

Faculté des Sciences Exactes et d'Informatique
Département de Physique

THÈSE
En vue de l'obtention du
Diplôme de Doctorat en Sciences

Filière : Physique
Spécialité : Physique Appliquée

Présentée par

AZZEMOU Fatiha

Sujet :

**Optimisation des performances des cellules solaires à
base d'hétérojonctions de silicium.**

Soutenu le : 03/ 07 /2022

Devant le jury composé de :

Membres	Grade	Domiciliation	Qualité
SENOUCI Khaled	Professeur	Université de Mostaganem	Président
HAMDACHE Fatima	Professeure	USTO-MB	Examinatrice
HAMID Azzedine	Professeur	C.U. d'El Bayadh	Examineur
ABBES Charef	MCA	Université de Mostaganem	Examineur
RAHAL Wassila Leila	MCA	Université de Mostaganem	Directrice de thèse
RACHED Djaaffar	Professeur	USTO-MB	Co-directeur de thèse

Année Universitaire 2021-2022

DEDICACES

A

La mémoire de mon père,

Tous ceux qui me sont proches.

REMERCIEMENTS

Louange à **ALLAH**, le miséricordieux, sans lui rien de tout cela n'aurait pu être. Je remercie le Bon Dieu, le tout Puissant, de m'avoir donné la force, le courage, la capacité, la volonté et l'audace pour dépasser toutes les difficultés et aussi de m'avoir orienté vers le chemin du savoir et les portes de la science.

Je tiens à remercier profondément ma Directrice de thèse madame **RAHAL Wassila Leila**, Maître de conférences A à l'université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem pour m'avoir fait confiance en me proposant un sujet de recherche intéressant, pour m'avoir consacré beaucoup de son précieux temps à ma modeste personne et pour m'avoir prodigué des conseils et apporté des remarques qui m'ont permis de renforcer mon sens de la critique et d'améliorer la qualité de mes travaux. Je n'oublierai jamais tout ce que j'ai appris durant toutes ces années auprès de vous. Vous étiez, pour moi, une source continue d'inspiration et d'encouragement, toujours prête à écouter mes idées et à répondre à mes questions avec patience. Veuillez trouver en ces quelques lignes l'expression de ma profonde et sincère reconnaissance.

Je remercie très sincèrement mon co-directeur de thèse Monsieur **RACHED Djaaffar**, Professeur à l'Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, pour ses suggestions et propositions très utiles pour l'amélioration de ce travail, pour son soutien, son suivi et l'intérêt porté à cette thèse.

Qu'il me soit permis de témoigner ma profonde reconnaissance et ma très haute considération au président de jury: Monsieur **SENOUCI Khaled**, Professeur à l'université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant la présidence de mon jury de thèse.

Je tiens à remercier l'ensemble des membres du jury qui m'ont fait l'honneur de bien vouloir examiner mon travail, Madame **HAMADACHE Fatima Zohra**, Professeure à l'Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, Monsieur **HAMID Azzedine** Professeur au centre universitaire d'el Bayadh et Monsieur **ABBES Charef**, Maître de conférences A à l'université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem. Je vous remercie pour l'intérêt que vous avez porté à mon travail de thèse, pour le temps consacré à la lecture de mon manuscrit et pour les conseils et remarques permettant de corriger et d'améliorer le manuscrit. Encore une fois, je vous remercie pour l'honneur que vous m'avez fait en acceptant de siéger à ma soutenance.

Je remercie profondément les membres de ma famille, mes enfants, mon époux, ma maman, mes frères et mes sœurs. Grâce à votre soutien, motivation et votre confiance, j'ai toujours pu repousser mes limites et faire de mon mieux dans tous les domaines.

LISTE DES ACRONYMES

AFORS-HET	Automate FOR Simulation of HETerostructures
AIE	Agence Internationale de l'Energie
AIE	Agence Internationale Energie
AM	Air Mass
AMPS-1D	Analysis Microelectronic and Photonic Structures - one Dimension
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
ASDMP	Amorphous Semiconductor Device Modeling Program
BC	Bande de Conduction
BSF	Back Surface Field
BV	Bande de Valence
CSP	Concentrated solar power
CVD	Chemical Vapor Deposition
DPM	Defect-Pool Model
ELIS	Department of Electronics and Information Systems
ENIE	Entreprise Nationale de l'Industrie Electronique
EnR	Energie Renouvelable
EQE	Efficacité Quantique Externe
EQI	Efficacité Quantique Interne
FF	Facteur de forme
HIT	Heterojunction with Intrinsic Thin layer
IBC	Interdigitated Back Contacts
IRENA	International Renewable Energy Agency
ITO	Indium Tin Oxide
LPICM	Laboratoire de Physique des Interface et des Couches Minces
MEM	Ministère de l'Energie et des Mines
MENA	Moyen-Orient et Afrique du Nord
NREL	National Renewable Energy Laboratory
PECVD	Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition
PNEREE	Programme National de développement des Energies Renouvelables et de l'Efficacité Energétique
PV	Photovoltaïque
SCAPS-1D	Solar Cell Capacitance Simulator - One Dimension
SHJ	Silicon HeteroJunction
SKTM	Sharikat Kahrab wa Takat Moutadjadida
SR	Réponse Spectrale
SRH	Shockey-Read-Hall
STC	Standard Test Conditions
TCO	Transparent Conductive Oxide
ZCE	Zone de Charge d'Espace

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE.....	9
CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR L'ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE	13
1.1 Introduction	13
1.2 Les énergies renouvelables.....	13
1.3. Le développement des énergies renouvelables en Algérie.....	15
1.4. Le rayonnement solaire	19
1.4.1. L'énergie solaire en Algérie.....	19
1.4.2. Spectre solaire	20
1.4.3 Masse d'air.....	20
1.5. Principe de la conversion photovoltaïque	21
1.5.1 Absorption de la lumière.....	21
1.5.2 L'effet photovoltaïque.....	22
1.5.3 Principe de fonctionnement d'une cellule solaire	23
1.6. Modèle équivalent à une cellule photovoltaïque	24
1.6.1 Schéma électrique équivalent à une diode	24
1.6.2 Schéma électrique équivalent à deux diodes	26
1.7. Caractéristique J-V d'une cellule solaire	27
1.7.1. La densité du courant de court-circuit J_{sc}	27
1.7.2. La tension en circuit ouvert V_{oc}	27
1.7.3. Le Facteur de Forme FF.....	28
1.7.4. Rendement de conversion η	28
1.7.5 Efficacité Quantique	28
1.8. Les différents types de pertes dans une cellule solaire.....	29
1.8.1. Les pertes optiques.....	30
1.8.2 Les pertes électriques	30
1.8.3 Les différents types de recombinaisons	31
1.9. Influence des différents paramètres sur une cellule photovoltaïque	32
1.9.1. Influence de l'éclairement.....	32
1.9.2. Influence de la température.....	33
1.10. Les filières photovoltaïques	33
1.10.1. Les filières à base de silicium :	35
1.10.2. Les filières à base de couches minces	36

