

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البليدة  
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا  
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك  
Département d'Électronique



## Mémoire de Master

Filière Électronique  
Spécialité Micro-électronique

présenté par :

**EL Baoni Abdenour**

&

**Bendiba Mohamed Redha**

# Etude et Simulation d'une cellule photovoltaïque a hétérojonction (HIT) de silicium a-Si :H/c-Si

Proposé par : **M.Bedia Fatima Zahra**

Année Universitaire 2020-2021

## Remerciements

---

Avant tout, nous remercions Allah le tout puissant qui nous a donné le courage, la volonté, la santé et la patience de mener à terme ce présent travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon encadreur madame **Bedia Fatima Zahra** pour son encadrement efficace, ses conseils précieux et sa patience.

Ce mémoire n'aurait jamais pu voir le jour sans le soutien actif des membres de notre famille, surtout nos parents qu'ils nous ont toujours encouragé moralement et matériellement et à qui on tient à les remercier.

Enfin on tient à exprimer vivement nos remerciements avec une profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à sa réalisation, car un projet ne peut pas être le fruit d'une seule personne.

## **Dédicaces**

En témoignage d'amour et de respect à tous ceux qui me  
sont chers, je dédie ce modeste travail à :

Nos grandes familles.

Nos chers amis et enseignants.  
Remerciements particuliers au défunt

Monsieur Hamidat Abderrahmane  
Paix a son âme

Ainsi qu'à tous ceux qui m'ont aidé, soutenu et conseillé tout  
au long des épreuves qui ont donné lumière à ce travail.

Merci à tous

---

**ملخص:** الخلايا الكهروضوئية تحول الطاقة الضوئية مباشرة الى طاقة كهربائية. في هذا العمل قمنا بدراسة الخلايا الضوئية باستعمال خلايا السيليكون بتقنية الترابط الجوهري للأغشية الرقيقة تمكنا من الحصول على وسائط الخروج: كثافة التيار  $40.03 \text{mA/cm}^2$  و تواتر  $0.76 \text{V}$ ، و مردود كهربائي  $24.9\%$ . كما أجرينا دراسة حول تأثير سمك وتطعيم الباعث والقاعدة، كثافة العيوب، عمر حاملات الشحنات الاقلية، الوسائط الخارجية للخلية. من خلال هذا العمل، توصلنا إلى الاستنتاجات التالية: زيادة السمك يحسن المردود الكهربائي والمردود الكونتي للخلية. تؤدي الزيادة في كثافة الاشابة إلى الزيادة في المردود. تخفيض في سرعة اعادة تركيب الالكترونات على السطح يحسن المردود الكهربائي و المردود الكونتي

---

**Résumé :** Dans ce travail nous avons simulé et étudié le fonctionnement des cellules photovoltaïques HIT en silicium par la simulation sous éclairage avec un spectre AM1.5 effectuée sous le simulateur SCAPS. Les paramètres de sortie de la cellule sont : Le courant de court-circuit,  $J_{cc}=40.03 \text{ (mA/cm}^2\text{)}$ . La tension de circuit ouvert  $V_{co}=0.76 \text{V}$ . Le facteur de forme  $FF=84.86\%$ . Le rendement de conversion,  $\eta=25.74\%$ . L'influence des différents paramètres sur les caractéristiques de la cellule sont aussi étudiée. À travers ce travail, nous avons abouti aux conclusions suivantes : L'augmentation de l'épaisseur améliore le rendement électrique de la cellule et le rendement quantique. L'augmentation de l'épaisseur de la cellule améliore aussi le rendement électrique et quantique de la cellule. L'augmentation du dopage entraîne une augmentation dans le rendement. La diminution de la vitesse de recombinaison en surface améliore le rendement électrique, et le rendement quantique externe.

---

**Abstract:** In this work we simulated and studied the operation of silicon HIT photovoltaic cells by simulation under illumination with an AM1.5 spectrum performed under the SCAPS simulator. The cell output parameters are: short circuit current  $J_{sc}=40.03 \text{ (mA/cm}^2\text{)}$ , open circuit voltage  $V_{co}=0.76 \text{V}$ , form factor  $FF=84.86\%$  and conversion efficiency  $\eta=25.74\%$ . The influence of different parameters on cell characteristics is also studied. Through this work, we have come to the following conclusions: • Increasing thickness improves the electrical efficiency of the cell and the quantum yield. • Increasing cell thickness also improves electrical efficiency and quantum of the cell. • increased doping leads to increased performance. • Decreasing surface recombination speed improves the electrical efficiency, and external quantum efficiency.

---

<i>Symbole</i>	<i>Signification</i>	<i>Unité</i>
<i>AM</i>	<i>Masse d'air</i>	<i>Watt. m<sup>-2</sup></i>
<i>E</i>	<i>Energie des photons</i>	<i>J</i>
<i>h</i>	<i>Constante de Planck [6.626.10<sup>-34</sup>]</i>	<i>J.s</i>
<i>C</i>	<i>Vitesse du photon dans le vide [3.10<sup>8</sup>]</i>	<i>m.s<sup>-1</sup></i>
<i>v</i>	<i>Fréquence de l'onde électromagnétique associée au photon</i>	<i>Hz</i>
<i>λ</i>	<i>Longueur d'onde électromagnétique associée au photon</i>	<i>m</i>
<i>α</i>	<i>Coefficient d'absorption</i>	<i>cm<sup>-1</sup></i>
<i>I</i>	<i>Courant de la cellule</i>	<i>A</i>
<i>I<sub>cc</sub></i>	<i>Courant de court-circuit</i>	<i>A</i>
<i>J<sub>cc</sub></i>	<i>Densité du courant de court-circuit</i>	<i>mA/cm<sup>-2</sup></i>
<i>I<sub>ph</sub></i>	<i>Photo-courant</i>	<i>A</i>
<i>I<sub>s</sub></i>	<i>Courant de saturation</i>	<i>A</i>
<i>I<sub>max</sub> (I<sub>mpp</sub>)</i>	<i>Courant maximale</i>	<i>A</i>
<i>V<sub>co</sub></i>	<i>Tension de circuit ouvert</i>	<i>V</i>
<i>V<sub>max</sub> (V<sub>mpp</sub>)</i>	<i>Tension maximale</i>	<i>V</i>
<i>P<sub>inc</sub></i>	<i>Puissance incidente</i>	<i>Watt</i>
<i>P<sub>m</sub></i>	<i>Puissance maximale</i>	<i>Watt</i>
<i>K<sub>B</sub></i>	<i>Constante de Boltzmann [1.38.10<sup>-23</sup>]</i>	<i>m<sup>2</sup>.Kg. s<sup>-2</sup>K<sup>-1</sup></i>

$q$	<i>Charge d'électron [ 1.602.10<sup>-19</sup>]</i>	<i>C</i>
$T$	<i>Température</i>	<i>K</i>
$R_s$	<i>Résistance série</i>	<i>Ω</i>
$R_{sh}$	<i>Résistance parallèle</i>	<i>Ω</i>
$\eta$	<i>Rendement</i>	<i>%</i>
$FF$	<i>Facteur de forme</i>	<i>%</i>
$RS$	<i>Réponse spectrale</i>	<i>%</i>
$N_A, N_D$	<i>Concentration des atomes accepteurs et des atomes donneurs respectivement</i>	<i>cm<sup>-3</sup></i>
$n, p$	<i>Concentration des électrons et des trous respectivement</i>	<i>cm<sup>-3</sup></i>
$E_t$	<i>Energie du niveau proche de la bande interdite</i>	<i>eV</i>
$E_{f_i}$	<i>Le niveau de fermi intrinsèque</i>	<i>eV</i>
$\Delta n(\Delta p)$	<i>La densité d'électrons (de trous)</i>	<i>cm<sup>-3</sup></i>
$n_i$	<i>Concentration intrinsèque</i>	<i>cm<sup>-3</sup></i>
$N_c$	<i>La densité d'états équivalente dans la BV, ramenée en Ev</i>	<i>cm<sup>-3</sup></i>
$N_D$	<i>La densité d'états équivalente dans la BV, ramenée en Ev</i>	<i>cm<sup>-3</sup></i>
$c$	<i>Paramètre de maille</i>	<i>nm</i>

## *Nomo-cloture*

	<i>Signification</i>
<i>PV</i>	<i>Photovoltaïque</i>
<i>E<sub>g</sub></i>	<i>L'énergie de bande interdite en eV</i>
<i>α-Si</i>	<i>Silicium amorphe</i>

# Sommaire

<b>SOMMAIRE .....</b>	<b>1</b>
<b>LISTE DES FIGURES :.....</b>	<b>3</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX : .....</b>	<b>6</b>
<b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>7</b>
<b>ENFIN, NOUS TERMINONS CE MEMOIRE PAR UNE CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>13</b>
1.1. INTRODUCTION .....	16
DANS CE CHAPITRE, NOUS PRESENTONS UNE GENERALITE SUR LES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES. NOUS DECRIVONS LE PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UNE CELLULE SOLAIRE AINSI QUE LES DIFFERENTES FILIERES PHOTOVOLTAÏQUES. ....	
1.2. HISTORIQUE SUR L'EFFET PHOTOVOLTAÏQUE .....	16
1.3. LE RAYONNEMENT SOLAIRE .....	17
1.4. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UNE CELLULE .....	18
1.4.1. <i>L'interaction rayonnement/semi-conducteur</i> .....	18
1.4.2. <i>Jonction et semi-conducteurs</i> .....	19
1.4.3. <i>Le principe d'une cellule photovoltaïque</i> .....	20
1.4.4. <i>Les grandeurs caractéristiques d'une cellule photovoltaïque</i> .....	21
1.4.5. <i>Rendement quantique externe (EQE)</i> .....	22
1.5. MODELISATION ELECTRIQUE DE LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE .....	23
1.6. LES DIFFERENTS TYPES DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES .....	23
1.7. CONCLUSION .....	27
<b>CHAPITRE 2 : CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE EN SILICIUM .....</b>	<b>28</b>
2.1. INTRODUCTION .....	29
2.2. CARACTERISTIQUES DU SILICIUM PHOTOVOLTAÏQUE.....	29
2.2.1. <i>Silicium monocristallin</i> .....	30
2.2.2. <i>Le Silicium polycristallin</i> .....	30
2.2.3. <i>Silicium amorphe</i> .....	31
2.3. CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES A HETEROJONCTIONS DE SILICIUM HIT .....	32
2.3.1. <i>Structure de base de la cellule HIT</i> .....	32
2.3.2. <i>Constituants de base de la cellule silicium à hétérojonctions</i> .....	33
2.3.2.1. <i>L'oxyde transparent conducteur</i> .....	33
2.3.2.2. <i>L'émetteur</i> .....	34
2.3.2.3. <i>BSF (Back Surface Field)</i> .....	34
2.3.2.4. <i>Les contacts</i> .....	34
2.4. PRINCIPE D'UNE HETEROJUNCTION HIT: (HETEROJUNCTION WITH INTRINSIC THIN LAYER).....	34
2.5. ÉQUATIONS FONDAMENTALES DANS LES SEMI-CONDUCTEURS .....	35
2.5.1. <i>Équation de Poisson</i> .....	36
2.5.2. <i>Équations de continuité</i> .....	36
2.5.3. <i>Équations de transport</i> .....	36
2.6. LES PHENOMENES DE RECOMBINAISON DANS LES SEMI-CONDUCTEURS .....	37
2.6.1 <i>Recombinaison radiative</i> .....	37
2.6.2 <i>La recombinaison Auger</i> .....	38
2.6.3 <i>La recombinaison Shockley Read Hall (SRH)</i> .....	39
2.7. LES AVANTAGES DE LA TECHNOLOGIE SILICIUM A HETEROJONCTION .....	39

2.8.	CONCLUSION .....	40
<b>CHAPITRE 3 : SIMULATION DE LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE A HETEROJONCTION DE SILICIUM HIT .....</b>		
<b>41</b>		
3.1.	INTRODUCTION .....	47
3.2.	SIMULATION NUMERIQUE DE L'HETEROJONCTION A-Si:H/c-Si .....	47
3.2.1.	<i>Présentation de logiciel de simulation SCAPS</i> .....	47
3.2.2.	<i>Utilisation du logiciel</i> .....	48
3.2.3.	<i>Action panel</i> .....	49
3.2.4.	<i>Bloc « working point », « illumination » et « series and shunt resistance »</i> .....	50
3.2.5.	<i>Bloc « Action » :</i> .....	52
3.2.6.	<i>Panneau de définition des cellules solaires</i> .....	52
3.2.7.	<i>Panneau des bandes d'énergies (résultats)</i> .....	57
3.2.8.	<i>Protocole de simulation</i> .....	58
3.3.	ETUDE DE L'HETEROJONCTION A-Si:H (N)/c-Si (P) .....	58
3.3.1.	<i>Structure simulée a-Si:H(n)/c-si(p)</i> .....	58
3.3.2.	<i>Paramètres de la structure simulée</i> .....	59
3.4.	RESULTATS DE SIMULATION .....	60
3.4.1.	<i>Etude de l'influence du substrat c-Si</i> .....	61
3.4.1.1	Influence de la concentration de dopants sur les performances de la cellule HJ .....	62
3.4.1.2	Influence de l'épaisseur du substrat sur les performances de la cellule HJ .....	65
3.4.2.	<i>Etude de l'influence de la couche intrinsèque de silicium amorphe a-Si:H(i)</i> .....	67
3.4.2.1	Influence de la concentration de dopants sur les performances de la cellule HIT .....	68
3.4.2.2	Influence de l'épaisseur du substrat sur les performances de la cellule HJ .....	69
3.4.3.	<i>Etude de l'influence du champ arrière (Back Surface Field : BSF)</i> .....	70
3.4.3.1	Influence de la concentration de dopants (Na, Nd) sur les performances de la cellule HJBSF ..	70
3.4.3.2	Influence de l'épaisseur sur les performances de la cellule HJBSF .....	75
3.4.3.3	Influence de la concentration de dopants (Na, Nd) sur les performances de la cellule HITBSF ..	77
3.4.4.	<i>Etude de l'influence de la couche émettrice FSF « FRONT SURFACE FIELD »</i> .....	82
3.5.	CONCLUSION .....	84
<b>CONCLUSION GENERALE .....</b>		<b>94</b>
<b>BIBLIOGRAPHIES: .....</b>		<b>95</b>

## Liste des figures :

### Chapitre 1 : Généralité sur les cellules photovoltaïques

FIGURE 1. 1 : DESCRIPTION DE NOMBRE D’AIR –MASSE ; AM0 (SPECTRE SOLAIRE EN DEHORS DE L’ATMOSPHERE), AM1 (SPECTRE SOLAIRE AU SOL LORSQUE LE SOLEIL EST SITUE AU ZENITH) ET AM1.5 (SPECTRE SOLAIRE AU SOL POUR UN RAYONNEMENT SOLAIRE AYANT UN ANGLE D’INCIDENCE DE 48,2°). .....	17
FIGURE 1. 2 : SPECTRES DU CORPS NOIR A LA TEMPERATURE DE 5 900 K, DU RAYONNEMENT SOLAIRE HORS DE L’ATMOSPHERE AM0 ET CELUI AU NIVEAU DE LA MER AM1.5 AVEC LES RAIES D’ABSORPTION DE CERTAINS CONSTITUANTS DE L’ATMOSPHERE COMME LA VAPEUR D’EAU, L’OXYGENE ET L’OZONE .....	18
FIGURE 1. 3 : ILLUSTRATION DU FONCTIONNEMENT D’UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE CONVENTIONNELLE, STRUCTURE (A GAUCHE) ET DIAGRAMME DE BANDE (A DROITE) D’UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE. ....	20
FIGURE 1. 4 : COURBE CARACTERISTIQUE COURANT – TENSION (J-V) D’UNE CELLULE SOLAIRE DANS L’OBSCURITE ET SOUS ECLAIREMENT STANDARD AM 1.5 .....	21
FIGURE 1. 5 : MODELISATION ELECTRIQUE D’UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE .....	23
FIGURE 1. 6 : ÉVOLUTION DES RECORDS DE RENDEMENTS DE CHAQUE FILIERE DE CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES[5]. ....	24
FIGURE 1. 7 : PRODUCTION DE CELLULE PV EN 2019[7].....	25
FIGURE 1. 8 : LA PRODUCTION DE MODULE PV PAR TECHNOLOGIE[7] .....	26

### Chapitre 2 : Les cellules photovoltaïque en silicium

FIGURE 2. 1 : CELLULE EN SILICIUM MONOCRISTALLIN.....	30
FIGURE 2. 2 : CELLULE AU SILICIUM POLYCRISTALLIN .....	31
FIGURE 2. 3 : RESEAUX (A) PERIODIQUE DANS LE SILICIUM CRISTALLIN ET (B) ALEATOIRE DANS LE SILICIUM AMORPHE. HYDROGENE SILICIUM. [2] .....	31
FIGURE 2. 4 : STRUCTURE D’UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE SILICIUM A HETEROJONCTIONS [2]. ....	33
FIGURE 2. 5 : REPRESENTATION DES PARAMETRES ELECTRONIQUES DE DEUX MATERIAUX ISOLES. LE NIVEAU DU VIDE EST LE NIVEAU DE REFERENCE. B) DIAGRAMME DE BANDES D’UNE HETEROJONCTION A-Si:H(N)/C-Si(P) A L’EQUILIBRE THERMODYNAMIQUE [3]. ....	35
FIGURE 2. 6 : RECOMBINAISON RADIATIVE D’UN ELECTRON DE LA BANDE DE CONDUCTION AVEC UN TROU DE LA BANDE DE VALENCE [18]. ....	38
FIGURE 2. 7 : EXEMPLE DE RECOMBINAISON AUGER [21]. ....	38
FIGURE 2. 8 : TRANSITIONS VIA UN NIVEAU DE LA BANDE INTERDITE. ....	39

### Chapitre 3 : Simulation de la cellule photovoltaïque à hétérojonction de silicium HIT

FIGURE 3. 1 : FENETRE D’EXECUTION « ACTION PANEL » DU LOGICIEL SCAPS.....	49
FIGURE 3. 2 : FENETRE D’EXECUTION, DE CONCEPTION DU DISPOSITIF ET DES RESULTATS DU LOGICIEL SCAPS .....	50
FIGURE 3. 3 : LE POINT DE FONCTIONNEMENT .....	50

FIGURE 3. 4 : RESISTANCE SERIE ET PARALLELE.....	51
FIGURE 3. 5 : L'ILLUMINATION .....	52
FIGURE 3. 6 : ACTION DE BLOC.....	52
FIGURE 3. 7 : PANNEAU DE DEFINITION D'UNE CELLULE SOLAIRE .....	53
FIGURE 3. 8 : DEFINIR LE PROBLEME.....	53
FIGURE 3. 9 : PROPRIETES DE LA COUCHE AJOUTEE .....	54
FIGURE 3. 10 : PROPRIETES DES DOPAGES DEFINIS.....	55
FIGURE 3. 11 : PROPRIETES DES DOPAGES DEFINIS.....	55
FIGURE 3. 12 : DEFINITION DES TYPES DE RECOMBINAISON PRESENTS.....	55
FIGURE 3. 13 : PANNEAU DES PROPRIETES DES CONTACTS.....	56
FIGURE 3. 14 : PANNEAU DES BANDES D'ENERGIE.....	57
FIGURE 3. 15 : STRUCTURE D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE A SIMPLE HETEROJONCTION HJ :ITO/A-Si:H(N)/C-Si(P).....	58
FIGURE 3. 16 : STRUCTURES DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES A HETEROJONCTION, CELLULE 1 : HJ : ITO/A-Si:H(N)/C-Si(P), CELLULE 2 : HIT : ITO/A-Si:H(N) A-Si:H(I)/C-Si(P), CELLULE 3 : HJ : ITO/A-Si:H(N)/C-Si(P)/BSF, CELLULE 4 : HIT BSF: ITO/A-Si:H(N)/A-Si:H(I)/C-Si(P)/BSF, .....	59
FIGURE 3. 17 : LA CARACTERISTIQUE DE COURANT-TENSION J(V) EN L'OBSCURITE ET SOUS ECLAIREMENT DE LA CELLULE HJ : ITO/A-Si:H(N)/C-Si(P) .....	61
FIGURE 3. 18 : VARIATION DE LA TENSION DE CIRCUIT OUVERT (VCO) DE LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE A SIMPLE HETEROJONCTION HJ :ITO/A-Si:H(N)/C-Si(P)EN FONCTION DE CONCENTRATION DES ACCEPTEURS « (NA) » POUR DIFFERENTES VALEURS DE CONCENTRATION DES DONNEURS (ND). .....	62
FIGURE 3. 19 : VARIATION DE LA DENSITE DE COURT-CIRCUIT (JCC) DE LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE A SIMPLE HETEROJONCTION HJ :ITO/A-Si:H(N)/C-Si(P)EN FONCTION DE CONCENTRATION DES ACCEPTEURS « (NA) » POUR DIFFERENTES VALEURS DE CONCENTRATION DES DONNEURS (ND). .....	63
FIGURE 3. 20 : VARIATION DU FACTEUR DE FORME (FF)DE LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE A SIMPLE HETEROJONCTION HJ :ITO/A-Si:H(N)/C-Si(P)EN FONCTION DE CONCENTRATION DES ACCEPTEURS « (NA) » POUR DIFFERENTES VALEURS DE CONCENTRATION DES DONNEURS (ND). .....	64
FIGURE 3. 21 : VARIATION DU RENDEMENT DE LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE A SIMPLE HETEROJONCTION HJ :ITO/A-Si:H(N)/C-Si(P)EN FONCTION DE CONCENTRATION DES ACCEPTEURS « (NA) » POUR DIFFERENTES VALEURS DE CONCENTRATION DES DONNEURS (ND). .....	64
FIGURE 3. 22 : VARIATION DE VCO EN FONCTION DE L'ÉPAISSEUR DU SUBSTRAT C-Si POUR DIFFERENTES ÉPAISSEURS DE LA COUCHE A-Si .....	65
FIGURE 3. 23 : VARIATION DE LA DENSITE DU COURANT DE COURT-CIRCUIT EN FONCTION DE L'ÉPAISSEUR DU SUBSTRAT C-Si, POUR DIFFERENTES ÉPAISSEURS DE LA COUCHE A-Si.....	66
FIGURE 3. 24 : VARIATION DE FACTEUR DE FORME EN FONCTION DE L'ÉPAISSEUR DU SUBSTRAT C-Si, POUR DIFFERENTES ÉPAISSEURS DE LA COUCHE A-Si. ....	66
FIGURE 3. 25 : VARIATION DE RENDEMENT EN FONCTION DE L'ÉPAISSEUR DE SUBSTRAT C-Si, POUR DIFFERENTES ÉPAISSEURS DE LA COUCHE D'ÉMETTEUR A-Si. ....	67
FIGURE 3. 26 : STRUCTURE HIT D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE A HETEROJONCTION HIT : ITO/A-Si :H(N)/A-Si :H(I)/C-Si(P). .....	68
FIGURE 3. 27 : VARIATION DU JCC, VCO, FF ET LE RENDEMENT DE LA CELLULE HIT EN FONCTION DE LA CONCENTRATION DE DOPANTS (ND ET NA).....	68
FIGURE 3. 28 : VARIATION DU JCC, VCO, FF ET LE RENDEMENT DE LA CELLULE HIT EN FONCTION DE L'ÉPAISSEUR DES COUCHES (C-Si ET A-Si :H). .....	69
FIGURE 3. 29 : STRUCTURE DE L'HETEROJONCTIONDE TYPE: HJBSF «ITO/A-Si:H(N)/C-Si(P)/BSF» ET HITBSF «ITO/A-Si:H(N)/A-Si :H(I)/C-Si(P)/BSF». ....	70
FIGURE 3. 30 : VARIATION DE VCO DE LA CELLULE BSF( $\mu$ C-Si :H( $P^+$ ))HJ EN FONCTION DE LA CONCENTRATION DE DOPANTS NA ET ND. ....	71
FIGURE 3. 31 : VARIATION DE JCC DE LA CELLULE BSF( $\mu$ C-Si :H( $P^+$ ))HJ EN FONCTION DE LA CONCENTRATION DE DOPANTS NA ET ND. ....	71

FIGURE 3. 32 : VARIATION DE FF DE LA CELLULE BSF( $\mu$ C-Si :H( $p^+$ ))HJ EN FONCTION DE LA CONCENTRATION DE DOPANTS NA ET ND. ....	72
FIGURE 3. 33 : VARIATION DU RENDEMENT DE LA CELLULE BSF( $\mu$ C-Si :H( $p^+$ ))HJ EN FONCTION DE LA CONCENTRATION DE DOPANTS NA ET ND. ....	72
FIGURE 3. 34 : VARIATION DE VCO DE LA CELLULE BSF(A-Si :H( $p^+$ ))HJ EN FONCTION DE LA CONCENTRATION DE DOPANTS NA ET ND. ....	73
FIGURE 3. 35 : VARIATION DE JCC DE LA CELLULE BSF(A-Si :H( $p^+$ ))HJ EN FONCTION DE LA CONCENTRATION DE DOPANTS DOPANTS NA ET ND. ....	74
FIGURE 3. 36 : VARIATION DE FF DE LA CELLULE BSF(A-Si :H( $p^+$ ))HJ EN FONCTION DE LA CONCENTRATION DE DOPANTS DOPANTS NA ET ND. ....	74
FIGURE 3. 37 : VARIATION DU RENDEMENT DE LA CELLULE BSF(A-Si :H( $p^+$ ))HJ EN FONCTION DE LA CONCENTRATION DE DOPANTS NA ET ND. ....	75
FIGURE 3. 38: VARIATION DE JCC, VCO, FF ET LE RENDEMENT H DE LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE A HETEROJONCTION BSFHJ : BSF( $\mu$ C-Si( $p^+$ ))HJ EN FONCTION DE L'ÉPAISSEUR DES COUCHES ( A-Si :H ET C-Si( $p$ )). ....	76
FIGURE 3. 39 : VARIATION DE JCC, VCO, FF ET LE RENDEMENT H DE LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE A HETEROJONCTION HJBSF : BSF( $\mu$ C-Si( $p^+$ ))HJ EN FONCTION DE L'ÉPAISSEUR DES COUCHES ( A-Si :H ET C-Si( $p$ )). ....	77
FIGURE 3. 40 : VARIATION DE JCC, VCO, FF ET LE RENDEMENT H DE LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE A HETEROJONCTION HITBSF (A-Si :H( $p^+$ )) EN FONCTION DE CONCENTRATION DE DOPANTS NA ET ND. ....	78
FIGURE 3. 41 : VARIATION DE JCC, VCO, FF ET LE RENDEMENT H DE LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE A HETEROJONCTION HITBSF( $\mu$ C-Si( $p$ )) EN FONCTION DE CONCENTRATION DE DOPANTS NA ET ND. ....	79
FIGURE 3. 42 : VARIATION DE JCC, VCO, FF ET LE RENDEMENT H DE LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE A HETEROJONCTION HITBSF( $\mu$ C-Si( $p^+$ )) EN FONCTION DE L'ÉPAISSEUR DES COUCHES ( A-Si :H ET C-Si( $p$ )). ....	80
FIGURE 3. 43 : VARIATION DE JCC, VCO, FF ET LE RENDEMENT H DE LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE A HETEROJONCTION HITBSF(A-Si :H( $p^+$ )) EN FONCTION DE L'ÉPAISSEUR DES COUCHES ( A-Si :H ET C-Si( $p$ )). ....	81
FIGURE 3. 44 : INFLUENCES DE LA COUCHE FSF SUR LES CARACTERISTIQUES CELLULE EN FONCTION DE LA CONCENTRATION DE DOPANT NA. ....	83
FIGURE 3. 45 : INFLUENCES DE LA COUCHE FSF SUR LES CARACTERISTIQUES DE LA CELLULE HIT EN FONCTION DE L'ÉPAISSEUR DU SUBSTRAT C-Si. ....	84

## Liste des tableaux :

TABLEAU 2. 1: <i>TABLEAU PERIODIQUE DES ELEMENTS</i> .....	29
TABLEAU 3. 1 : <i>PRINCIPAUX PARAMETRES DE SIMULATION DE LA STRUCTURE DE LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE A HETEROJONCTION HIT [REF].</i> .....	60
TABLEAU 3. 2 : <i>PARAMETRES ECLECTIQUES DE LA CELLULE HJ « ITO/A-Si:H(N)/C-Si(P) ». CELLULE DE REFERENCE [N.DWIVIDI 2013].</i> .....	61
TABLEAU 3. 3 : <i>LES RESULTATS OBTENUS PAR LA SIMULATION</i> .....	94

# **Introduction générale**

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 part de l'électricité dans la consommation finale d'énergie mondiale s'élevait à 19,3 % en 2018 [1]. La production mondiale d'électricité était issue en 2018 des combustibles fossiles pour 63,9 %, du nucléaire pour 10,1 % et des énergies renouvelables pour 25,5 % (hydroélectricité 16,2 %, éolien 4,8 %, solaire 2,1 %, biomasse 1,9 %, géothermie 0,3 %). Les deux principaux pays producteurs d'électricité totalisent 43,7 % de la production mondiale : Chine 27 % et États-Unis 16,7 % [3]. Ces sources d'énergie fossiles non renouvelables qui sont néfastes à l'environnement disposent de stocks encore disponibles pour quelques décennies, d'après le rapport publié par le GIEC « Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat » des experts mondiaux affirment que l'augmentation des gaz à effet de serre issus de la combustion de ces énergies fossiles est à l'origine du réchauffement climatique.

Le monde se penche actuellement vers le développement des énergies renouvelables pour la production de l'énergie, on trouve principalement l'énergie solaire « Thermique et photovoltaïque », l'éolienne, et l'hydro-électrique, l'énergie produite par ces sources est dite « Propre » ce qui signifie qu'elle n'est pas néfaste à l'environnement et bénéficie de stocks inestimables, l'avantage de ce type d'énergie est la diversité des sources afin d'assurer un approvisionnement continu d'énergie.

L'effet photovoltaïque est défini par la conversion instantanée de la lumière émise par la source « soleil » en énergie électrique, cette énergie constitue un chemin clé d'avenir pour la production d'énergie électrique renouvelable, le taux d'énergie électrique généré par le photovoltaïque dans le monde a atteint les 550 TWh en 2018[4].

