*souple*" entre celle du semi-conducteur et celle de TCO, soit une valeur comprise entre 2,4 et 3,2 eV.
- Une conductivité de type n pour former la jonction avec la couche absorbante qui est, elle, de type p ; de plus, afin d'éviter les effets de fuites de courant, sa conductivité doit être plus faible que celle de la couche absorbante.
- Elle doit être morphologiquement très homogène pour éviter tout effet de court-circuit au niveau des joints de grains

Dans le cas d'une cellule à hétérojonction de silicium, la couche tampon est une couche

de silicium amorphe hydrogéné d'une épaisseur de quelques nanomètres qui est déposées grâce à la technique de CVD assistée par plasma ou par filament chaud (Plasma Enhanced CVD et Hot Wire CVD). [35]

IV.3 La couche absorbante

La couche absorbante est la partie de la cellule dans laquelle les photons vont être convertis en paires électrons-trous, une couche absorbante doit être constituée d'un matériau à grand coefficient d'absorption dans le domaine du visible, autrement dit la valeur de sa bande interdite directe (gap), soit de l'ordre de 1,1 à 1,7 eV.

Dans le cas d'une cellule à hétérojonction de silicium l'absorbeur est le silicium cristallin. [35]

V. Diagramme des bandes

À partir des énergies de bord de bande de conduction E_C et de valence E_V associées à l'énergie du niveau de Fermi E_F , il est possible de construire le diagramme des bandes d'un semi-conducteur. Ce diagramme est défini à partir d'un niveau de référence $E_{vac} = 0$ appelé niveau d'énergie du vide. [21]

A l'équilibre, le schéma suivant représente la position des bandes de conduction et de valence par rapport au niveau de fermi.

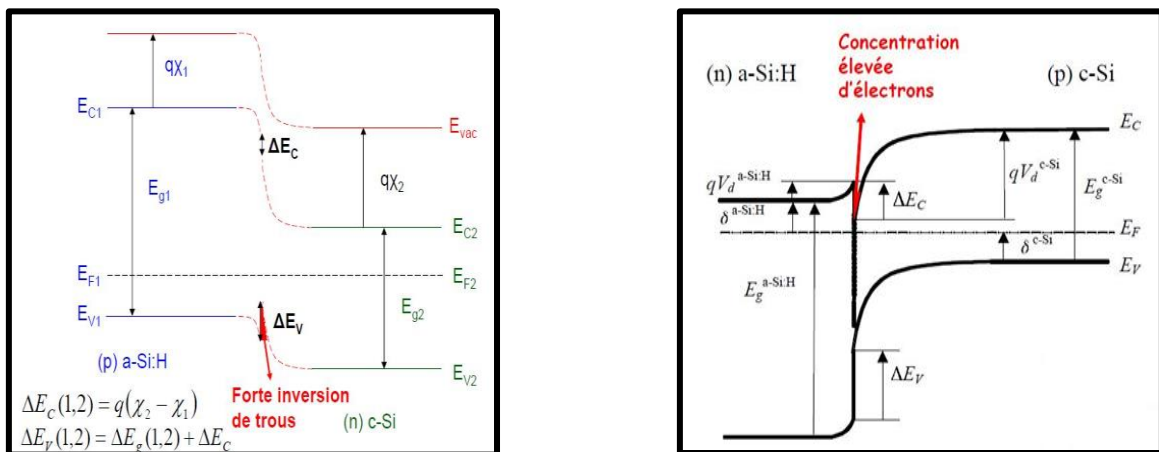


Figure II 5: diagramme des bandes type d'une hétérojonction à l'équilibre 1) a-Si:H(p)/ c-Si(n) ;
2) a-Si:H(n)/ c-Si(p).

Le niveau de Fermi varie en fonction de la température mais surtout du dopage. À l'équilibre, le niveau de Fermi est le même dans toute la structure

L'affinité électronique (χ) est l'énergie nécessaire pour extraire un électron de la bande de conduction vers le niveau du vide. Elle vaut 4.05 eV pour le silicium cristallin et 3.87 eV pour le silicium amorphe.

VI. Propriétés électriques :

Les propriétés électriques du silicium dépendent des paramètres cités dessous : [36]

VI.1 Concentration des porteurs de charge libres :

Le premier paramètre à prendre en compte est la densité de porteurs libres à l'équilibre notée (n_0) pour les électrons et (p_0) pour les trous et dont les expressions sont les suivantes :

$$n_0 = N_c \cdot \exp\left(-\frac{E_c - E_F}{k_B \cdot T}\right) \quad \text{Et} \quad p_0 = N_v \cdot \exp\left(-\frac{E_F - E_v}{k_B \cdot T}\right) \quad (\text{II.1})$$

Où N_c et N_v sont respectivement les densités d'états effectives des bandes de conduction et de valence, k_B la constante de Boltzmann et T la température.

À l'aide de ces concentrations, on définit également la densité de porteurs intrinsèques (n_i) avec l'expression suivante :

$$n_i = \sqrt{n_0 \cdot p_0} = q \cdot N_c \cdot N_v \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{k_B \cdot T}\right) \quad (\text{II.2})$$

Dans le cas où le matériau est dopé et que tous les atomes donneurs et accepteurs sont ionisés, les concentrations n_0 et p_0 peuvent s'écrire simplement :

Dopage type N

$$n_0 = N_d$$

Dopage type P

$$n_0 = \frac{n_i^2}{N_a} \quad (\text{II.3})$$

$$p_0 = \frac{n_i^2}{N_d}$$

$$p_0 = N_a \quad (\text{II.4})$$

N_a et N_d sont respectivement les concentrations d'atomes accepteurs et donneurs.

VI.2 Mobilité des porteurs :

La mobilité (μ) des porteurs libres est également un autre paramètre important qui caractérise la facilité qu'ont les porteurs à se déplacer dans le matériau. Elle peut être mesurée par effet Hall ou par temps de vol. Elle dépend essentiellement de la température et du dopage.

Pour un dopage de type N avec une concentration $N_d = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ à une température de 300 K, la mobilité des électrons est égale à $1360 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ et celle des trous $480 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$.

VI.3 Conductivité et résistivité :

Les matériaux semi-conducteurs sont souvent classés d'après leur conductivité ou résistivité. La conductivité σ est liée à la concentration des porteurs de charge et à leur mobilité :

$$\Sigma = q (\mu_n n + \mu_p p) \quad (\text{II.5})$$

Avec q la charge élémentaire.

La résistivité est l'inverse de la conductivité :

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad (\text{II.6})$$

Ces paramètres dépendent comme les autres essentiellement du dopage et de la température.

Pour un substrat c-Si dopé avec $N_{\text{dop}} = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ à la température de 300 K, la résistivité vaut $4,5 \ \Omega \cdot \text{cm}$ pour un dopage de type N et $13,2 \ \Omega \cdot \text{cm}$ pour un dopage de type P.

VI.4 Recombinaisons des porteurs libres.

La recombinaison des porteurs de charge influe sur le fonctionnement de la cellule et limite ses performances. En effet les électrons libres dans le semi-conducteur ont tendance à se recombiner avec les trous, et lorsque ce phénomène se produit, l'électron perd de l'énergie et cesse d'être un porteur libre.

La recombinaison dans un semi-conducteur se manifeste selon plusieurs mécanismes.

➤ Recombinaison radiative

Le processus de la recombinaison radiative ou inter-bandes est défini comme l'inverse du processus de la photo-génération. Ce processus est faible pour les matériaux à gaps indirects comme le Silicium. [37]

➤ Recombinaisons Shockley-Read-Hall

La recombinaison Shockley-Read-Hall est universellement utilisée pour décrire les processus de recombinaison dans la bande interdite des matériaux semi-conducteurs. [37]

Les défauts présents dans le réseau cristallin peuvent jouer le rôle de centres recombinants pour les charges libres. Ces centres recombinants ont une énergie E_t située vers le milieu de la bande interdite. [36]

➤ Recombinaison Auger

La recombinaison Auger est décrite par un mécanisme faisant intervenir trois entités. Lors de la recombinaison d'un électron de la bande de conduction et d'un trou de la bande de valence, l'énergie excédentaire est transférée sous forme d'énergie cinétique à un autre porteur libre (électron ou trou). Ce porteur perd alors progressivement son énergie par thermalisation. [37]

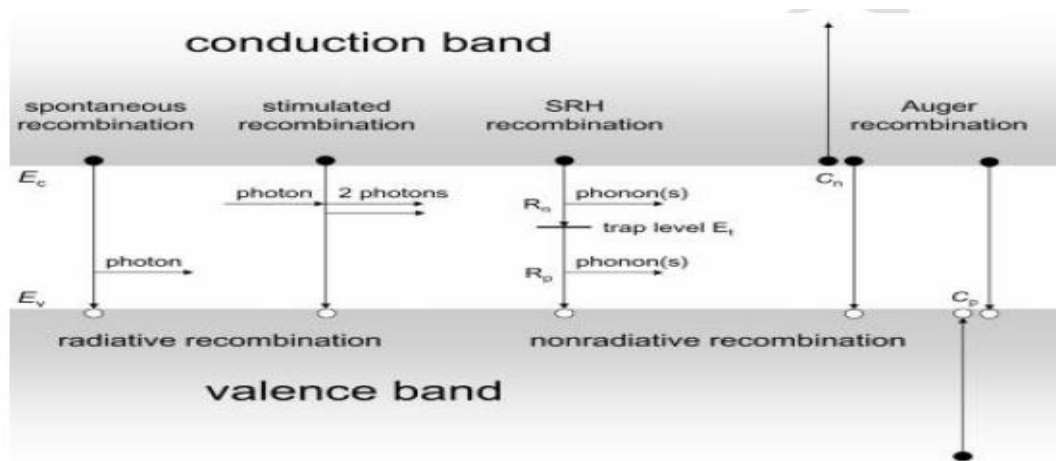


Figure II 6: Schéma des principaux processus de recombinaisons dans les semi-conducteurs. Les directions des flèches indiquent la transition des électrons