1.11. Les logiciels de simulation	39
1.11.1 Présentation du logiciel ASDMP	40
1.11.2. Présentation du logiciel de simulation SCAPS-1D.....	41
1.12. Conclusion.....	43
Références du chapitre 1	44
CHAPITRE 2 : LES CELLULES SOLAIRES A BASE D’HETEROJONCTION SILICIUM AMORPHE/SILICIUM CRISTALLIN	47
2.1. Introduction	47
2.2. Rappel sur les semi- conducteurs	48
2.2.1. Densité de porteurs à l’équilibre thermodynamique	49
2.2.2. Semi-conducteur intrinsèque	50
2.2.3. Semi-conducteur extrinsèque.....	51
2.2.4. Jonction P-N.....	53
2.2.5 Le modèle d’Anderson.....	59
2.2.6. Les équations de base des semi-conducteurs	60
2.3. Le silicium cristallin.....	62
2.3.1. Description générale du silicium cristallin.....	62
2.3.2 Dopage du silicium cristallin	63
2.3.3. Propriétés électriques du silicium cristallin	63
2.4. Le silicium amorphe.....	65
2.4.1 Description générale du matériau	66
2.4.2 Rôle de l’hydrogène dans le silicium amorphe hydrogéné	67
2.4.3 Procédé de fabrication du silicium amorphe hydrogéné.....	69
2.4.4 Densité d’états dans le silicium amorphe hydrogéné.....	70
2.4.5 Dopage du silicium amorphe	72
2.4.6 Caractérisation du silicium amorphe hydrogéné a-Si :H.....	72
2.5. Etat de l’art des cellules hétérojonction HIT :.....	73
2.6. Le rôle de chaque couche dans la cellule hétérojonction de silicium HIT.....	75
2.6.1 Les contacts métalliques	75
2.6.2. La couche antireflet TCO.....	75
2.6.3. L’émetteur à base de Silicium amorphe hydrogéné.....	76
2.6.4. La couche tampon à base de silicium amorphe hydrogéné intrinsèque.....	76
2.6.5. La couche active à base de silicium cristallin (c-Si).....	77
2.6.6. Le Back Surface Field (BSF)	77
2.7. Conclusion.....	77

Références du chapitre 2	78
CHAPITRE 3 : OPTIMISATION DE LA STRUCTURE A HETEROJONCTION DE SILICIUM HIT DE TYPE N	82
3.1. Introduction	82
3.2. Présentation de la cellule.....	82
3.3. Optimisation de l'émetteur (p-a-Si :H)	85
3.3.1. Effet de l'épaisseur de l'émetteur sur la performance de la cellule	85
3.3.2. Choix du meilleur matériau constituant l'émetteur selon son énergie de gap	87
3.3.3. Optimisation de la densité de dopage de l'émetteur	91
3.4. Optimisation de la couche de passivation intrinsèque i-a-Si :H.....	94
3.4.1. Effet de l'épaisseur de la couche de passivation sur la performance de la cellule .	94
3.4.2. Effet du gap de la couche de passivation sur la performance de la cellule.....	97
3.5. Optimisation de l'absorbeur (n-c-Si).....	100
3.5.1. Effet de l'épaisseur et de la densité des défauts de l'absorbeur sur la performance de la cellule	101
3.5.2. Effet du dopage de l'absorbeur sur la performance de la cellule.....	106
3.6. Optimisation de la couche BSF.....	108
3.7. Conclusion.....	113
Références du chapitres 3.....	115
CONCLUSION GENERALE	118
PRODUCTION SCIENTIFIQUE.....	121

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

La demande mondiale en énergie a fortement augmenté ces dernières décennies. Cela s'explique par la forte croissance démographique ainsi que par la croissance économique et l'évolution des modes de vie des populations. En effet, la consommation énergétique mondiale a progressé de 115 % en 46 ans, de 1973 à 2019. Selon l'Agence internationale de l'énergie AIE [1], elle s'élevait en 2019 à 418 EJ, dont 19,7 % sous forme d'électricité. La domination des énergies fossiles reste massive (81,4 %), ce qui engendre de fortes émissions de dioxyde de carbone (CO₂) estimées à 33 622 Mt en 2019 [2], dont 44,0 % produites par le charbon, 33,7 % par le pétrole et 21,6 % par le gaz naturel.

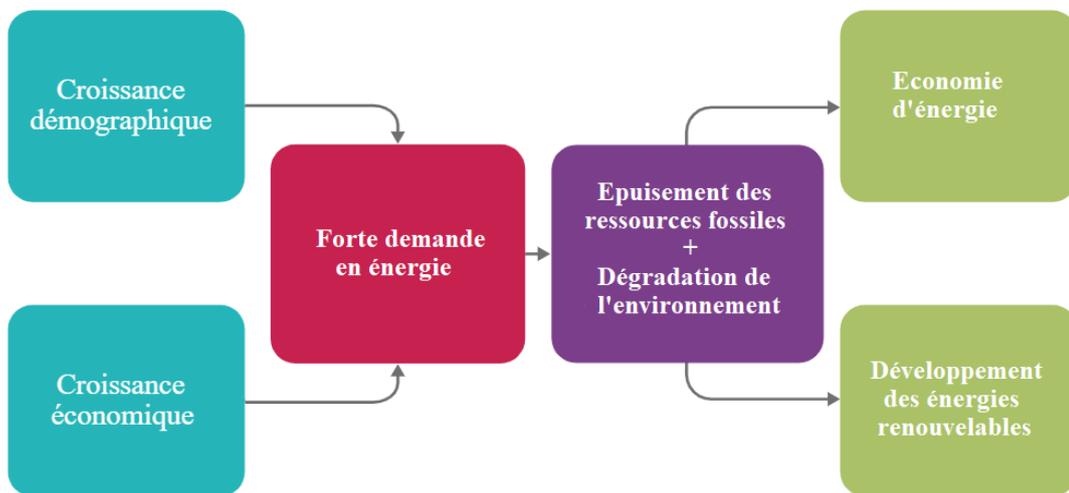


Figure 0-1 : Importance du développement des énergies renouvelables.

Les cellules photovoltaïques (PV) à hétérojonction de silicium (SHJ) combinant du silicium amorphe hydrogéné (a-Si :H) et du silicium cristallin (c-Si) ont démontré de très hauts rendements à la fois en laboratoire et en environnement de production. De nouvelles améliorations sont toujours possibles, avec un effort consacré à l'amélioration des propriétés de transport électronique, et à un meilleur confinement optique aux différentes interfaces du dispositif. Les mécanismes de transport dans ces cellules ne sont toujours pas complètement compris.

Les tendances photovoltaïques actuelles montrent qu'une efficacité améliorée et un coût réduit peuvent être obtenus par la technologie des cellules solaires à hétérojonction [3]. Les

cellules solaires à hétérojonction de silicium standards sont constituées de tranches de silicium cristallin (c-Si) avec un empilement de couches i/p pour former l'émetteur sur la face avant et un empilement de couches de silicium amorphe hydrogénées i/n+ hydrogénées forme le champ de surface arrière. L'utilisation de telles couches dans des cellules à hétérojonction présente de nombreux avantages tels que de basses températures de traitement, un faible coût, un dépôt sur une grande surface et des efficacités de cellule élevées. Une telle structure de dispositif a été mise au point par l'entreprise Sanyo à partir du début des années 1990, augmentant régulièrement l'efficacité pour atteindre actuellement 24,7% pour une simple face [4,5] et 26,7% [6] avec une hétérojonction double face et une cellule IBC-SHJ, respectivement.