L'énergie solaire ayant atteint le point où elle surpasse systématiquement toutes les autres technologies de production d'électricité, en termes de coût et d'efficacité, Étant donné que le module solaire et ses matériaux de traitement sont les principaux contributeurs au coût du système, ils sont au cœur des efforts de réduction des coûts, les chercheurs et les développeurs travaillent dur pour améliorer encore la compétitivité de l'énergie solaire, en 2019, 16 pays ont installé plus de 1 GW d'énergie solaire, soit un taux de croissance de 45 % par rapport aux 11 marchés solaires à l'échelle de GW en 2018 [5].

Les cellules solaires en Silicium font actuellement l'objet de multiples recherches dans le but de réaliser le meilleur rapport entre le rendement énergétique et le prix de revient. Les cellules

## Introduction générale

photovoltaïques à hétérojonction (a-Si:H / c-Si) combine le haut rendement stable du silicium cristallin avec le faible prix de la technologie de dépôt du silicium amorphe hydrogéné. SANYO est le premier fabricant au monde à produire des cellules solaires en silicium amorphe à des fins commerciales en 1980, 17 ans plus tard, des cellules photovoltaïques SANYO dotées de la technologie à hétérojonction avec couche mince intrinsèque (HIT) sont produites en série, elles sont commercialisées sous la marque HIT®, des modules solaires 170 W, Taux de rendement des cellules : 16,4 % ; taux de rendement des modules : 14,4 %. La structure HIT a montré une résistance aux hautes températures, un désavantage du silicium cristallin par rapport au silicium amorphe est la dégradation de son efficacité à haute température. La cellule HIT, possédant à la fois du silicium amorphe et cristallin, a une meilleure dépendance à la température que les cellules conventionnelles [2].

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

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

Enfin, nous terminons ce mémoire par une conclusion générale.

# **Chapitre 1 : Généralités sur les cellules photovoltaïques**

# Chapitre 1 Généralités sur les cellules photovoltaïques

## 1.1. Introduction

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

## 1.2. Historique sur l'effet photovoltaïque

La conversion photovoltaïque repose sur l'effet photovoltaïque qui consiste en la transformation de l'énergie lumineuse en énergie électrique. Le préfixe Photo vient du grec « phos » qui signifie lumière. « Volt » vient du patronyme d'Alessandro Volta (1745-1827), physicien qui a contribué aux recherches sur l'électricité. Photovoltaïque (PV) signifie donc littéralement électricité lumineuse. Ce phénomène physique a été découvert par le physicien français Edmond Becquerel en **1839**. Einstein expliqua le phénomène photoélectrique en **1905**, propose que la lumière n'est pas seulement une onde électromagnétique mais qu'elle est composée de quanta. Il décrypte l'effet photoélectrique, Il ouvre ainsi la voie à une série de physiciens remarquables comme Louis De Broglie (**1892-1987**), Werner Heisenberg (**1901-1976**), Erwin Schrödinger (**1887-1961**) et Enrico Fermi (**1901-1954**) qui, au cours des années **1920-1940**, vont peu à peu décrypter les principes de la physique quantique. Des laboratoires vont ainsi être incités à exploiter ces principes dans diverses applications et à s'intéresser à cette nouvelle classe de matériaux que sont les semi-conducteurs, les laboratoires Bell présentent la première cellule photovoltaïque avec un rendement de **6%** en **1954** qui alimente des appareils électriques domestiques, 4 ans plus tard (**1958**), le monde verra « Vanguard I » : le premier satellite alimenté en énergie par des panneaux photovoltaïques, les années qui suivent, l'usage du photovoltaïque pour les satellites se généralise. Embarqués à bord des lanceurs puis déployés en orbite autour de la terre, les panneaux photovoltaïques démontrent leur robustesse et leur fiabilité.

C'est en 1973 que la première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Wilmington dans l'Etat du Delaware, USA, les années qui suivent étaient pleine d'accidents et d'évènements, comme la crise économique des années 70's (flambée des prix du pétrole, 1973) puis l'incident de centrales nucléaires tels ceux de Three Mile Island (USA, 1979) ou de Tchernobyl (URSS, 1986) jetèrent un discrédit sur les énergies fossiles et atomiques et renforcèrent l'intérêt du grand public envers les énergies renouvelables, pour cela, un programmes de toits photovoltaïques raccordés au réseau ont été lancés en 1995, au Japon et en Allemagne, et se généralisent depuis 2001 [1].

# Chapitre 1 Généralités sur les cellules photovoltaïques

Le géant chinois joue un rôle très important dans l'évolution industrielle des cellules solaires, d'un côté il a participé à la réduction major des prix des modules, d'un autre coté il a amélioré le rendement des cellules, on trouve le record détenu par le constructeur chinois « Jinko Solar » en 2020 le model nommé « Topcon » de type N Monocristallin a 24.7% de rendement.

## 1.3. Le Rayonnement solaire

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

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

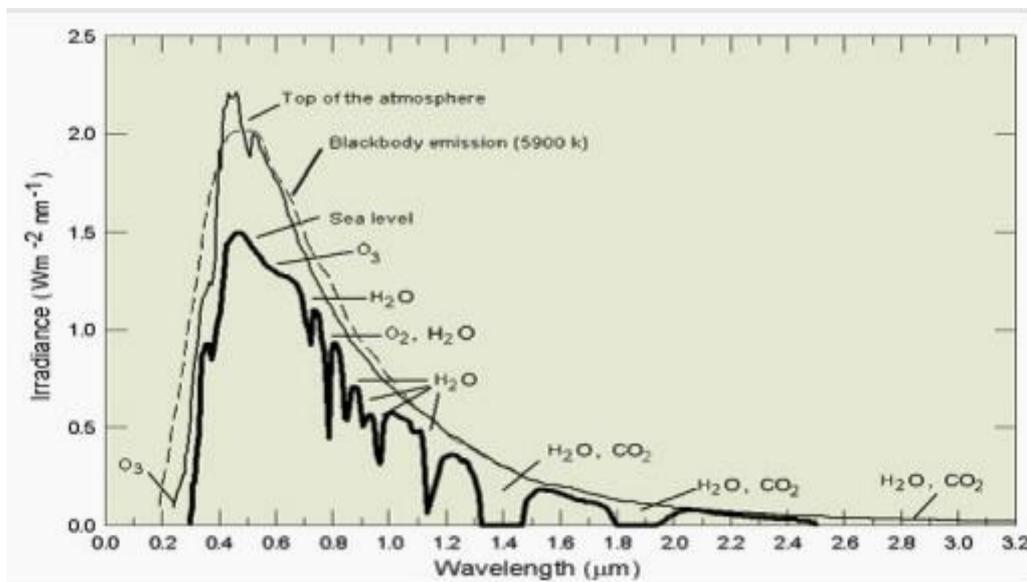
Les scientifiques ont donné un nom au spectre standard de la lumière du soleil sur la surface de la terre : AM1.5G ou AM1.5D. Le nombre "1.5" indique que le parcours de la lumière dans l'atmosphère est 1.5 fois supérieur au parcours le plus court du soleil, c'est-à-dire lorsqu'il est au zénith (correspondant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



**Figure 1.1** : Description de nombre d'air –masse ; AM0 (spectre solaire en dehors de l'atmosphère), AM1 (spectre solaire au sol lorsque le soleil est situé au zénith) et AM1.5 (spectre solaire au sol pour un rayonnement solaire ayant un angle d'incidence de 48,2°).

# Chapitre 1 Généralités sur les cellules photovoltaïques

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



## 1.4. Principe de fonctionnement d'une cellule

### 1.4.1. L'interaction rayonnement/semi-conducteur

Pour mieux comprendre le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque, il est important de décrire les phénomènes qui régissent l'interaction entre un semi-conducteur et le rayonnement lumineux. Les trois processus qui peuvent se produire lors de l'interaction rayonnement/semi-conducteur sont :

# Chapitre 1 Généralités sur les cellules photovoltaïques

- L'absorption fondamentale qui représente le passage d'un électron d'un état occupé de la bande de valence à un état vide de la bande de conduction après l'absorption d'un photon.
- L'émission spontanée qui représente le passage d'un électron de la bande de conduction à la bande de valence avec émission d'un photon,
- L'émission stimulée qui représente le passage d'un électron de la bande de conduction à la bande de valence suite à l'absorption d'un photon avec l'émission d'un deuxième photon.

## 1.4.2. Jonction et semi-conducteurs

Ces différents processus sont fonction du type de semi-conducteur. Nous devons distinguer les semi-conducteurs à bande interdite directe et ceux à bande interdite indirecte. Un semi-conducteur est à bande interdite directe quand le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence sont obtenus pour une même valeur du vecteur d'onde  $k$ . Les transitions bande à bande (de la bande de conduction vers la bande de valence) sont radiatives (émission spontanée) et sont favorisées avec ce type de semi-conducteur utilisé en optoélectronique (matériau III-V en général comme le GaAs). Un semi-conducteur est à bande interdite indirecte quand le minimum de la bande de conduction est décalé par rapport au maximum de la bande de valence dans l'espace des  $k$ .

Les transitions bande à bande impliquent un changement de vecteur d'onde  $k$  et sont donc non-radiatives. Ceci est le cas même si avec un photon de plus grande énergie, un électron peut être directement excité vers un minimum relatif de la bande de conduction et se thermalise dans le minimum absolu de la bande de conduction. La transition d'un électron dans un matériau à bande interdite indirecte est assistée par un phonon absorbé ou émis par l'électron afin que son vecteur d'onde corresponde au maximum de la bande de valence pour absorber un photon.

Le fonctionnement de toute cellule photovoltaïque est basé sur l'existence d'un champ interne afin de séparer les paires électron-trou générées par l'absorption de la lumière. Cette barrière de potentiel peut être créée par :

- Une jonction p-n avec un même semi-conducteur que l'on appelle *homojonction*
- Une jonction p-n avec deux semi-conducteurs différents que l'on appelle *hétérojonction*
- Un contact métal/semi-conducteur de type **Schottky**.

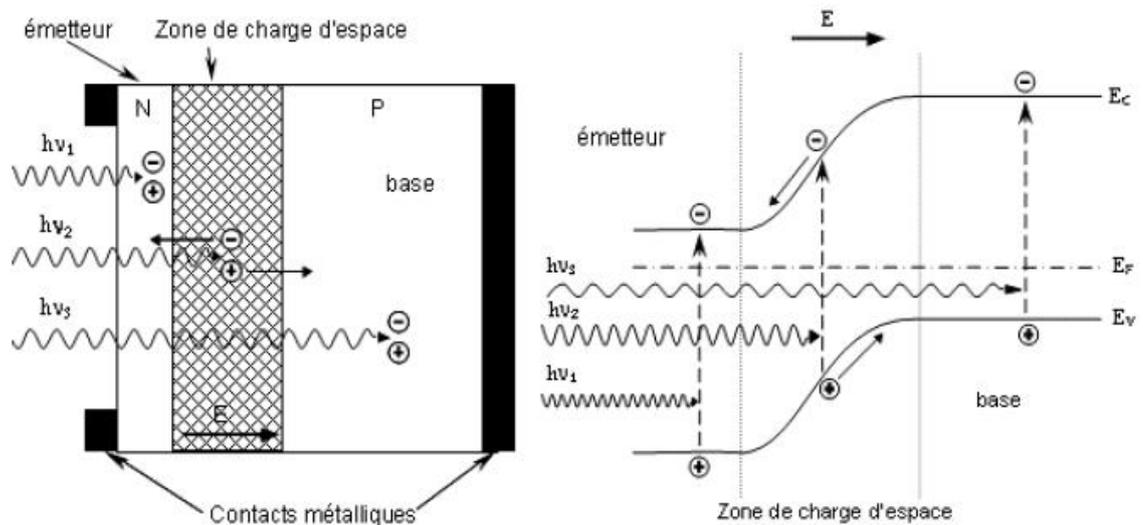
# Chapitre 1 Généralités sur les cellules photovoltaïques

## 1.4.3. Le principe d'une cellule photovoltaïque

Le principe de fonctionnement d'une cellule à jonction p-n à homojonction est décrit dans la figure suivante. Les photons incidents créent des paires électron-trou et nous avons deux scénarios possibles suivant le lieu de création des paires électron-trou

- Si une paire est générée dans une zone électriquement neutre (p ou n), les porteurs diffusent. Si les porteurs minoritaires atteignent la zone de charge d'espace alors ils sont propulsés par le champ électrique dans la zone où ils deviennent porteurs majoritaires. Ces porteurs contribuent ainsi au courant par leur diffusion et il se crée un courant de **diffusion**.
- Si une paire est générée dans la zone de charge d'espace, l'électron et le trou sont séparés par le champ électrique et chacun est propulsé dans la région où il est porteur majoritaire (région n pour l'électron et région p pour le trou). Ces porteurs donnent naissance à un courant de **génération**.

Ces deux contributions donnent naissance à un photocourant qui contribue au courant inverse de la diode formée par la jonction. Le courant inverse d'une jonction p-n est fonction des densités de porteurs minoritaires dans les régions neutres de la diode et de la génération de paires électron-trou dans la zone de charge d'espace. L'éclairement augmente le courant inverse par la création de porteurs minoritaires dans les zones neutres et la génération de paires électron-trou dans la zone de charge d'espace.



**Figure 1.3 :** ILLUSTRATION du fonctionnement d'une cellule photovoltaïque conventionnelle, STRUCTURE (à gauche) et diagramme de bande (à droite) d'une cellule photovoltaïque.

# Chapitre 1 Généralités sur les cellules photovoltaïques

## 1.4.4. Les grandeurs caractéristiques d'une cellule photovoltaïque

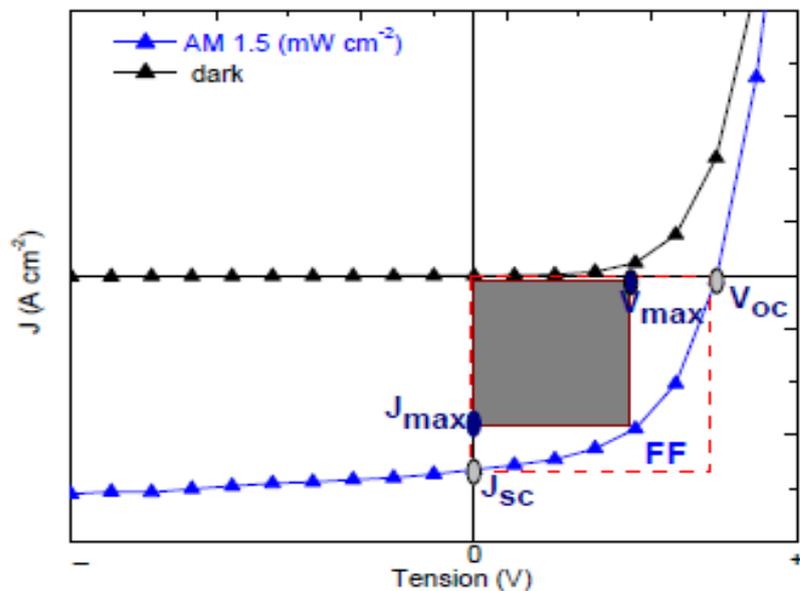
Sous illumination, le courant aux bornes d'une jonction p-n qui constitue la cellule photovoltaïque est donné par l'expression suivante :

$$I = I_{ph} - I_0 \left( \frac{qv}{eKT} - 1 \right) \quad (1.2)$$

Où  $I_s$  est le courant de saturation,  $V$  est la tension appliquée,  $i$  est le facteur d'idéalité de la diode,  $I_{ph}$  le courant photogénéré,  $q$  la valeur absolue de la charge élémentaire,  $kB$  la constante de Boltzmann et  $T$  la température.

Les paramètres de sortie d'une cellule photovoltaïque sont ainsi définis à partir de la caractéristique  $I(V)$  (Figure 1.4). Sous un éclairement normalisé (spectre solaire AM1.5G, d'une puissance de 1000 W/m<sup>2</sup>, à 25°C).

- $I_{CC}$  le courant de court-circuit qui correspond au courant obtenu à  $V=0$ .
- $V_{CO}$  la tension de circuit ouvert qui correspond à un courant nul.
- $V_{max}$  la tension obtenue au point de fonctionnement maximal (puissance maximale).
- $I_{max}$  le courant obtenu au point de fonctionnement maximal (puissance maximale).



# Chapitre 1 Généralités sur les cellules photovoltaïques

Dans le cas idéal, le courant de court-circuit  $I_{cc}$  est égale au courant photogénéré  $I_{ph}$  et la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  est donnée par :

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

Le courant de court-circuit  $I_{cc}$  d'une cellule photovoltaïque obtenu pour une tension  $V=0$ , caractérise la quantité des paires électrons trous créés « G » qui traverse la jonction sans être recombinées et ce entre les longueurs de diffusion des électrons et trous ( $L_n$  et  $L_p$ ) :

$$I_{cc} = q G (L_n + L_p) \quad (I.4)$$

Le facteur de forme « FF » défini par :

$$FF = \frac{V_{max} I_{max}}{V_{co} I_{cc}} \quad (I.5)$$

Le rendement de conversion  $\eta$  est le rapport entre la puissance maximale  $P_{max}$  obtenue avec la cellule sur la puissance incidente ( $P_{in}$  est donnée par unité de surface) :

$$\eta = \frac{V_m I_m}{P_{in}} = \frac{FF V_{co} I_{cc}}{P_{in}} \quad (I.6)$$

## 1.4.5. Rendement quantique externe (EQE)

Le rendement quantique est le rapport entre le nombre d'électrons dans le circuit externe et le nombre de photons incidents. Lorsque les photons perdus par réflexion (à la fenêtre de la cellule) et les photons perdus par transmission à travers toute l'épaisseur de la cellule (à cause de l'absorption incomplète) ne sont pas pris en compte, cette grandeur s'appelle alors le rendement quantique interne, IQE (internal quantum efficiency). Dans le cas contraire, ce paramètre s'appelle le rendement quantique externe, EQE (external quantum efficiency). Le rendement quantique externe est défini comme suit :

$$EQE(\lambda) = \frac{J_{cc}(\lambda)}{\phi(\lambda)} \times \frac{E_{ph}(\lambda)}{q} = \frac{J_{cc}(\lambda)}{\phi(\lambda)} \times \frac{hc}{q\lambda} \quad (I.7)$$

Où  $\phi(\lambda)$  est la puissance de l'éclairement reçu par la cellule (W) et  $I_{cc}$  le courant de court-circuit (mA).  $q$  la charge de l'électron (C) et  $E_{ph}$  l'énergie du photon (avec  $E_{ph}(\lambda)=hc/\lambda$  ;  $h$  étant la constante de Planck(J.s),  $c$  la vitesse de la lumière ( $\mu\text{m.s}^{-1}$ ) et  $\lambda$  la longueur d'onde (nm)).

# Chapitre 1 Généralités sur les cellules photovoltaïques

## 1.5. Modélisation électrique de la cellule photovoltaïque

L'analogie entre le fonctionnement de la cellule photovoltaïque sous éclairage et celui d'un générateur de courant, produisant un courant  $I_{ph}$  auquel se soustrait le courant de la diode en polarisation directe, n'est qu'une représentation simplifiée du fonctionnement réel de la cellule. Pour tenir compte des différentes limitations de la cellule photovoltaïque, on introduit le modèle à deux diodes représentées sur la figure suivante :

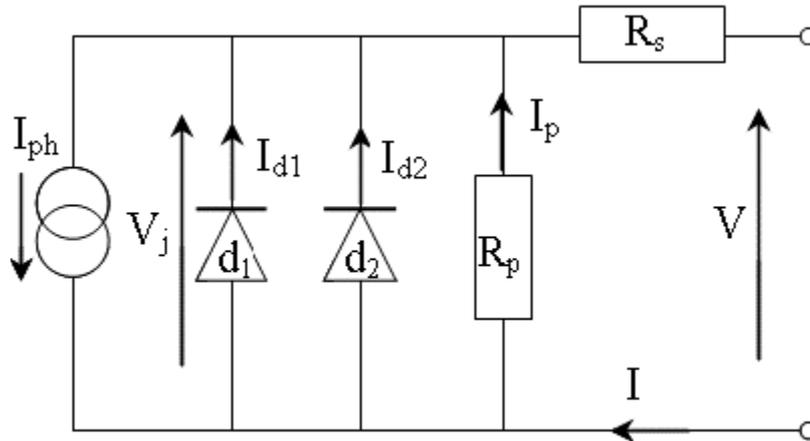


Figure 1. 5 : Modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque

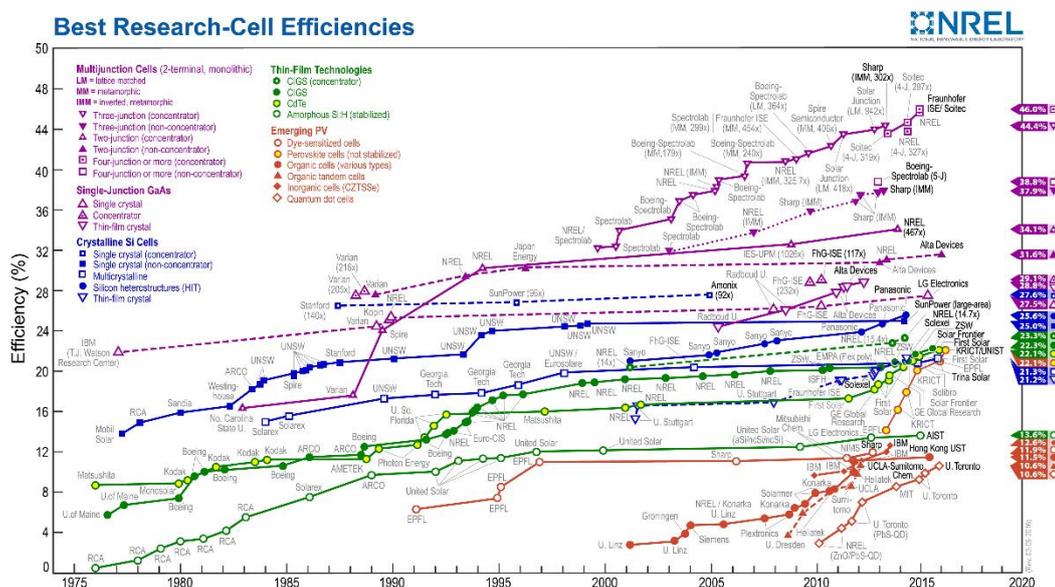
- **Le générateur de courant** : il délivre le courant  $I_{ph}$  correspondant au courant photogénéré.
- **La résistance série  $R_s$**  : elle prend en considération les contacts ohmiques entre le métal et le semi-conducteur ainsi que la résistance intrinsèque de silicium.
- **La résistance série  $R_p$**  : elle représente la résistance shunt qui modélise les fuites par l'effet de bord autour de la cellule solaire ; connue aussi sous le nom de résistance de court-circuit.
- **La diode  $d_1$**  : modélise la diffusion des porteurs dans la base et l'émetteur. Son influence sera d'autant plus grande que le matériau présentera une bonne longueur de diffusion.
- **La diode  $d_2$**  : modélise-la génération/recombinaison des porteurs dans la zone de charge d'espace.

## 1.6. Les différents types des cellules photovoltaïques

De nombreuses technologies de cellules photovoltaïques existent et sont regroupées en filières. Elles se distinguent par les matériaux utilisés, les procédés de fabrication et le nombre de

# Chapitre 1 Généralités sur les cellules photovoltaïques

jonctions utilisées au sein de la cellule. La figure I.6 montre l'évolution des rendements dans les principales filières.

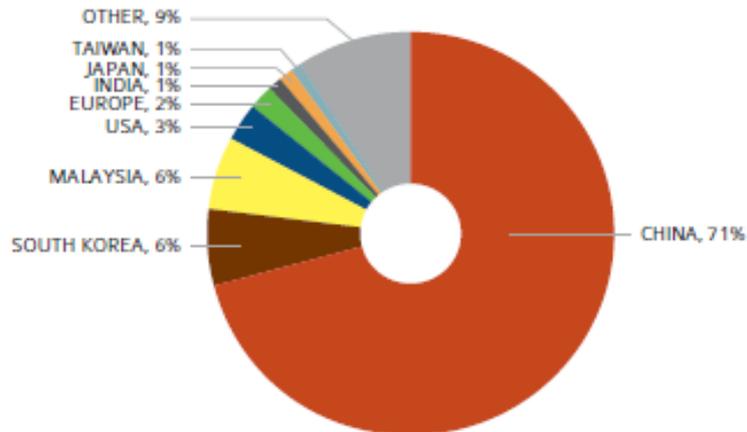


C'est la filière silicium qui domine actuellement le marché avec plus de 90% des cellules vendues (silicium cristallin et multicristallin)[6]. Le silicium est utilisé dans la cellule photovoltaïque (constituant des panneaux solaires) sous forme ultra pure, c'est le deuxième élément le plus courant de la croûte terrestre et le composant principal du sable. Le silicium ne se rencontre jamais pur, mais sous forme de composés : la silice, le dioxyde de silicium ( $\text{SiO}_2$ ) ou encore dans les silicates. Le silicium de qualité photovoltaïque doit être purifié jusqu'à plus de 99,999 %, ce qui s'obtient en transformant le silicium en un composé chimique qui sera distillé puis retransformé en silicium. Le silicium est produit sous forme de lingots de section ronde ou carrée. Ces lingots sont ensuite sciés en fines plaques, le cas échéant mises au carré, de près de 200  $\mu\text{m}$  d'épaisseur, appelées « wafers ». Après un traitement visant à l'enrichir en éléments dopants (P, As, Sb ou B) et ainsi obtenir du silicium semi-conducteur de type P ou N, les wafers sont « métallisés » : des rubans de métal sont incrustés en surface et reliés à des contacts électriques. Une fois métallisés, les wafers deviennent des cellules photovoltaïques.

Cette filière domine toujours le marché de la production des modules photovoltaïques, la production mondiale de modules photovoltaïques (module PV c-Si et module PV à couche mince) est passée de 116 GW en 2018 à 140 GW en 2019. Comme le montre la figure I.7, la Chine demeure le plus grand producteur de modules photovoltaïques au monde, comme en 2018. La Chine a produit 98,6 GW de modules photovoltaïques en 2019, ce qui représente 70 % de la production totale mondiale de modules photovoltaïques. Le deuxième plus grand pays de

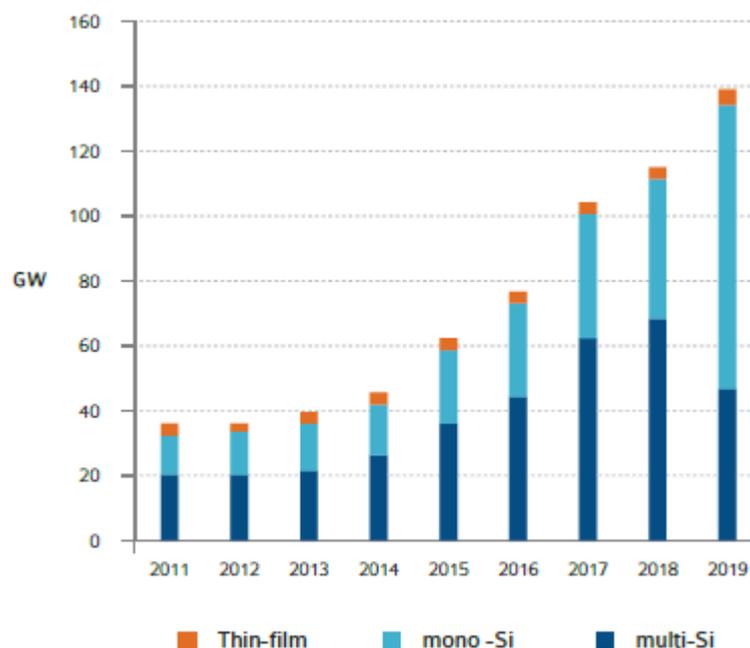
## Chapitre 1 Généralités sur les cellules photovoltaïques

la fabrication de modules photovoltaïques est le Sud de La Corée, qui a produit environ 8,4 GW, la production américaine de modules photovoltaïques a atteint 3,84 GW, soit une hausse de 154 % par rapport à 2018 (1,51 GW) [7].



Les modules photovoltaïques Crystalline Si ont représenté 96 % de la production mondiale de modules photovoltaïques en 2019, restant au même niveau que l'année précédente. Parmi les modules PV c-Si, les modules PV sc-Si ont pris la part la plus élevée (62%) que les modules PV mc-Si (34%). Cette tendance est due à la recherche d'une plus grande efficacité de conversion sur le marché, à l'augmentation de l'offre et à la réduction des prix des wafers c- Si [7].

## Chapitre 1 Généralités sur les cellules photovoltaïques



**La filière couches minces** connaît une croissance importante ces dernières années. Elle est composée de plusieurs branches

- Les cellules en couches minces à base silicium amorphe : Les cellules sont soit à simple jonction p-i-n ou bien à jonctions multiples. Les épaisseurs sont de l'ordre du  $\mu\text{m}$  ce qui rend cette filière moins couteuse avec cependant des rendements plus faibles. Les meilleurs rendements (15 %) ont été obtenus avec des triples jonctions
- Les cellules en couches minces de la famille des chalcopyrites  $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$  (CIGS) ou  $\text{Cu}(\text{In,Ga})(\text{Se,S})_2$  (CIGSS). Des rendements de l'ordre de 20,1 % ont été obtenus avec des cellules CIGS. La rareté de l'indium et du gallium peut constituer un frein pour cette filière.
- Les cellules multi-jonctions en semi-conducteurs III-V ( $\text{GaAs}$ ,  $\text{AlGaAs}$ ,  $\text{InGaAsP}$ ). De très bons rendements sont obtenus avec cette filière mais les coûts de fabrication sont plus élevés (bâti sous ultravide, croissance très lente). Les cellules sont destinées à des applications spatiales. Un rendement de 32 % a été obtenu avec une triple jonction  $\text{GaInP/GaAs/Ge}$  sans concentrateur et 41 % avec concentrateur.
- Les cellules organiques qui suscitent un intérêt grandissant notamment avec un coût de fabrication potentiel très faible même si l'encapsulation pour lutter contre l'oxydation

## Chapitre 1 Généralités sur les cellules photovoltaïques

reste problématique. Elles sont encore cependant à l'état de recherche avec des rendements ne dépassant pas 5 %. Les cellules à colorants (*Grätzel*) sont aussi à bas coûts avec des rendements maximums de 11 % mais le vieillissement rapide de ces cellules est problématique.