➤ Recombinaison de surface

Les porteurs de charge (électrons ou trous) peuvent être générés ou recombinés à la surface du semi-conducteur en plus de la recombinaison de génération en masse. [37]

En l'absence de traitement, on peut trouver à la surface du silicium cristallin des impuretés métalliques provenant de la découpe du substrat. De plus, suite à cette découpe, de nombreux atomes à proximité de la surface vont posséder des liaisons insatisfaites. Enfin, laissé à l'air libre pendant quelques heures, le substrat de silicium subit un phénomène d'oxydation qui crée de nouveaux défauts. Le traitement chimique permet d'éliminer une majorité des défauts, mais il reste cependant de nombreuses liaisons pendantes en surface responsables des recombinaisons surfaciques. [36]

VII. Présentation de logiciel de simulation AFORS-HET

AFORS-HET (Automate for Simulation of heterostructures) est un programme de simulation à une dimension qui est capable de gérer des homo-jonctions ainsi que des hétérojonctions. Il est particulièrement adapté aux simulations des cellules solaires à hétérojonctions à base de silicium.

Ce logiciel nous permet de définir aisément les structures dont on peut contrôler la plupart des paramètres physiques (affinité électronique, énergie de gap, mobilité, dopage, etc.). [38]

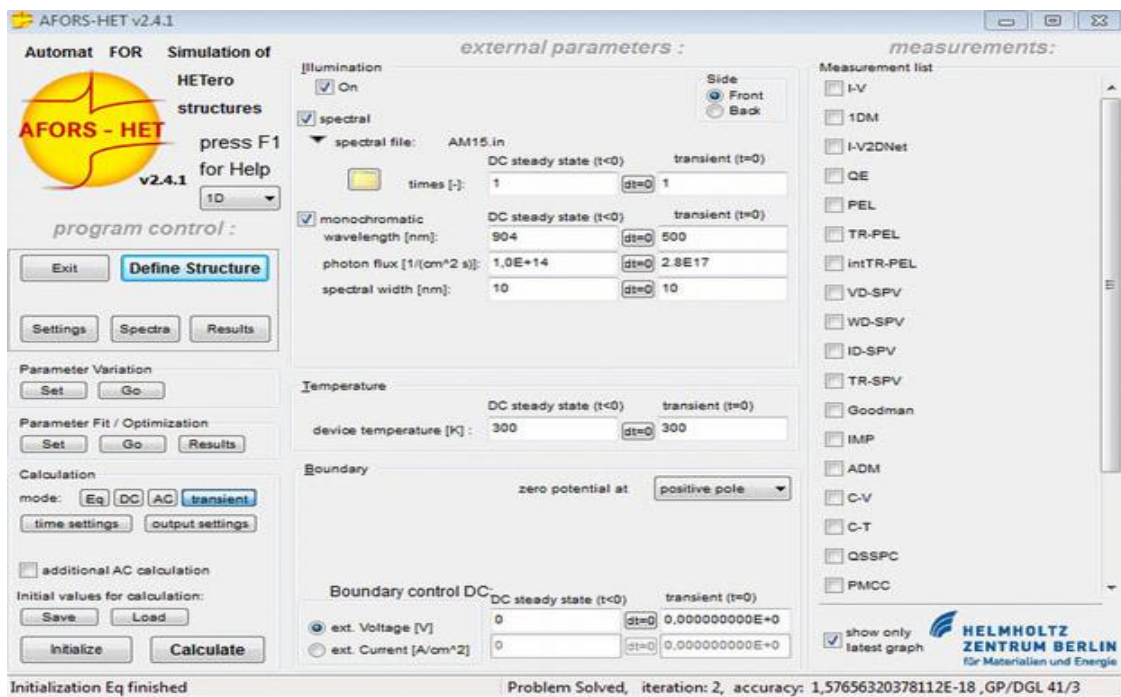


Figure II.7: La fenêtre principale AFORS-HET.

VIII. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié les cellules photovoltaïques à hétérojonction de silicium en parlons de sa définition, son développement, les différentes couches d'une structure a-Si/c-Si ainsi une modélisation numérique de la mobilité, la concentration des porteurs et les différents types de la recombinaison. Et en fin nous avons présenté le logiciel AFORS-HET.

*Chapitre 3 : Modélisation des
performances des cellules PV
à hétérojonction de silicium
a-Si/c-Si*

I. Introduction

Dans ce chapitre on va étudier les effets de l'épaisseur et le dopage de différent couche. On va voir aussi l'effet de l'insertion de la couche BSF et la couche intrinsèque à l'augmentation des performances des cellules photovoltaïque. On va voir aussi l'effet de l'énergie de gap de la couche BSF et la couche émettrice.

II. Modélisation des performances des cellules PV à base de a-Si/c-Si

Dans cette section on va présenter les deux structures étudiées à l'aide de logiciel AFORS-HET. Les deux structures initiales sont constituées des couches suivantes (Figure III.1) :

- Une couche de silicium amorphe (a-Si) « L'émetteur ».
- Une couche de silicium cristallin (c-Si) « L'absorbeur ».

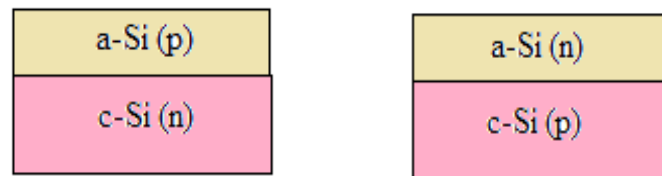


Figure III.1 : Structures des cellules PN/NP

Les différents paramètres pour les différentes couches sont donnés dans le tableau III.1 [39-42].

Tableau III. 1: Différents paramètres pour les deux couches des cellules modélisées

Paramètre	a-Si (p)	c-Si (n)	a-Si (n)	c-Si (p)
Epaisseur (nm)	10	300.000	5	300.000
Permittivité diélectrique	11,9	11,9	11,9	11,9
Affinité électronique (eV)	3,9	4,05	3,9	4,05
Energie de gap (eV)	1,72	1,124	1,72	1,124
Densité efficace de la bande de conduction (cm ⁻³)	1,00 10 ²⁰	2,85 10 ¹⁹	1,00 10 ²⁰	2,85 10 ¹⁹
Densité efficace de la bande de valence (cm ⁻³)	1,00 10 ²⁰	2,69 10 ¹⁹	1,00 10 ²⁰	2,69 10 ¹⁹
Mobilité électronique (cm ² V ⁻¹ s ⁻¹)	20	1111	20	1041
Mobilité des trous (cm ² V ⁻¹ s ⁻¹)	5	421,6	5	412,9
Concentration des accepteurs (cm ⁻³)	7,47 10 ¹⁹	0	0	1,50 10 ¹⁶
Concentration des donneurs (cm ⁻³)	0	1,50 10 ¹⁶	6,89 10 ¹⁹	0
Vitesse thermique des électrons (cm s ⁻¹)	1,00 10 ⁰⁷	1,00 10 ⁰⁷	1,00 10 ⁰⁷	1,00 10 ⁰⁷
Vitesse thermique des trous (cm s ⁻¹)	1,00 10 ⁰⁷	1,00 10 ⁰⁷	1,00 10 ⁰⁷	1,00 10 ⁰⁷
Densité de la couche (g.cm ⁻³)	2,328	2,328	2,328	2,328
Coefficient de recombinaison Auger pour les électrons (cm ⁶ s ⁻¹)	0	2,20 10 ⁻³¹	0	0
Coefficient de recombinaison Auger pour les trous (cm ⁶ s ⁻¹)	0	9,90 10 ⁻³²	0	0
Coefficient de recombinaison de bande à bande (cm ³ s ⁻¹)	0	0	0	0

II.1 Caractéristique J-V

Les caractéristiques J-V de a-Si (p)/c-Si (n) et de a-Si (n)/c-Si (p), les structures (a) et (b) (Fig.III.1), sont calculées dans les conditions standard (300 °C, AM1.5) et elles représentées dans la figure.III.2.

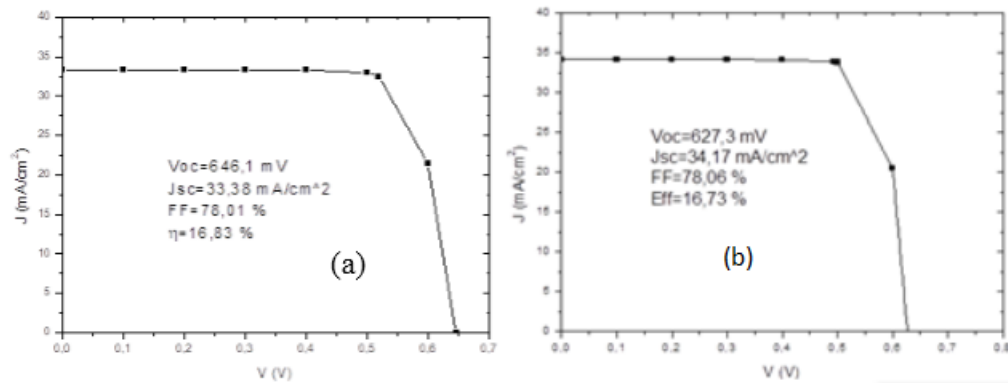


Figure III.2 : Caractéristiques J-V a) a-Si (p)/c-Si (n) et b) de a-Si (n)/c-Si (p).