Le principal objectif de cette thèse est d'optimiser numériquement des cellules photovoltaïques à hétérojonction de silicium HIT, en réalisant une investigation approfondie afin d'étudier l'influence des paramètres géométriques, électriques et optiques des matériaux constituant la cellule solaire sur la performance du dispositif. Les quatre principales couches seront optimisées (Emetteur, absorbeur, couche de passivation et BSF). L'accent sera mis sur la compréhension et l'interprétation des différents phénomènes électrique qui ont lieu dans ce type de dispositif afin de comprendre les mécanismes engendrés dans ce type de cellule et éventuellement d'orienter rentablement les réalisations expérimentales de cellules solaires à haut rendement.

Dans le premier chapitre, nous présenterons les notions de base concernant l'énergie solaire photovoltaïque et nous détaillerons les principales lignes de la transition énergétique mise au point par l'Algérie. Nous expliquerons par la suite les principales caractéristiques du spectre solaire, puis nous aborderons le principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques. Nous présenterons les différents schémas électriques équivalents indispensables à la modélisation des cellules solaires. Cette modélisation permet de déterminer paramètres PV de la cellule (Densité de courant de court-circuit J_{SC} , Tension de circuit ouvert V_{OC} , Facteur de forme FF et rendement de conversion η). Nous terminerons ce chapitre en détaillant les filières les plus importantes des cellules solaires, puis en présenterons brièvement les logiciels utilisés pour réaliser nos simulations.

Le deuxième chapitre sera consacré aux cellules solaires HIT. Nous rappellerons d'abord quelques notions de base sur les jonctions P-N qui sont considérées comme le cœur même de la cellule solaire. Nous présenterons les principales caractéristiques du silicium amorphe et du silicium cristallin, qui sont les deux matériaux principaux utilisés dans l'élaboration des cellules

HIT. Enfin, nous présenterons les principales étapes de développement des cellules photovoltaïques à hétérojonction, et nous présenterons de façon détaillée les principaux constituants des cellules HIT standards.

Dans le dernier chapitre, nous présenterons les différents résultats de l'optimisation numérique de la cellule solaire à hétérojonction de silicium HIT de type N, ayant la structure ITO/p-a-Si :H/i-a-Si :H/n-c-Si/BSF/Al afin d'obtenir un rendement optimal dépassant le record de 26.7% établi en 2017 [6] et toujours pas dépassé à ce jour. Nous commencerons par présenter la structure de la cellule à modéliser et à optimiser, en détaillant les propriétés des différents matériaux utilisés afin de les introduire comme paramètres d'entrée dans la simulation. Pour réaliser nos simulations, nous utiliserons dans un premier temps le logiciel ASDMP (Amorphous Semiconductor Device Modeling Program) pour réaliser l'optimisation du gap, de l'épaisseur et de la densité de dopage de l'émetteur à base de silicium amorphe hydrogéné dopé P. Nous poursuivrons l'optimisation des couches restantes (Couche de passivation, Absorbeur, BSF) à l'aide du logiciel SCAPS-1D (Solar Cell Capacitance Simulator one Dimension). Nous présenterons les résultats obtenus et discuterons l'influence des différents paramètres, tel que la densité de défauts, le gap, le dopage, l'épaisseurs des couches sur la performance de la cellule étudiée.

Nous clôturerons cette thèse par une conclusion générale résumant les différents résultats obtenus, suivi de perspectives nécessaires à l'amélioration de ce travail.

Références :

- [1] www.iea.org consulté le 15/05/2021
- [2] AIE, « CO2 Emissions from Fuel Combustion 2019 Highlights », Agence internationale de l'énergie, 2019.
- [3] M.A. Green et al., « Solar cell efficiency tables (Version 58) », Volume 29, Issue 7, Special Issue: EU PVSEC, 2021.
- [4] Y. Liu, Y. Sun, W. Liu, J. Yao, « Novel high-efficiency crystalline-silicon-based compound heterojunction solar cells : HCT (heterojunction with compound thin-layer) », Physical Chemistry Chemical Physics, 16 (29), 15400-15410, 2014.
- [5] K. Patel, P.K. Tyagi, « Technological advances in a-Si: H/c-Si Heterojunction solar cells ». International Journal of Renewable Energy Research (IJRER), 4 (2), 528-538, 2014.
- [6] K. Yoshikawa, H. Kawasaki, W. Yoshida, *et al.* «Silicon heterojunction solar cell with interdigitated back contacts for a photoconversion efficiency over 26% », Nat Energ. 2, 17032, 2017.

CHAPITRE 1

GENERALITES SUR L'ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE

CHAPITRE 1

GENERALITES SUR L'ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE

1.1 Introduction

Dans ce premier chapitre, nous présenterons les notions de base concernant l'énergie solaire photovoltaïque (PV). Nous commencerons par parler de l'importance des énergies renouvelables puis des principales lignes de la transition énergétique mise au point par l'Algérie

Pour décrire le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque, il est important de comprendre la source d'énergie incidente : le rayonnement solaire. Nous expliquerons alors les principales caractéristiques du spectre solaire, puis nous aborderons le principe de fonctionnement des cellules solaires.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous présenterons les schémas électriques équivalents à une cellule photovoltaïque. Ces schémas permettent de déterminer la caractéristique J-V d'où découle les quatre paramètres PV de la cellule (Densité de courant de court-circuit J_{SC} , Tension de circuit ouvert V_{OC} , Facteur de forme FF et rendement de conversion η). Nous terminerons ce chapitre en détaillant les filières les plus importantes des cellules solaires, puis en citant les différents logiciels de simulation disponibles ASDMP, SCAPS-1D, AMPS-1D, AFROS-HET et enfin nous présenterons brièvement les logiciels utilisés pour réaliser nos simulations.

1.2 Les énergies renouvelables

Les énergies renouvelables (EnR) sont des sources d'énergie dont le renouvellement naturel est assez rapide pour qu'elles puissent être considérées comme inépuisables à l'échelle du temps humain. L'exploitation des énergies renouvelables génère peu de polluants (émission de CO_2) notamment lorsqu'on la compare aux énergies fossiles (charbon, gaz, pétrole). C'est pour cette raison que les EnR sont un vecteur important dans la lutte contre le réchauffement climatique. Les principales énergies renouvelables sont :

- L'énergie solaire photovoltaïque (Transformations des rayonnements solaires en électricité),
- L'énergie solaire thermique (Transformations des rayonnements solaires en chaleur),
- L'énergie éolienne (Energie du vent),

- L'énergie hydraulique (Barrages, moulins à eau... etc.),
- L'énergie géothermique (Energie thermique emmagasinée sous terre)
- La biomasse (Transformation des matières organiques).
- L'énergie marine (Vagues et marées)

Selon le rapport de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE) édité en mai 2021 [1], les installations mondiales de nouvelles capacités électriques renouvelables ont atteint leur plus haut niveau depuis plus de deux décennies et ont atteint près de 280 GW en 2020, soit 45% de plus qu'en 2019. Près de 135 GW de nouvelles capacités solaires photovoltaïques ont été déployées en 2020. Le rythme de développement de ces filières devrait se maintenir à un niveau similaire en 2021 et 2022, comme nous pouvons l'observer la figure 1.1.