### 1.7. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons d'abord procédé à un historique de l'effet photovoltaïque et les progrès scientifiques dans ce domaine, les différents phénomènes qui entre en jeu lors de la conversion, une description générale des cellules photovoltaïques, les caractéristiques principales d'une cellule photovoltaïque. Aussi on a déduit les différents paramètres électriques (rendement, facteur de forme, le courant de court-circuit, ...), et le circuit équivalent, puis nous avons vu l'aspect économique de la production des cellules, taux de cellules produites, puis taux de production électrique par l'énergie solaire. Notre travail est orienté vers la filière silicium et plus particulièrement les cellules à hétérojonctions à base de silicium cristallin et silicium amorphe. Nous présenterons dans la suite les cellules conventionnelles à hétérojonctions en silicium c-Si/a-Si : H.

# **Chapitre 2 : Cellule Photovoltaïque en Silicium**

# Chapitre 2 : Cellule Photovoltaïque en Silicium

## 2.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous introduisons le domaine du silicium en décrivant les deux matériaux utilisés (c-Si et a-Si : H) et ce type de composant, notamment avec l'hétérojonction c-Si/a-Si : H des cellules photovoltaïques.

## 2.2. Caractéristiques du silicium photovoltaïque

Aujourd'hui, plus de 99 % des dispositifs photovoltaïques utilisent le silicium comme matériau de base [8], c'est le deuxième élément le plus courant de la croûte terrestre et le composant principal du sable (et le troisième du matériau terrestre après l'oxygène et le magnésium). Il contient de l'oxyde naturel ( $\text{SiO}_2$ ) et possède d'excellentes propriétés électroniques. Il appartient à la colonne IV, troisième ligne du tableau périodique (Tableau II.1) des éléments, situé respectivement entre le carbone et le germanium, et l'aluminium et le phosphore

	III	IV	V	VI
	5 B Bore	6 C Carbone	7 N Azote	8 O Oxygène
	13 Al Aluminium	14 Si Silicium	15 P Phosphore	16 S Soufre
30 Zn Zinc	31 Ga Gallium	32 Ge Germanium	33 As Arsenic	34 Se Sélénium
48 Cd Cadmium	49 In Indium	50 Sn Étain	51 Sb Antimoine	52 Te Tellure
80 Hg Mercure	81 Tl Thallium	82 Pb Plomb	83 Bi Bismuth	84 Po Polonium

Tableau 2. 1: Tableau périodique des éléments

Il est semi-conducteur avec une énergie de gap  $E_g = E_c - E_v$  égale à 1,12 eV à 300 K dans l'état cristallin, et comprise dans la gamme 1,55- 2,1 eV [9] dans l'état amorphe hydrogéné. Entre ces valeurs, on trouve des matériaux composites, intégrant des nano ou micro cristaux de silicium dans des matrices amorphes, allant du silicium polymorphe au microcristallin. Cette flexibilité en fait un bon candidat pour les applications de conversion photovoltaïque terrestres et spatiales. Le silicium cristallin représente une configuration cubique à face centrée ou chaque atome de silicium est lié à 4 autres atomes de silicium dans la configuration cubique face centrée comme le montre le tableau II.1. La structure cubique du silicium en fait un semi-conducteur multi-vallée à 6 vallées [10], comme le montre la représentation de sa structure des bandes dans l'espace des k sur la figure II.1. On remarque immédiatement que le gap du silicium est indirect : le maximum de la bande de valence la plus haute n'est pas aligné avec le minimum de la bande de conduction la plus basse, et il existe une dégénérescence d'ordre 2 du plus haut niveau de la bande de valence. Sur cette figure sont aussi représentés plusieurs types de transitions électroniques pouvant avoir lieu : le chemin (1) pour les transitions bande à bande directes, le chemin (2) pour les transitions indirectes, le chemin (3) lors de la thermalisation des électrons.

Le silicium peut être dopé en introduisant des atomes dopants dans le réseau. Dans ce cas, l'énergie du système est minimale quand les dopants se substituent à un atome de silicium du réseau. Les atomes dopants

## Chapitre 2 : Cellule Photovoltaïque en Silicium

tels que le phosphore, l'azote ou l'arsenic sont donneurs d'électrons lorsqu'ils sont liés à quatre atomes de silicium (partageant donc 8 électrons avec eux), un 9<sup>ème</sup> électron en excès est délocalisé de l'atome dopant (ex : ion P<sup>+</sup>) et libéré dans le matériau à température ambiante. Ce matériau est alors dopé n. Les atomes accepteurs d'électrons tels que le bore, l'aluminium ou le gallium sont eux en déficit d'un électron dans cette configuration, laissant apparaître une charge négative à leur voisinage (ex : ion B<sup>-</sup>) et un trou au sein du matériau à l'ambiante. Ce matériau est alors dopé p. Pour les applications photovoltaïques, le silicium est le plus souvent dopé avec des atomes de phosphore et de bore.

Le silicium reste cependant le matériau le plus utilisé dans le photovoltaïque. Outre les avantages précités, il bénéficie d'une implantation importante et durable dans l'industrie de la microélectronique. Celle-ci utilise du silicium monocristallin de très haute pureté, obtenu par des méthodes telles que le tirage CZ (Le procédé de Czochralski) [10]. Ce type de matériau, qui présente d'excellentes qualités électroniques, est très coûteux.

### 2.2.1. Silicium monocristallin

Le silicium monocristallin comporte des grains parfaitement ordonnés de taille supérieur à 10 cm [12] et permet d'obtenir des meilleurs rendements en cellules solaires [13]. La monocristallisation est élaborée par la méthode Float zone (Fz) [14] et la méthode Czochralski (Cz). Ce type de matériau, qui présente d'excellentes qualités électroniques, est très coûteux.



### 2.2.2. Le Silicium polycristallin

Le silicium polycristallin ou multi-cristallin : Il apparaît comme la juxtaposition de petits cristaux monocristallins d'orientations différentes et de dimensions du millimètre ou centimètre. Pour fabriquer ce matériau, on refond tous les déchets provenant du tirage de monocristaux, on obtient des lingots qu'il faut ensuite scier en plaquettes (wafers). Il occupe 55,9% du marché et tend à progresser. Les rendements obtenus avec des cellules photovoltaïques à base de silicium monocristallin sont plus importantes. Mais, il faut signaler que les techniques d'élaboration utilisées pour obtenir du silicium monocristallin sont très coûteuses. Le

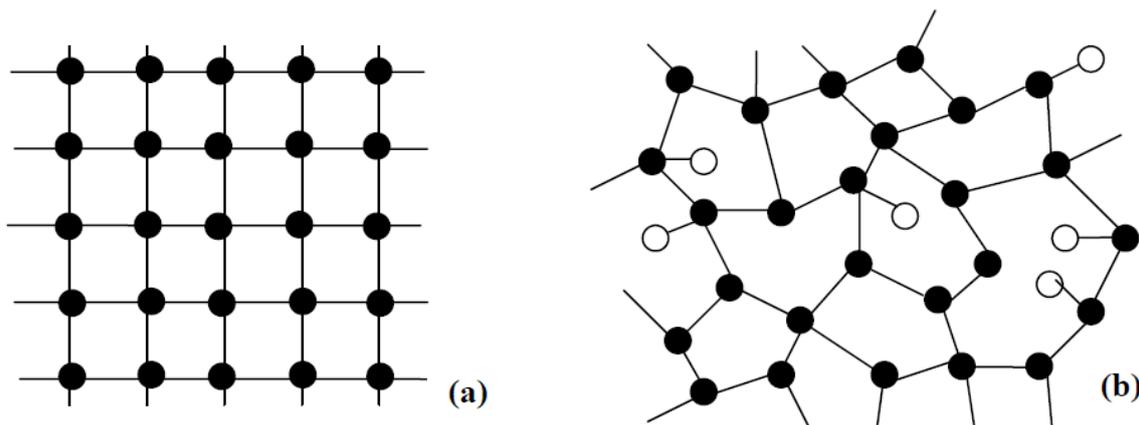
## Chapitre 2 : Cellule Photovoltaïque en Silicium

silicium multi-cristallin a donc l'avantage d'être moins couteux que le silicium monocristallin. Cela explique la prédominance des cellules à base de silicium multi-cristallin dans l'industrie photovoltaïque.



### 2.2.3. Silicium amorphe

La structure du silicium amorphe est, par opposition à celle du silicium cristallin (réseau régulier d'atomes sur la figure 2.3 (a)), un réseau aléatoire d'atomes qui conserve un ordre local (à courte distance). En effet, une distribution régulière d'atomes est respectée pour les premiers voisins (ordre à courte distance) mais plus on s'éloigne d'un atome donné plus les longueurs et angles de liaisons fluctuent (désordre à grande distance). Ainsi, les positions atomiques sont distribuées aléatoirement et une grande partie des liaisons de covalence sont brisées. Les atomes du réseau aléatoire se caractérisent non plus par leur position mais plutôt par le nombre de liaisons qu'ils ont avec leurs voisins. La figure 2.3(b) montre un exemple de réseau aléatoire dans le silicium amorphe. Certaines liaisons ne sont pas satisfaites tandis que d'autres sont reliées à des atomes d'hydrogène.



**Figure 2. 3 :** Réseaux (a) périodique dans le silicium cristallin et (b) aléatoire dans le silicium amorphe. Hydrogène silicium. [2]

Les premières études sur le silicium amorphe remontent au début des années soixante. Ces études font suite à un intérêt grandissant pour les semi-conducteurs amorphes en général. Les premiers dépôts réalisés ont révélé une densité élevée de défauts profonds (de l'ordre de  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ) dans le silicium amorphe qui empêchait son

## Chapitre 2 : Cellule Photovoltaïque en Silicium

dopage et dégradait en même temps les propriétés électroniques (photoconductivité, mobilité des porteurs). Avec cette densité élevée de défauts profonds, le niveau de Fermi reste bloqué et les atomes dopants introduits sont inactifs. Le dopage du silicium amorphe est rendu possible grâce à l'introduction de l'hydrogène. En effet, l'hydrogène atomique sature les liaisons pendantes ce qui se traduit par une baisse de la densité de défauts profonds jusqu'à quelques  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$  pour un bon silicium amorphe hydrogéné. La concentration d'hydrogène dans le silicium amorphe hydrogéné varie de 6 % à 35 % car son niveau final dépend du substrat, du plasma, du dopage, de la température de dépôt et des éventuels recuits. Spear et LeComber ont réussi en 1975 à doper le silicium amorphe hydrogéné avec du phosphore (type n) et du bore (type p) [15]. Dès lors, le silicium amorphe devenait un matériau utile car pouvant être intégrés dans des dispositifs classiques (jonctions p-n, transistors). Les premières cellules solaires à base de silicium amorphe hydrogéné furent réalisées par Carlson en 1976 avec des rendements de conversion allant de 2 % à 2,5 % [16].

Le silicium amorphe hydrogéné est un matériau qui possède plusieurs avantages. Il peut être déposé uniformément sur de grandes surfaces et à faible coût. Les applications possibles avec ce matériau sont multiples : les cellules photovoltaïques (diodes p-i-n ou cellules à hétérojonctions), les matrices d'adressages pour écrans plats TFT-LCD, les détecteurs optoélectroniques à bas coût (diodes p-i-n), détecteurs de rayonnements (le a-Si:H a une bonne résistance aux radiations, la structure du dispositif est aussi de type diode p-i-n)...

### 2.3. Cellules photovoltaïques à hétérojonctions de silicium HIT

Les premiers composants à base d'hétérojonctions a-Si:H/c-Si ont été réalisés par l'équipe de Walter FUHS [17]. Cette découverte fut exploitée par l'entreprise japonaise SANYO pour réaliser des cellules solaires. SANYO a commencé ces premiers travaux sur les cellules silicium à hétérojonctions a-Si:H/c-Si vers la fin des années 1980 et la première publication a été faite en 1991 [2]. SANYO domine actuellement le marché de la production des cellules silicium à hétérojonctions avec ses cellules HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin film) dont l'originalité est d'utiliser une couche de silicium amorphe hydrogéné intrinsèque (non dopé) entre le silicium amorphe hydrogéné dopé et le silicium cristallin. Cette couche de silicium amorphe intrinsèque joue un rôle primordial dans les valeurs élevées de  $V_{oc}$  obtenues avec la technologie HIT. Suite au succès obtenu par l'entreprise SANYO, plusieurs laboratoires européens ont débuté des recherches en se basant sur le même type de structure mais en utilisant un substrat de type p, plus largement utilisé dans l'industrie photovoltaïque. Le groupe le plus avancé est constitué du laboratoire allemand de Hahn-Meitner-Institut de Berlin en collaboration avec l'Université de Hagen. Ce groupe est parvenu à fabriquer des cellules sur substrat non texturé d'une épaisseur de  $350 \mu\text{m}$  avec BSF, possédant un rendement de 16.2%. Ce résultat laisse penser que ce type de cellule avec une texturation de surface et un champ arrière (BSF) fait de silicium amorphe est très susceptible d'atteindre de très hauts rendements.

#### 2.3.1. Structure de base de la cellule HIT

La figure 2.4 représente la structure conventionnelle d'une cellule en silicium à hétérojonctions où les contacts sont placés sur les deux faces de la structure. Sur un substrat de silicium cristallin, sont déposées sur les deux faces des couches de silicium amorphe hydrogéné qui vont créer des hétérojonctions entre le silicium cristallin et le silicium amorphe.

## Chapitre 2 : Cellule Photovoltaïque en Silicium

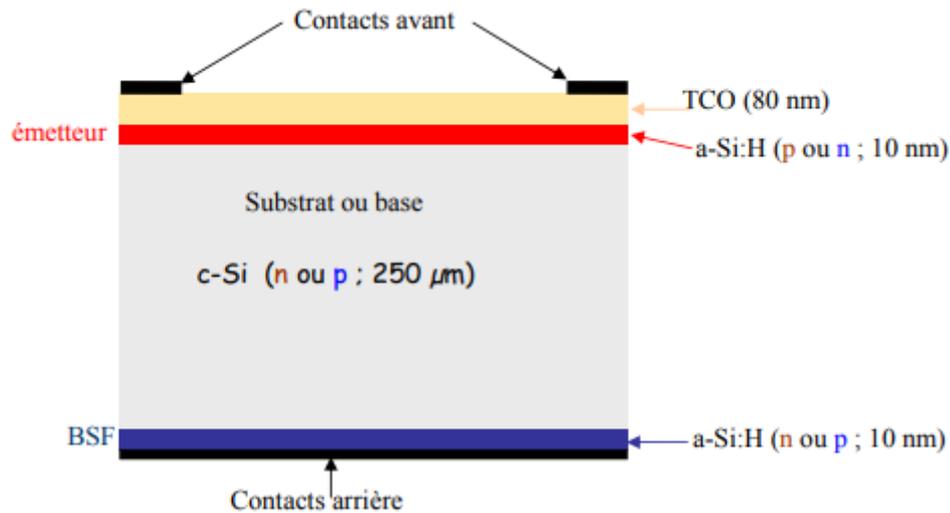


Figure 2.4 : Structure d'une cellule photovoltaïque silicium à hétérojonctions [2].

est appelée émetteur. La couche de a-Si:H déposée sur la face arrière est du même type de dopage que le substrat et est appelée BSF (*Back Surface Field*). Au-dessus de l'émetteur est ensuite déposé un oxyde transparent conducteur. Les contacts métalliques sont enfin placés sur les deux faces de la cellule HIT.

### 2.3.2. Constituants de base de la cellule silicium à hétérojonctions

#### 2.3.2.1. L'oxyde transparent conducteur

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

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

Les oxydes transparents conducteurs sont des matériaux à grand gap. Il existe une grande variété d'oxydes transparents conducteurs possibles. Nous avons les oxydes de zinc, les oxydes d'étain et les oxydes d'indium qui peuvent être dopés avec un grand nombre d'éléments atomiques (selon les cas : Al, In, Ga, F, Sn). L'oxyde d'indium dopé à l'étain nommé ITO (*Indium Tin Oxide*) est l'oxyde transparent conducteur le plus connu et aussi le plus utilisé. L'ITO possède en effet d'excellentes propriétés de transparence de l'ordre 80 % - 90 % sur le spectre visible et une résistivité faible de  $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$  à  $5 \cdot 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ . 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

## Chapitre 2 : Cellule Photovoltaïque en Silicium

passivation de la surface du substrat c-Si. Le nitrure de silicium ( $\text{SiN}_x$ ) est généralement utilisé pour ce type de structure

### 2.3.2.2. L'émetteur

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

### 2.3.2.3. BSF (Back Surface Field)

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

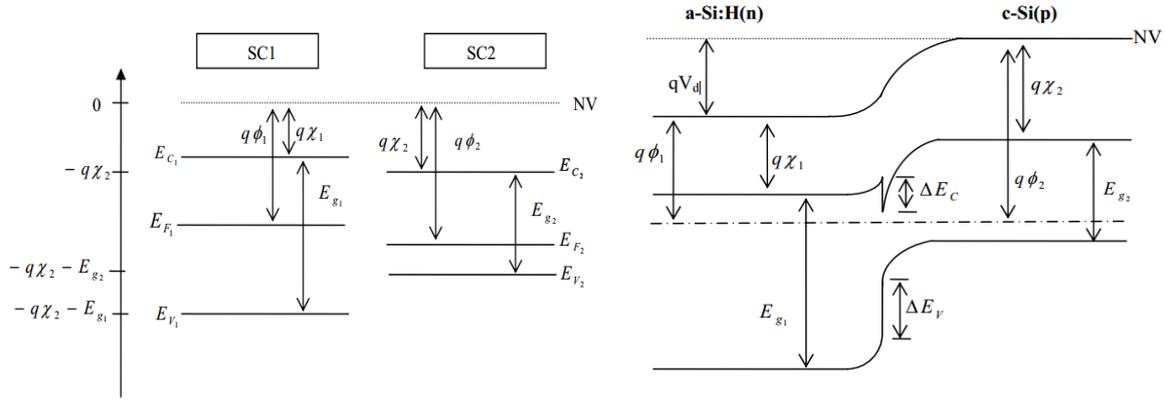
### 2.3.2.4. Les contacts

Les contacts métalliques sont placés sur les deux faces de la cellule pour les structures standards représentées sur la figure II.4. Ces contacts permettent de collecter le courant photogénéré. Les contacts doivent être ohmiques, c'est-à-dire que la caractéristique  $I=f(V)$  du contact doit être linéaire. La résistance des contacts est un paramètre très important. La forte résistance des contacts augmente la résistance série de la cellule et baisse le facteur de forme et le rendement. Différents procédés sont utilisés pour réaliser les contacts. Dans le cadre des cellules photovoltaïques industrielles en silicium multicristallin, les contacts sont généralement réalisés par sérigraphie. Pour les cellules photovoltaïques à haut rendement, la pulvérisation cathodique ou l'évaporation sous vide sont utilisées.

## 2.4. Principe d'une Heterojunction HIT: (Heterojunction with Intrinsic Thin layer)

Lorsque deux matériaux semi-conducteurs sont en contact, il se produit un échange des charges qui fait tendre le système vers l'équilibre thermodynamique. L'émetteur qui est la zone fortement dopée dans le cas d'une homojonction est remplacé par un matériau à grand gap (ici le silicium amorphe, a-Si:H). Ce matériau à grand gap doit satisfaire certaines conditions comme avoir une faible absorption et avoir une faible recombinaison. Le diagramme de bande dépend des paramètres suivants : le gap ( $E_{g1}$  et  $E_{g2}$ ), l'affinité électronique ( $\chi_1$  et  $\chi_2$ ) et le niveau de dopage ( $\delta_1$  et  $\delta_2$ ) de ces deux matériaux en contact (figure 2.5(a)).

## Chapitre 2 : Cellule Photovoltaïque en Silicium



Lors du raccordement des bandes de conduction et de valence, la différence entre les gaps et les affinités électroniques sont à l'origine des discontinuités. La figure 2.5(b) représente le diagramme de bande d'une hétérojonction a-Si:H(n)/c-Si(p). Le modèle d'Anderson est un modèle de base pour décrire les conditions de contact deux matériaux semi-conducteurs. Le modèle est basé sur les propriétés électroniques le matériau est le gap  $E_g$ , la constante diélectrique  $\epsilon$ , l'affinité électronique et le niveau d'énergie. Dans ce modèle, on considère que le transport de charges se fait par injection dans les régions quasi-neutres et aussi par les phénomènes de génération/recombinaison dans la zone de charge d'espace. On considère aussi que les quasi-niveaux de Fermi ne varient pas dans la zone de charge d'espace. Le raccordement des bandes de conduction et de valence se fait en respectant les relations suivantes [3] :

$$\text{Le désaccord de la bande de conduction : } \Delta E_c = q(\chi_2 - \chi_1) \quad (\text{II.1})$$

$$\text{Le désaccord de la bande de valence } \Delta E_v = q(\chi_1 - \chi_2) + E_{g1} - E_{g2} \quad (\text{II.2})$$

$$\text{La tension de diffusion } qV_d = q(\phi_2 - \phi_1) \quad (\text{II.3})$$

### 2.5. Équations fondamentales dans les semi-conducteurs

Les équations de fondamentales de la physique sont l'équation de Poisson, les deux équations de courant et les deux équations de continuité. Ce système de cinq équations de base peut être ramené à un système de trois équations car les deux équations de courant sont en effet incluses dans les deux équations de continuité. La simulation numérique est basée sur la résolution de ces trois équations fondamentales qui régissent le transport de charge dans les semi-conducteurs.

## Chapitre 2 : Cellule Photovoltaïque en Silicium

### 2.5.1. Équation de Poisson

C'est l'équation qui relie le potentiel électrostatique ( $\psi$ ) à la densité de charge d'espace ( $\rho$ ). L'équation de Poisson est définie ci-dessous :

$$\text{div}(\epsilon \nabla \psi) = -\rho \quad (\text{II.4})$$

Où ;  $\epsilon$  : la permittivité électrique du matériau.

### 2.5.2. Équations de continuité

Les équations de continuité décrivent la vitesse de variation en fonction du temps des concentrations des porteurs. L'équation de continuité s'exprime par :

$$\frac{\partial n}{\partial t} = 1/q \text{ div} J_n + G_n - R_n \quad \text{pour les électrons} \quad (\text{II.5})$$

►

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -1/q \text{ div} J_p + G_p - R_p \quad \text{pour les trous} \quad (\text{II.6})$$

$G_n$  et  $G_p$  sont les taux de génération pour les électrons et les trous,  $R_n$  et  $R_p$  sont respectivement les taux de recombinaisons pour les électrons et les trous,  $J_n$  et  $J_p$  sont les densités des courants des électrons et des trous.

### 2.5.3. Équations de transport

Afin de pouvoir résoudre les équations précédentes, nous avons besoin de trouver une expression pour  $J_n$  et  $J_p$ . Ces deux grandeurs sont calculées par le modèle dit Drift-Diffusion, et elles sont données par :

$$J_n = -q \mu_n n \nabla E_{fn} \quad (\text{II.7})$$

$$J_p = -q \mu_p p \nabla E_{fp} \quad (\text{II.8})$$

Avec  $q$  est la charge électrique, ( $\mu_n$  et  $\mu_p$ ) sont les mobilités des électrons et des trous. ( $E_{fn}$  et  $E_{fp}$ ) sont les quasi-niveaux de Fermi des électrons et des trous sont reliés ainsi aux concentrations des électrons et des trous ( $n$  et  $p$ ), ils sont égaux et constants tout au long de la structure à l'équilibre thermodynamique, le courant est alors nul. On peut donc en déduire que :

$$n = n_i \exp\left(\frac{E_{fi} - E_{fn}}{kT}\right) \quad (\text{II.9})$$

$$p = n_i \exp\left(-\frac{E_{fi} - E_{fp}}{kT}\right) \quad (\text{II.10})$$

$$E_{fn} = E_i - kT \ln(n / n_i) \quad (\text{II.11})$$

$$E_{fp} = E_i - kT \ln(n / p_i) \quad (\text{II.12})$$

En introduisant ces équations dans les expressions de densité de courant, on obtient :

## Chapitre 2 : Cellule Photovoltaïque en Silicium

$$\vec{J}_n = -n\mu_n \nabla E_{fi} + \mu_n K T \nabla n - n\mu_n \nabla K T \ln(ni) \quad (\text{II.13})$$

$$\vec{J}_p = -p\mu_p \nabla E_{fi} - \mu_p K T \nabla n + p\mu_p \nabla K T \ln(ni) \quad (\text{II.14})$$

Le dernier terme est nul dans le cas où l'énergie de la bande interdite ne varie pas en fonction de la position, comme par exemple l'effet de rétrécissement de gap. Sachant que :

$$E_{fi} = q \cdot \nabla \psi \quad (\text{II.15})$$

Nous pouvons réécrire l'Eq. (II.13) et l'Eq. (II.14) comme suit :

$$J_n = qn\mu_n \varepsilon + qD_n \nabla n \quad (\text{II.16})$$

$$J_p = qn\mu_p \varepsilon + qD_p \nabla n \quad (\text{II.17})$$

Dans les équations Eq. (II.16) et Eq. (II.17), le premier terme est lié au déplacement des porteurs par le champ électrique (en anglais Drift), et le deuxième terme est lié à la diffusion des porteurs. C'est la raison pour laquelle ce modèle est appelé le modèle de Drift-Diffusion.

Où ( $D_n$ ,  $D_p$ ) sont les coefficients de diffusion des électrons et des trous et ils sont donnés par :

$$D_{n,p} = \frac{KT}{q} \mu_{n,p} \quad (\text{II.18})$$

### 2.6. Les phénomènes de recombinaison dans les semi-conducteurs

Les principaux mécanismes de recombinaison des porteurs de charge libres dans les semi-conducteurs sont : la recombinaison SRH, radiatives, Auger et la recombinaison surface (cas particulier de SRH (Shockley-Read-Hall)).

À chaque mécanisme de recombinaison des porteurs de taux  $R$  est associée une durée de vie  $\tau$  par la relation :

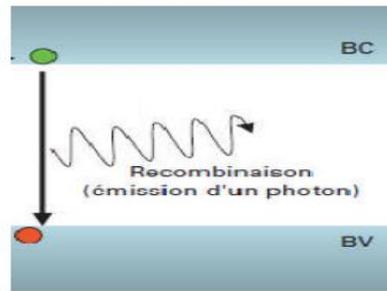
$$R = \frac{\Delta n(p)}{\tau_{n(p)}} \quad (\text{II.19})$$

$\Delta n(p)$  : La densité d'électrons (de trous) en excès. Dans notre cas, ils correspondent aux porteurs photo-générés.

#### 2.6.1 Recombinaison radiative

Le porteur en excès repasse directement de la bande de conduction à la bande de valence, en évacuant son énergie par émission d'un photon (figure II.6).

## Chapitre 2 : Cellule Photovoltaïque en Silicium



**Figure 2. 6 :** *Recombinaison radiative d'un électron de la bande de conduction avec un trou de la bande de valence [18].*

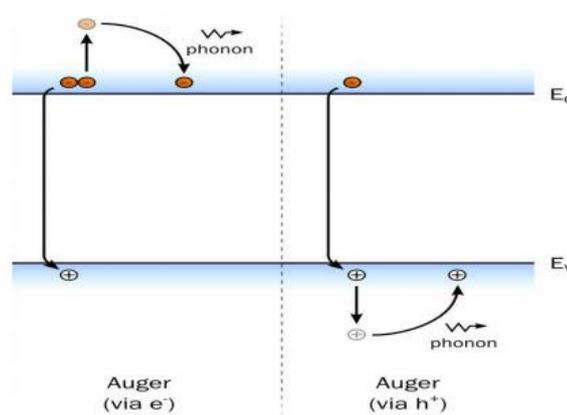
Ce processus est important pour les matériaux à bande interdite directe et faible pour les matériaux à gaps indirects. Le taux de recombinaison net est défini par :

$$U = B_r (np - n_i^2) \quad (\text{II.20})$$

Où  $B_r$  ( $\text{cm}^3/\text{s}$ ) est le coefficient de recombinaison radiative. Pour un semi-conducteur à gap direct,  $B_r$  compris entre  $10^{-11}$  et  $10^{-9} \text{cm}^3/\text{s}$  [19].

### 2.6.2 La recombinaison Auger

La recombinaison Auger est aussi un des phénomènes physiques à prendre en compte dans notre étude. La recombinaison Auger est un processus d'interaction à trois particules (voir figure II.7). L'excès d'énergie de la recombinaison d'une paire électron-trou est fourni à une troisième particule qui peut être un trou dans la bande de valence ou un électron dans la bande de conduction [20].



**Figure 2. 7 :** *Exemple de recombinaison Auger [21].*

L'expression correspondante du taux net de recombinaison s'écrit [21] :

$$U = (C_n n + C_p p) (np - n_i^2) \quad (\text{II. 21})$$

Avec :  $C_n$  et  $C_p$  les coefficients Auger pour les électrons et les trous.

## Chapitre 2 : Cellule Photovoltaïque en Silicium

La recombinaison Auger devient dominante dans le cas de substrats fortement dopés ou dans le cas où nous sommes en régime de forte injection (cellules sous concentration de la lumière). Les coefficients Auger dépendent donc de la concentration de dopants et du niveau d'injection.

### 2.6.3 La recombinaison Shockley Read Hall (SRH)

La recombinaison Shockley-Read-Hall (SRH) est unanimement reconnue pour décrire les processus de recombinaison des porteurs excédentaires via des défauts situés à une énergie  $E_t$  dans la bande interdite d'un matériau semi-conducteur. Le taux de recombinaison SRH est calculé en considérant, comme représentés sur la figure II.8, les quatre mécanismes responsables de la population ou de la dépopulation d'un état particulier à l'énergie  $E_t$  dans la bande interdite de mobilité :

(A) l'émission d'un électron, (B) la capture d'un électron, (C) l'émission d'un trou, (D) la capture d'un trou.

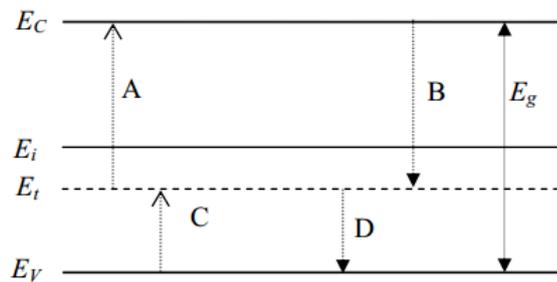


Figure 2. 8 : Transitions via un niveau de la bande interdite.