Les paramètres V_{oc} , J_{sc} , FF et η sont résumé dans le tableau suivant :

Tableau III. 2 les performances des deux structures de référence.

	$V_{oc}(mV)$	$J_{sc}(mA/cm^2)$	FF (%)	η (%)
P-N	646.1	33.38	78.01	16.83
N-P	627.3	34.17	78.06	16.73

II.2 Influence de l'épaisseur de la couche a-Si

Dans cette partie on va représenter dans la figure III.3 la variation du V_{oc} , J_{sc} , FF et η en fonction de l'épaisseur de la couche émettrice (a-Si) pour les deux cellules :

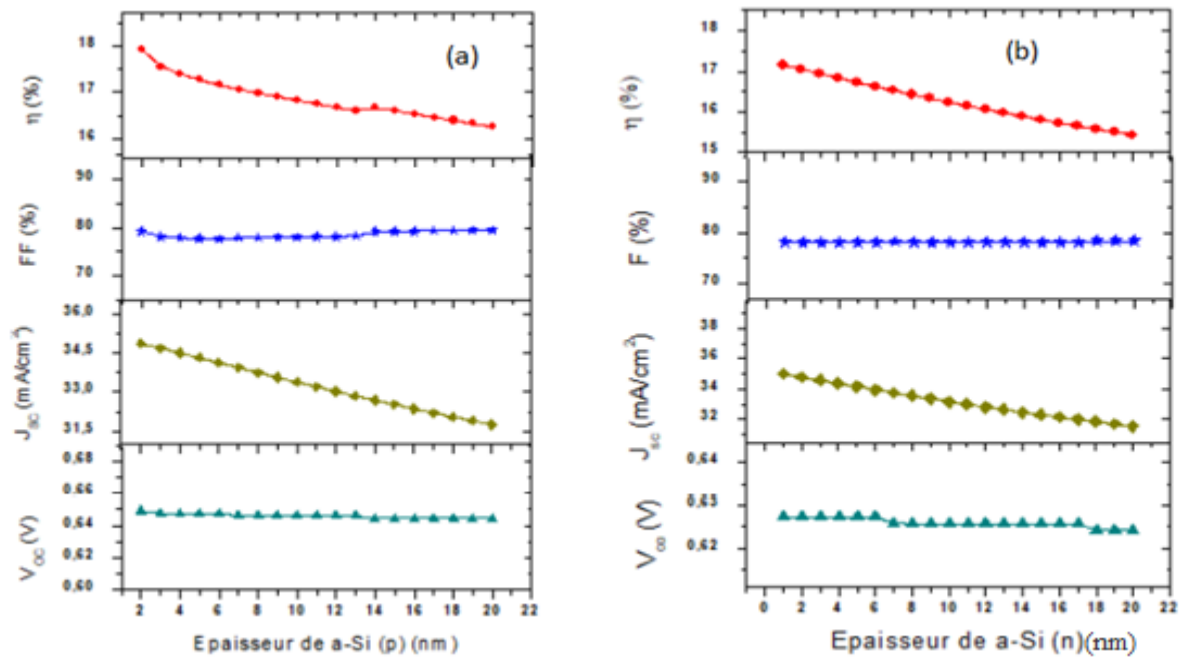


Figure III.3 : L'effet de l'épaisseur de a-Si sur les performances de la cellule HJ.

Selon la figure III.3 on a deux cas d'HJ, P-N ça veut dire a-Si de type P et l'HJ N-P alors le a-Si de type N.

Pour le 1^{er} cas (a), l'augmentation de l'épaisseur conduit a une déminution de J_{sc} de 35.01mA/cm² à 31.76 mA/cm² et de η de 18.30 % à 16.25 % de la cellule solaire. Pour le FF et V_{oc} ils restent presque constante.

Pour le 2^{iem} cas (b), on a toujours une déminution de J_{sc} de 35mA/cm² à .31.54 mA/cm², et une déminution de η de 17.15 % à 15.43 %. pour les 2 autre paramètre FF et V_{oc} ils restent toujours constante.

L'augmentation de l'aipaisseur dûe à l'augmentation de la longueur de diffusion ca veut dire qu'on a un augmentation des pertes d'absorption dans la couche émittrice qui est explique la diminution de J_{sc} , et puisque cette dernière est en relation avec le rendement on a remarque qu'il a dimunue aussi.

D'après ces résultats et pour les deux cas, les meilleurs performances sont obtenues avec une épaisseur de 2 nm mais cette épaisseur est difficilement maitrisable en laboratoire. Pour cela on a choisi une valeur opyimale de 4 nm comme épaisseur de la couche de silicium amorph.

II.2 Influence de l'épaisseur de la couche c-Si

La figure III.4 montre l'effet de l'épaisseur de silicium cristallin (couche absorbante) sur les performances de la cellule modélisée.

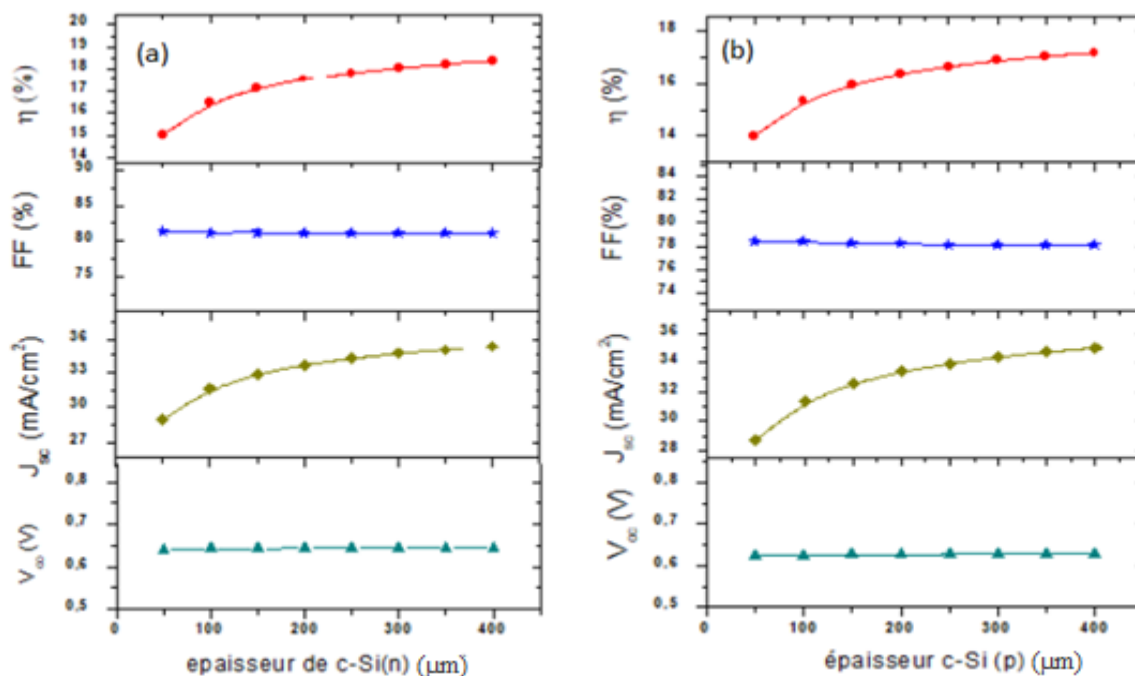


Figure III.4 : l'effet de l'épaisseur de c-Si sur les performances de la cellule – HJ.

Dans cette partie on a étudié l'effet de l'épaisseur de c-Si sur les performances des deux structures (a) et (b). On remarque que il y'a les mêmes changements des V_{oc} , J_{sc} , FF, η tel qu'il y'a une augmentation de η de 15.02 % à 18.39 % et une augmentation de J_{sc} de 28.94 mA/cm² à 35.25 mA/cm² en fonction de l'augmentation de l'épaisseur pour le c-Si de type N. Aussi, une augmentation de η de 14 % à 17.17 % et de J_{sc} de 28.68 à 35.04 pour le c-Si de type P.

Pour le FF et V_{oc} ils sont constants pour les deux types. On explique ce changement, à cause de l'augmentation d'épaisseur, ce qui est conduit à l'augmentation de nombre des porteurs de charge électrons et des trous dans la couche absorbante.

Le meilleur résultat que nous avons obtenu a été réalisé avec une épaisseur de c-Si de 400μm. Mais on a choisi une épaisseur de 200 μm de c-Si puisqu'il nous donne des performances importantes en utilisant d'épaisseur réduit.

III.3 Influence de dopage de la couche a-Si

Dans cette partie on va parler sur un autre paramètre qui est la concentration de dopage. Ce dernier a une influence très importante sur le comportement de la cellule PV.

L'effet de la concentration de dopage de la couche émettrice pour les deux structure (a) et (b) sont montré dans la figure III.5 suivant.