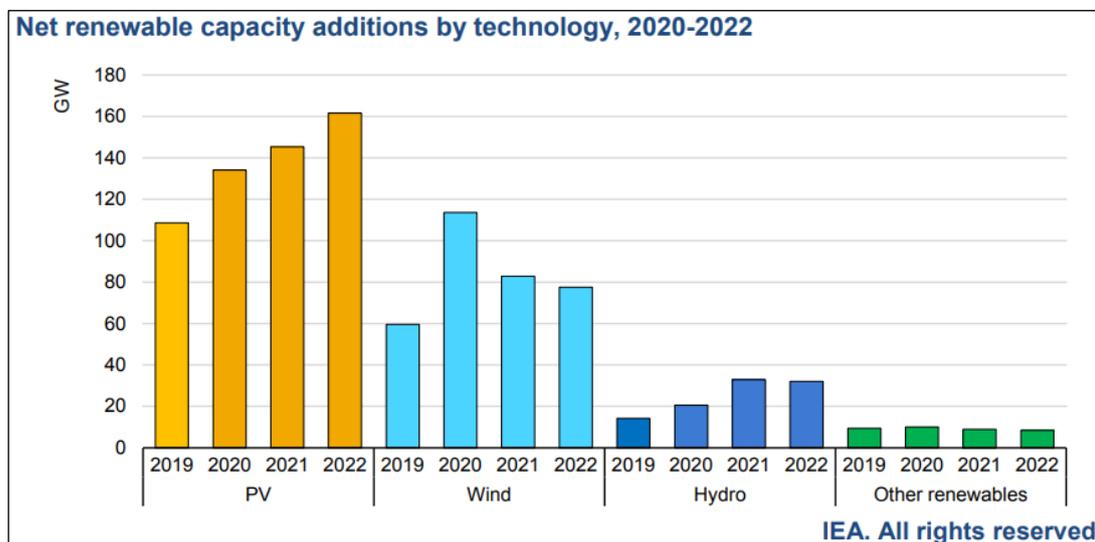


Figure 1.1. Prévisions de l'AIE sur les nouvelles capacités renouvelables installées dans le monde [1]

Le dernier rapport d'IRENA (International Renewable Energy Agency) sur les nouvelles capacités de génération d'électricité renouvelable, indique que le solaire photovoltaïque continue d'évoluer (Figure 1.2.). La capacité cumulée prévue de 8519 GW en 2050, est 30 % supérieure à celle de l'éolien à la même échéance, avec une contribution toujours prépondérante de l'Asie (4837 GW), suivie de l'Amérique du nord (1728 GW), l'Europe (891 GW), l'Afrique (673 GW) et enfin l'Amérique latine (281 GW). [2]

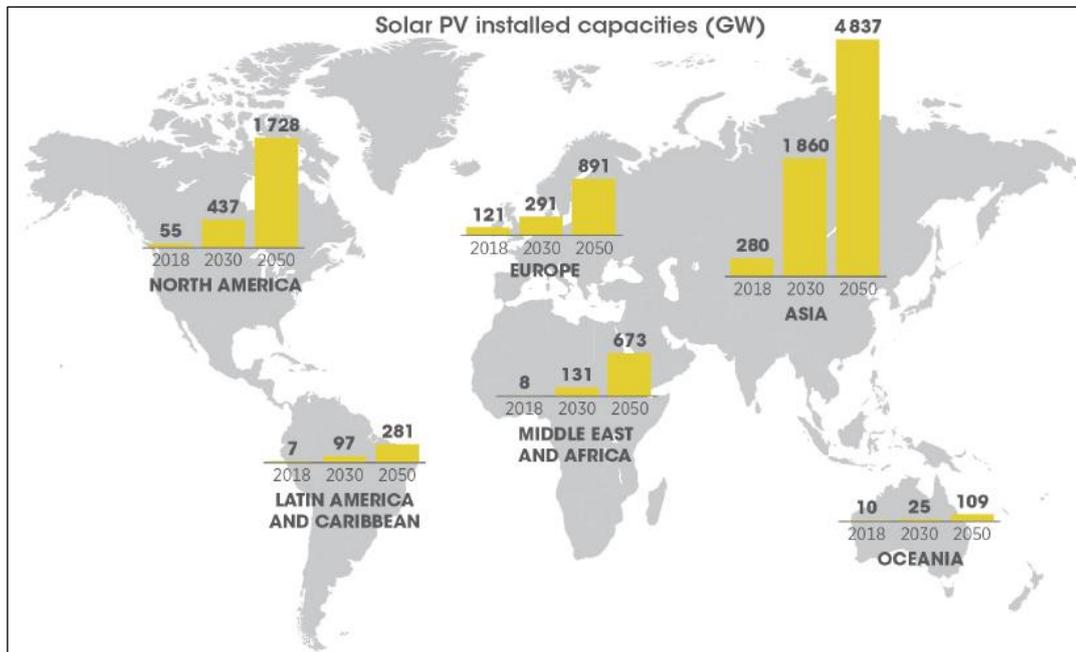


Figure 1.2. Projection à l'horizon 2050 de l'évolution des capacités cumulées du solaire photovoltaïque installées dans le monde [2]

1.3. Le développement des énergies renouvelables en Algérie

Le plan d'action du gouvernement algérien a placé la transition énergétique au cœur des politiques de développement du pays. En effet, partant de la situation économique du pays, qui a jusqu'ici reposé sur les ressources fossiles, tout programme visant le contournement de cette situation, conduit forcément à une modification de la politique énergétique. [3]

L'Algérie s'est engagée sur la voie des énergies renouvelables afin de préserver les ressources énergétiques d'origine fossile. Le programme consistait à installer une puissance d'origine renouvelable de près de 22 000 MW entre 2011 et 2030 (12 000 MW pour le marché national et 10 000 MW qui pourraient être dédiés à l'exportation). Les moyens de production de l'électricité destinée au marché national (12 GW), ont été planifiés selon le Ministère de l'Énergie et des Mines (MEM) de l'époque (2011), sur la base de trois principales ressources renouvelables (Tableau 1.1) et déployés selon quatre étapes (Tableau 1.2).

Tableau 1.1. Part des ressources renouvelables primaires retenues en 2011. [3]

Solaire thermique à concentration (CSP)	Solaire photovoltaïque (PV)	Éolien	Total
7200 MW	2800 MW	2000 MW	12000 MW

Tableau 1.2. Planning de réalisation du programme [3]

Etape	Action
2011-2013	Réalisation de projets pilotes totalisant une capacité de 110 MW pour tester les différentes technologies.
2014-2015	Début du déploiement du programme avec l'installation d'une puissance totale de près de 650 MW.
2016-2020	Déploiement à l'horizon 2020 d'une capacité minimale de 4600 MW, dont 2600 MW sont destinés au marché intérieur et 2000 MW à l'exportation.
2021-2030	Déploiement à grande échelle du programme pour atteindre à l'horizon 2030 les objectifs respectifs de 12000 MW (consommation locale) et 10000 MW (marché international).