L'expression correspondante du taux net de recombinaison SRH est :

$$R_{SRH} = \frac{(pn - n_i^2)}{\tau_{p0} \left[ n + n_i \exp\left(\frac{E_t - E_i}{K_B T}\right) \right] + \tau_{n0} \left[ p + n_i \exp\left(\frac{E_t - E_i}{K_B T}\right) \right]} \quad (\text{II. 22})$$

Avec  $E_i$  : est le niveau de Fermi dans le semi-conducteur intrinsèque.  $\tau_{n0}$  et  $\tau_{p0}$  sont respectivement la durée de vie pour les électrons et les trous définies par les expressions suivantes :

$$\tau_{n0} = \frac{1}{\sigma_n v_{th,n} N_t} \quad \text{et} \quad \tau_{p0} = \frac{1}{\sigma_p v_{th,p} N_t} \quad (\text{II. 23})$$

Où  $N_t$  est la densité des pièges situés à  $E_t$ ,

$v_{th,n}$  et  $v_{th,p}$  sont les vitesses thermiques des électrons et des trous,  $\sigma_n$  et  $\sigma_p$  sont les sections efficaces de capture des électrons et des trous par les états  $N_t$  situés à l'énergie  $E_t$ .

## 2.7. Les avantages de la technologie silicium à hétérojonction

La technologie des cellules silicium à hétérojonctions possède plusieurs avantages :

- Elle possède un grand potentiel d'amélioration du rendement avec l'optimisation du dépôt du silicium amorphe (passivation du silicium cristallin).

## Chapitre 2 : Cellule Photovoltaïque en Silicium

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

### 2.8. Conclusion

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

# **Chapitre 3 : Simulation de la cellule photovoltaïque à hétérojonction de silicium HIT**

## Chapitre 3 Simulation de la cellule photovoltaïque à hétérojonction de silicium HIT

### 3.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous étudions la sensibilité des principaux facteurs qui interviennent dans le rendement de conversion des cellules HIT à base de silicium cristallin de type p : (ITO/a-Si:H(n)/c-Si(p)) afin d'optimiser les caractéristique  $J = f(V)$ . Nous commençons par la présentation de simulateur numérique SCAPS unidimensionnel développé par ELIS, à l'université de Gent en Belgique. Ensuite nous présentons la structure de la cellule solaire à hétérojonction HJ (silicium amorphe / silicium cristallin) étudiée et nous terminons par les résultats obtenus.

### 3.2. Simulation numérique de l'hétérojonction a-Si:H/c-Si

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

- AMPS-1D « Analysis of Microelectronic and Photonic Structures » développé à Pennsylvania State university (USA) par l'équipe du professeur Stephen Fonash [22].
- ASPIN développé à l'université de Ljubljana (Slovénie) ASPIN développé à l'université de Ljubljana (Slovénie) [23]
- ASDMP « AmorphousSiliconDeviceModelling Program » développé par le professeur ParsathiChatterjee de l'Indian Association for Cultivation of Science (Kolkata, Inde) [24]
- ASA « AmorphousSemiconductorAnalysis» développé à l'université technologique de Delft (Pays Bas) [25].
- ATLAS de Silvaco International (USA) [26].
- AFORS-HET « Automat for Simulation of Heterojunction » développé au HahnMeintner Institute (Allemagne) [27].
- SCAPS « A Solar Cell Capacitance Simulator » unidimensionnel développé par ELIS, à l'université de Gent en Belgique [28].

#### 3.2.1. Présentation de logiciel de simulation SCAPS

SCAPS (Solar Cell Capacitance Simulator) est un logiciel de simulation numérique des cellules solaires unidimensionnelles développé par le département des systèmes électroniques et informatiques (ELIS), à l'université de Gent en Belgique. Plusieurs chercheurs ont contribué au développement de ce logiciel : Alex Niemegeers, Marc Burgelman, Koen Decock, Johan Verschraeagen, StefaanDegrave [29].

Ce logiciel est disponible gratuitement pour la communauté des recherches photovoltaïques (PV) (Instituts et établissements de recherche). Il fonctionne sur PC sous les systèmes d'exploitation Windows 95, 98, NT, 2000, XP, Vista, Windows 7, Windows 8 et occupe 50 MB d'espace sur le disque. SCAPS est développé pour les cellules de la famille CuInSe<sub>2</sub> et CdTe. Cependant, plusieurs extensions ont amélioré ses capacités de façon à devenir applicable pour les cellules solaires cristallines (de la famille Si et GaAs), ainsi que les cellules

## Chapitre 3 Simulation de la cellule photovoltaïque à hétérojonction de silicium HIT

solaires amorphes (a-Si et les micro-morphes Si). Un aperçu de ses principales caractéristiques est donné ci-dessous :

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

### 3.2.2. Utilisation du logiciel

Cliquez sur l'icône ci-dessus sur le bureau, ou double-cliquez sur le fichier SCAPS3200.EXE. Lorsque SCAPS est ouvert, le panneau de commande illustré à la Figure 3.1 s'affiche.

## Chapitre 3 Simulation de la cellule photovoltaïque à hétérojonction de silicium HIT

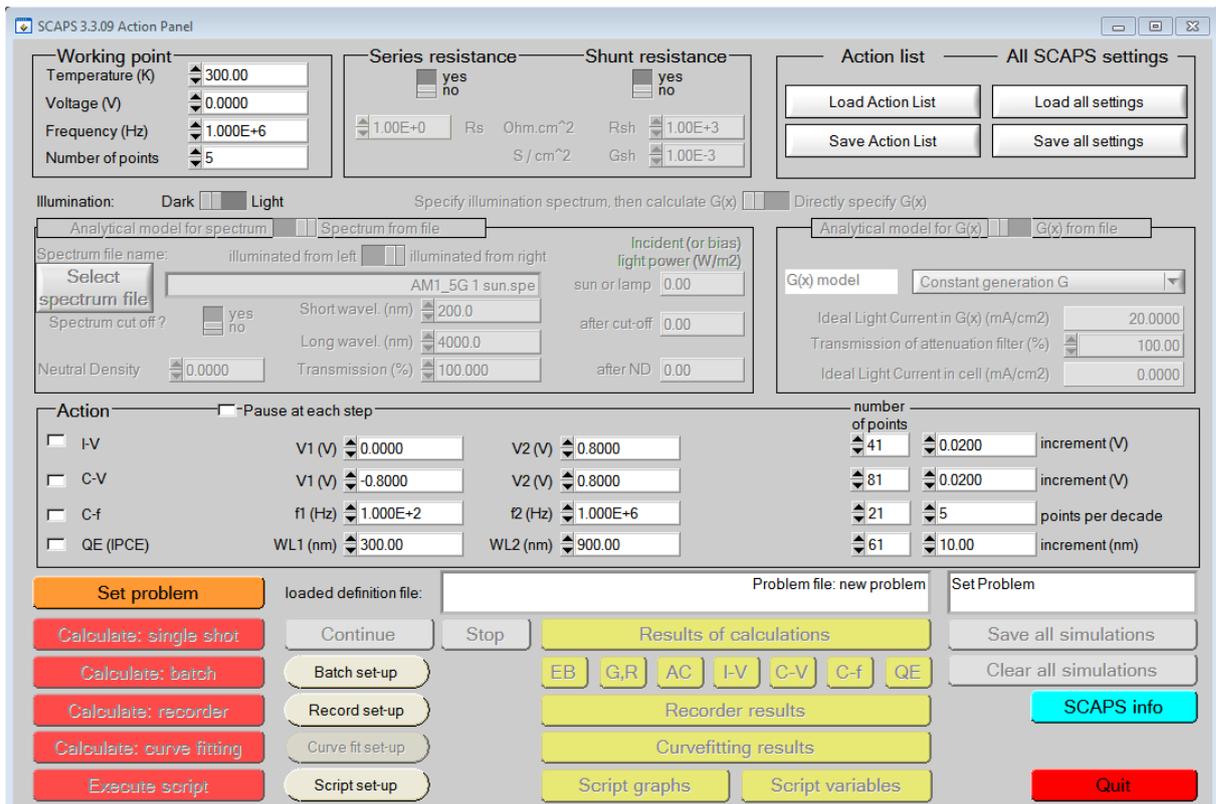


Figure 3. 1 : Fenêtre d'exécution « action panel » du logiciel SCAPS

### 3.2.3. Action panel

Tout d'abord, démarrez l'application en tant que fenêtre d'exécution du menu principal Ouvert. Vous pouvez accéder à tout moment aux deux autres fenêtres, la fenêtre de conception La fenêtre des équipements et des résultats est illustrée à la Figure 3.2.

## Chapitre 3 Simulation de la cellule photovoltaïque à hétérojonction de silicium HIT

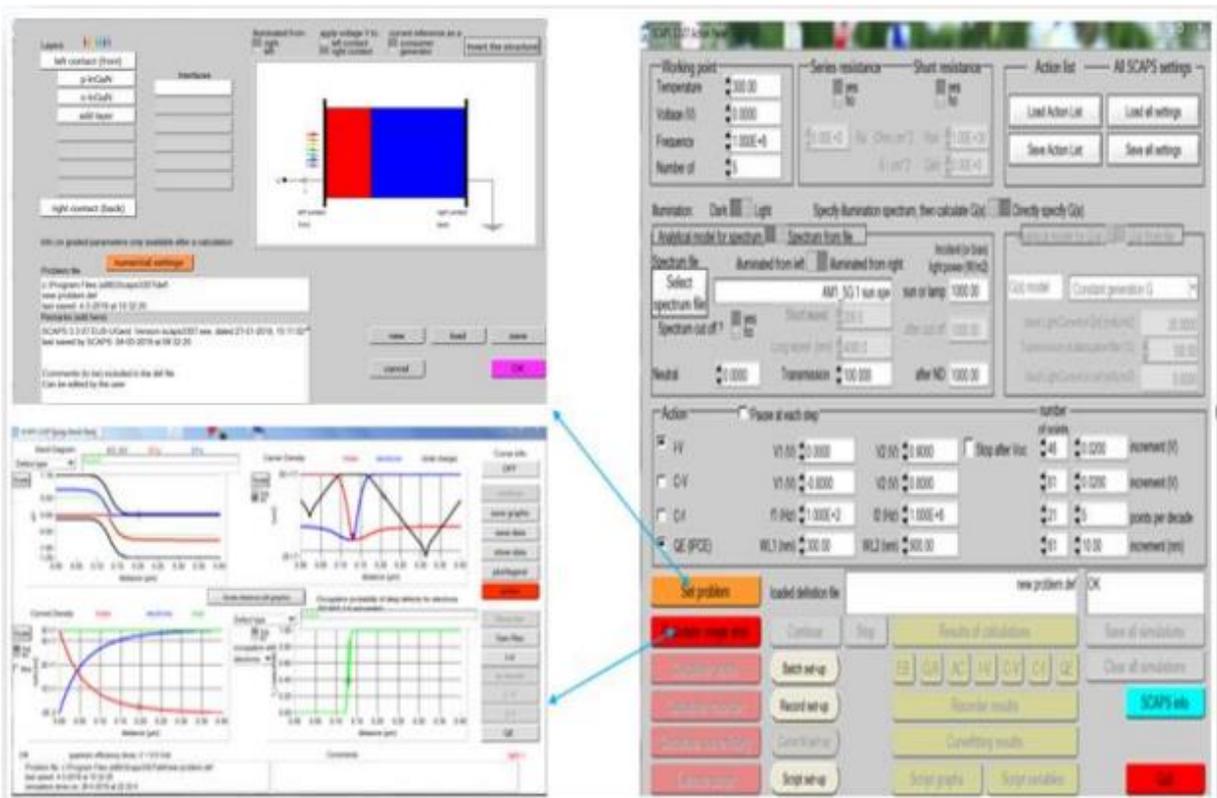


Figure 3. 2 : Fenêtre d'exécution, de conception du dispositif et des résultats du logiciel SCAPS

### 3.2.4. Bloc « working point », « illumination » et « series and shunt resistance »

Cette partie spécifie le point de fonctionnement.

❖ working point :

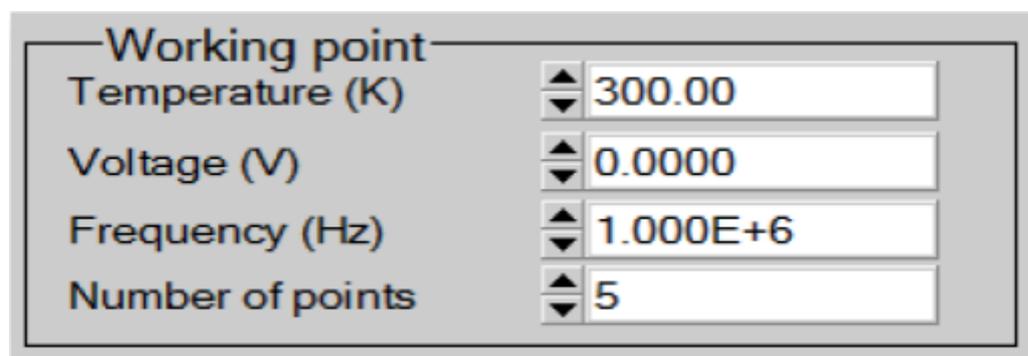


Figure 3. 3 : Le point de fonctionnement

## Chapitre 3 Simulation de la cellule photovoltaïque à hétérojonction de silicium HIT

Les champs présentés sont [30]:

- ✓ **Température T** : Importante pour toutes les mesures. Remarque : Dans SCAPS,  $N_c(T)$ ,  $N_v(T)$ , la vitesse thermique, la tension thermique et toutes leurs dérivées sont la seule variable avec une corrélation thermique claire ; doit être saisie Manuellement, pour chaque valeur T, le paramètre du matériau correspondant.
- ✓ **Tension V** : Elle n'implique pas de simulation I-V et C-V. C'est la tension Biais DC C-f et EQE ( $\lambda$ ) dans la simulation. SCAPS démarre toujours à 0 V, Sous la tension de point de fonctionnement à travers de nombreuses étapes, ces étapes doivent également Spécifier.
- ✓ **Fréquence f** : Cela n'a rien à voir avec la simulation I-V, EQE ( $\lambda$ ) et C-f. C'est ici Simuler la fréquence de la caractéristique C-V.
- ✓ **Nombre de points** : le nombre de points utilisés pour tracer la courbe
- ✓ **Résistance série et résistance shunt (parallèle)** : Ces deux paramètres influencent sur la caractéristique I-V, elle représente les pertes ohmiques de la cellule (voir la Figure 3.4) [31]

Series resistance		Shunt resistance	
<input checked="" type="checkbox"/> yes		<input checked="" type="checkbox"/> yes	
<input type="checkbox"/> no		<input type="checkbox"/> no	
1.00	$R_s$ Ohm.cm <sup>2</sup>	1.00E+3	$R_{sh}$
	S / cm <sup>2</sup>	1.00E-3	$G_{sh}$

Figure 3. 4 : Résistance série et parallèle.

- ✓ **L'illumination** : Il est utilisé pour toutes les mesures. Pour QE ( $\lambda$ ), il détermine Conditions de polarisation de la lumière. Les paramètres de base sont : sombre ou Lumière, choix de la surface éclairée, choix du spectre. Spectre d'éclairage un Le soleil avec une qualité de l'air globale de 1,5 (= 1000 W / m<sup>2</sup>) est le spectre par défaut, mais il y a Il existe également une large gamme de lumière monochromatique et de spectre pour plus Simulation personnalisée. S'il existe un simulateur optique, nous pouvons immédiatement Chargez le fichier de configuration généré au lieu d'utiliser le spectre [30].

## Chapitre 3 Simulation de la cellule photovoltaïque à hétérojonction de silicium HIT

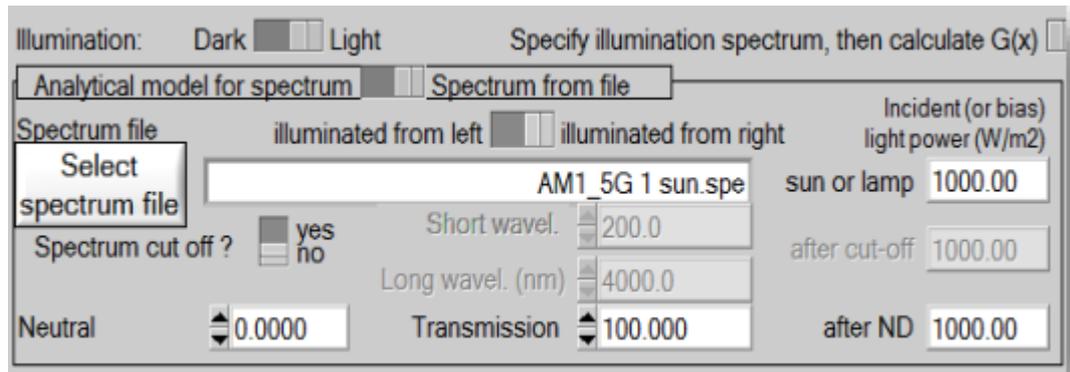


Figure 3. 5 : L'illumination

### 3.2.5. Bloc « Action » :

Grâce à ce bloc, nous pouvons choisir la quantité requise afin de les simuler efficacement :

- ✓ Nous pouvons mesurer les caractéristiques I-V en remplissant les champs appropriés : point initial, Le point final, l'étape et le nombre de points sont automatiquement affichés.
- ✓ Capacité-tension, capacité-fréquence et réponse spectrale sont les mêmes que ci-dessus [31].

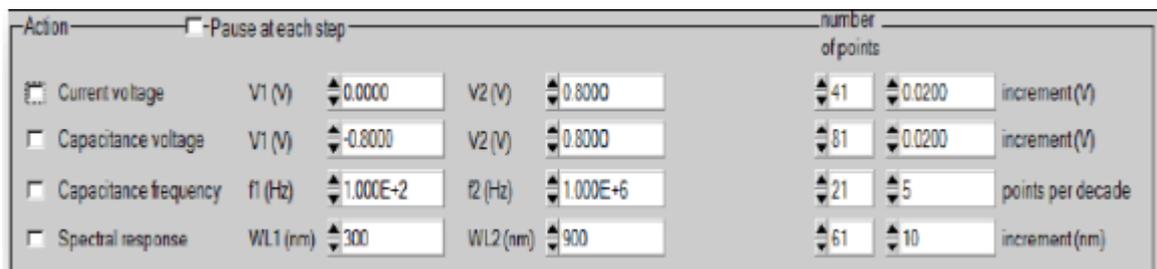


Figure 3. 6 : Action de bloc.

### 3.2.6. Panneau de définition des cellules solaires

En appuyant sur le bouton "Définir les questions" dans le panneau de commande, nous obtiendrons la fenêtre Comme le montre la Figure 3.7 : Panneaux définis appelés cellules solaires ou cellules solaires Panneau de définition de cellule [32].

## Chapitre 3 Simulation de la cellule photovoltaïque à hétérojonction de silicium HIT

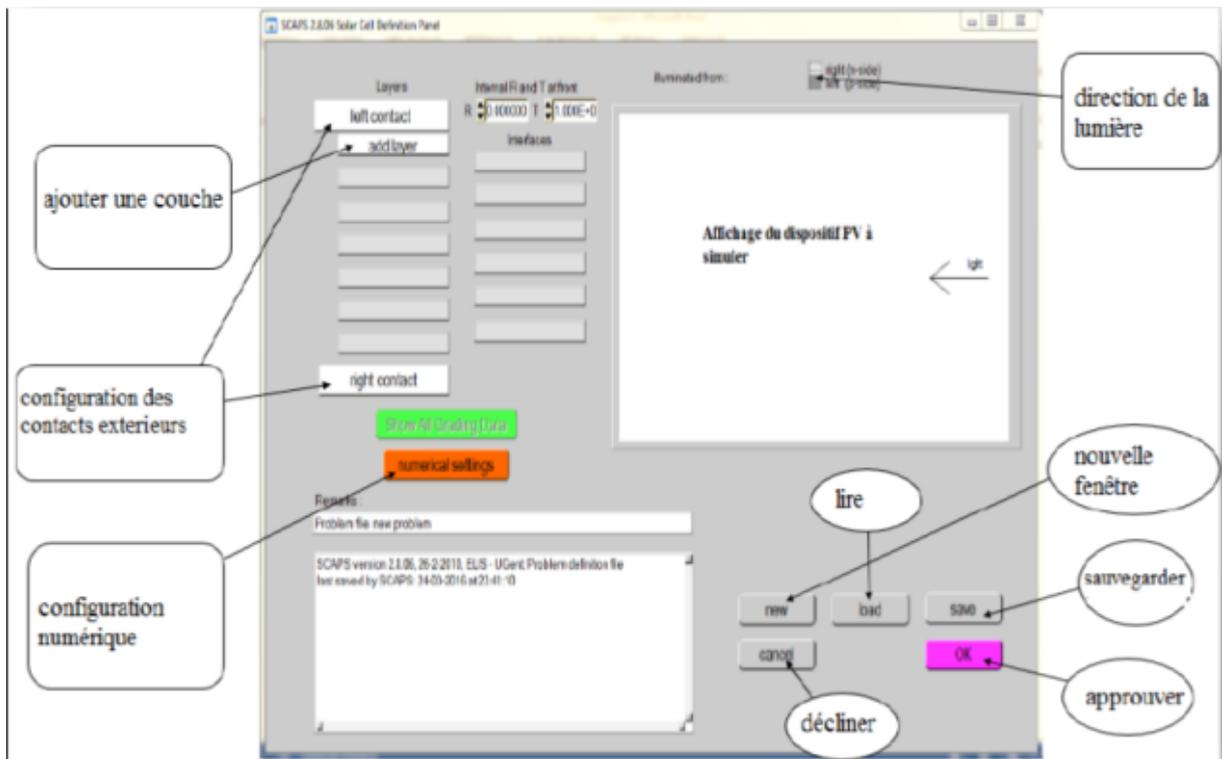


Figure 3. 7 : Panneau de définition d'une cellule solaire

- a. **New** : afin crée un nouveau dispositif photovoltaïque.

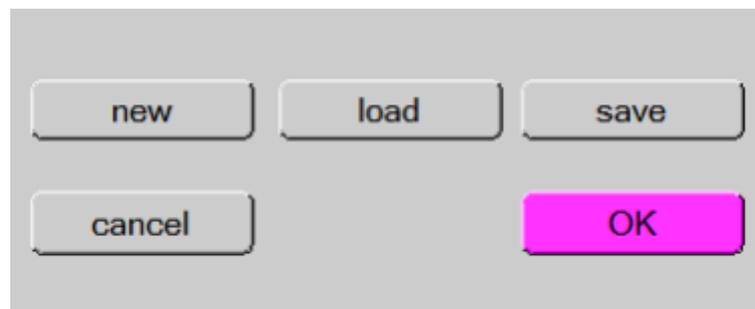


Figure 3. 8 : Définir le problème

- b. **Add a layer** : En cliquant sur le bouton "Ajouter une couche", une fenêtre s'ouvrira (Figure 3.9) contenant différents paramètres du matériau à introduire. Ces paramètres peuvent être distribués L'uniformité ou la non-uniformité dépend des propriétés physiques du matériau.

Dans la première case, nous avons introduit le nom de la couche (correspondant au type de dopage).

Dans la deuxième case, entrez l'épaisseur de la couche.

La troisième pièce concerne la pureté du matériau et son profil.

### Chapitre 3 Simulation de la cellule photovoltaïque à hétérojonction de silicium HIT

Dans la quatrième partie, nous introduisons : le gap d'énergie, l'affinité électronique, la permittivité diélectrique, les densités effectives des bandes de conduction et de valence, les vitesses thermiques des électrons et des trous libres, les mobilités des électrons et des trous. Finalement, une case, qui permet d'ajouter les masses effectives des électrons et des trous si on tient compte du transport des porteurs par effet tunnel. Si le matériau est un composé d'éléments à concentration inégale, on peut introduire des changements progressifs dans les paramètres précédents.

Dans le cinquième bloc, figure 3.10, nous avons introduit le dopage, le type et la densité. Prendre également des stimulants Peut être introduit comme uniforme car il peut avoir des changements graduels (linéaire, parabole, ...).

Dans le sixième bloc, nous avons défini l'absorption de la couche, comme le montre la figure 3.11. L'absorption peut être définie par le modèle d'analyse fourni par SCAPS car elle peut en entrer de données. SCAPS fournit de nombreuses données d'absorption Plusieurs types de semi-conducteurs. D'autres données d'absorption peuvent également être utilisées pour les semi-conducteurs qui ne sont pas disponibles dans SCAPS, tant que les fichiers ont le même SCAPS fournit une extension du fichier d'absorption.

LAYER 3	p-c-Si
thickness ( $\mu\text{m}$ )	300.000
	uniform pure A (y=0)
The layer is pure A: y = 0, uniform	0.000
Semiconductor Property P of the pure material	pure A (y = 0)
bandgap (eV)	1.120
electron affinity (eV)	4.050
dielectric permittivity (relative)	11.900
CB effective density of states ( $1/\text{cm}^3$ )	2.800E+19
VB effective density of states ( $1/\text{cm}^3$ )	1.040E+19
electron thermal velocity (cm/s)	1.000E+7
hole thermal velocity (cm/s)	1.000E+7
electron mobility ( $\text{cm}^2/\text{Vs}$ )	1.140E+3
hole mobility ( $\text{cm}^2/\text{Vs}$ )	4.200E+2

Figure 3. 9 : Propriétés de la couche ajoutée

### Chapitre 3 Simulation de la cellule photovoltaïque à hétérojonction de silicium HIT

no ND grading (uniform)		
shallow uniform donor density ND (1/cm3)		0.000E+0
no NA grading (uniform)		
shallow uniform acceptor density NA (1/cm3)		1.500E+16

**Figure 3. 10** : propriétés des dopages définis

Absorption interpolation model

alpha pure A material (y=0)

from file  from model

Set absorption file

show

save

C:\Program Files (x86)\Scaps3309\absorption\Si.a  
bs

**Figure 3. 11** : propriétés des dopages définis

Le type des recombinaisons en volume présent est indiqué dans le côté droite du panneau des propriétés de la couche (Figure 3.12). Tous les types des recombinaisons sont présents ; directs ou au piège.

Recombination model

Band to band recombination

Radiative recombination coefficient (cm <sup>2</sup> /s)	1.100E-14
Auger electron capture coefficient (cm <sup>6</sup> /s)	2.200E-31
Auger hole capture coefficient (cm <sup>6</sup> /s)	9.900E-32

Defect 1 of p-c-Si

defect type	Single Acceptor (-/0)
capture cross section electrons (cm <sup>2</sup> )	1.000E-14
capture cross section holes (cm <sup>2</sup> )	1.000E-14
energetic distribution	Single
reference for defect energy level Et	Above EV (SCAPS < 2.7)
energy level with respect to Reference (eV)	0.550
characteristic energy (eV)	0.010

no Nt grading (uniform)

Nt total (1/cm3)	uniform Nt	1.000E+10
------------------	------------	-----------

**Figure 3. 12** : définition des types de recombinaison présents

### Chapitre 3 Simulation de la cellule photovoltaïque à hétérojonction de silicium HIT

Si on introduit les défauts (pièges) ; ils peuvent être uniformes ou non uniformes, discrets, avec des distributions gaussiennes, donneurs, accepteurs, neutres, monovalents ou divalents. On peut même définir des transitions de porteurs entre les différents niveaux d'énergie des pièges.

**c. Right and left contact :** afin de modifier les paramètres des surfaces extérieurs gauche et droite de la cellule.

**Electrical properties**

Thermionic emission / surface recombination velocity (cm/s) :

electrons 1.00E+3

holes 1.00E+3

Metal work function (eV) 6.7504 or  flat bands

Majority carrier barrier height (eV) :

relative to EF 0.1196 In batch mode, recalculate Phi m:  at each step  at first step only

relative to EV or EC 0.0000

Allow contact tunneling

Effective mass of electrons 1.00E+0

Effective mass of holes 1.00E+0

**Optical properties**

optical filter

Filter Mode  transmission  reflection

From Value

From File

Filter Value 0.000000

Complement of Filter 1.0000E+0

Select Filter File

OK cancel

**Figure 3. 13 :** *panneau des propriétés des contacts*

Les caractéristiques des contacts sont divisées en caractéristiques électriques et caractéristiques optiques. Dans les propriétés électriques, on définit : Le taux de recombinaison de surface des électrons et des trous libres. Si le contact a du travail de sortie, ou c'est idéal (solution courroie plate). Obstacles à la plupart des opérateurs. Effet tunnel (si vous voulez en tenir compte). Pour les propriétés optiques, la transmission ou la réflexion peut être définie par une valeur ou un fichier de données.

**d. Save :** Enregistrez la cellule à apprendre.

**e. load :** sélectionnez une cellule enregistrée.

**f. OK :** approuvez la cellule construite et revenez au panneau de commande pour terminer le travail.

**g. Cancel :** décliner le panneau de définition et revenir au panneau d'action.

## Chapitre 3 Simulation de la cellule photovoltaïque à hétérojonction de silicium HIT

### 3.2.7. Panneau des bandes d'énergies (résultats)

Une fois le calcul terminé, SCAPS passe au panneau de la barre d'énergie, comme illustré à la Figure 3.14. Dans ce panneau, on peut voir le diagramme de bande d'énergie, la densité de porteurs libres, Densité de courant ; au dernier point de polarisation. Si on veut afficher le résultat Pour la tension intermédiaire, nous utilisons le bouton pause dans le panneau de commande. Ce que nous pouvons faire Afficher le résultat via la commande IMPRIMER, SAUVEGARDER LES GRAPHIQUES, AFFICHER et la valeur Ensuite, il apparaîtra à l'écran. Vous pouvez couper et coller vers, par exemple, Excel, Origine ou enregistrer la valeur dans le fichier de données [31].