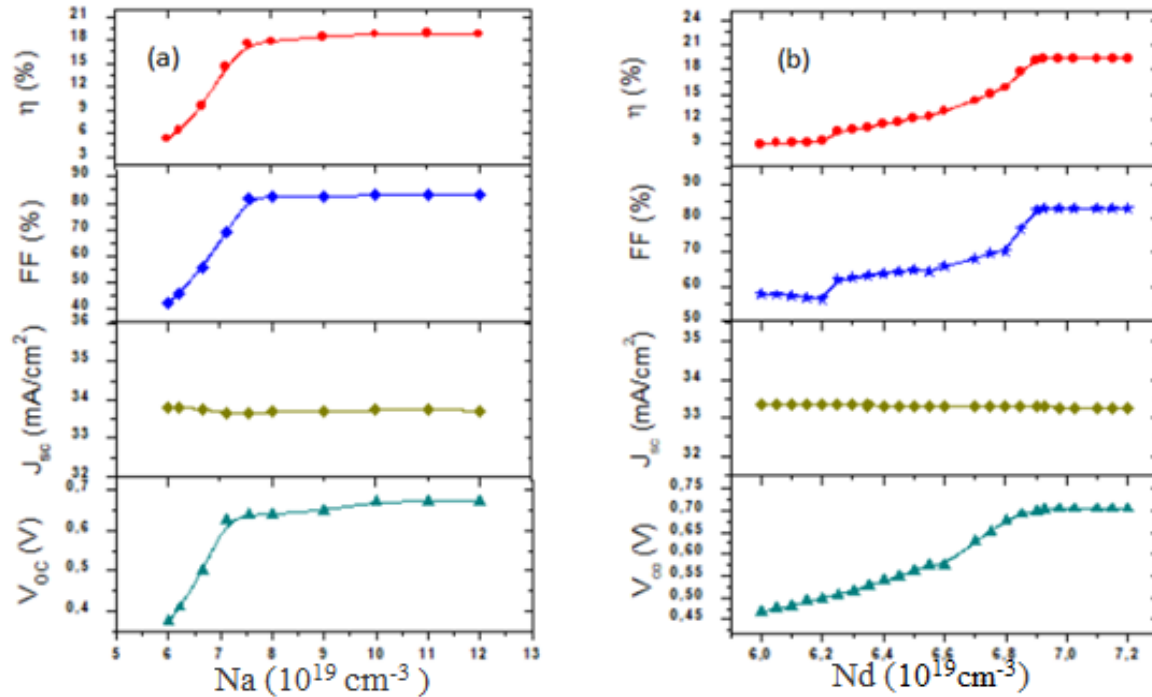


Figure III.5 : influence de la concentration de dopage de la couche émettrice sur les performances des cellules (a) et (b).

Dans la figure III.5(a), nous remarquons que les performances V_{oc} , FF et η augmentent quand N_a augmente [V_{oc} de 375.78mV à 671.09 mV ; FF de 42.10% à 83.79% ; η de 5.34% à 19%], mais au-dessus de la valeur 1.5×10^{20} ils deviennent constante. Pour le J_{sc} il reste presque constant. D'après ces résultats on a choisi $1.5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ comme une valeur optimale.

Dans la figure III.5(b), qui montre l'effet de la concentration de dopage de la couche a-Si de la jonction N-P sur les performances de la cellule étudié. Cette figure indique que la concentration de dopage influence principalement sur V_{oc} , FF et η , d'autre part J_{sc} reste constante [V_{oc} : 467.97mV \Rightarrow 703.97mV ; FF : 57.75% \Rightarrow 82.96% ; η : 9.01% \Rightarrow 19.42% ; $J_{sc} \approx 33 \text{ mA/cm}^2$]. D'après les résultats obtenus nous considérons que N_d sera $7.075 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ puisqu'elle nous donne une bonne performance.

III.4 Influence de dopage de la couche c-Si

L'effet de la concentration de dopage de c-Si (couche absorbante) pour les deux cellules sur ses performances est montré dans la figure suivant :

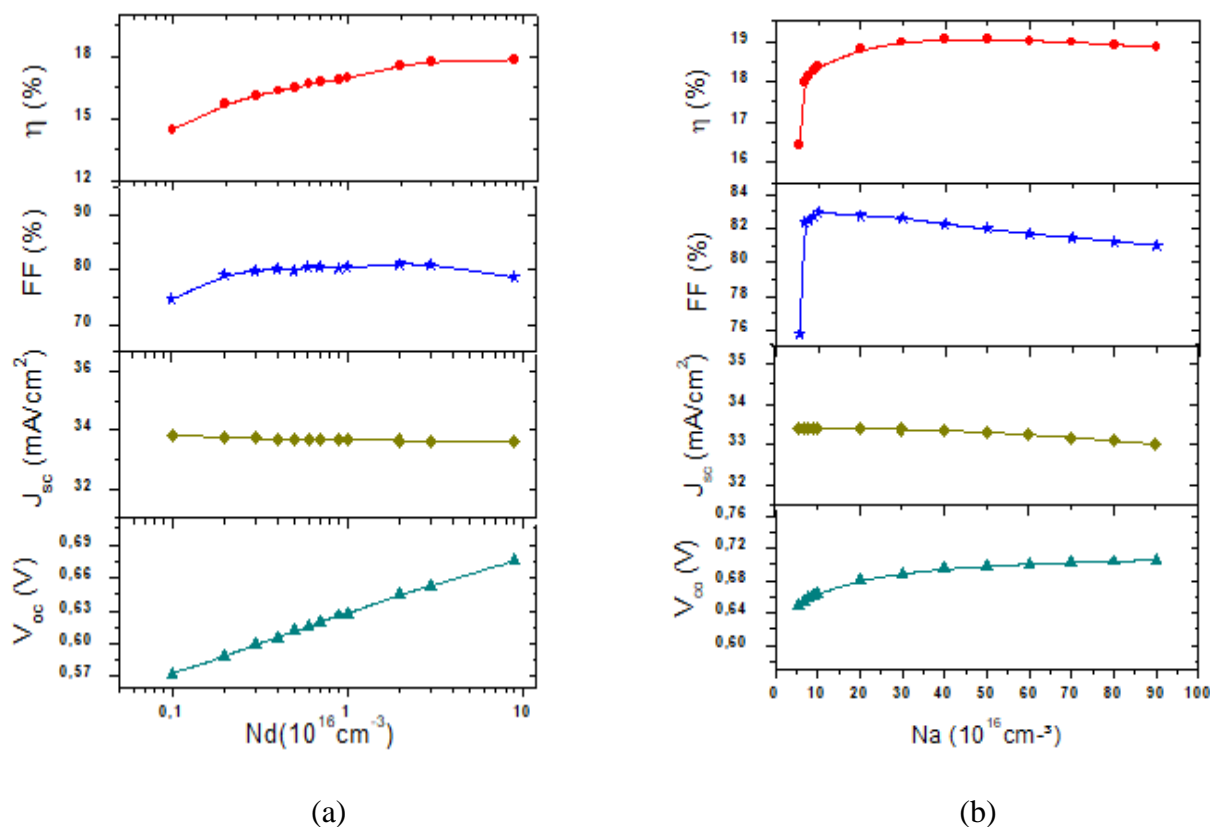


Figure III.6 : influence de la concentration de dopage de c-Si sur les performances des cellules PV

D'après cette figure III.6(a) nous remarquons que V_{oc} et η augmentons quand N_d augmente autant que J_{sc} reste presque constante (V_{oc} de 572.66 à 675.78V, η de 14.45 à 17.84 %, $J_{sc} \approx 33.6 \text{ mA/cm}^2$). Pour le facteur de forme (FF) on remarque qu'il augmente avec l'augmentation de N_d mais aux dessus de $1 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ il commence à déminue de 80.33 à 78.56%. Pour cela on a choisi $5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ comme une valeur optimale.

Dans la figure III.6(b) on a presque les mêmes changements des performances, on remarque l'augmentation de V_{oc} de 649.22 à 705.47 V, et le η de 16.41 à 18.86 % avec l'augmentation de N_a . D'autre part le J_{sc} il est presque constant à la valeur 33 mA/cm². On remarque aussi que le facteur de forme augment au début entre 75.73 à 82.93 après il diminue jusqu'à 80.99%. D'après ces résultats on prend $5 \cdot 10^{17}$ comme une concentration de dopage de c-Si dans la jonction N-P.

La figure III.7 montre les performances pour les deux structures (Figure III.1) après l'optimisation de l'épaisseur et la concentration de dopage de chaque couche.

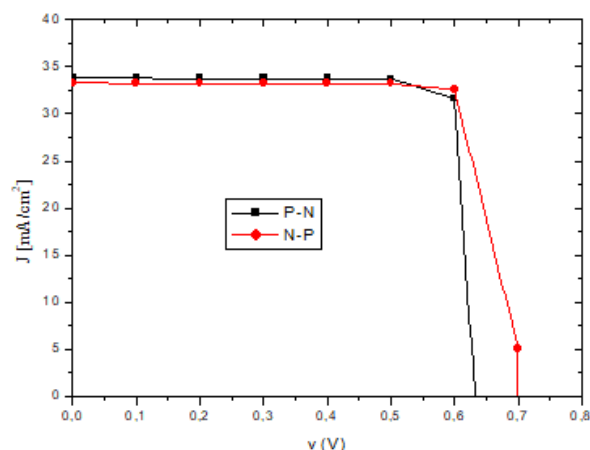


Figure III.7 : caractérisation J-V

D'après cette caractérisation J-V, on retire les performances obtenues, qui sont représentés dans le tableau III.3 suivant.