Le planning de réalisation ci-dessus, n'a jamais été suivi. En effet, sur l'ensemble des projets pilotes totalisant les 110 MW prévus, seules trois réalisations ont vu le jour avec une puissance globale de 36.3 MW soit :

a. La centrale hybride (gaz-solaire thermique) de Hassi-Rmel, avec 25 MWc de solaire thermique à concentration CSP (mise en service en 2011).

b. La centrale photovoltaïque (PV) de 1.1 MWc de Ghardaïa, englobant quatre technologies PV, avec et sans poursuite du soleil (mise en service en 2014).

c. La centrale éolienne de 10.2 MWc de Kabertène (Adrar), englobant 12 aérogénérateurs de puissance nominale de 850 KW chacun (mise en service en 2014).

Pour le reste, seul un programme totalisant 343 MWc de centrales solaires photovoltaïques a été lancé début 2014 par SKTM (Sharikat Kahrab wa Takat Moutadjadida), filiale de production d'électricité de Sonelgaz, créée en Avril 2013. C'est dans ce contexte que dix centrales solaires photovoltaïques totalisant 265 MW et partitionnées en trois lots (Est, Centre et Ouest) ont été réalisées au niveau des hauts plateaux, alors que dix autres l'ont été dans le cadre du lot sud (78 MW).

La réactualisation en 2015 de la première version du programme a été essentiellement motivée par les modifications importantes dans le monde quant aux coûts d'investissement et de production d'électricité à base des diverses ressources renouvelables [4]. En effet, c'est le solaire thermique à concentration (CSP) qui a été initialement adopté pour générer 7200 MW d'électricité solaire (Tableau 1.1), soit plus de 2.5 fois la part du solaire photovoltaïque (2800 MWc). En effet, en 2011 les coûts de production d'électricité à base de ces deux technologies étaient quasiment les mêmes, ceux relatifs au solaire photovoltaïque ont par la suite fortement chuté jusqu'à moins de 0.15 dollars/KWh en 2015, alors que ceux du CSP sont restés bien au-dessus de 0.25 dollars/KWh (Figure 1.3). Ainsi, la part du CSP a été revue à la baisse (2000 MW au lieu de 7200 MW), alors que celle du solaire photovoltaïque a été multipliée par 5 environ (13575 MW au lieu de 2800 MW), soit 62 % de l'ensemble des 22000 MW prévus à l'horizon 2030.

Toutefois, le deuxième planning résumé dans le tableau 1.3 n'a également pas été suivi. En effet, la seule activité visible sur le terrain dans le domaine des énergies renouvelables dans le pays depuis 2015, a essentiellement été dominée par la réception (étalée jusqu'en 2017) des centrales solaires photovoltaïques totalisant 343 MW du programme lancé en 2014 par SKTM. Sonatrach a également mis en service en 2018 une première centrale solaire photovoltaïque de 10 MWc à Bir Rebaa Nord, wilaya de Ouargla [3].

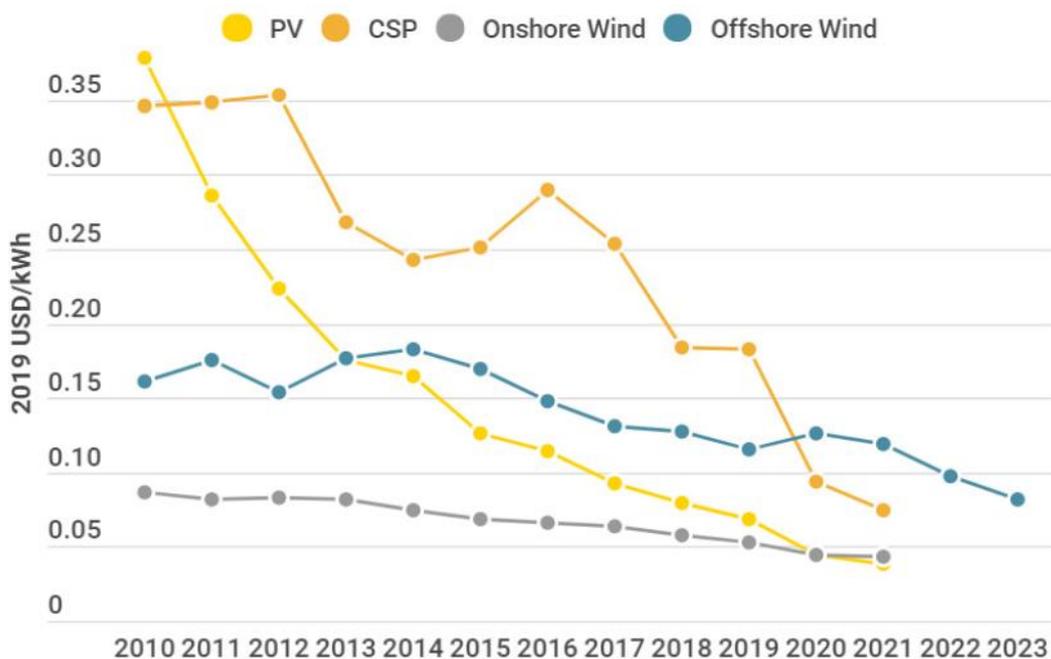


Figure 1.3. Évolution des coûts de production de l'électricité à base des principales ressources renouvelables [3]

Tableau 1.3. Plan d'exécution du PNEREE actualisé en 2015 (en MW) [3].

	1ère Phase 2015-2020	2ème Phase 2021- 2030	Total
Photovoltaïque	3 000	10 575	13 575
Eolien	1 010	4 000	5 010
CSP	-	2 000	2 000
Cogénération	150	250	400
Biomasse	360	640	1 000
Géothermie	05	10	15
Total	4 525	17 475	22 000

Dans le but de promouvoir la production de l'énergie à partir de systèmes photovoltaïques, plusieurs entreprises Algériennes publiques et privés de production de panneaux solaires ont vu le jour. Les plus importantes sont citées dans le tableau 1.4.

Jusqu'à maintenant, toutes ces entreprises importent les cellules solaires (Majoritairement à base de silicium), puis les assemblent afin de réaliser des panneaux solaires de différents types. Ce choix stratégique permet à ces entreprises de pouvoir choisir les cellules de dernières générations sans avoir à supporter les coûts importants de la recherche et du développement sur une technologie qui évolue continuellement [3].

Tableau 1.4. Production de panneaux solaires photovoltaïques en Algérie [3].

Fabrication de panneaux PV	ALPV	AURES SOLAIRE	CONDOR Electronics	ENIE Electronics	Milltech	Zergoun green energy
Capacités de production annuelle (MWc)	12	30	130	18	200	160
Lieu de production	Tlemcen	Batna	Bordj Bou Arréridj	Sidi Bel Abbes	Mila	Ouargla

1.4. Le rayonnement solaire

Sur Terre, la plus grande source de lumière encore gratuite est le Soleil. L'utilisation de cette énergie inépuisable est un enjeu incontournable pour notre société. Le système qui permet de convertir cette énergie solaire en énergie électrique est la cellule solaire.

1.4.1. L'énergie solaire en Algérie

Compte tenu de sa position géographique, l'Algérie dispose de grandes potentialités quant aux gisements de ressources renouvelables, notamment l'énergie solaire. Comme nous pouvons le constater à partir du tableau 1.5., l'Algérie dispose du potentiel solaire le plus élevé de la région du MENA « Moyen-Orient et Afrique du Nord ».