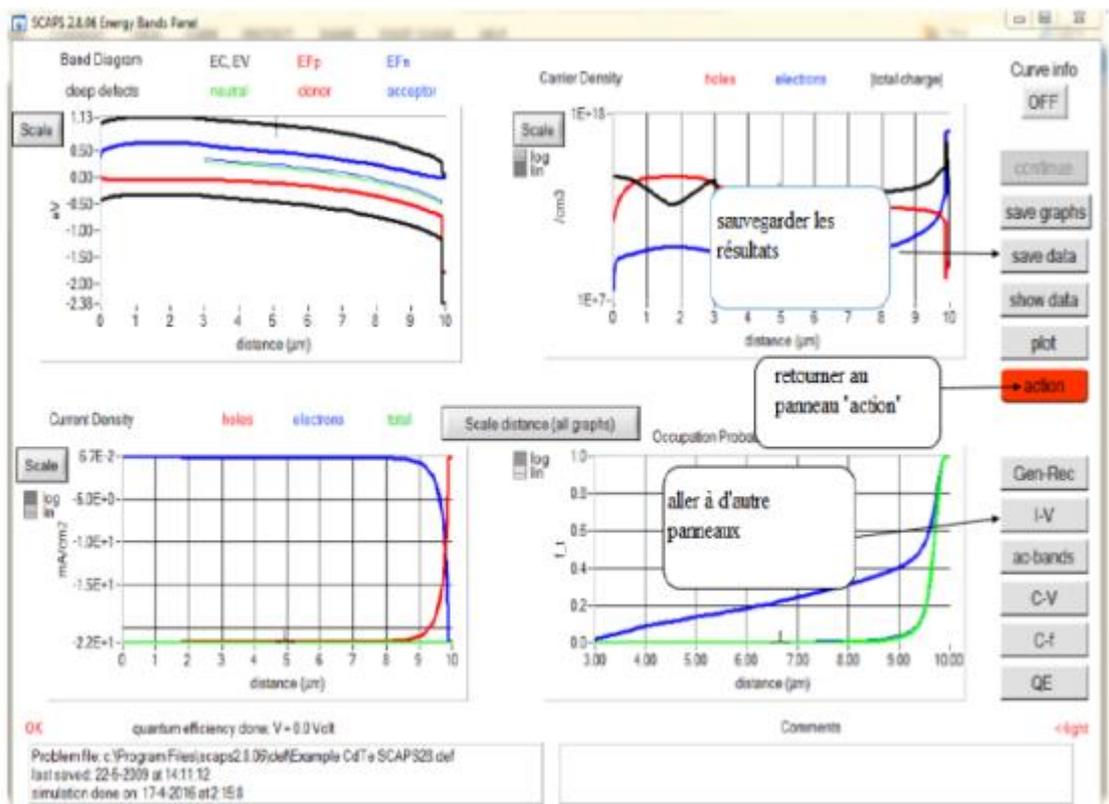


Figure 3. 14 : PANNEAU DES BANDES D'ENERGIE

Les grandeurs simulées sont :

- Caractéristique I-V.
- Capacitance en fonction de la tension « C-V ».
- Capacitance en fonction de la fréquence « C-f ».
- Rendement quantique Q-E.
- Bande d'énergie « Energy band » et bande d'énergie en régime alternatif «AC Band »

## Chapitre 3 Simulation de la cellule photovoltaïque à hétérojonction de silicium HIT

### 3.2.8. Protocole de simulation

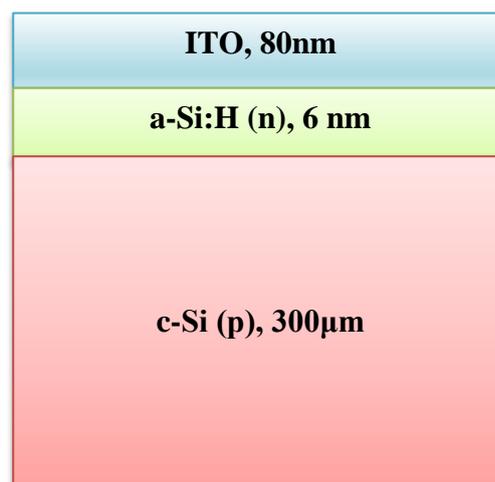
Le protocole de simulation d'une cellule solaire par logiciel SCAPES est comme suit [32] :

- Etape 1 : après le lancement du logiciel et l'ouverture de la fenêtre d'exécution on modifie les paramètres : la température, illumination, ...
- Etape 2 : modifier la structure de la cellule à travers la fenêtre « définition panel ».
- Etape 3 : exécuter la simulation « calculate », noter les résultats de simulation ( $V_{co}$ ,  $I_{cc}$ , FF,  $\eta$ ) dans la fenêtre « I-V panel », la caractéristique I.V. On peut encore afficher et copier ces résultats sous forme de tableau en appuyant « show ».

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

#### 3.3.1. Structure simulée a-Si:H(n)/c-si(p)

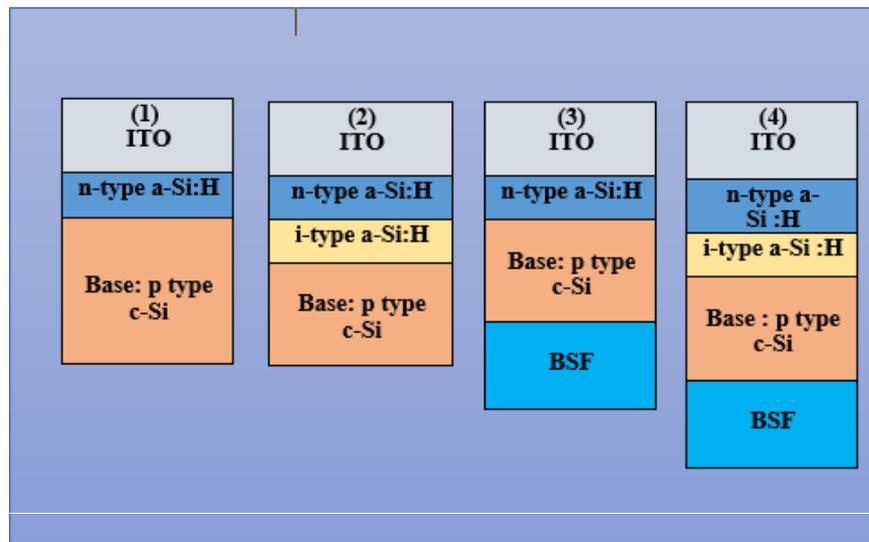
La figure 3.15 représente la structure d'une cellule photovoltaïque à simple hétérojonction HJ : ITO/a-Si:H(n)/c-Si(p). Sur un substrat du silicium cristallin c-Si de type p avec une épaisseur de 300  $\mu\text{m}$ , est placé un émetteur de silicium amorphe de type n a-Si:H de 6 nm. Cette structure a été simulée en introduisant les paramètres pour les couches de silicium cristallin et de silicium amorphe dopé p dans le logiciel SCAPS. Une couche antireflet de 80 nm reproduisant les propriétés optiques de ITO (d'oxyde d'indium et d'étain) est déposée sur la face avant au-dessus de la couche de silicium amorphe a-Si:H(n). Les contacts ohmiques sont placés aussi bien sur la face avant que sur la face arrière.



## Chapitre 3 Simulation de la cellule photovoltaïque à hétérojonction de silicium HIT

### 3.3.2. Paramètres de la structure simulée

Les paramètres utilisés pour simuler la cellule à hétérojonction a-Si:H/c-Si tel que les épaisseurs, le dopage des deux régions p et n, le gap d'énergie du Si, les densités effectives des électrons et des trous, la température ambiante (300 K), les mobilités des électrons et des trous, les vitesses thermiques des électrons et des trous sont présentées dans le tableau 3.1. la concentration de dopants (ND) et l'épaisseur du silicium amorphe hydrogéné dopé n (a-Si:H(n)) sont fixées à  $5.0 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  et 6nm, respectivement. En introduisant des modèles physiques plus spécifiques notamment par exemple la recombinaison Auger et la recombinaison SRH dans le silicium cristallin c-Si. La concentration de dopants (NA) du silicium cristallin (c-Si) est fixée à  $1.5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  et la durée de vie  $\tau_{SRH}$  est de 1 ms. Les propriétés optiques du semi-conducteur sont prises en compte en introduisant un fichier texte data dans SCAPS (Si.abs, a-Si.abs, ITO.abs). On considère que les contacts sont parfaits : conditions de bandes plates, pas de résistances de contacts, les deux surfaces sont entièrement couvertes par le métal. Le choix de nos paramètres repose sur les données générales que l'on peut trouver dans la référence [33],[34],[35],[36],[37],[38],[39] différent type émetteur. Le spectre solaire utilisé pour l'éclairement est l'AM1.5G ( $100 \text{ Mw/cm}^2$ , 300K).



## Chapitre 3 Simulation de la cellule photovoltaïque à hétérojonction de silicium HIT

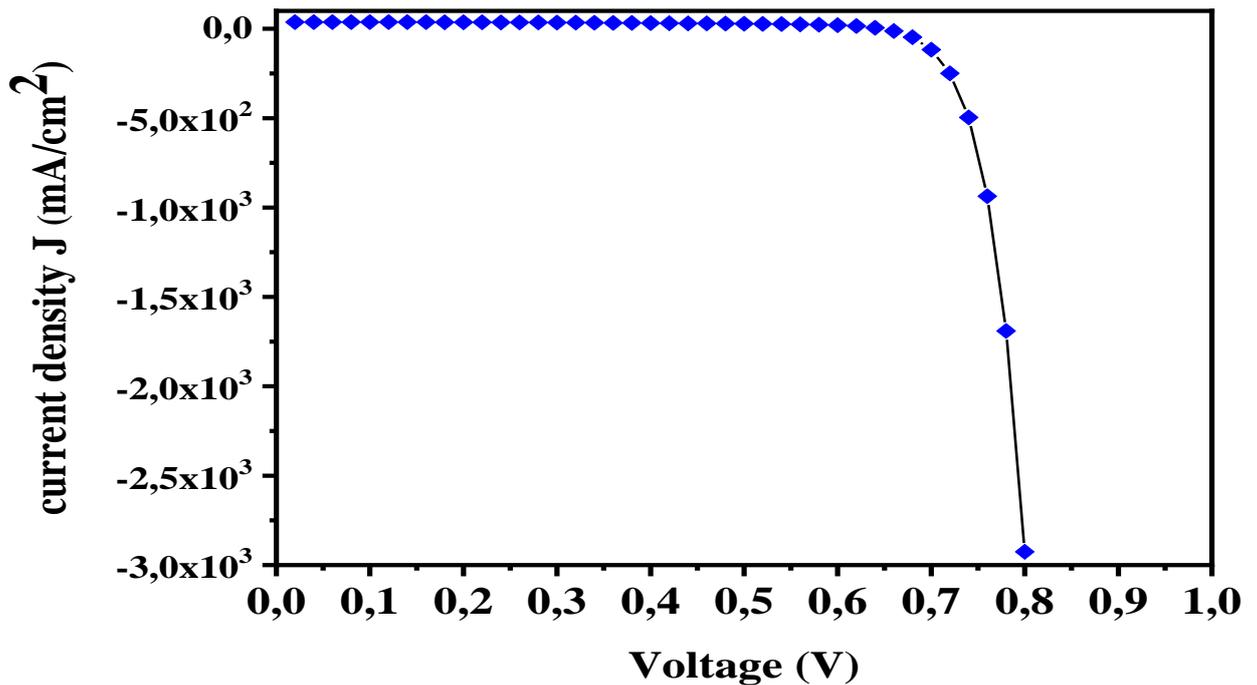
Paramètres	a-Si:H(p <sup>+</sup> )	a-Si:H(i)	a-Si:H(n)	c-Si(p)	ITO	μc-Si:H(p <sup>+</sup> )	a-Si:H(n)	μc-SiO:H(n)	μc-Si:H(n)
Épaisseur (nm)	10	3	variable	variable	80	10	3	3	3
Constante diélectrique	11,9	11,9	11,9	11,9	10	11,9	11,9	11,9	11,9
Affinité électronique (eV)	3,9	3,9	3,9	4,05	4,5	3,9	4,1	4,1	4,2
Énergie de gap (eV)	1,72	1,72	1,74	1,12	3,7	1,2	1,71	2,05	1,6
Densité de la bande de conduction (cm <sup>-3</sup> )	10 <sup>20</sup>	10 <sup>19</sup>	10 <sup>19</sup>	2,8.10 <sup>19</sup>	3.10 <sup>18</sup>	10 <sup>20</sup>	10 <sup>21</sup>	10 <sup>20</sup>	10 <sup>19</sup>
Densité de la bande de valence (cm <sup>-3</sup> )	10 <sup>20</sup>	10 <sup>10</sup>	10 <sup>19</sup>	1,04.10 <sup>19</sup>	1,16.10 <sup>19</sup>	10 <sup>20</sup>	10 <sup>21</sup>	10 <sup>20</sup>	10 <sup>19</sup>
Mobilité d'électron (cm <sup>2</sup> /Vs)	5	7	7	1,14.10 <sup>3</sup>	6.10 <sup>2</sup>	50	5	50	50
Mobilité du trou (cm <sup>2</sup> /Vs)	1	1	1	4,2.10 <sup>2</sup>	2.10 <sup>2</sup>	5	1	5	5
Accepteur (cm <sup>-3</sup> )	1.10 <sup>20</sup>	0	0	variable	10 <sup>19</sup>	10 <sup>20</sup>	0	0	0
Donneur (cm <sup>-3</sup> )	0	0	variable	0	0	0	10 <sup>16</sup>	10 <sup>19</sup>	10 <sup>20</sup>
Vitesse thermique des électrons (cm/s)	10 <sup>7</sup>	10 <sup>7</sup>	10 <sup>7</sup>	10 <sup>7</sup>	10 <sup>7</sup>	10 <sup>7</sup>	10 <sup>7</sup>	10 <sup>7</sup>	10 <sup>7</sup>
Vitesse thermique des trous (cm/s)	10 <sup>7</sup>	10 <sup>7</sup>	10 <sup>7</sup>	10 <sup>7</sup>	10 <sup>7</sup>	10 <sup>7</sup>	10 <sup>7</sup>	10 <sup>7</sup>	10 <sup>7</sup>

**Tableau 3. 1 :** PRINCIPAUX paramètres de simulation de la structure de la cellule photovoltaïque à hétérojonction HIT [ref].

### 3.4. Résultats de simulation

La figure 3.17 représente la caractéristique de courant-tension J(V) en l'obscurité et sous éclaircissement de la cellule photovoltaïque à hétérojonction ITO/a-Si:H(n)/c-Si(p).. Pour cette cellule en utilisant les paramètres du tableau 3.1, les performances obtenues (tension de circuit ouvert  $V_{co}$ , densité de courant de court-circuit  $J_{cc}$ , facteur de forme FF et rendement  $\eta$ ) sont regroupées dans le tableau 3.2.

## Chapitre 3 Simulation de la cellule photovoltaïque à hétérojonction de silicium HIT



**Figure 3. 17 :** la caractéristique de courant-tension  $J(V)$  en l'obscurité et sous éclairage de la cellule HJ : ITO/a-Si:H(n)/c-si(p)

Le tableau III.2 montre que tous les paramètres (le rendement  $\eta$ , la densité de courant de court-circuit  $J_{cc}$  et la tension de circuit ouvert  $V_{co}$ ) augmentent pour la cellule HJ de type ITO/a-Si:H(n)/c-Si(p). On observe que les résultats obtenus se rapprochent à ceux obtenues par N. Dwivedi et al. [ref].

Structure	$V_{co}$ (mV)	$J_{cc}$ ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ )	FF (%)	$\eta$ (%)	référence
HJ	646.9	36.46	82.87	19,53	Notre travail
HJ	630.6	37.28	82.48	19.39	N.Dwivedi 2013

**Tableau 3. 2 :** Paramètres électrochimiques de la cellule HJ « ITO/ a-Si:H(n)/c-Si(p) ». Cellule de référence [N.Dwivedi 2013].

### 3.4.1. Etude de l'influence du substrat c-Si

## Chapitre 3 Simulation de la cellule photovoltaïque à hétérojonction de silicium HIT

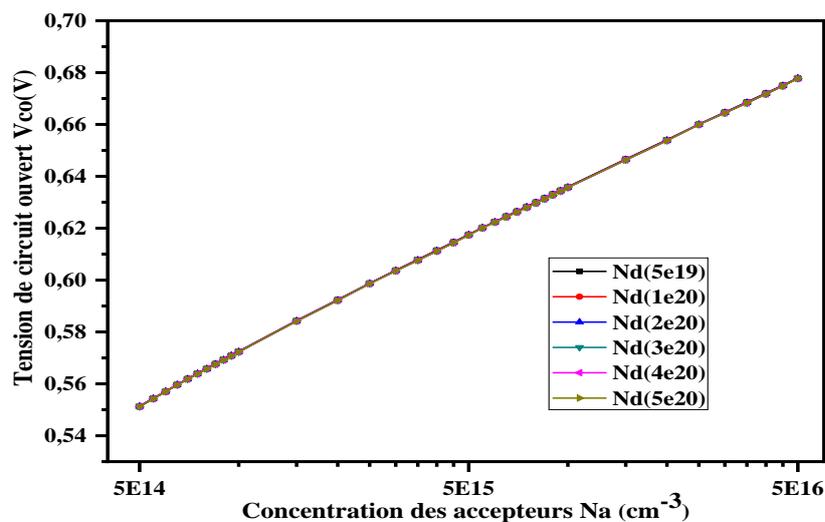
Dans cette partie, nous allons étudier l'influence de la concentration de dopants et de l'épaisseur du substrat sur les performances de la cellule à simple hétérojonction HJ : ITO/a-Si:H(n)/c-si(p).

### 3.4.1.1 Influence de la concentration de dopants sur les performances de la cellule HJ

Dans cette étape nous avons fixé l'épaisseur de substrat « c-Si (P) » à 300  $\mu\text{m}$  et l'émetteur « a-Si :H(n) » à 6 nm, puis nous avons varié la concentration des accepteurs de « c-Si (P) »  $N_a = [5.10^{14} \text{ } _5.10^{16}] \text{cm}^{-3}$  et la concentration des donneurs  $N_d = [5.10^{19} \text{ } _5.10^{20}] \text{cm}^{-3}$ .

#### Impact sur la tension de circuit ouvert $V_{co}$

Dans la figure 3.18, nous représentons la variation de la tension de circuit ouvert «  $V_{co}$  » de la cellule photovoltaïque à simple hétérojonction HJ : ITO/a-Si:H(n)/c-si(p) en fonction de concentration de dopants (NA) du substrat, pour différentes valeurs de concentration des donneurs  $N_d$  de la couche amorphe. La valeur de la concentration des donneurs  $N_d$  de la couche amorphe n'a pas d'impact sur les valeurs de la tension de circuit ouvert «  $V_{co}$  » de la cellule photovoltaïque à simple hétérojonction HJ. La tension de circuit ouvert croît de 551.24 mV à 677.73 mV avec la concentration de dopants (NA) du substrat c-Si. Et cela est dû à la tension de diffusion à l'hétérojonction a-Si:H(n)/ c-Si(p), qui détermine le  $V_{co}$ , croît avec la concentration de dopants.



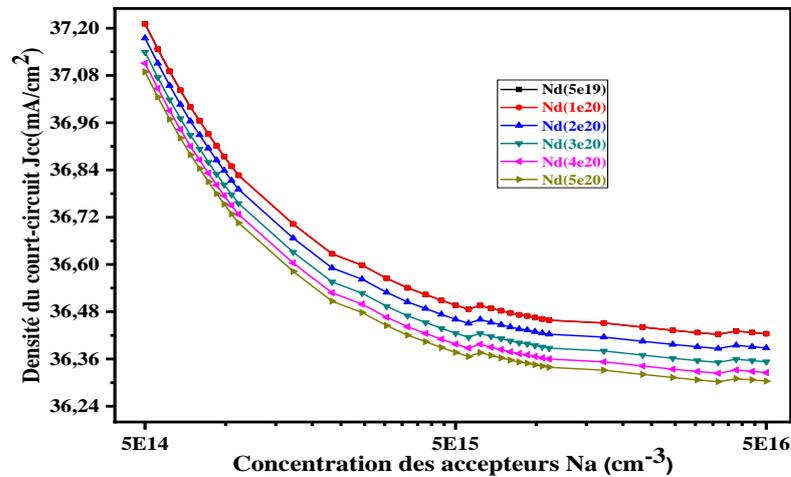
**Figure 3. 18 :** variation de la tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ ) de la cellule photovoltaïque à simple hétérojonction HJ : ITO/a-Si:H(n)/c-si(p) en fonction de concentration des accepteurs « (na) » pour différentes valeurs de concentration des donneurs (nd).

#### Impact sur la densité de courant de court-circuit $J_{cc}$

Dans la figure 3.19, nous représentons la variation de la densité de courant de court-circuit «  $J_{cc}$  » de la cellule photovoltaïque à simple hétérojonction HJ : ITO/a-Si:H(n)/c-si(p) en fonction de concentration de dopants (NA) du substrat, pour différentes valeurs de concentration des donneurs  $N_d$  de la couche amorphe. Nous observons que  $J_{cc}$  décroît d'une manière exponentielle avec l'augmentation de concentration de dopants  $N_a$  du substrat. On voit une stabilité de  $J_{cc}$  à partir de la valeur  $N_a = 1.10^{16} \text{cm}^{-3}$ , ainsi que la valeur de  $J_{cc}$  diminue à chaque fois qu'on augmente la valeur de la concentration de dopants  $N_d$  de la couche a-Si :H. Effet, La mobilité

### Chapitre 3 Simulation de la cellule photovoltaïque à hétérojonction de silicium HIT

diminue avec une concentration croissante de dopants. Cela explique la baisse de la densité de courant de court-circuit  $J_{cc}$  avec une concentration croissante de dopants. La concentration de dopant optimale de la couche amorphe est  $N_d=1.10^{20}cm^{-3}$ .

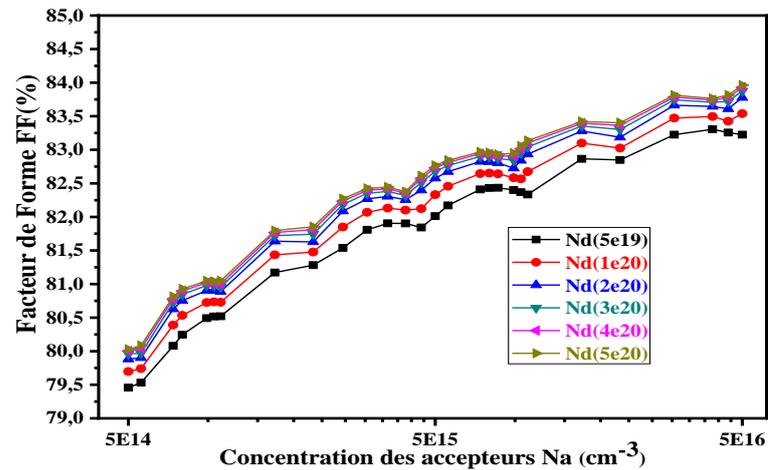


**Figure 3. 19 :** variation de la densité de court-circuit ( $J_{cc}$ ) de la cellule photovoltaïque à simple hétérojonction HJ : ITO/a-Si:H(n)/c-si(p) en fonction de concentration des accepteurs «  $(n_a)$  » pour différentes valeurs de concentration des donneurs ( $nd$ ).

#### Impact sur le facteur de forme FF

Dans la figure 3.20, nous représentons la variation du Facteur de forme « FF » de la cellule photovoltaïque à simple hétérojonction HJ : ITO/a-Si:H(n)/c-si(p) en fonction de concentration de dopants ( $N_A$ ) du substrat, pour différentes valeurs de concentration des donneurs  $N_d$  de la couche amorphe. En augmentant la concentration de dopants ( $N_A$ ) du substrat  $N_a= [5.0 \cdot 10^{14} \text{ - } 5.0 \cdot 10^{16}]cm^{-3}$ , le facteur de forme augmente de 80%-83.96% pour la valeur de concentration de dopant  $N_d$  de la couche amorphe égale à  $5.10^{20}cm^{-3}$ . En effet, lorsqu'on augmente la concentration de dopants du substrat, la résistivité du substrat diminue : ce qui améliore la conduction dans le substrat c-Si et donc le facteur de forme s'améliore. L'intervalle optimal de concentration est  $[1.5 \cdot 10^{16} \text{ - } 5.0 \cdot 10^{16}] cm^{-3}$  pour une concentration de dopant de la couche amorphe égale à  $1.10^{20}cm^{-3}$  ce qui correspond à la valeur stable du facteur de forme égale à 83.5%. Les simulations ont été réalisées sans tenir compte des résistances série au niveau des contacts ce qui explique les bonnes valeurs obtenues.

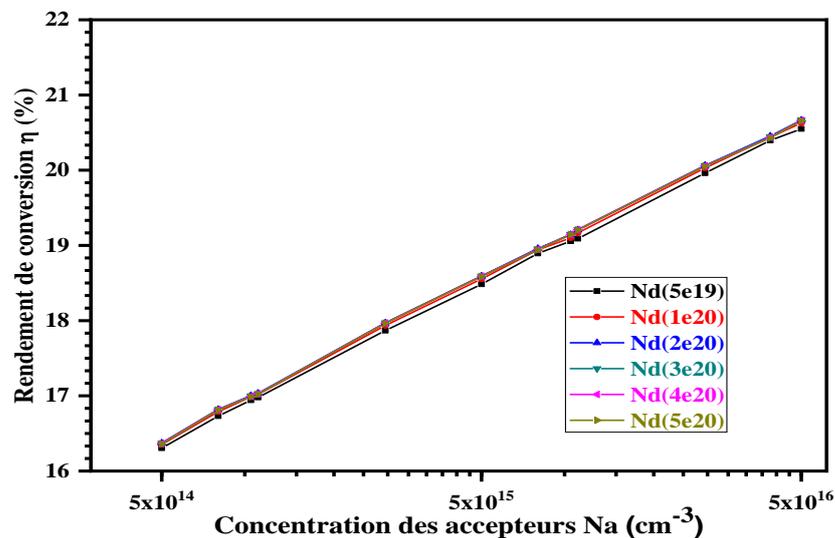
## Chapitre 3 Simulation de la cellule photovoltaïque à hétérojonction de silicium HIT



**Figure 3. 20 :** variation du facteur de forme ( $ff$ ) de la cellule photovoltaïque à simple hétérojonction HJ :ITO/a-Si:H(n)/c-si(p) en fonction de concentration des accepteurs « ( $na$ ) » pour différentes valeurs de concentration des donneurs ( $nd$ ).

### Impact sur le rendement « $\eta$ »

Dans la figure 3.21, nous représentons la variation du rendement «  $\eta$  » de la cellule photovoltaïque à simple hétérojonction HJ : ITO/a-Si:H(n)/c-si(p) en fonction de la concentration des accepteurs  $Na$  ( $cm^{-3}$ ), pour différentes valeurs de concentration des donneurs  $Nd$  ( $cm^{-3}$ ). Nous remarquons que le rendement augmente de 16.36 % à 20.66 % avec l'augmentation de la concentration  $Na$  de la couche a-Si:H(n). Lorsque la concentration de dopants devient élevée ( $Nd= 5.10^{20}cm^{-3}$ ,  $Na= 5.10^{19} cm^{-3}$ ) le rendement est de 20.66 %. La valeur du rendement optimal est 20.63% correspond à la concentration de dopant ( $Nd= 1.10^{20}cm^{-3}$ ,  $Na= 5.10^{19} cm^{-3}$ ).



**Figure 3. 21 :** variation du rendement de la cellule photovoltaïque à simple hétérojonction HJ :ITO/a-Si:H(n)/c-si(p) en fonction de concentration des accepteurs « ( $na$ ) » pour différentes valeurs de concentration des donneurs ( $nd$ ).

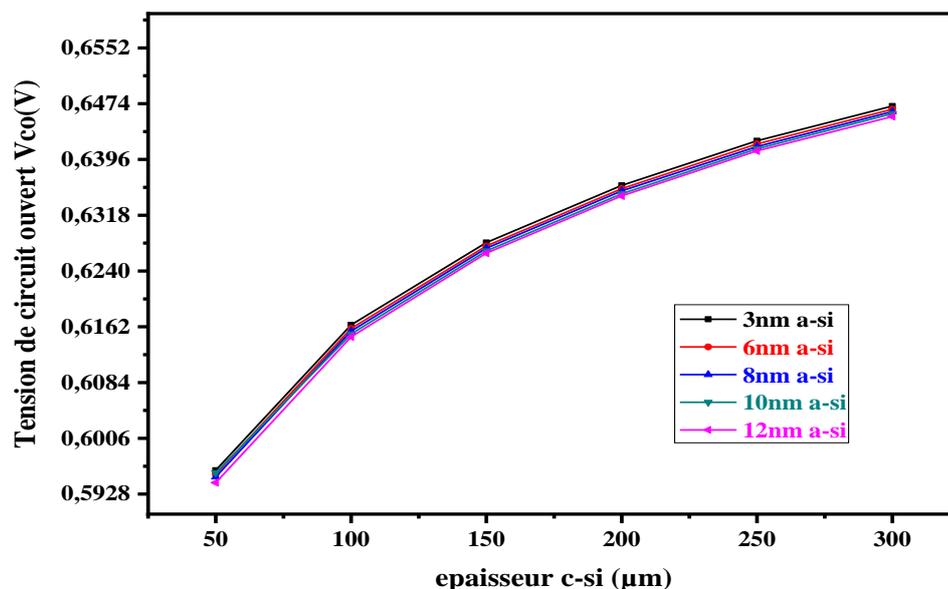
## Chapitre 3 Simulation de la cellule photovoltaïque à hétérojonction de silicium HIT

### 3.4.1.2 Influence de l'épaisseur du substrat sur les performances de la cellule HJ

Nous allons étudier dans cette partie l'impact de la réduction de l'épaisseur du substrat c-Si de 300  $\mu\text{m}$  à 50  $\mu\text{m}$  sur les caractéristiques de sortie de la cellule la cellule HJ pour un intervalle d'épaisseur de la couche d'émetteur a-Si :H est de 3 à 12 nm.

#### Impact sur la tension de circuit ouvert $V_{co}$

Dans la figure 3.22, nous représentons la variation de la tension de circuit ouvert «  $V_{co}$  » de la cellule photovoltaïque à simple hétérojonction HJ : ITO/a-Si:H(n)/c-si(p) en fonction de l'épaisseur du substrat c-Si(p). La figure 3.22 montre que la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  augmente lorsque le substrat c-Si est épais. Ainsi, la tension de circuit ouvert «  $V_{co}$  » de 647.07 mV est obtenu en passant de 50  $\mu\text{m}$  à 300  $\mu\text{m}$  pour L(a-Si :H ) égale à 3nm.