Tableau III. 3 les performances obtenues

	$V_{oc}(mV)$	$J_{sc} (mA/cm^2)$	$FF (%)$	$n(\%)$
P-N	671.1	33.76	82.99	18.8
N-P	703,9	33,25	82.99	19,42

III. L'effet de l'insertion de la couche BSF

Dans cette partie on ajoute une couche BSF « back surface Field », tel que on va ajouter une couche a-Si de type N à la face arrière de la jonction PN (une couche de a-Si de type P à la face arrière de la jonction NP). Les structures des cellules solaires sont affichées dans la figure III.8.

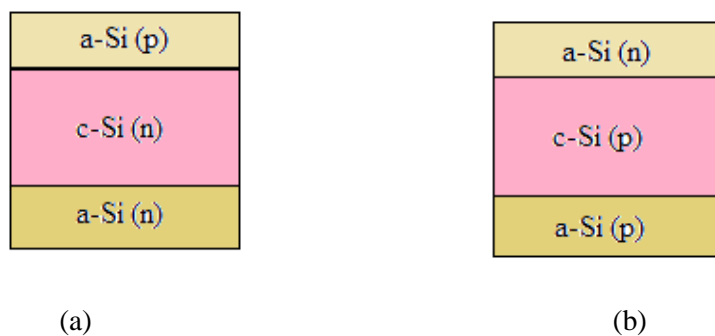


Figure III.8 : structures des cellules HJ avec couche BSF (a-Si(p)/ c-Si(n)/a-Si(n) et a-Si(n)/ c-Si(p)/a-Si(p))

Dans le tableau III.4 nous avons défini les différents paramètres utilisés dans les deux couches BSF [41-44].

Tableau III. 4 Différents paramètres pour les deux couches BSF des cellules modélisées.

Paramètre	a-Si (n)	a-Si (p)
Epaisseur (nm)	4	4
Permittivité diélectrique	11,9	11,9
Affinité électronique (eV)	3,9	3,9
Energie de gap (eV)	1,72	1,72
Densité efficace de la bande de conduction (cm ⁻³)	1,00*10 ²⁰	1,00*10 ²⁰
Densité efficace de la bande de valence (cm ⁻³)	1,00*10 ²⁰	1,00*10 ²⁰
Mobilité électronique (cm ² V ⁻¹ s ⁻¹)	20	20
Mobilité des trous (cm ² V ⁻¹ s ⁻¹)	5	5
Concentration des accepteurs (cm ⁻³)	0	1,01*10 ²⁰
Concentration des donneurs (cm ⁻³)	7,32*10 ¹⁹	0
Vitesse thermique des électrons (cm s ⁻¹)	1,00*10 ⁷	1,00*10 ⁷
Vitesse thermique des trous (cm s ⁻¹)	1,00*10 ⁷	1,00*10 ⁷
Densité de la couche (g.cm ⁻³)	2,328	2,328
Coefficient de recombinaison Auger pour les électrons(cm ⁶ s ⁻¹)	0	0
Coefficient de recombinaison Auger pour les trous(cm ⁶ s ⁻¹)	0	0
Coefficient de recombinaison de bande à bande (cm ³ s ⁻¹)	0	0

III.1 caractérisation J(V)

Après l'ajoute de couche BSF on a calculée, à l'aide le logiciel AFORS-HET, les caractéristiques J-V qui sont calculés dans les condition standard (T= 300K, AM = 1.5, $\Phi=1000\text{w/m}^2$). La figureIII.8 représente les deux caractéristiques J-V.

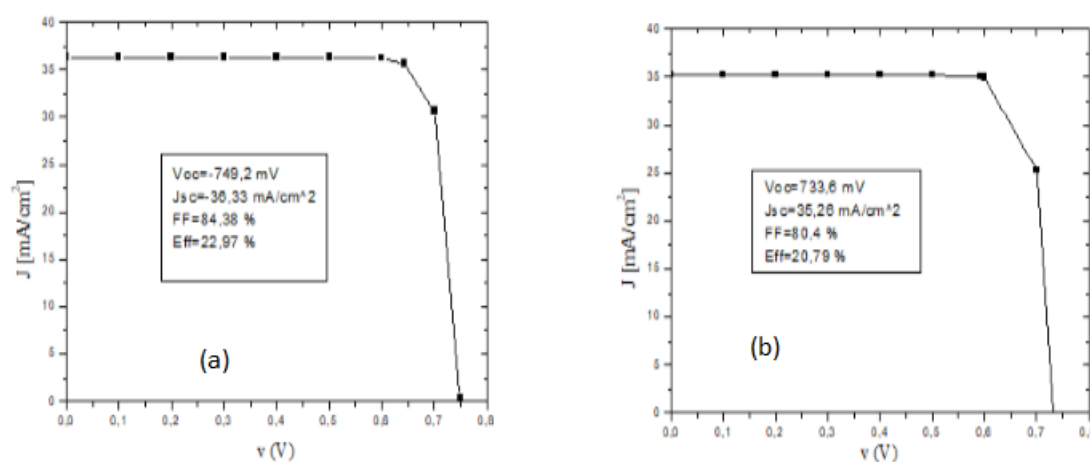


Figure III.9 : caractérisation J-V des deux cellules étudiées

D'après ces caractéristiques J-V on retire les résultats qui sont résumé dans le tableau III.5.

Tableau III.5: les paramètres obtenus

	$V_{oc}(mV)$	$J_{sc} (mA/cm^2)$	$FF (%)$	$n (%)$
P-N	749.2	36.33	84.38	22.97 %
N-P	733.6	35.26	80.4	20.79

III.2 Influence de dopage de la couche BSF

Influence des concentrations de dopage N_a et N_d de la couche BSF sur les performances des cellules sont présentés sur la figure III.10.

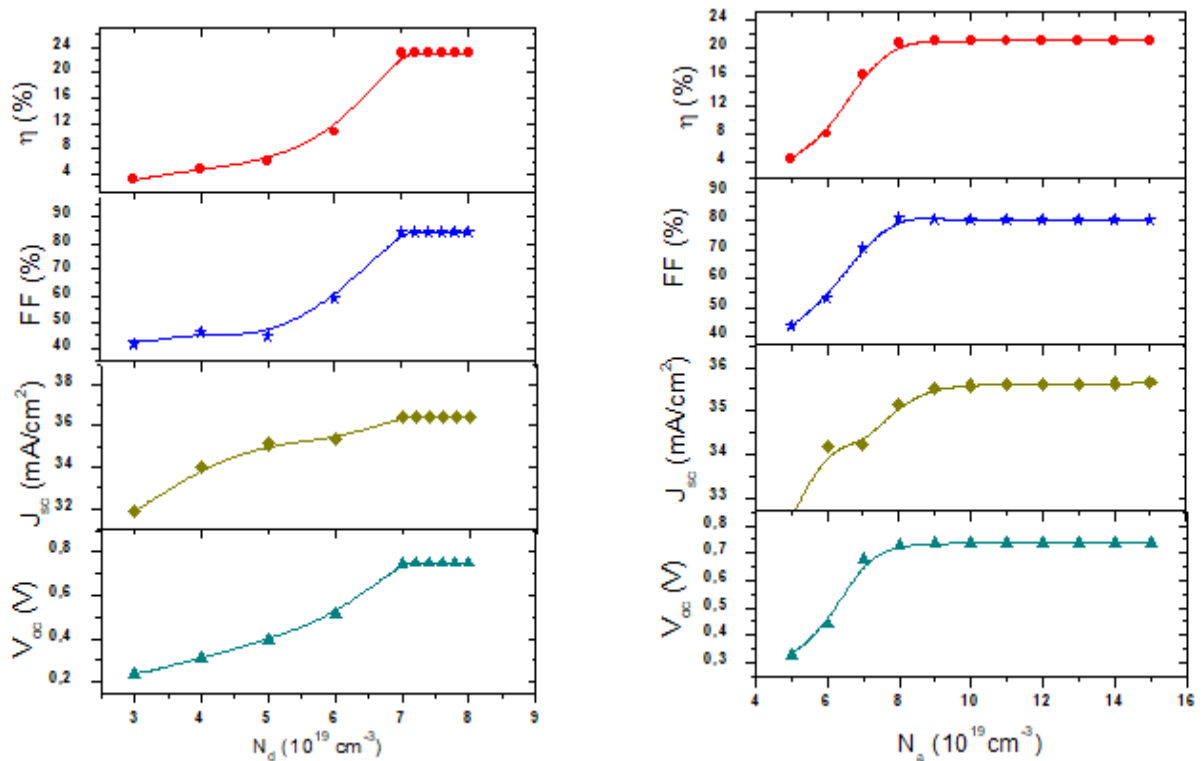


Figure III.10 : effet de concentration de dopage de la couche BSF sur les performances des cellules

D'après cette figure on remarque que les quatre paramètres augmentent quand la concentration de dopage de la couche BSF augmente.

Pour le premier cas (Structure (a)) qui concerne la couche BSF (a-Si (n)), on remarque que les performances augmentent (V_{oc} : 235.16-750.78 mV, J_{sc} : 31.87-36.42 mA/cm^2 , FF : 41.77-84.23%, η : 3.13-23.03%) quand la concentration de dopage de la couche BSF

augmente de $3 \cdot 10^{19}$ à $7.2 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$; après cette valeur ils seront constants (saturés). Pour cela nous considérons que N_d de $7.9 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ une concentration de dopage optimale.