Tableau 1.5. Potentiel solaire dans quelques pays.

Pays	Espagne	Tunisie	Maroc	Egypte	Algérie
Potentiel solaire (TWh/an)	1278	9244	20146	73656	168972

La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut même atteindre 3900 heures dans les hauts plateaux et le Sahara. Ainsi, sur l'ensemble du territoire national, l'énergie solaire globale reçue par jour sur une surface horizontale d'un mètre carré varie entre 5.1 KWh au Nord et 6,6 KWh dans le Grand Sud.

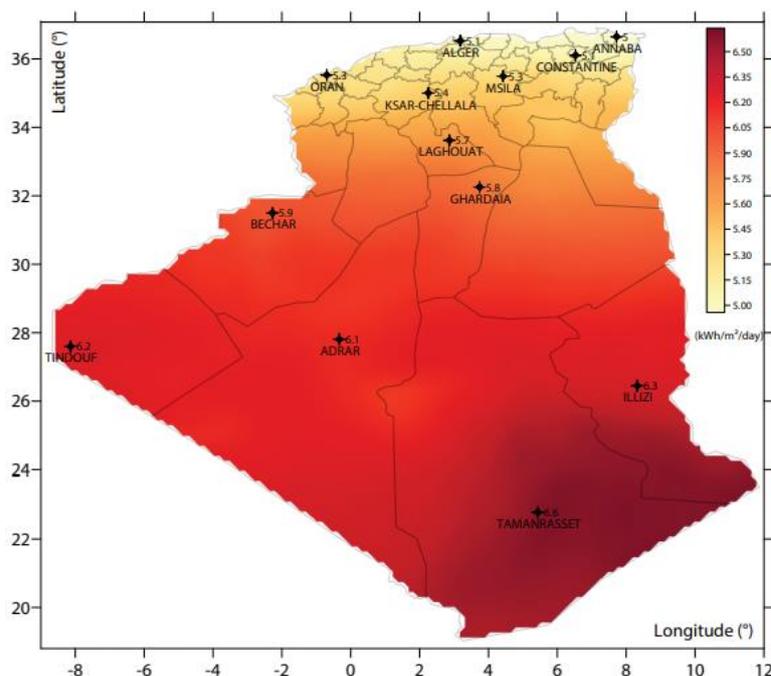


Figure 1.5. Gisement solaire de l'Algérie reçue par jour sur une surface d'un m². [3]

1.4.2. Spectre solaire

Le rayonnement solaire est représenté par un spectre donnant l'irradiance en fonction de la longueur d'onde (Figure 1.6). Le spectre AM0 représente le rayonnement solaire hors l'atmosphère, ce spectre est généralement utilisé pour l'étude des cellules photovoltaïques dans l'espace. Sur terre, le rayonnement solaire a un spectre très différent de AM0 car la lumière subit une grande atténuation en traversant les couches de l'atmosphère. A cet effet, le spectre AM1.5G a été introduit pour définir la répartition de l'énergie des photons solaires en fonction de la longueur d'onde sur la surface de la terre. La lettre G désigne "global", car le spectre inclut la lumière directe et diffusée

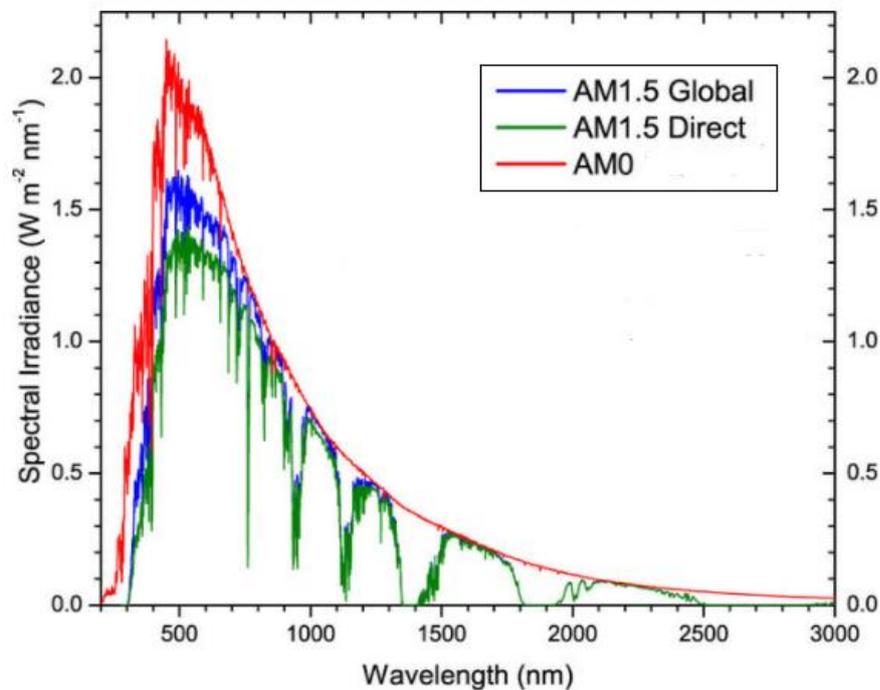


Figure 1.6. Spectre solaire AM0, AM1.5G et AM1.5D [4]

1.4.3 Masse d'air

Plus le soleil est bas sur l'horizon, plus son rayonnement va traverser une épaisseur importante de l'atmosphère et plus il va subir des transformations. On appelle masse d'air (ou Air Mass en anglais), le rapport entre l'épaisseur d'atmosphère traversée par le rayonnement direct pour atteindre le sol et l'épaisseur traversée à la verticale du lieu (Figure 1.7).

Dans les conditions normales et au niveau de la mer, l'expression simplifiée suivante est utilisée :

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

Avec θ l'angle que fait le soleil avec le zénith (position verticale).

- AM1 = correspond au soleil au zénith ($\theta = 0$)
- AM2 = correspond à l'angle $\theta = 60^\circ$
- AM1.5 = correspond à l'angle $\theta = 48,19^\circ$
- AM0 est utilisé pour préciser les conditions en dehors de l'atmosphère.

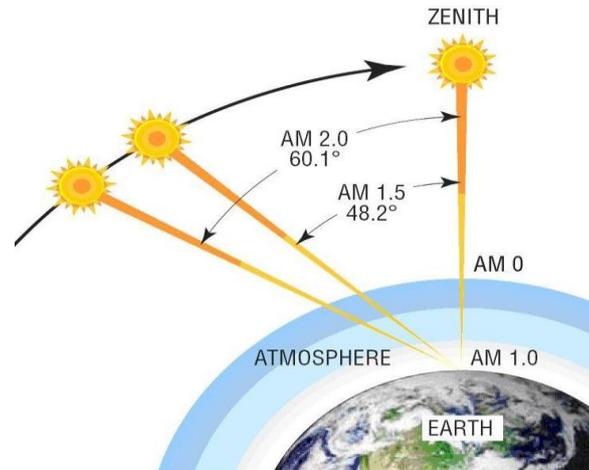


Figure 1.7 : Représentation schématique du nombre de masse d'air AM [5].