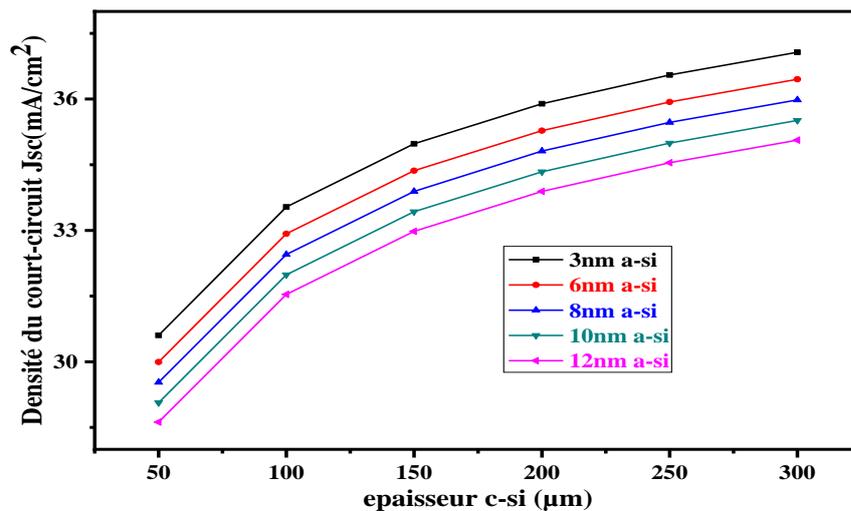


**Figure 3. 22 :** variation de  $V_{co}$  en fonction de l'épaisseur du substrat c-Si pour différentes épaisseurs de la couche a-Si

#### Impact sur la densité de courant de court-circuit $J_{cc}$

Dans la figure 3.23, nous représentons la variation la densité de courant de court-circuit  $J_{cc}$  de la cellule photovoltaïque à simple hétérojonction HJ : ITO/a-Si:H(n)/c-si(p) en fonction de l'épaisseur du substrat c-Si(p). La figure 3.23 montre que la réduction de l'épaisseur du substrat de silicium cristallin c-Si(p) de 300  $\mu\text{m}$  à 50  $\mu\text{m}$  se traduit par une baisse de la densité de courant de court-circuit  $J_{cc}$  de 37,07 à 30,60  $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$  pour L(a-Si :H ) égale à 3nm qui s'explique par une diminution de l'absorption des photons de basse énergie. En réduisant l'épaisseur de c-Si, l'absorption des photons de grande longueur d'onde et donc les paires photogénérées dans le substrat diminuent.

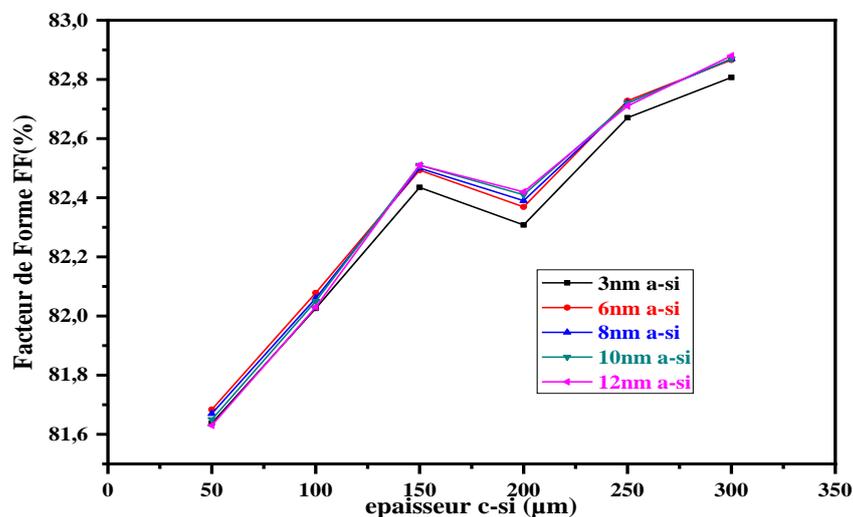
## Chapitre 3 Simulation de la cellule photovoltaïque à hétérojonction de silicium HIT



**Figure 3. 23 :** variation de la densité du courant de court-circuit en fonction de l'épaisseur du substrat c-Si, pour différentes épaisseurs de la couche a-Si

### Impact sur le facteur de forme FF

Dans la figure 3.24, nous représentons la variation du facteur de forme FF de la cellule photovoltaïque à simple hétérojonction HJ : ITO/a-Si:H(n)/c-si(p) en fonction de l'épaisseur du substrat c-Si(p). La réduction de l'épaisseur du substrat de silicium cristallin c-Si(p) de 300  $\mu\text{m}$  à 50  $\mu\text{m}$  entraîne une faible décroissance du facteur de forme FF~82%.

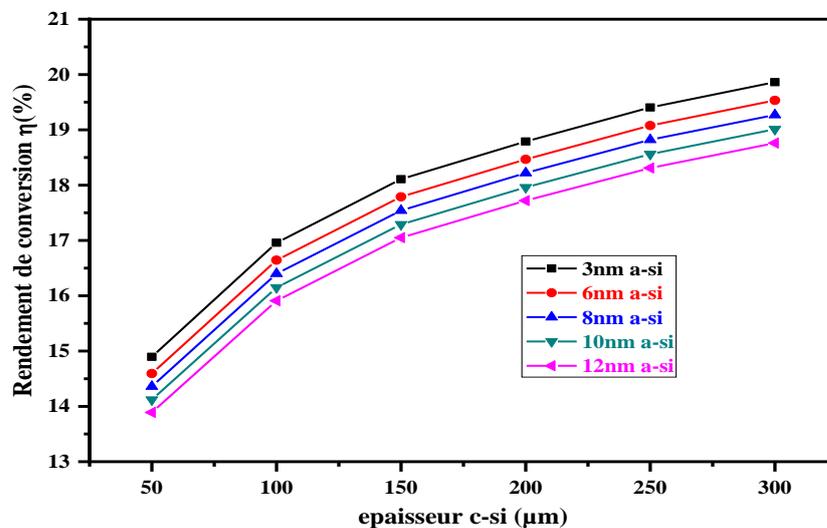


**Figure 3. 24 :** variation de facteur de forme en fonction de l'épaisseur du substrat c-si, pour différentes épaisseurs de la couche a-Si.

### Impact sur le rendement « $\eta$ »

### Chapitre 3 Simulation de la cellule photovoltaïque à hétérojonction de silicium HIT

Dans la figure 3.25, nous représentons la variation du rendement  $\eta$  de la cellule photovoltaïque à simple hétérojonction HJ : ITO/a-Si:H(n)/c-si(p) en fonction de l'épaisseur du substrat c-Si(p). Pour chaque variation d'épaisseur de l'émetteur « a-Si(n) », nous observons que le rendement de la cellule HJ diminue pour chaque diminution de l'épaisseur du substrat cristallin c-Si. Ainsi qu'à chaque fois que l'épaisseur de l'émetteur a-Si :H diminue de 3nm -12nm , le rendement augmente et prend une valeur de 19,86% pour une épaisseur de 3nm . L'une des voies pour baisser les coûts de fabrication des cellules silicium à hétérojonctions est de réduire la quantité de matière utilisée. Dans notre cas nous remarquons que réduire l'épaisseur du substrat de silicium cristallin (la quantité de matière) revient à diminuer des performances de la cellule solaire HJ. Donc l'épaisseur de c-Si généralement utilisée est d'environ de 300  $\mu\text{m}$ .

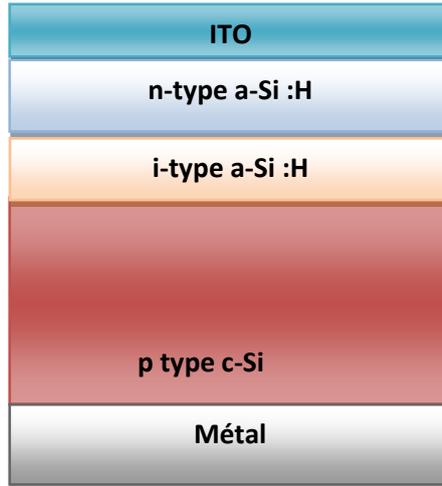


**Figure 3. 25 :** Variation de rendement en fonction de l'épaisseur de substrat c-Si, pour différentes épaisseurs de la couche d'émetteur a-Si.

#### 3.4.2. Etude de l'influence de la couche intrinsèque de silicium amorphe a-Si :H(i)

Dans cette partie, Nous avons effectué des simulations de la cellule à hétérojonction HJ en introduisant une fine couche (10 nm) de silicium amorphe intrinsèque a-Si:H(i). La structure HIT de la cellule à hétérojonctions de silicium de type ITO/a-Si:H(n)/a-Si:H(i)/c-Si(p) est représentée sur la figure 3.26. Nous allons étudier l'influence de la concentration de dopants et de l'épaisseur du substrat c-Si(p) et l'émetteur a-Si :H sur les performances de la cellule à hétérojonction HIT : ITO/a-Si:H(n)/a-Si:H(i)/c-Si(p).

## Chapitre 3 Simulation de la cellule photovoltaïque à hétérojonction de silicium HIT



### 3.4.2.1 Influence de la concentration de dopants sur les performances de la cellule HIT

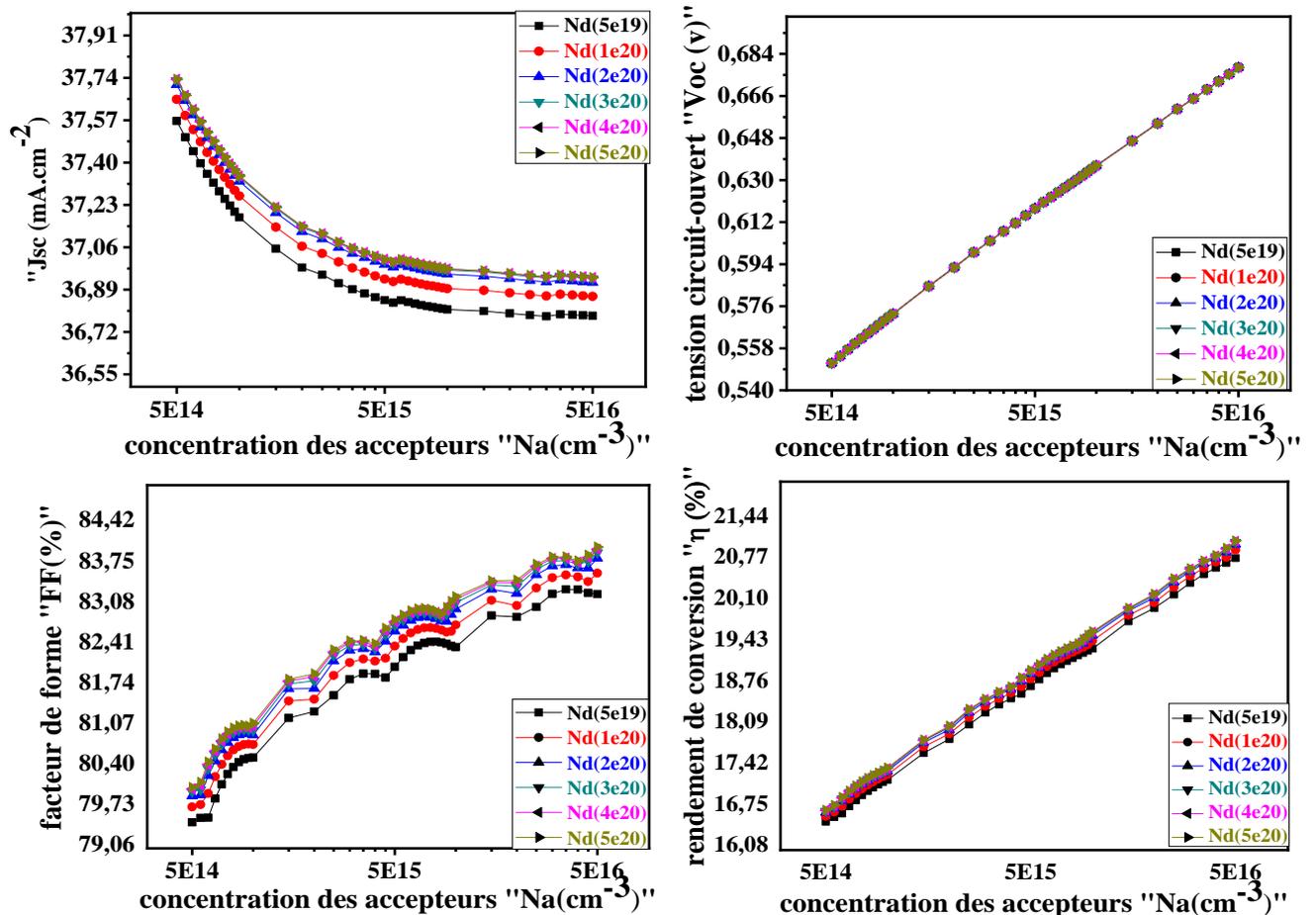
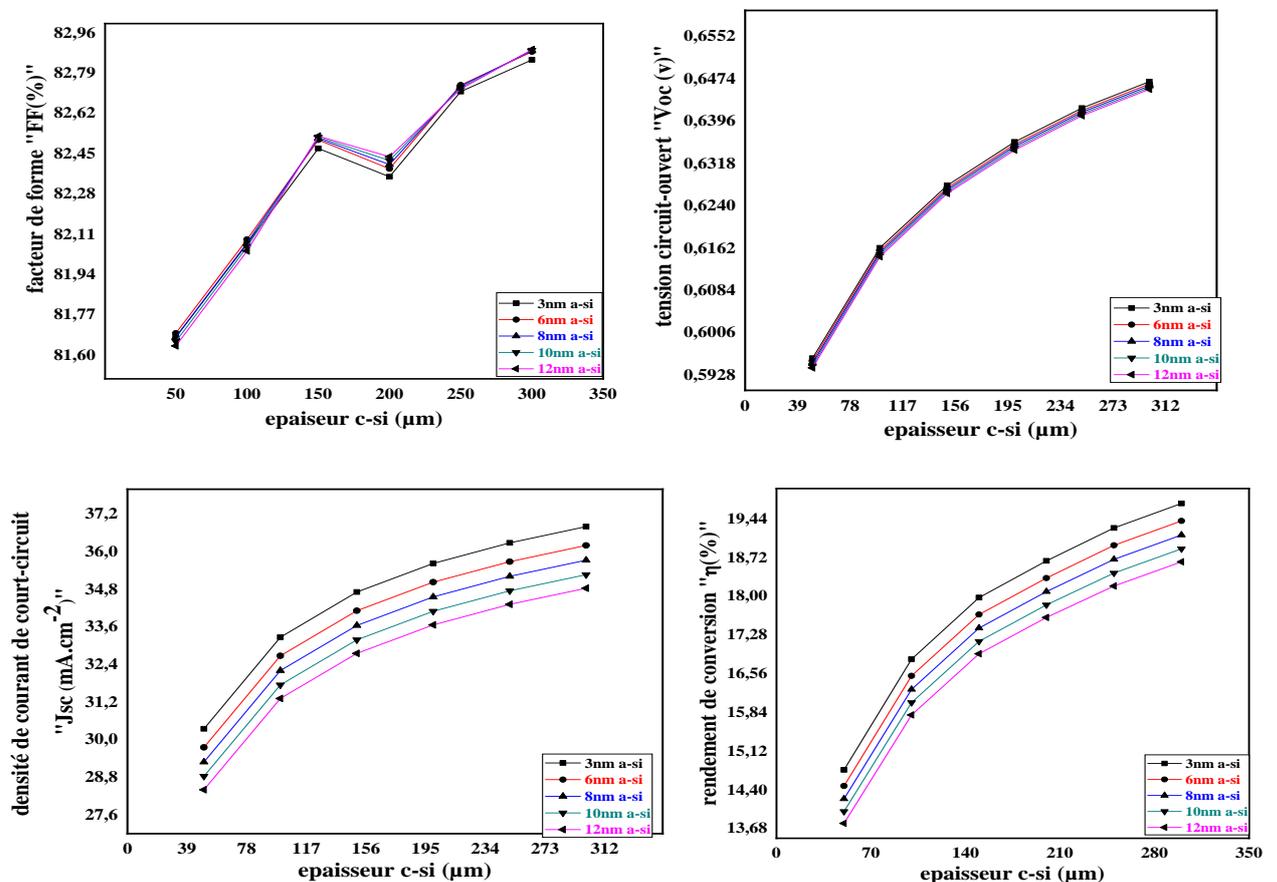


Figure 3. 27 : Variation du  $J_{cc}$ ,  $V_{co}$ , FF et le rendement de la cellule HIT en fonction de la concentration de dopants (ND ET NA).

## Chapitre 3 Simulation de la cellule photovoltaïque à hétérojonction de silicium HIT

Dans la figure 3.27, nous représentons la variation  $J_{cc}$ ,  $V_{co}$ , FF et le rendement  $\eta$  de la cellule photovoltaïque à hétérojonction HIT : ITO/a-Si:H(n)/a-Si:H(i)/c-Si(p) pour différentes valeurs de la concentration de dopants Nd de l'émetteur a-Si :H en fonction de la concentration de dopants Na du substrat c-Si(p). Dans la figure 3.27, nous remarquons une amélioration apportée par la couche intrinsèque de silicium amorphe a-Si:H(i). Nous observons que la tension en circuit ouvert augmente avec l'augmentation de la concentration de dopants Na du substrat c-Si. Ainsi, une augmentation de concentration de dopants Na du substrat c-Si se traduit par une dégradation de la densité de courant de court-circuit  $J_{cc}$  et le facteur de forme FF. Cette augmentation de  $V_{co}$  est due à la réduction du nombre de recombinaisons à l'interface et le courant de fuite est aussi réduit. Par conséquent, le rendement de la cellule HIT augmente de 20,65% à 21,04%.

### 3.4.2.2 Influence de l'épaisseur du substrat sur les performances de la cellule HJ



**Figure 3. 28 :** Variation du  $J_{cc}$ ,  $V_{co}$ , FF et le rendement de la cellule HIT en fonction de l'épaisseur des couches (c-Si et a-Si :H).

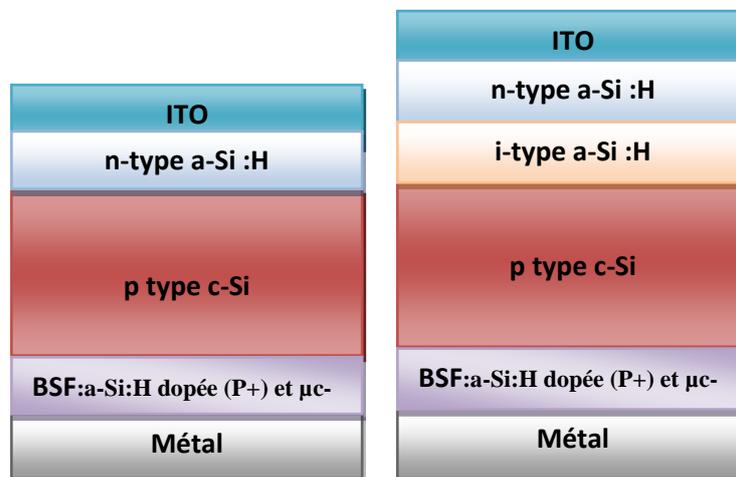
Dans la figure 3.28, nous représentons la variation de  $J_{cc}$ ,  $V_{co}$ , FF et le rendement  $\eta$  de la cellule photovoltaïque à hétérojonction HIT : ITO/a-Si:H(n)/a-Si:H(i)/c-Si(p) en fonction de l'épaisseur des couches ( a-Si :H et c-Si(p)). Nous remarquons que pour chaque augmentation de l'épaisseur du substrat cristallin, toutes les

## Chapitre 3 Simulation de la cellule photovoltaïque à hétérojonction de silicium HIT

caractéristiques de sortie de la cellule HIT augmentent. Ainsi que pour chaque diminution de l'épaisseur d'émetteur a-Si :H, les performances de la cellule augmentent.

### 3.4.3. Etude de l'influence du champ arrière (Back Surface Field : BSF)

La figure 3.29 représente la structure de la cellule de silicium à hétérojonction de type : HJBSF « ITO/a-Si :H(n)/c-Si(p)/BSF » et HITBSF « ITO/a-Si :H(n)/a-Si :H(i)/c-Si(p)/BSF». En face arrière de la cellule solaire, nous retrouvons deux types de matériaux (silicium hydrogéné fortement dopé a-Si:H dopée (P+) et silicium microcristallin  $\mu\text{c-Si :H(p}^+)$  afin de former le champ arrière BSF. Dans cette partie, Nous avons réalisé la simulation de la cellule solaire HJBSF et HITBSF afin d'analyser l'influence du BSF (a-Si:H dopée (P+) et  $\mu\text{c-Si :H(p}^+)$ ) sur les caractéristiques de la cellule solaire à hétérojonction. Les paramètres du BSF (a-Si:H dopée (P+) et  $\mu\text{c-Si :H(p}^+)$ ) sont regroupés dans le tableau 3.1.



#### 3.4.3.1 Influence de la concentration de dopants (Na, Nd) sur les performances de la cellule HJBSF

**BSF/  $\mu\text{c-Si :H(p}^+)$  :** Dans cette partie, nous allons étudier l'effet de la concentration de dopants des couches (c-Si(p) et a-Si :H(n)) sur les performances de la cellule solaire BSFHJ : « ITO/a-Si :H(n)/c-Si(p)/  $\mu\text{c-Si :H(p}^+)$  ». Les figures (3.30, 3.31, 3.32 et 3.33) représentent la variation de  $V_{co}$ ,  $J_{cc}$ , FF et le rendement  $\eta$  de la cellule BSF( $\mu\text{c-Si :H(p}^+)$ )HJ en fonction de la concentration de dopants des couches (c-Si(p) et a-Si :H(n)). La figure 3.30 montre que la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  augmente pour chaque variation de la concentration de dopants du substrat et prend une valeur maximale de 700 mV pour  $N_a=5.0 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ . Dans la figure 3.31, la densité de courant de court-circuit  $J_{cc}$  diminue de  $39.5 \text{ mA.cm}^{-2}$  à  $38.5 \text{ mA.cm}^{-2}$  avec l'augmentation de la concentration de dopants du substrat. La figure 3.32 montre que le facteur de forme augmente pour chaque

### Chapitre 3 Simulation de la cellule photovoltaïque à hétérojonction de silicium HIT

variation de la concentration de dopants du substrat et prend une valeur de 84% à partir  $N_A=1.5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ . La figure 3. 33 montre que le rendement augmente de 20% jusqu'à 23% pour chaque variation de la concentration de dopants ( $N_A$  et  $N_D$ ). ce qui veut dire que la couche BSF de type  $\mu\text{-Si} : \text{H}(p^+)$  a une influence positive sur la cellule HJ.

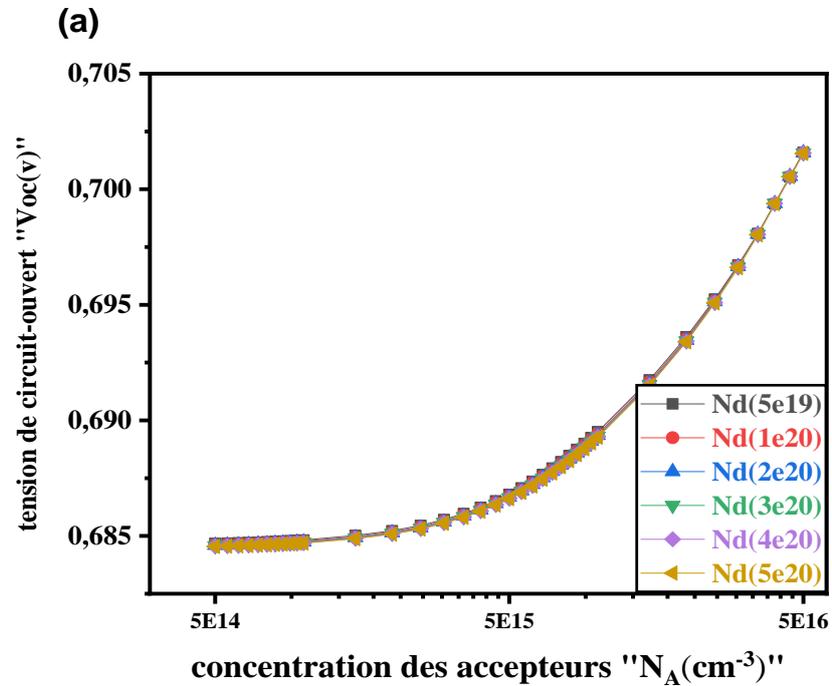


Figure 3. 30 : variation de  $V_{oc}$  de la cellule  $\text{BSF}(\mu\text{-Si} : \text{H}(p^+))\text{HJ}$  en fonction de la concentration de dopants  $N_A$  et  $N_D$ .

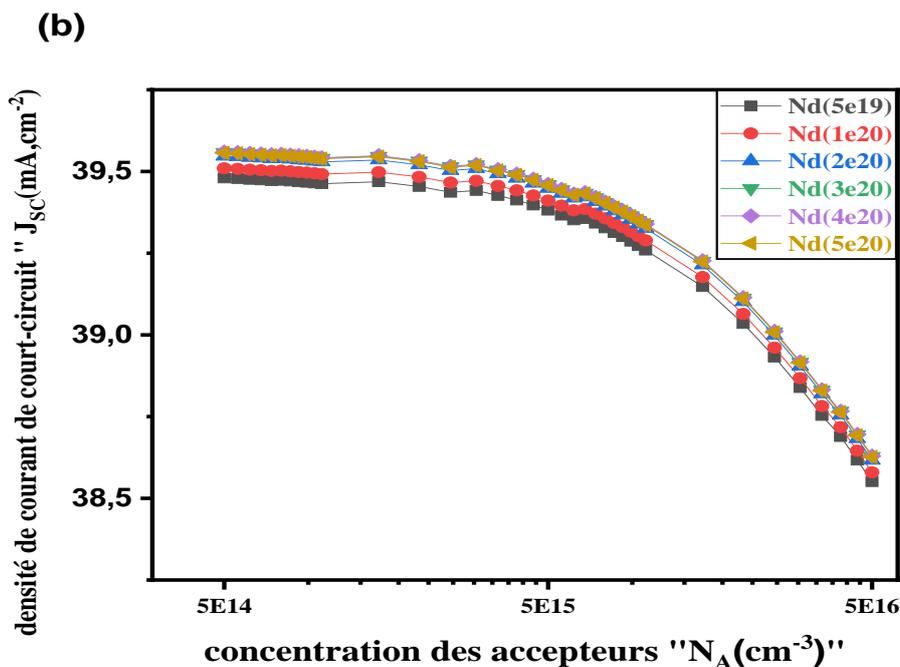


Figure 3. 31 : variation de  $J_{sc}$  de la cellule  $\text{BSF}(\mu\text{-Si} : \text{H}(p^+))\text{HJ}$  en fonction de la concentration de dopants  $N_A$  et  $N_D$ .

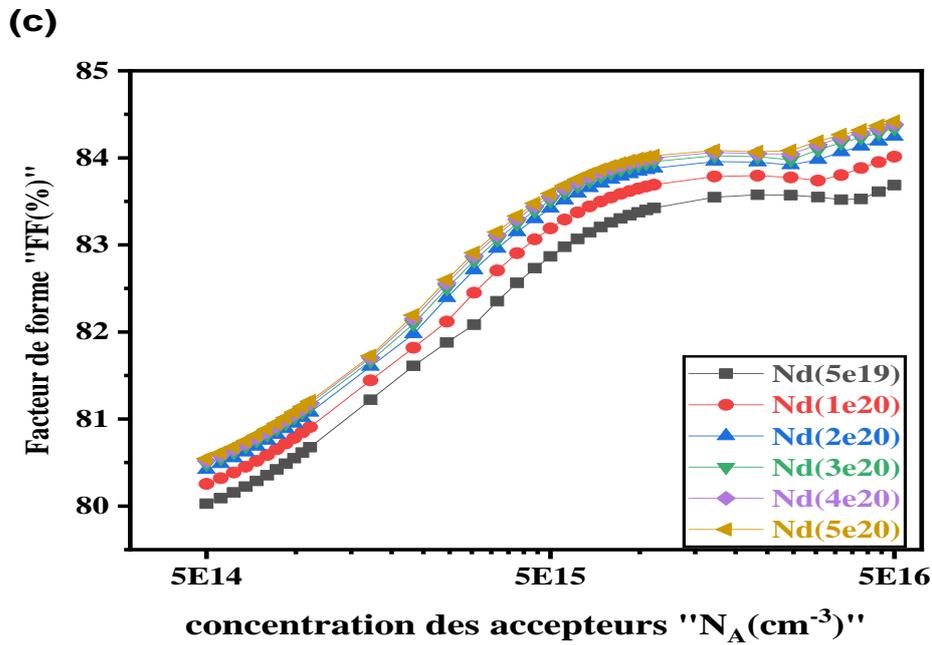


Figure 3. 32 : variation de FF de la cellule BSF( $\mu\text{c-Si:H}(p^+)$ )HJ en fonction de la concentration de dopants Na et Nd.