Pour la deuxième (a-Si (p) comme couche BSF), quand N_d augmente de $5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ à $15 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, les performances augmente également (V_{oc} : 328.91 à 738.28 mV ; J_{sc} : 32.50 à 35.64 mA/cm² ; FF : 43.31 à 81.27 % ; η : 4.62 à 21.07) mais au-dessus de $1.5 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ils seront saturés, de sorte qu'une valeur optimale de $1.5 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ peut être choisie.

III.3 L'influence de l'énergie de gap de la couche BSF

Dans cette section nous explorons l'influence d'énergie de gap de la couche BSF sur les performances des cellules PV. La figure III.11 montre cette influence.

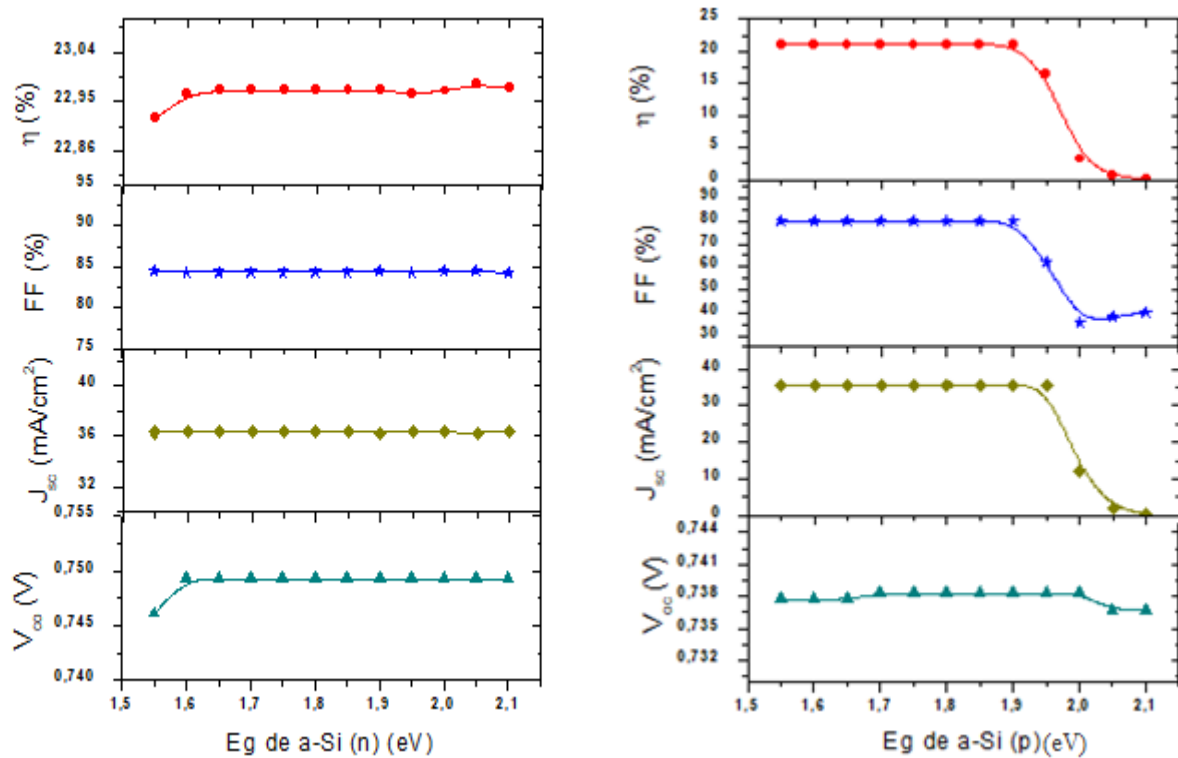


Figure III.11 : l'effet de Eg de la couche BSF sur les performances de la cellule HJ.

D'après cette figure, pour la structure a-Si(p)/ c-Si(n)/a-Si(n), nous pouvons voir que quand énergie de gap augmente entre 1.55 ev et 1.65 ev le V_{oc} et η augmentent ; après cette valeur 1.65 eV ils deviennent constants (V_{oc} = 749.22 mV ; η =22.97%). Au temps que le J_{sc} et le FF demeurent constante (J_{sc} =36.33 mA/cm² ; FF=84.58%). De préférence Eg sera égale 1.72 ev pour obtenir des bonnes performances.

Pour la structure a-Si(n)/ c-Si(p)/a-Si(p), les trois performances J_{sc} , FF et η ($J_{sc}=35.6\text{mA/cm}^2$; $FF=80.27\%$; $\eta=21.07\%$) seront constante en fonction de l'augmentation de l'énergie de gap entre 1.55 ev et 1.9 ev mais ils diminuent depuis cette dernière valeur jusqu'à 2.1eV. Pour le V_{oc} nous voyons une légère baisse de 737.72 à 736.72 mV/cm² donc on peut dire qu'il est presque constant. D'après ces résultats, les meilleures performances sont obtenues avec une énergie de gap de de 1.72 eV

III.3 L'influence de l'énergie de gap de la couche émettrice

Dans cette partie on va voir l'effet de changement d'énergie de gap de la couche émettrice sur les quatre paramètres V_{oc} , J_{sc} , FF et η de la cellule (figure III.12).

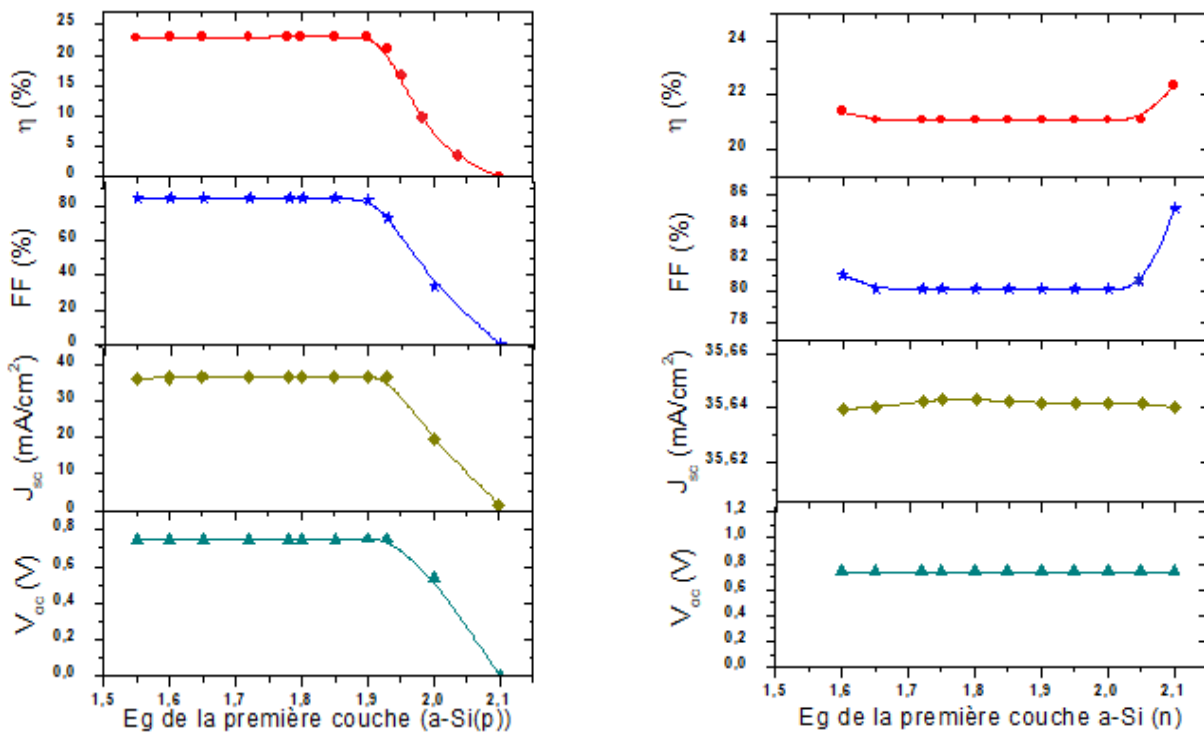


Figure III.12 : l'influence de E_g de la couche émettrice sur les performances des cellules HJ.

L'effet de l'énergie de gap de la couche émettrice sur les performances de la cellule photovoltaïque à base d'hétérojonction de silicium est montré dans la figure III.12.

Pour le premier cas a-Si(p), on a remarqué que l'augmentation de E_g influe sur les quatre paramètres après la valeur 1.85 ev tel que on a vu que les performances commencent à diminuer jusqu'à ils devront nul quand l'énergie de gap égale à 2.1 eV. D'un autre côté,

quand E_g augmente entre 1.55 eV et 1.85 eV les performances étaient presque constantes ($V_{oc}=746$ mV, $J_{sc}=36$ mA/cm² ; FF=84% et $\eta=22.9\%$).

La figure III.10 montre aussi l'influence de E_g de la 1^{er} couche sur les performances de la deuxième cellule. On remarque que le V_{oc} et le J_{sc} restent presque constants ($V_{oc}=738$ mV ; $J_{sc}=35$ mA/cm²). Pour le facteur de forme et le rendement, ils seront presque constants entre 1.55 et 2.05 eV d'énergie de gap. Après on remarque que les deux augmentent jusqu'à 85% pour le FF et 22% pour le η .