1.5. Principe de la conversion photovoltaïque

1.5.1 Absorption de la lumière

La lumière peut être considérée sous forme d'ondes électromagnétiques de longueur d'onde λ ou sous forme de corpuscules dotées d'une énergie propre E_{photon} fonction de λ (Eq. 1.2)

$$E_{\text{photon}} = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (1.2)$$

Avec h : constante de Planck (J.s)

c : Vitesse de la lumière (m/s)

λ : Longueur d'onde (m)

Cette dualité de la lumière est essentielle lorsqu'on souhaite comprendre les interactions rayonnement-matière ; les phénomènes intervenant dans l'absorption de la lumière et la conversion photoélectrique dépendent à la fois de l'énergie et de la longueur d'onde du rayonnement incident. Ainsi, on définit le phénomène d'absorption de la lumière par un matériau par la loi de Beer-Lambert (Eq. 1.3) où le coefficient d'absorption α (en m^{-1}) est lui-

même défini par la relation 1.4. k est le coefficient d'extinction du matériau qui dépend lui aussi de la longueur d'onde du rayonnement.

$$I = I_0 \exp(-\alpha x) \quad (1.3)$$

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad (1.4)$$

Avec I_0 : intensité de la lumière incidente (w)

I : Intensité de la lumière sortante (w)

x : Longueur du trajet optique (m)

1.5.2 L'effet photovoltaïque

Découvert par Becquerel en 1839, l'effet photoélectrique provoque sur certains matériaux, l'émission d'une petite quantité d'électricité lorsqu'ils sont exposés à la lumière. Pour cela, il faut que l'énergie des photons incidents soit transmise à des porteurs de charge (électrons ou trous) dans le matériau.

A l'équilibre les électrons possèdent une énergie correspondant à des états situés dans la bande de valence BV et sont dits « liés ». Lorsqu'un photon interagit avec un électron, il transfère intégralement son énergie à ce dernier, à la condition que le niveau énergétique final de l'électron soit autorisé et libre. Ainsi, un photon incident dont l'énergie est supérieure à E_g du matériau permettra le passage d'un électron de la bande de valence vers la bande de conduction BC. Il y'a alors création d'une paire électron/trou (e/h) constituée de l'électron « excité » de la BC et du trou créé dans la BV par la transition électronique. Leur déplacement dans le matériau est alors possible.

La transition électronique respecte les lois de conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement. La quantité de mouvement peut s'exprimer par la relation 1.5.

$$\vec{p} = \frac{h}{2\pi} \vec{k} \quad (1.5)$$

Avec \vec{k} : vecteur d'onde

Il existe deux types de transitions : à gap direct et à gap indirect (Figure 1.8). Quand on est dans le cas où le maximum de la bande de valence correspond au minimum de la bande de conduction, la transition est directe. En revanche, dans le cas où la transition est à gap indirect, pour satisfaire la relation de conservation du moment, il faut qu'une troisième particule appelée phonon intervienne. Les phonons sont des vibrations du réseau apportant ou absorbant la quantité de mouvement nécessaire. Puisqu'il s'agit d'un problème à trois corps, on comprend

que la probabilité d'absorption soit plus faible que pour une transition à gap direct. L'effet photoélectrique est donc plus ou moins important en fonction du matériau semi-conducteur suivant qu'il permettra une transition électronique directe ou indirecte.

Le silicium cristallin (c-Si) possède un gap direct de 3,4 eV, ce qui limite les transitions radiatives aux photons très énergétiques ($\lambda < 365$ nm). Au-delà de 365 nm, les seules transitions possibles sont celles impliquant le gap indirect de 1,12 eV.

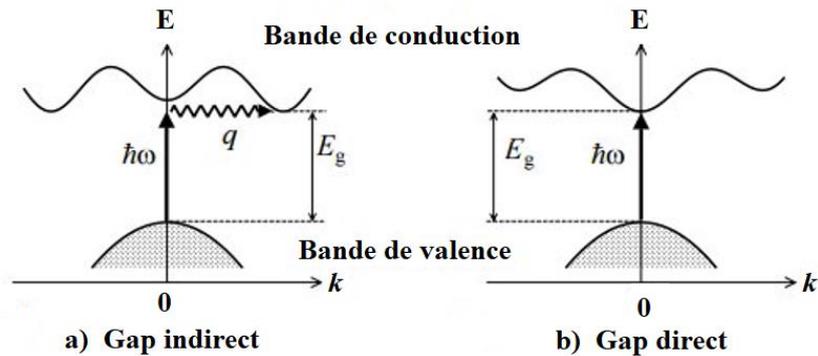


Figure 1.8 : Transitions électronique (a) pour un gap direct, (b) pour un gap indirect.

1.5.3 Principe de fonctionnement d'une cellule solaire

Le fonctionnement d'une cellule solaire repose sur la conversion photovoltaïque et peut être résumé en trois étapes : L'absorption de la lumière, la séparation des charges électriques photogénérés et enfin la collecte de ces charges.

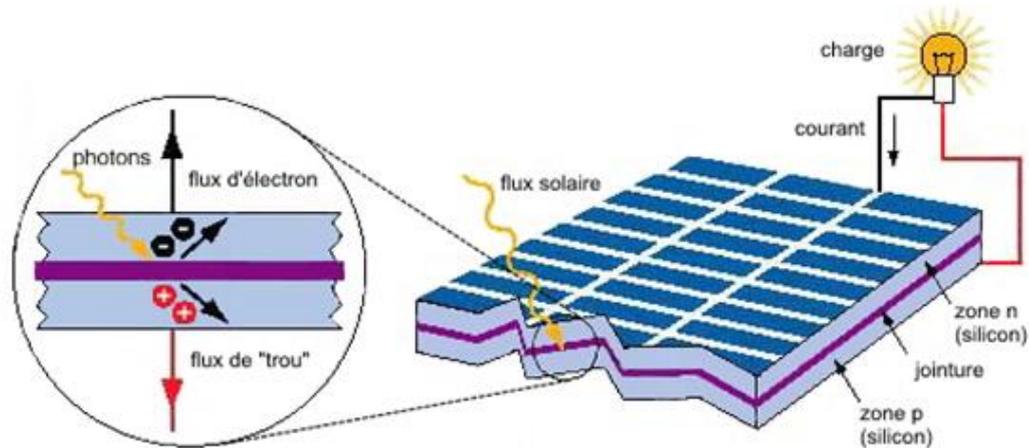


Figure 1.9 : Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire [6].

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

Lorsqu'un photon est absorbé par le matériau, il passe une partie de son énergie par collision à un électron l'arrachant littéralement de la matière. Ce dernier étant précédemment à un niveau d'énergie inférieur, où il était dans un état stable, passe alors vers un niveau d'énergie supérieur,

créant un déséquilibre électrique au sein de matériau se traduisant par une paire électron-trou qui modifie localement la conductivité du matériau.

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

b) Séparation des charges électriques

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

c) Collecte des charges électriques

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

1.6. Modèle équivalent à une cellule photovoltaïque

La modélisation et l'analyse du comportement des cellules photovoltaïques est largement étudiée depuis longtemps. Différents circuits électriques sont proposés pour représenter la cellule, nous traitons quelques modèles de ces circuits proposés.

1.6.1 Schéma électrique équivalent à une diode

Le modèle d'une cellule solaire idéale consiste en une diode en parallèle avec un générateur de courant (Figure 1.10).