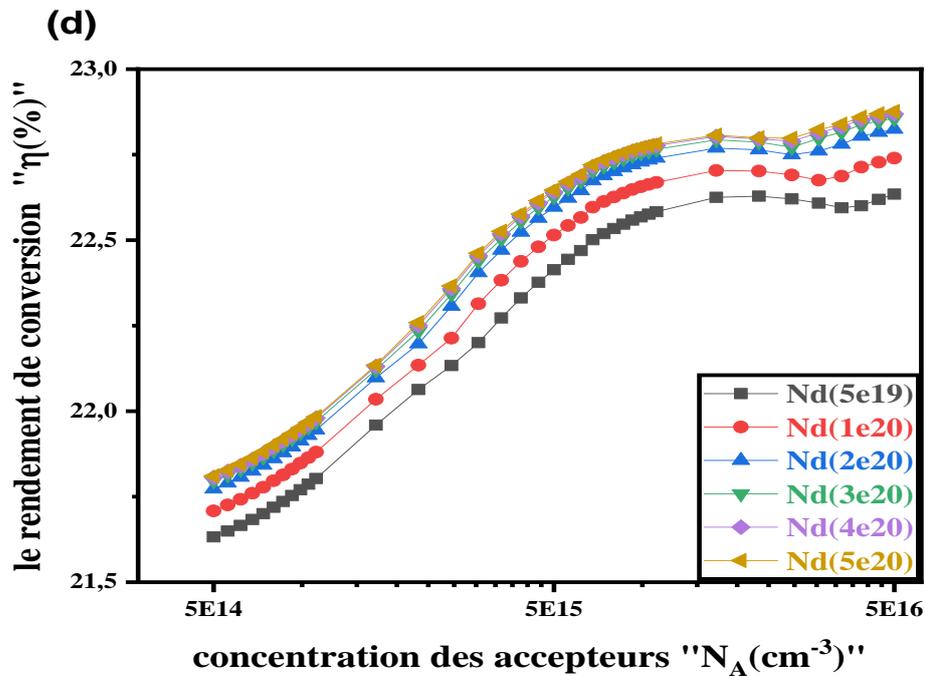
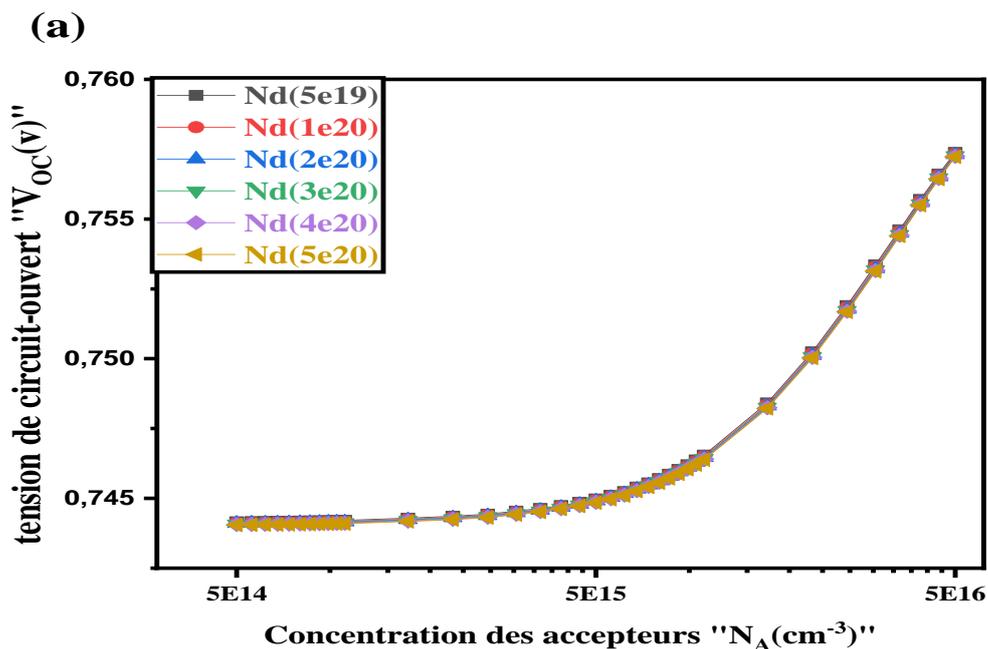


Figure 3. 33 : variation du rendement de la cellule BSF( $\mu\text{c-Si:H}(p^+)$ )HJ en fonction de la concentration de dopants Na et Nd.

### Chapitre 3 Simulation de la cellule photovoltaïque à hétérojonction de silicium HIT

**BSF/a-Si:H(p+)** : Dans cette partie nous allons étudier la cellule BSFHJ une autre fois en remplaçant la couche de BSF par a-Si:H(p+) fortement dopé. Les figures (3.34, 3.35, 3.36 et 3.37) représentent la variation de  $V_{co}$ ,  $J_{cc}$ , FF et le rendement  $\eta$  de la cellule BSF(a-Si:H(p<sup>+</sup>))HJ : « ITO/a-Si:H(n)/c-Si(p)/ a-Si:H(p<sup>+</sup>) » en fonction de la concentration de dopants des couches (c-Si(p) et a-Si:H(n)). Dans la figure 3.34, nous remarquons une augmentation de la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  en fonction de la concentration des dopants Na. La densité de courant de court-circuit  $J_{cc}$  augmente de 0.04 mA/cm<sup>2</sup> avec la concentration des dopants Na comme le montre la figure 3.35. La densité de courant de court-circuit  $J_{cc}$  varie de 39.55 mA/cm<sup>2</sup> pour  $N_D=5 \cdot 10^{19}$  cm<sup>-3</sup> jusqu'à 39.62 mA/cm<sup>2</sup> pour  $N_D= 5 \cdot 10^{20}$  cm<sup>-3</sup>. Dans la figure 3.36, le facteur de forme FF augmente avec la concentration de dopants Na et Nd. Finalement, le rendement augmente de 22.5% à 25.5% avec l'augmentation de la concentration des dopants Na et Nd.



**Figure 3. 34** : Variation de  $V_{co}$  de la cellule BSF(a-Si:H(p<sup>+</sup>))HJ en fonction de la concentration de dopants Na et Nd.

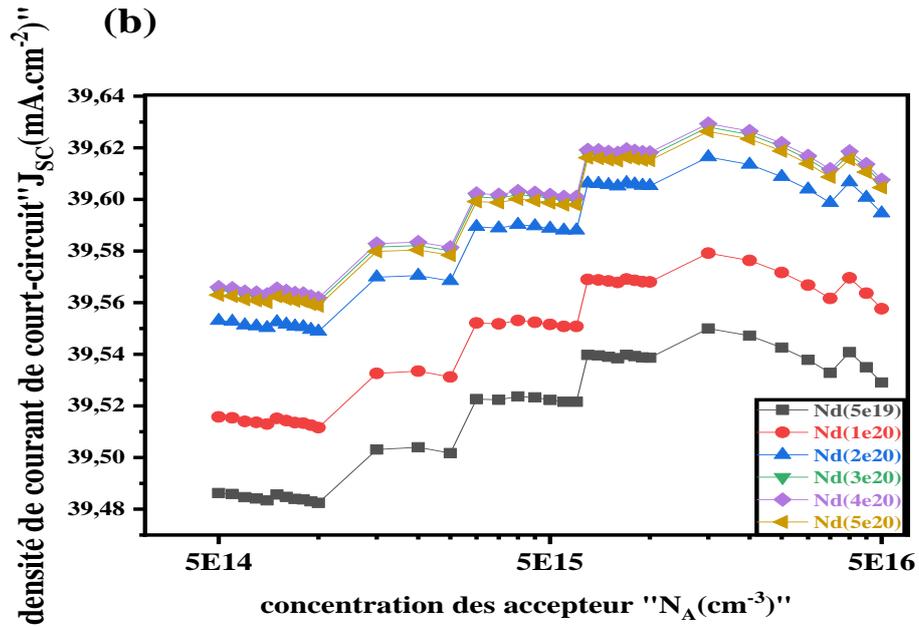


Figure 3. 35 : Variation de  $J_{cc}$  de la cellule BSF(*a*-Si :H(*p*+))HJ en fonction de la concentration de dopants dopants Na et Nd

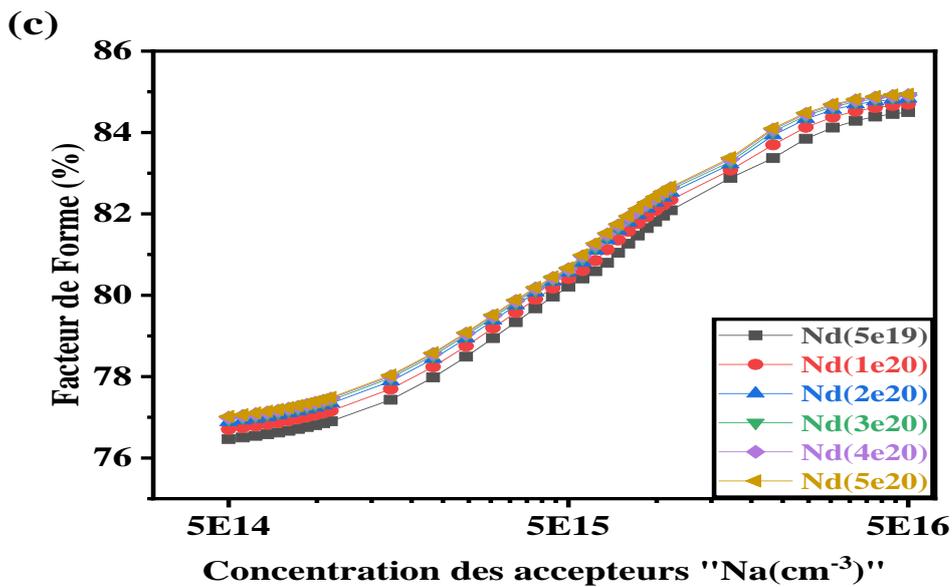


Figure 3. 36 : Variation de FF de la cellule BSF(*a*-Si :H(*p*+))HJ en fonction de la concentration de dopants dopants Na et Nd.

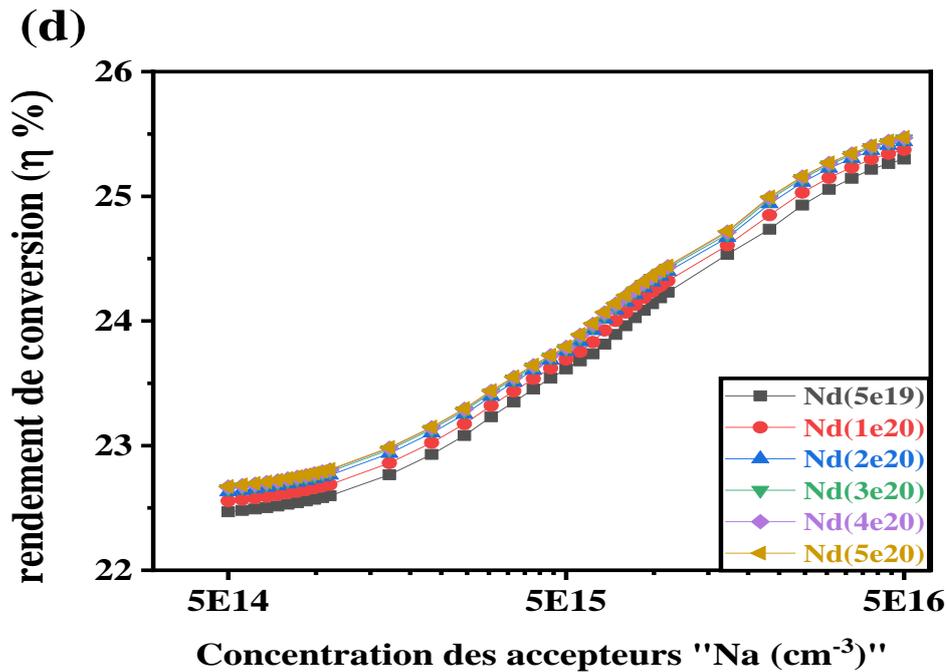


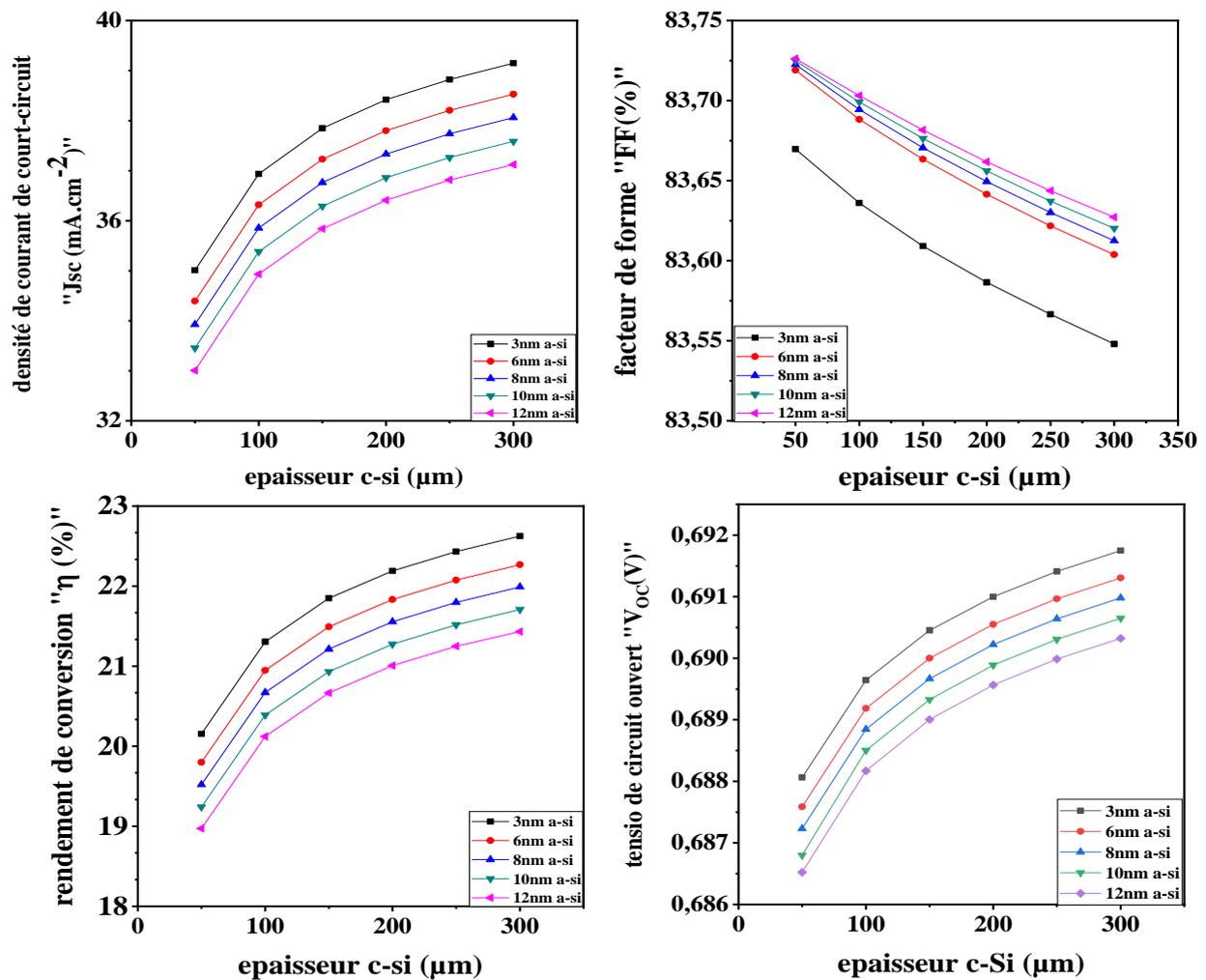
Figure 3. 37 : Variation du rendement de la cellule BSF(a-Si :H(p+))HJ en fonction de la concentration de dopants Na et Nd.

### 3.4.3.2 Influence de l'épaisseur sur les performances de la cellule HJBSF

Dans cette partie, nous allons étudier l'influence de l'épaisseur du substrat et l'émetteur sur les performances de la cellule HJBSF.

**BSF  $\mu\text{c-Si(p)}$  :** Dans la figure 3. 38, nous représentons la variation de  $J_{cc}$ ,  $V_{co}$ , FF et le rendement  $\eta$  de la cellule photovoltaïque à hétérojonction HJBSF : BSF( $\mu\text{c-Si(p}^+)$ )HJ : « ITO/a-Si :H(n)/c-Si(p)/  $\mu\text{c-Si(p}^+)$  » en fonction de l'épaisseur des couches ( a-Si :H et c-Si(p)). Dans la figure 3.38, nous constatons que l'épaisseur du substrat c-Si joue un rôle très important. Nous observons que toutes les caractéristiques ( $J_{cc}$ ,  $V_{co}$ ,  $\eta$ ) de la cellule HJBSF augmentent avec la variation de l'épaisseur, excepté le facteur de forme qui diminue. Le rendement optimal est de 22.5% pour  $L_{c-Si}=300\mu\text{m}$  et  $L_{a-Si :H}=3\text{nm}$ . Nous remarquons aussi que l'épaisseur a-Si :H(n) influe sur les caractéristiques de la cellule HJBSF. Effet, le rendement augmente avec la diminution l'épaisseur de l'émetteur a-Si :H(n).

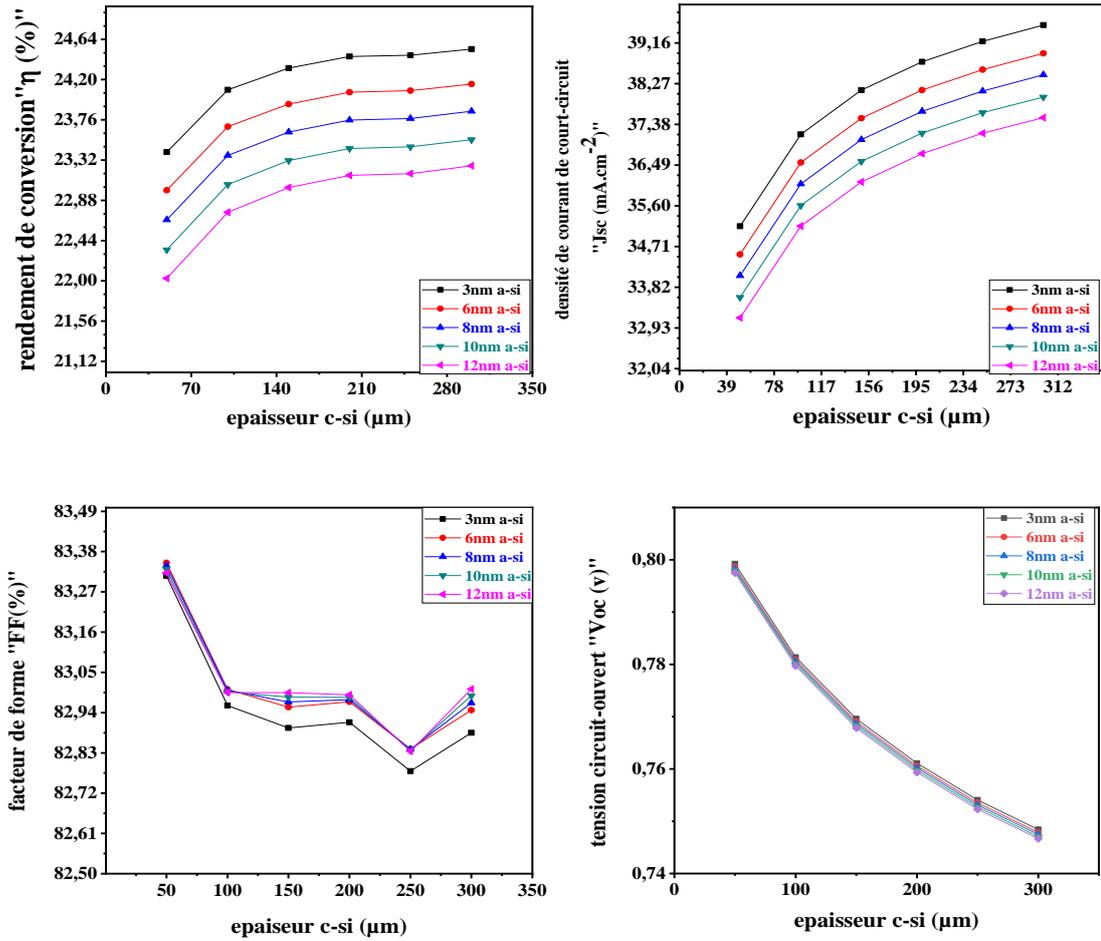
## Chapitre 3 Simulation de la cellule photovoltaïque à hétérojonction de silicium HIT



**Figure 3. 38:** Variation de  $J_{cc}$ ,  $V_{co}$ ,  $FF$  et le rendement  $\eta$  de la cellule photovoltaïque à hétérojonction BSFHJ : BSF( $\mu c$ --Si(p+))HJ en fonction de l'épaisseur des couches ( a-Si :H et c-Si(p)).

**BSF a-Si :H(p+) :** Dans la figure 3. 39, nous représentons la variation de  $J_{cc}$ ,  $V_{co}$ ,  $FF$  et le rendement  $\eta$  de la cellule photovoltaïque à hétérojonction HJBSF : BSF( $\mu c$ -Si(p<sup>+</sup>))HJ : « ITO/a-Si :H(n)/c-Si(p)/ a-Si :H(p+) » en fonction de l'épaisseur des couches ( a-Si :H et c-Si(p)). Nous remarquons que la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  est décroissante lorsque la couche c-Si est plus épaisse. Le rendement augmente jusqu'à 24.5% avec l'augmentation de l'épaisseur du substrat c-Si.

## Chapitre 3 Simulation de la cellule photovoltaïque à hétérojonction de silicium HIT



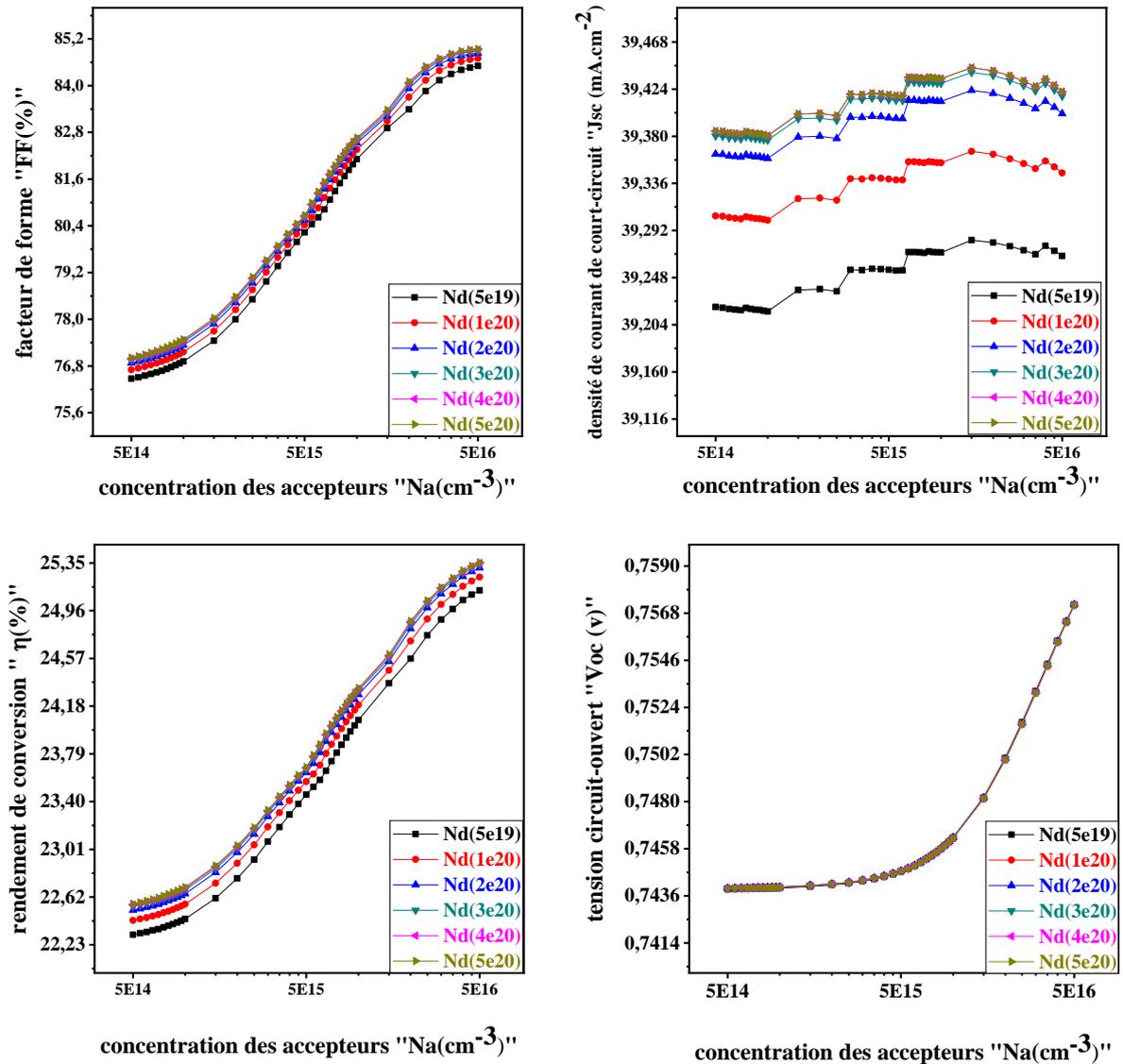
**Figure 3. 39 :** variation de  $J_{cc}$ ,  $V_{co}$ ,  $FF$  et le rendement  $\eta$  de la cellule photovoltaïque à hétérojonction  $HJBSF : BSF(\mu c-Si(p^+))HJ$  en fonction de l'épaisseur des couches ( $a-Si :H$  et  $c-Si(p)$ ).

### 3.4.3.3 Influence de la concentration de dopants (Na, Nd) sur les performances de la cellule HITBSF

Dans cette partie, nous allons étudier l'effet de la concentration et l'épaisseur de la couche BSF ( $a-Si :H(p^+)$  et  $\mu c-Si(p^+)$ ) sur les caractéristiques de sortie de la cellule solaire HIT.

### Chapitre 3 Simulation de la cellule photovoltaïque à hétérojonction de silicium HIT

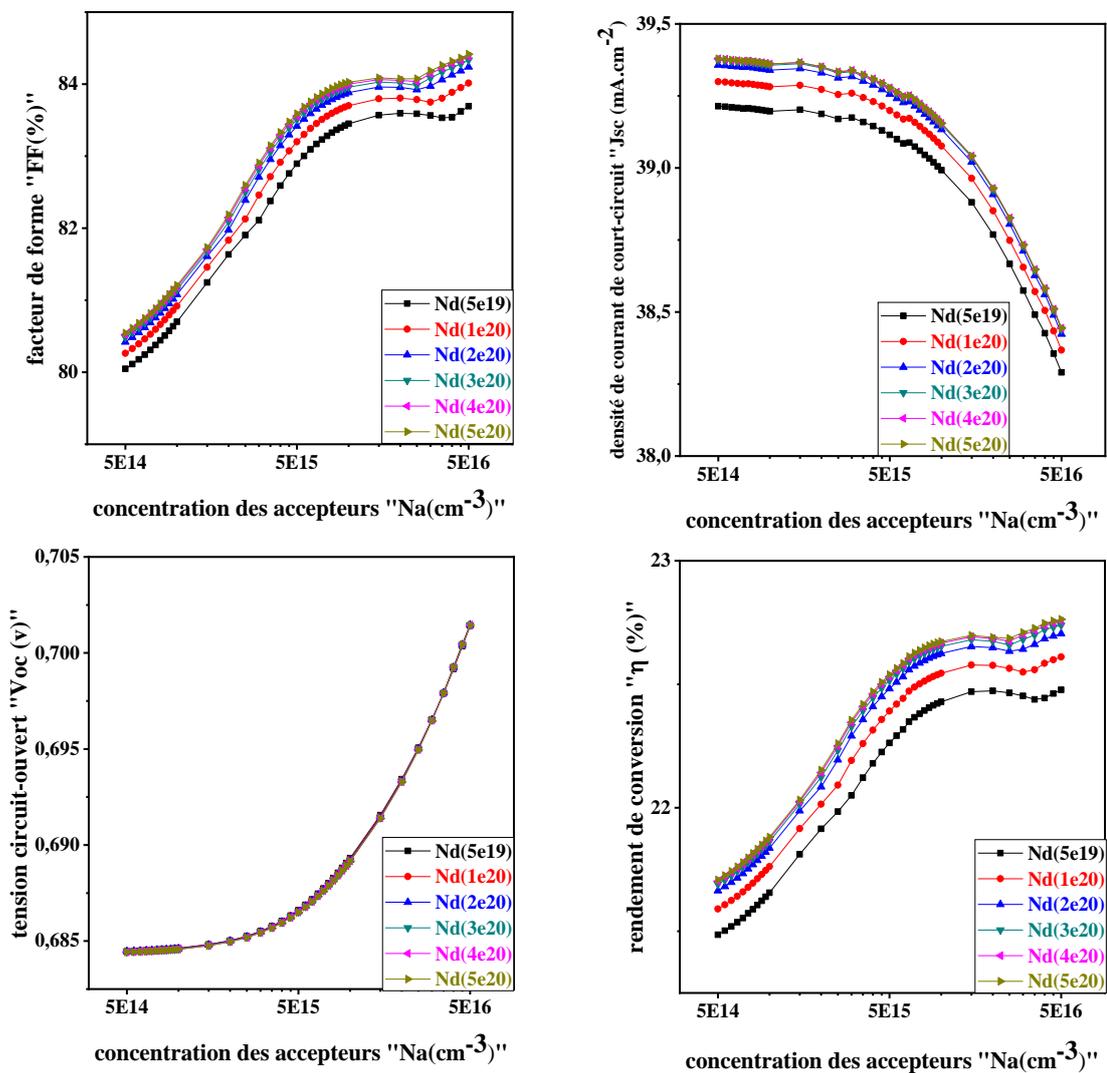
**BSF/ a-Si :H(p+) :** La figure 3.40 représente la variation de  $V_{co}$ ,  $J_{cc}$ , FF et le rendement  $\eta$  de la cellule HITBSF(a-Si :H(p<sup>+</sup>)) : « ITO/a-Si :H(n)/ a-Si :H(i)/c-Si(p)/ a-Si :H(p<sup>+</sup>) » en fonction de la concentration de dopants Na et Nd.



**Figure 3. 40 :** variation de  $J_{cc}$ ,  $V_{co}$ , FF et le rendement  $\eta$  de la cellule photovoltaïque à hétérojonction HITBSF (a-Si :H(p<sup>+</sup>)) en fonction de concentration de dopants Na et Nd.