IV. Les performances de la cellule photovoltaïque HIT

Une cellule photovoltaïque HIT est une cellule HJ avec une couche de silicium amorphe intrinsèque.

Dans cette partie, on va présenter la simulation des performances d'une cellule photovoltaïque à base de a-Si(n)/ a-Si(i)/ c-Si(p)/a-Si(p) (Structure (a), figure III.1, avec l'insertion d'une couche a-Si(i) entre l'émetteur et l'absorbeur).

La figure III.13 présente la structure étudiée.

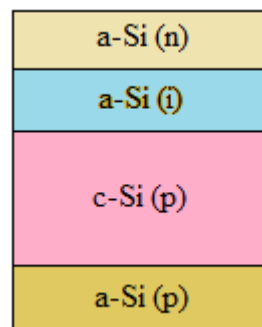


Figure III.13 : structure de la cellule HIT.

Les valeurs des paramètres qui sont utilisés dans cette couche sont affichées dans le tableau suivant.

Tableau III. 6 différents paramètres de la couche intrinsèque. [45]

Paramètre	a-Si (i)
Epaisseur (nm)	10
Permittivité diélectrique	11,9
Affinité électronique (eV)	3,9
Energie de gap (eV)	1,72
Densité efficace de la bande de conduction (cm ⁻³)	1,00*10 ²⁰
Densité efficace de la bande de valence (cm ⁻³)	1,00*10 ²⁰
Mobilité électronique (cm ² V ⁻¹ s ⁻¹)	20
Mobilité des trous (cm ² V ⁻¹ s ⁻¹)	5
Concentration des accepteurs (cm ⁻³)	0
Concentration des donneurs (cm ⁻³)	0
Vitesse thermique des électrons (cm s ⁻¹)	1,00*10 ⁰⁷
Vitesse thermique des trous (cm s ⁻¹)	1,00*10 ⁰⁷
Densité de la couche (g.cm ⁻³)	2,328
Coefficient de recombinaison Auger pour les électrons (cm ⁶ s ⁻¹)	0
Coefficient de recombinaison Auger pour les trous (cm ⁶ s ⁻¹)	0
Coefficient de recombinaison de bande à bande (cm ³ s ⁻¹)	0

IV.1 Caractérisation J-V

La figure III.14 montre la caractéristique J-V de la cellule étudiée qui sont calculé après l'ajoute de la couche intrinsèque.

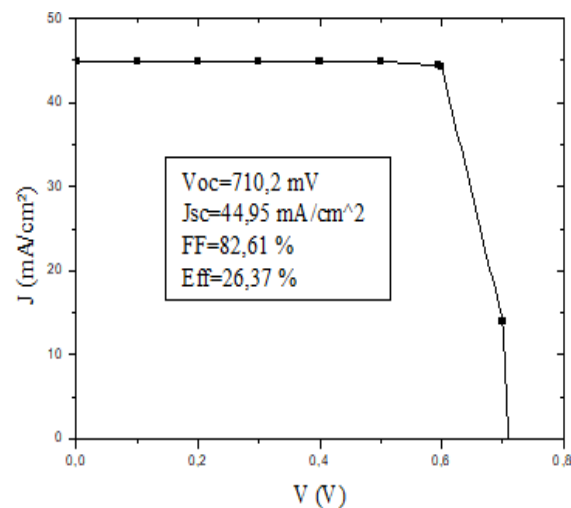


Figure III.14 : Caractéristique J-V de la structure étudiée.

D'après la figure III.14, l'insertion d'une couche de silicium amorphe intrinsèque entre l'émetteur et l'absorbeur conduit à l'amélioration des performances de la cellule photovoltaïque

à hétérojonction de silicium, où on a une augmentation du rendement par 4% et ça due à l'élargissement de la zone de charge d'espace entre l'émetteur et l'absorbeur.

IX. Conclusion

Dans ce chapitre, les effets de la concentration de dopage et l'épaisseur de différents couches, l'insertion de la couche BSF et la variation de l'énergie de gap des couches émettrices et BSF sont étudiées à l'aide de logiciel AFORS-HET.

D'autre part, on a montré que les performances de la cellule solaire sont améliorées à la présence d'une couche de silicium amorphe intrinsèque. Un rendement de 26,37% pourrait être obtenu. Les valeurs des paramètres pertinents sont les $V_{OC}=710$ mV, $J_{SC}=44,95$ mA/cm² et FF de 82,61%.



Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce travail nous avons présenté une étude théorique et simulation des cellules solaire à hétérojonction à base de silicium. Nous avons simulé deux structures des cellules à hétérojonction de type a-Si(p)/c-Si(n) et a-Si(n)/c-Si(p) à l'aide de logiciel Afors-Het. Tel que on a déterminé l'influence de certaine paramètres (épaisseur, concentration de dopage de chaque couche et l'énergie de gap de silicium amorphe) sur les performances de ces cellules : tension de circuit ouvert V_{oc} , courant de court-circuit J_{sc} , facteur de forme FF et le rendement η .

Les résultats obtenus montrent que chaque changement des paramètres qui sont étudié à une grande influence sur les performances de la cellule étudiée. On a commencé notre étude par deux structures a-Si(p)/c-Si(n) et a-Si(n)/c-Si(p) qui ont les performances suivantes : $V_{oc}=646.1$ mV, $J_{sc}=33.38$ mA/cm², FF =78.01%, $\eta=16.83\%$ et $V_{oc}=627.3$ mV, $J_{sc}=34.17$ mA/cm², FF =78.06%, $\eta=16.73\%$ respectivement.

Dans la première partie nous avons étudié l'influence de l'épaisseur sur les performances des cellules. Les résultats montrent que l'épaisseur de l'émetteur doit être le plus faible possible pour éviter l'absorption dans cette couche. Pour la couche c-Si l'augmentation de l'épaisseur nous donne une augmentation de courant de court-circuit et ça nous donne une augmentation de rendement. Pour cela on a choisi 4 nm comme une épaisseur de la couche émettrice (silicium amorphe) et 200 μ m de la couche absorbante.

Concernant la deuxième partie, on a ajouté une couche BSF. Nous avons étudié le dopage et l'énergie de gap de cette couche. Ces deux paramètre influent sur performance tel que on a montré que l'augmentation de dopage signifie l'augmentation des performance et l'augmentation de l'énergie de gap change ces performances aussi. Comme un résultat on peut dire que l'insertion de la couche BSF augment les performances des cellules solaires.

La troisième partie de simulation consiste l'insertion de la couche intrinsèque entre la couche émettrice et la couche absorbante. Cette dernière montre qu'elle a un grand rôle à l'augmentation des performances. Comme un résultat de notre simulation, nous avons obtenu les performances suivantes : $V_{oc}=710$ mV, $J_{sc}=44,95$ mA/cm², FF =82,61% et $\eta=26,37\%$ pour la cellule a-Si(n)/a-Si(i)/c-Si(p)/a-Si(p).

Références

- [1] khadraoui Zakaria « étude d'une centrale solaire thermique », thèse de master, université de Badji Mokhtar, Annaba 2017.
- [2] Frédéric marquet « analyse de la rentabilité des sources d'énergie renouvelable en région wallonne », thèse de master, école de gestion de l'université de liège, 2017.
- [3] <https://www.connaissancedesenergies.org>.
- [4] Fairouz Kendouli « etat de l'art et modélisation des microcentrales », thèse magister, université de constantine, 2017.
- [5] Goetzbergera, C. Heblinga, H. Schockb, "Photovoltaic materials, history, status and outlook" Materials Science and Engineering (2003) 1–46.
- [6] Mlle Zerrouki Zolikhha & Mlle BEREKSI REGUIG Rym « Dimensionnement d'un système photovoltaïque autonome », these de master, université abou bakr belkaid, tlemcen,2017
- [7] Bouguetaia Nadia,« Contribution à l'Etude et à la Simulation d'un Concentrateur Cylindro-Parabolique», thèse de magister, université de constantine,2013.
- [8] Trahi Fatiha « application pour le dimensionnement d'une installation photovoltaïque pour l'alimentation du laboratoire de recherche LAMPA » thèse de magister, université de Tizi-Ouzou,2011.
- [9] Bouzaki Mohammed Moustafa « Etudes comparées et modélisation des performances des différentes technologies de cellules photovoltaïques en vue du dimensionnement des systèmes et installations photovoltaïques », thèse de doctorat, université de Tlemcen, 2016
- [10] Mr.Abderrazek Mahfoude « modélisation des cellules solaires tandem à couches minces et à haut rendement »,thèse de doctorat, université stif,2015
- [11] Thomas Mambrini « Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implantation et en fonction des différentes technologies », Thèse de doctorat, Université Paris-Sud, école doctorale : STITS,2014.

[12] N. Benaouda, R. Aiouaz et M. Abersi « Réponses spectrales et des caractéristiques I - V des cellules solaires au silicium », Revue des Energies Renouvelables ICRES-07 Tlemcen (2007) 145 – 150.

[13] Emilie Steveler « Etude des mécanismes de photoluminescence dans les nitrures et oxydes de silicium dopés aux terres rares (Er, Nd) », thèse de doctorat, université de lorraine,2012.