### Chapitre 3 Simulation de la cellule photovoltaïque à hétérojonction de silicium HIT

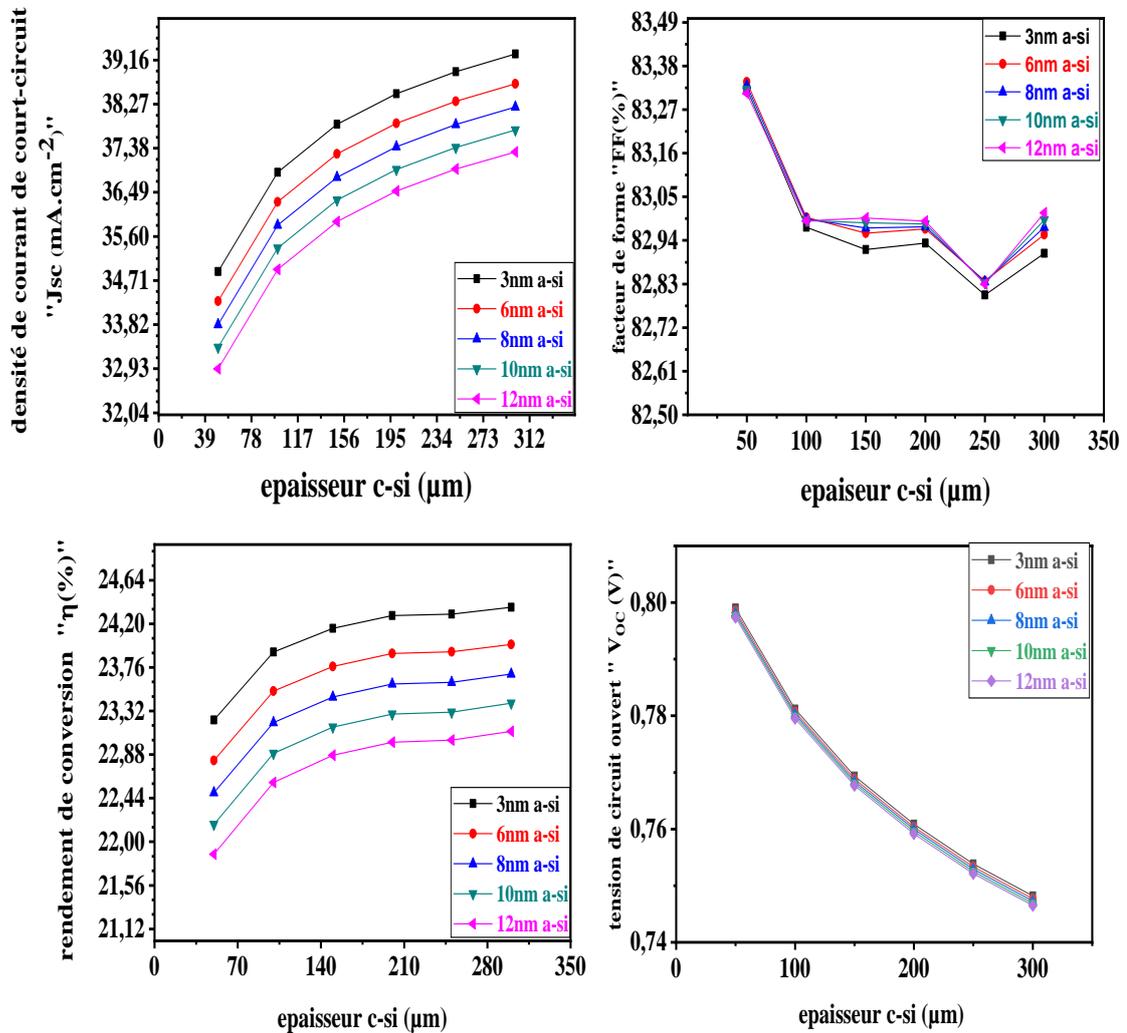
**BSF  $\mu\text{c-Si(p)}$  :** La figure 3.41 représente la variation de  $V_{oc}$ ,  $J_{cc}$ , FF et le rendement  $\eta$  de la cellule HIT BSF( $\mu\text{c-Si(p)}$ ) : « ITO/a-Si :H(n)/ a-Si :H(i)/c-Si(p)/ $\mu\text{c-Si(p)}$  » en fonction de la concentration de dopants Na et Nd. D'après la figure 3.41, Nous remarquons que toutes les caractéristiques de sortie de la cellule HITBSF augmentent avec la concentration de dopants Na et Nd. La densité du courant de court-circuit  $J_{cc}$  augmente avec la diminution de la concentration des dopants Na. Le  $V_{CO}$  diminue avec l'augmentation de la concentration de dopants du substrat.



**Figure 3. 41 :** variation de  $J_{cc}$ ,  $V_{co}$ , FF et le rendement  $\eta$  de la cellule photovoltaïque à hétérojonction HITBSF( $\mu\text{c-Si(p)}$ ) en fonction de concentration de dopants Na et Nd

## 3.4.3.4 Influence de l'épaisseur sur la jonction HITBSF

**BSF  $\mu\text{c-Si}(p)$**  : Dans la figure 3.42, nous représentons la variation de  $J_{cc}$ ,  $V_{oc}$ , FF et le rendement  $\eta$  de la cellule photovoltaïque à hétérojonction HITBSF( $\mu\text{c-Si}(p^+)$ ): « ITO/a-Si :H(n)/ a-Si :H(i)/c-Si(p)/  $\mu\text{c-Si}(p^+)$  » en fonction de l'épaisseur des couches ( a-Si :H et c-Si(p)). D'après la figure 3.42, nous observons que  $V_{oc}$  augmente avec la diminution de l'épaisseur, ce qui influe sur le facteur de forme qui se dégrade également. De l'autre côté nous constatons que le rendement accroît progressivement pour atteindre **24.20%** due à l'augmentation de  $J_{cc}$ .

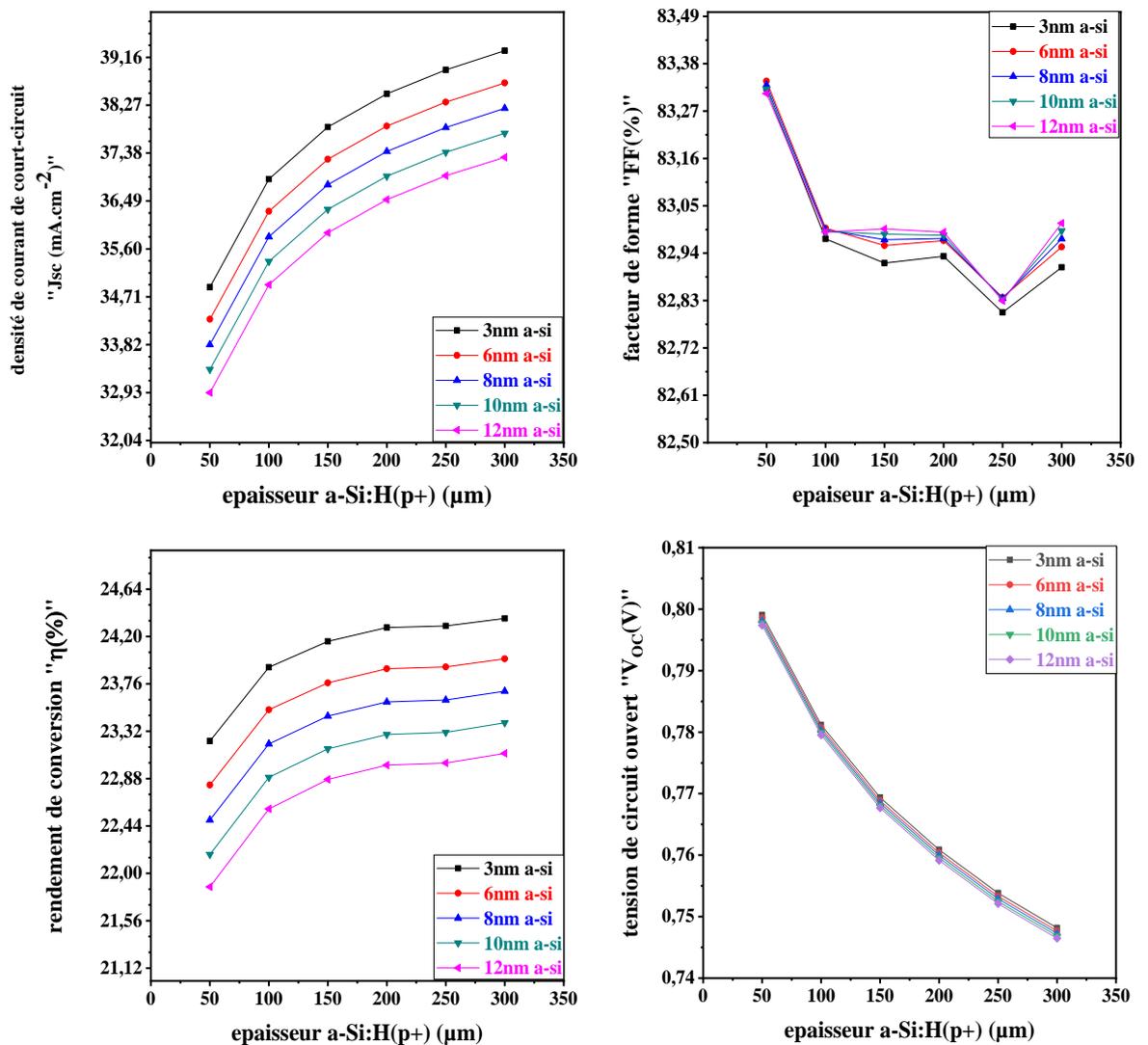


**Figure 3. 42** : variation de  $J_{cc}$ ,  $V_{oc}$ , FF et le rendement  $\eta$  de la cellule photovoltaïque à hétérojonction HITBSF( $\mu\text{c-Si}(p^+)$ ) en fonction de l'épaisseur des couches ( a-Si :H et c-Si(p)).

## Chapitre 3 Simulation de la cellule photovoltaïque à hétérojonction de silicium HIT

Selon la figure 3.42, nous constatons que plus la couche a-Si :H est épaisse, la tension  $V_{co}$  et le facteur de forme décroissent, par contre on remarque l'accroissance de courant  $J_{sc}$  et le rendement. L'épaisseur de la couche a-Si est influente, à 3 nm d'épaisseur, le rendement dépasse les 24% en contre partie à 12 nm est 22.88%.

### BSF/ a-Si :H(p+):



**Figure 3. 43 :** variation de  $J_{cc}$ ,  $V_{co}$ ,  $FF$  et le rendement  $\eta$  de la cellule photovoltaïque à hétérojonction  $HITBSF(a-Si :H(p^+))$  en fonction de l'épaisseur des couches ( $a-Si :H$  et  $Si(p)$ ).

## Chapitre 3 Simulation de la cellule photovoltaïque à hétérojonction de silicium HIT

En comparant les résultats obtenus pour la couche BSF  $\mu\text{-Si(p)}$  et  $\text{a-Si:H(p+)}$  sur la cellule HJ on déduit que le BSF de type  $\text{a-Si:H(p+)}$  est bien meilleur que le  $\mu\text{-Si}$ , ce qui nous amène à choisir l'amorphe pour les prochaines simulations.

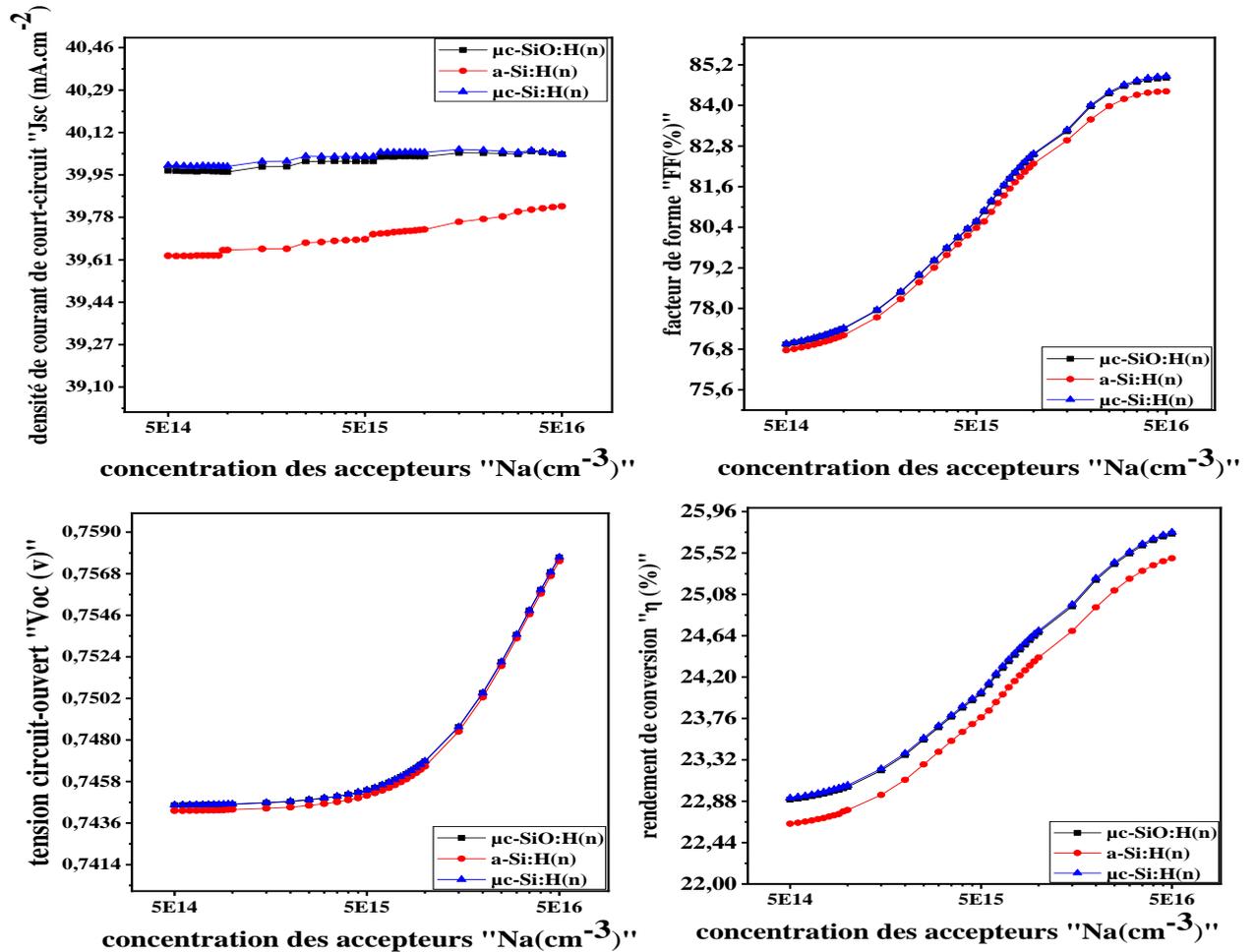
### 3.4.4. Étude de l'influence de la couche émettrice FSF « FRONT SURFACE

#### FIELD »

Dans cette partie, nous allons étudier l'influence de la couche émettrice FSF sur les performances de la cellule solaire HIT. En face avant de la cellule HIT, nous retrouvons trois types de matériaux ( $\text{a-Si:H dopée (n+)}$ ,  $\mu\text{-Si:H(n+)}$  et  $\mu\text{-SiO(n+)}$ ) afin de former le FSF. Nous avons réalisé la simulation de la cellule solaire FSFHIT afin d'analyser l'influence du FSF ( $\text{a-Si:H (n+)}$ ,  $\mu\text{-Si:H(n+)}$  et  $\mu\text{-SiO(n+)}$ ) sur les caractéristiques de sortie de la cellule solaire. Les paramètres du FSF ( $\text{a-Si:H (n+)}$ ,  $\mu\text{-Si:H(n+)}$  et  $\mu\text{-SiO(n+)}$ ) sont regroupés dans le tableau 3.1. Nous allons voir l'influence du FSF ( $\text{a-Si:H (n+)}$ ,  $\mu\text{-Si:H(n+)}$  et  $\mu\text{-SiO(n+)}$ ) avec la concentration des accepteurs Na et l'épaisseur du substrat  $\text{c-Si(p)}$ .

## Chapitre 3 Simulation de la cellule photovoltaïque à hétérojonction de silicium HIT

### 3.4.4.1 Influence de la concentration de dopants Na du substrat sur les performances de la cellule FSFHIT



**Figure 3. 44 :** influences de la couche FSF sur les caractéristiques cellule en fonction de la concentration de dopant Na.

La figure 3.44 représente influence de la couche FSF sur les caractéristiques de sortie de la cellule HIT avec la concentration de dopant Na du substrat. Nous remarquons que toutes les caractéristiques augmentent avec la concentration de dopant Na du substrat. Nous constatons que la courbe (a-Si :H(n+)) est largement inférieure aux autres courbes. Le rendement le plus élevé est de 25.7% pour la cellule FSF(μc-Si :H(n+)) HIT avec une concentration de dopant Na=  $5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ .

### 3.4.4.2 Influence de l'épaisseur du substrat sur la jonction FSFHIT

La figure 3.45 représente influence de la couche FSF sur les caractéristiques de sortie de la cellule HIT avec la variation de l'épaisseur du substrat. Nous constatons que le meilleur résultat est obtenu pour la cellule FSFHIT à base de la couche μc-Si :H(n<sup>+</sup>).

## Chapitre 3 Simulation de la cellule photovoltaïque à hétérojonction de silicium HIT

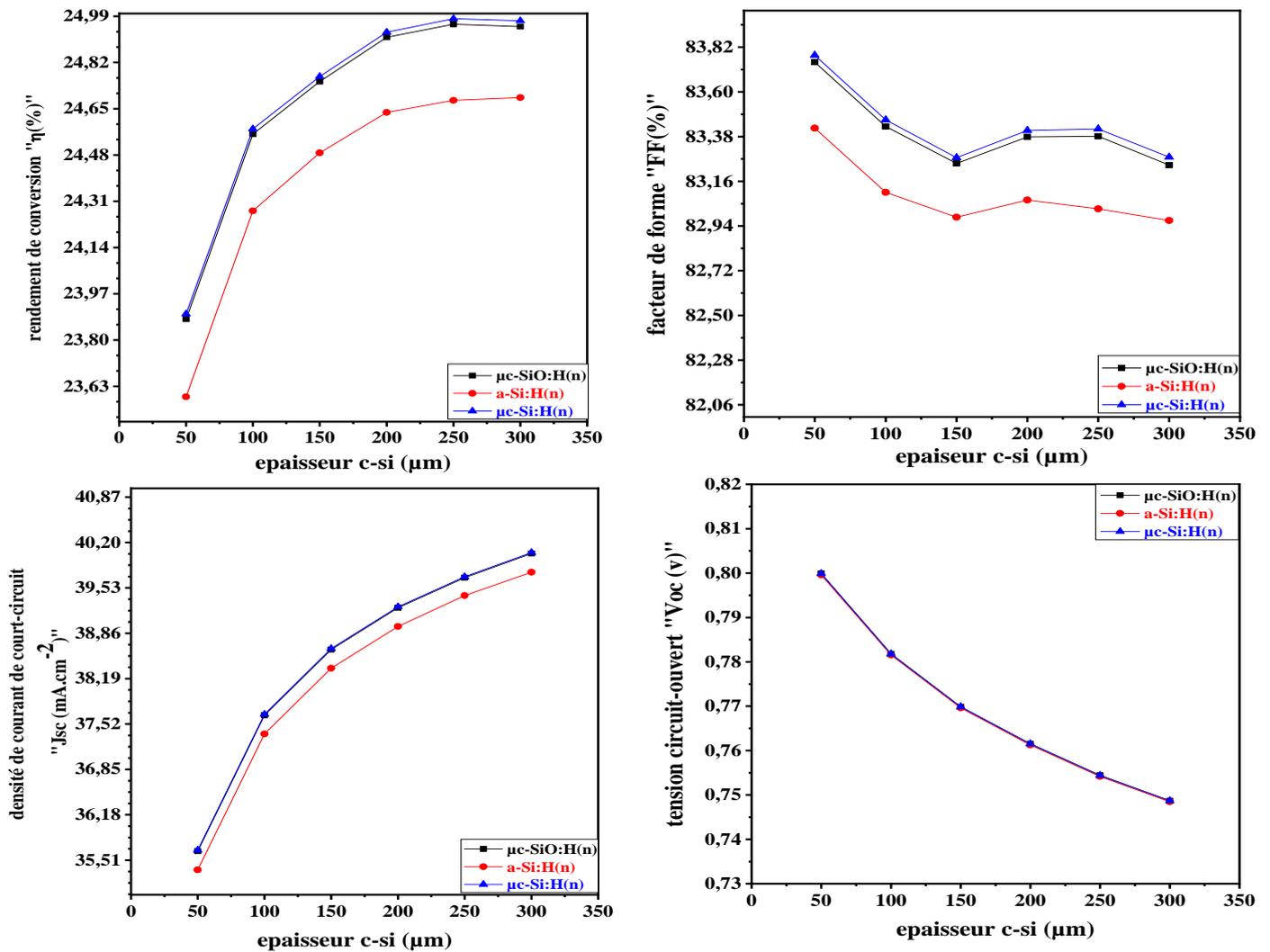


Figure 3. 45 : influences de la couche FSF sur les caractéristiques de la cellule HIT en fonction de l'épaisseur du substrat c-Si.

### 3.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons simulé une cellule solaire à base de silicium HIT en utilisant le simulateur SCAPS, avec une étude de l'effet de quelques paramètres, tel que le dopage, l'épaisseur, sur les caractéristiques électriques de la cellule qui sont: la tension de circuit ouvert ( $V_{oc}$ ), la densité de courant de court-circuit ( $J_{sc}$ ), le facteur de forme ( $FF$ ), le rendement de conversion ( $\eta$ ).

# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

La conversion d'énergie lumineuse en énergie électrique n'est pas totale, différentes pertes viennent influencer le rendement d'une cellule. Elles sont dans la plupart des cas dues à la nature du matériau et à la technologie utilisée. Parmi les nouveaux matériaux considérés prometteurs pour le photovoltaïque, le HIT étudié intensément depuis plus d'une dizaine d'années. Depuis le début des années 2000, il est étudié pour le photovoltaïque grâce à son coefficient d'absorption élevé tolérance aux rayonnements, et à son large direct et modulable gap d'énergie interdite pouvant couvrir le spectre solaire de l'infrarouge à l'ultraviolet.

Nous avons effectué dans ce mémoire la simulation numérique des caractéristiques électriques, courant-tension, FF et rendement de conversion, d'une cellule solaire HIT en silicium en étudiant l'effet de l'épaisseur et du dopage sur les jonctions HJ et HIT.

Les résultats obtenus par la simulation sont les suivants :

Cellule n°	Structure de la cellule	Voc (mV)	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	FF (%)	η (%)
Cellule 1	HJ	646.9	36.46	82.87	19.53
Cellule 2	HIT	678.2	36.94	83.97	21.04
Cellule 3	HJ-BSF	757.2	39.60	84.93	25.47
Cellule 4	HIT-BSF	757.1	39.42	84.93	25.35
Cellule 5	BIF ACIAL	757.68	40.03	84.86	25.74

**Tableau 3. 3 :** Les résultats obtenus par la simulation

Comme conclusion, on a trouvé que :

- La diminution de l'épaisseur de l'émetteur améliore le rendement électrique de la cellule
- L'augmentation de l'épaisseur de base améliore aussi le rendement électrique
- L'augmentation du dopage de la base entraîne une augmentation dans la tension de circuit ouvert (Vco) et par conséquent une augmentation dans le rendement.
- L'augmentation du dopage de l'émetteur entraîne une augmentation dans la tension de circuit ouvert(Vco) et par conséquent une augmentation dans le rendement.
- L'introduction de la couche BSF améliore le rendement de notre cellule

## Bibliographies

### Bibliographies:

- [1] International Energy Agency - IEA), Key World Energy Statistics 2020 [PDF page 34].
- [2] Djicknoum DIOUF, « Cellules photovoltaïques silicium à hétérojonctions et à structure interdigitée en face arrière », thèse de doctorat, université paris –sud 11, (2010).
- [3] Bendjellouli Zakaria, « Le Photovoltaïque fonctionnement et technologies », mémoire magistère, université de Bechar, algérie, 2009
- [4] International Energy Agency - IEA), Key World Energy Statistics 2020[pdf page 24]
- [5] NREL National Center for Photovoltaics NREL. Best researchcell efficiencies. 2015.
- [6] Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie ADEME. *Le solaire photovoltaïque*. Les Avis de l'ADEME, 2016.
- [7] Data and statistics - World: Electricity 2018 [archive], Agence internationale de l'énergie
- [8] M. A. Green, «silicon solar cells: operating principal's technology and system applications», Sydney, Australia: center for photovoltaic devices and systems, UNSW, (1992),274.
- [9] Wilfried FAVRE : << Silicium de type n pour cellules à hétérojonctions : caractérisations et modélisations >>Thèse de doctorat. Ecole Doctorale « Sciences et Technologies de l'Informatique des Télécommunications et des Systèmes» » juin 2011
- [10] H. Mathieu et H. Fanet, Physique des semiconducteurs et des composants électroniques. Dunod,2009
- [11] Goetzberger A., Hebling C. Photovoltaic materials, past, present, future. Solar En.Mat.&Sol.Cells, 2000, Vol. 62, pp. 1-19
- [12] B. Loic, thèse doctorat, «cellules photovoltaïques organiques souples à grandes surfaces », université Bordeaux I, (2008)
- [13] U. Gangopadhyay, S. Roy et al, «comparative simulation study between n-type and p-type silicon solar cells and the variation of efficiency of n-type solar cells by the application of passivation layer with different thickness using AFORS HET and PC1D», IOSR journal of engineering (IOSRJEN) ISSN:2250-3021, (2012),41-48.
- [14] Keck et al., The Review of Scientific Instruments 25, 331 (1954)
- [15] A. Hangleiter and R. Hacker, Phys. Rev. Lett. **65**, 215 (1990).
- [16] P.P. Altermatt, J. Schmidt, G. Heiser and A.G. Aberle, J. Appl. Phys. **82**, 4938 (1997).
- [17] Aouati Redha, « Etude de l'interaction électron-matière des nano structures de l'arséniure de gallium », Thèse doctorat, Université Constantine, Algérie, 2011

## Bibliographies

- [18] S. Siebentritt, «Why are kesterite solar cells not 20% efficient ». Thin Solid Films, vol. 535, pp. 1–4, 2013.
- [19] Alex Niemegeers, Marc Burgelman, Koen Decock, Johan Verschraegen, Stefaan Degraeve SCAPS manual, Version: 20 May 2014.
- [20] J.G. Fossum and D.S. Lee, Solid State Electronics **25**, 741 (1982).
- [21] 20Y. Sayade, « Détermination de la longueur de diffusion des porteurs de charge minoritaires dans le silicium cristallin par interaction lumière matière », thèse de doctorat, Institut National des Sciences appliquées de Lyon, 2009
- [22] AMPS-1D « Analysis of Microelectronic and Photonic Structures » développé à Pennsylvania State university (USA) par l'équipe du professeur Stephen Fonash [AMPS-1D web site, Pennsylvania State University, <http://psu.edu/dept/AMPS>].
- [23] ASPIN développé à l'université de Ljubljana (Slovénie) [F. Smole, M. Topi and J. Furlan, J. Non-Cryst. Solids**194**, 312 (1996)].
- [24] ASDMP « Amorphous Silicon Device Modelling Program » développé par le professeur Parsathi Chatterjee de l'Indian Association for Cultivation of Science (Kolkata, Inde) [P. Chatterjee, J. Appl. Phys. **76**, 1301 (1994)].
- [25] ASA « Amorphous Semiconductor Analysis » développé à l'université technologique de Delft (Pays Bas) [M. Zeman, J. A. Willems, L. L. A. Vosteen, G. Tao and J. W. Metselaar, Solar Energy Materials and Solar Cells**46**, 81 (1997)].
- [26] ATLAS de Silvaco International (USA) [25Manuel d'utilisation de Silvaco, version 5.12.1.R.].
- [27] AFORS-HET « Automat for Simulation of Heterojunction » développé au Hahn Meitner Institute (Allemagne) [R. Stangl, M. Kriegel and M. Schmidt, Proc. 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 1350 (2006)].
- [28] SCAPS « A Solar Cell Capacitance Simulator » unidimensionnel développé par ELIS, à l'université de Gent en Belgique[Manuel<http://scaps.elis.ugent.be/>].
- [29] A. Niemegeers, M. Burgelman, Numerical modelling of ac-characteristics of CdTe and CIS solar cells, Proceedings of the 25th IEEE Photovoltaic Specialists Conference Washington DC, 1996, pp.901-904. M. Burgelman, P. Nollet, S. Degraeve, Modelling polycrystalline semiconductor solar cells, Thin Solid. Films, 361 (2000) 527-532.].
- [30] Hasni, C. (2014). Comparaison par simulation numérique entre une cellule solaire n/p et une cellule solaire p/n en silicium cristallin par SCAPS (Doctoral dissertation, Université de Biskra-Mohamed Khider).
- [31] Bensmain, F. (2015). Etude théorique sur les applications actuelles du ZnO et les dopages possibles sur ce matériau (Doctoral dissertation).

## Bibliographies

- [32] Medjdoub, S. Etude structurelle des cellules solaires deuxième et troisième génération (Doctoral dissertation, 04/01/2017).
- [33] Neeraj Dwivedi, Sushil Kumar, Atul Bisht, Kamlesh Patel, S. Sudhakar: Simulation approach for optimization of device structure and thickness of HIT solar cells to achieve 27% efficiency
- [34] Vinh Ai Dao, Jongkyu Heo, Hyungwook Choi, Yongkuk Kim, Seungman Park, Sungwook Jung a, Nariangadu Lakshminarayan b, Junsin Yi: Simulation and study of the influence of the buffer intrinsic layer, back-surface field, densities of interface defects, resistivity of p-type silicon substrate and transparent conductive oxide on heterojunction with intrinsic thin-layer (HIT) solar cell
- [35] Hyeongsik Parka, Muhammad Quddamah Khokhara, Eun-Chel Choa, Minkyu Jua, Youngkuk Kima, Sangho Kimb, Junsin Yi: Computer modeling of the front surface field layer on the performance of the rear-emitter silicon heterojunction solar cell with 25 % efficiency
- [36] Arti Rawat, Mansi Sharma, Deepika Chaudhary, S. Sudhakar, Sushil Kumar: Numerical simulations for high efficiency HIT solar cells using microcrystalline silicon as emitter and back surface field (BSF) layers
- [37] Antara Datta a, J. Damon-Lacoste b, P. Roca i Cabarrocas b, P. Chatterjee: Defect states on the surfaces of a P-type c-Si wafer and how they control the performance of a double heterojunction solar cell
- [38] Sehyeon Kim, Hyeongsik Park, Duy Phong Pham a, Youngkuk Kim, Sangho Kim, Eun-Chel Cho, Younghyun Cho, Junsin Yi: Design of front emitter layer for improving efficiency in silicon heterojunction solar cells via numerical calculations
- [39] F. Azzemoua, D. Rachedb, W.L. Rahal: Optimisation of emitter properties for silicon heterojunction solar cell ITO/p-a-Si:H/i-a-Si:H/n-c-Si/BSF/Al