[14] M. Belarbi , A. Benyoucef, B. Benyoucef «STUDY OF THE EQUIVALENT CIRCUIT OF A DYESENSITIZED SOLAR CELLS», Advanced Energy: An International Journal (AEIJ), Vol. 1, No. 2, April 2014

[15] Mr. Messaoudene Hichem, « Détermination intelligente de la puissance maximale des modules photovoltaïques», thèse de Magister, université al hadj lakhdar batna, 2014

[16] NREL, http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency_chart.jpg.

[17] Harold Kintz « Réalisation de couches minces nano composites par un procédé original couplant la pyrolyse laser et la pulvérisation magnétron : application aux cellules solaires tout silicium de troisième génération », thèse de doctorat, université paris sud,2013.

[18] Salaheddine Bensalem, « Effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires », Thèse magister, université FERHAT ABBAS – SETIF,2011

[19] BenghabriT Siham « Elaboration et caractérisation de couches minces CdS par bain chimique CBD pour application photovoltaïque », thèse de doctorat, université de mohamed boudiaf, oran,2015

[20] W. Fuhs, K. Niemann et J. Stuke, « Heterojunctions of amorphous silicon and crystalline single crystals »,Tetrahedrally bonded amorphous semiconductors, p. 345–350, 1974.

[21] Wilfried FAVRE «Silicium de type n pour cellules à hétérojonctions : caractérisations et modélisations» Thèse de doctorat, université PARIS-SUD 11,2011.

[22] Sylvain De Vecchi. « Développement de cellules photovoltaïques à hétérojonction de silicium et contacts interdigités en face arrière ». Matériaux. INSA de Lyon, 2013.

- [23] Raphaël LACHAUME, « Contribution à la caractérisation électrique et à la simulation numérique des cellules photovoltaïques silicium à hétérojonction », Thèse de doctorat, UNIVERSITÉ DE GRENOBLE, 2006
- [24] L. Zhao, C.L.Li “Design optimization of bifacial HIT solar cells on p-type silicon substrates by simulation” Solar Energy Materials & Solar Cells 92 (2008) 673-681.
- [25] J.M.Romàn, “State-of-the-art of III-V Solar Cell Fabrication Technologies, Device Designs and Applications”, Advanced Photovoltaic Cell Design, EN548, 2004.
- [26] Hfayed Massika « Simulation numérique d’une Cellule solaire (p/n) en GaAs », Mémoire de fin d’étude en Master, Univ-Biskra, 2014.
- [27] Laurent Schlur. « Elaboration de cellules photovoltaïques hybrides solides à base d’oxyde de zinc nanostructuré. Thèse the doctorat. Université de Strasbourg, 2012 »
- [28] Djicknoum DIOUF « Cellules photovoltaïques silicium à hétérojonctions et à structure interdigitée en face arrière », thèse de doctorat, université Paris-sud, 2010.
- [29] Rahmouni Mawahib « Etude des cellules photovoltaïques ‘HET’ en vue d’améliorer leur rendement » thèse de doctorat, l’université des sciences et de la technologie d’Oran Mohamed Boudiaf, 2010.
- [30] Yannick Veschetti « modélisation, caractérisation et réalisation de nouvelles structures photovoltaïques sur substrat de silicium mince » thèse de doctorat, université de louis pasteur, Strasbourg, 2005.
- [31] Rahmani Abderrahmane et Selmani kadda «Etude des performances d’une cellule photovoltaïque à hétérojonctions», thèse de master, universite dr. moulay tahar-saida, 2017.
- [32] RACHED Djaaffar « Etude et modélisation d’une cellule HIT à base de silicium polymorphe», thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d’Oran, 2010.
- [33] Kahoul fouad « Caractéristique électrique d’une cellule solaire à hétérojonction a-Si: H/ μ c-Si», thèse de master, Université Mohamed Khider Biskra, 2014

- [34] Abaidia Abdelghafour et Dahmane Abderrahmane « Simulation d'une cellule solaire photovoltaïque à base d'hétérojonction : a-Si:H(n)/c-Si(p) » mémoire pour un master académique, université de Ouargla, 2016,
- [35] MOHAMMED-KRARROUBI Asmaa « Structure Oxyde / Métal / Oxyde destinée à remplacer les oxydes transparents conducteurs classiques dans les cellules solaires par effet photovoltaïque » mémoire de magister université d'Oran, 2012, page13.
- [36] David Reaux « Cellules photovoltaïques à hétérojonctions de silicium (a-Si :H/c-Si) : modélisation des défauts et de la recombinaison à l'interface » archives HAL.
- [37] Djicknoum Diouf, Jean-Paul Kleider, and Christophe Longeaud « Two-Dimensional Simulations of Interdigitated Back Contact Silicon Heterojunctions Solar Cells» Chapter 15.
- [38] MECHERI ABDESLEM, SANDALI ABD ELAZIZ « Simulation d'une cellule solaire photovoltaïque à base d'hétérojonction : a-Si:H(n)/c-Si(p)» mémoire pour un master académique. 2015, page46
- [39] G.Z.Nie ; C.I.Zhoug. L.E.Luo ;Y.Xu.«A modification of usual C-V measurement to more precisely characterize the band offsets in a-Si:H/c-Si heterojunctions», journal of results in phys 2211-3797 (2015).
- [40] Melis Bilgic Aksaria, Aynur Erayba*«Optimization of a-Si:H/c-Si Heterojunction Solar Cells By Numerical Simulation»,Energy Procedia 10 (2011) 101 – 105.
- [41] Miroslav Mikolasek, Juraj Racko, Ladislav Harmatha, Pavol Gaspierik, Pavol sulta «influence of the broken symmetry of defect distribution at the a-Si:H/c-Si interface on the performance of heterojunction solar cells», applied surface science 256(2010) 5662-5666.
- [42] Sukhbir singh; Sushil Kumar; Neeraj Dwivedi «Band gap optimization of p-i-n layers of a-Si: by computer aided simulation for development of efficient solar cell», solar energy 86(2012) 1470-1476.
- [43] Xixing Wen, Xiangbin Zeng, Wugang liao, Qingsong Lei, Sheng Yin «An approach for improving the carriers transport properties of a-Si:H/c-Si heterojunction solar cells with efficiency of more than 27%», solar Energy 96(2013) 168-176.

[44] Wang Jianqiang, Gao Hua, Zhang Jian, Meng Fanying and Ye Qinghao «Investigation of an a-Si/c-Si interface on a c-Si(P) substrate by simulation», Journal of Semiconductors, Vol. 33, No. 3, March 2012.

[45] Abbas Belfar «the role of p^+ -layer dopant concentration, p^+ -layer band gap and p^+ -layer thickness in performances of a-Si:H n – i – p - p^+ solar cells with double layer window nanocrystalline silicon», Optik 126(2015) 5688-5693.

Résumé :

Dans ce travail nous avons présenté une étude théorique et simulation des cellules solaire à hétérojonction de silicium.

Nous avons simulé, à l'aide de logiciel Afors-Het, deux cellules photovoltaïques à hétérojonction de silicium avec les structures a-Si(p)/c-Si(n) et a-Si(n)/c-Si(p) où on a déterminé l'influence de certains paramètres (épaisseur, concentration de dopage de chaque couche et l'énergie de gap de silicium amorphe) sur les performances de ces cellules : tension de circuit ouvert V_{OC} , densité de courant de court-circuit J_{SC} , facteur de forme FF et le rendement η .

Comme un résultat de notre simulation, nous avons obtenu les performances suivantes : $V_{oc}=710$ mV, $J_{sc}=44,95$ mA/cm², FF=82,61% et $\eta=26,37\%$ pour la cellule a-Si(n)/a-Si(i)/c-Si(p)/a-Si(p).

Abstract :

In this work, we presented a theoretical study and simulation of solar cells with silicon heterojunction.

We have simulated, using Afors-Het software, two silicon heterojunction photovoltaic cells with the structures a-Si (p) / c-Si (n) and a-Si (n) / c-Si (p) where the influence of certain parameters (thickness, doping concentration of each layer and the amorphous silicon gap energy) on the performance of these cells was determined: open circuit voltage V_{oc} , short circuit current density J_{sc} , FF form factor and η yield.

As a result of our simulation, we obtained the following performances: $VOC = 710$ mV, $JSC = 44.95$ mA / cm², FF = 82.61% and $\eta = 26.37\%$ for the cell a-Si (n) / a-Si (i) / c-Si (p) / a-Si (p).

ملخص:

قدمنا في هذا العمل دراسة نظرية محاكاة الخلايا الشمسية المصنوعة من السليسيوم الغير متجانس لقد قمنا بمحاكاة بواسطة برنامج المحاكات Afors-Het ، خليتين كهرو ضوئيتين مصنوعتين من السليسيوم الغير متجانس ذات الهياكل التالية: (a-Si(p)/c-Si(n) et a-Si(n)/c-Si(p)) حيث تم تحديد تأثير بعض الخصائص (السلك، تركيز المنشطات لكل طبقة وطاقة فجوة السليكون غير المتبلورة) على أداء هذه الخلية: (جهد الدائرة المفتوحة، كثافة التيار للدائرة القصيرة، معامل الشكل، والمردود).

تحصلنا نتيجة لمحاكاة خصائص الخلية ذات الهيكل a-Si (n) / a-Si (i) / c-Si (p) / a-Si (p).

على النتائج التالية: $\eta = 26.37\%$ FF = 82.61% , $JSC = 44.95$ mA / cm², $VOC = 710$ mV,