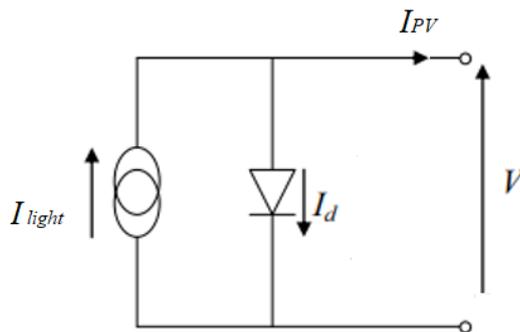


Figure 1.10 : Schéma équivalent d'une cellule solaire idéale

Néanmoins, ce modèle ne décrit pas bien le cas réel. Pour pouvoir se rapprocher du cas réel, deux résistances sont ajoutées : une résistance série (R_s) et une résistance parallèle (R_{sh}) comme présenté dans la figure 1.11. La résistance série modélise les pertes résistives dans la cellule, et la résistance parallèle (shunt en anglais) modélise les courants de fuites dans différentes couches de la cellule.

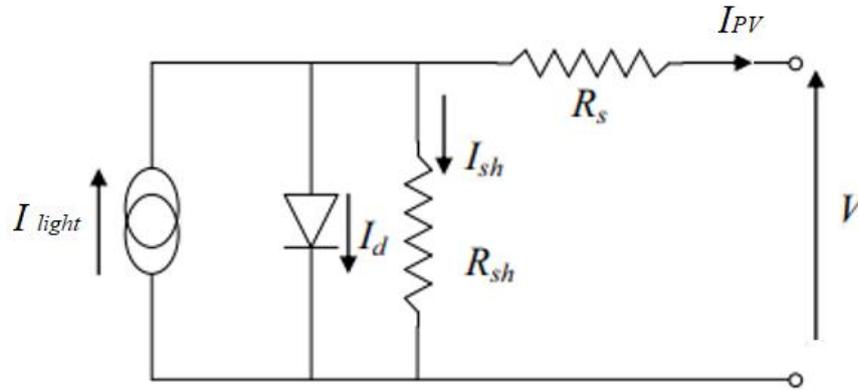


Figure 1.11 : Schéma électrique équivalent d'un modèle à une diode.

D'après la loi des nœuds, nous obtenons l'équation caractéristique courant-tension de la cellule donnée par :

$$I_{PV} = I_{light} - I_d - I_{sh} \quad (1.6)$$

I_{PV} : courant fourni par la cellule.

I_{light} : courant généré par l'éclairement (courant photonique).

I_{sh} : courant de la résistance en série.

I_d : courant de la diode (courant d'obscurité).

D'un autre côté, nous avons :

$$I_{sh} \cdot R_{sh} - I_{PV} \cdot R_s - V = 0 \quad (1.7)$$

$$I_d = I_0 \left[\exp\left(\frac{V_D}{AV_t}\right) - 1 \right] \quad (1.8)$$

Où :

I_0 : courant de saturation inverse de la diode.

A : facteur d'idéalité du matériau (compris entre 1 et 2).

$V_t = \frac{k.T}{q}$: potentiel thermodynamique.

V_D : Tension aux bornes de la diode.

T : température en kelvin.

K_B : constante de Boltzmann, $1,38.10^{-23}$ J/K.

q : charge de l'électron, $1,602.10^{-19}$ c.

A partir des équations (1.7) et (1.8), l'équation (1.6) devient :

$$I_{PV} = I_{light} - I_0 \left[\exp\left(\frac{qV + q(I_{PV} \cdot R_S)}{A \cdot K_B \cdot T}\right) - 1 \right] - \left(\frac{V + (I_{PV} \cdot R_S)}{R_{Sh}}\right) \quad (1.9)$$

1.6.2 Schéma électrique équivalent à deux diodes :

Ce modèle est constitué d'une source de courant I_{light} modélisant l'éclairement, d'une diode D1 en parallèle (facteur d'idéalité $A_1=1$) spécifiant le courant de diffusion les zones neutres de la cellule solaire, d'une deuxième diode D2 (facteur d'idéalité $A_2=2$) tenant compte de la recombinaison des porteurs dans la Zone de Charge d'espace.

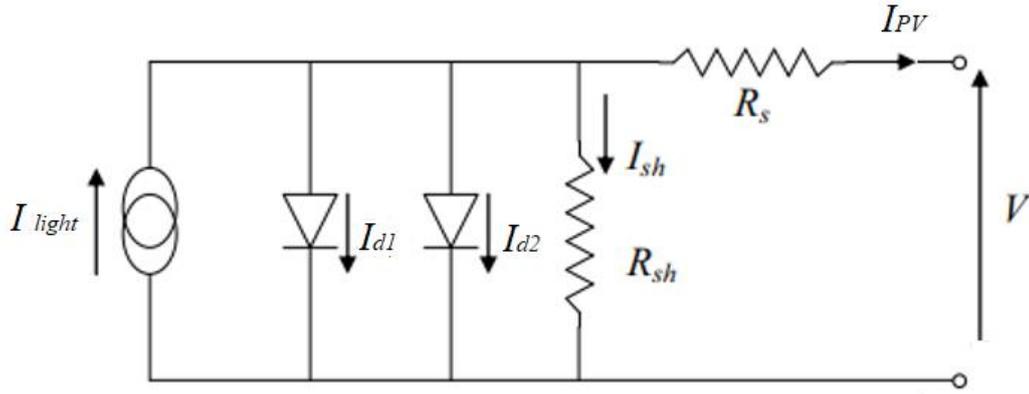


Figure 1.12 : Schéma électrique équivalent d'un modèle à deux diodes.

D'après la loi des nœuds, nous obtenons le courant de sortie de la cellule suivant :

$$I_{PV} = I_{light} - I_{D1} - I_{D2} - I_{sh} \quad (1.10)$$

$$I_{D1} = I_{01} \left[\exp\left(\frac{q(V - I_{PV}R_S)}{A_1 K_B T}\right) - 1 \right] \quad (1.11)$$

$$I_{D2} = I_{02} \left[\exp\left(\frac{q(V - I_{PV}R_S)}{A_2 K_B T}\right) - 1 \right] \quad (1.12)$$

I_{01} et I_{02} : courants de saturation de diode D1 et la diode D2, respectivement.

A_1 et A_2 : facteurs d'idéalité de D1 et D2, respectivement.

L'équation générale de la caractéristique $I(V)$ de ce modèle est donnée par :

$$I_{PV} = I_{light} - I_{01} \left[\exp\left(\frac{q(V - I_{PV}R_S)}{A_1 K_B T}\right) - 1 \right] - I_{02} \left[\exp\left(\frac{q(V - I_{PV}R_S)}{A_2 K_B T}\right) - 1 \right] - \left(\frac{V + I_{PV}R_S}{R_{SH}}\right) \quad (1.13)$$

1.7. Caractéristique J-V d'une cellule solaire

La performance d'une cellule solaire peut être évaluée grâce à sa caractéristique courant-tension $J(V)$ sous illumination représentée sur la figure 1.13. A partir de cette caractéristique, il est possible d'obtenir les paramètres photovoltaïques : le rendement de conversion η , la tension en circuit ouvert V_{oc} , la densité de courant de court-circuit J_{sc} et le Facteur de Forme FF.

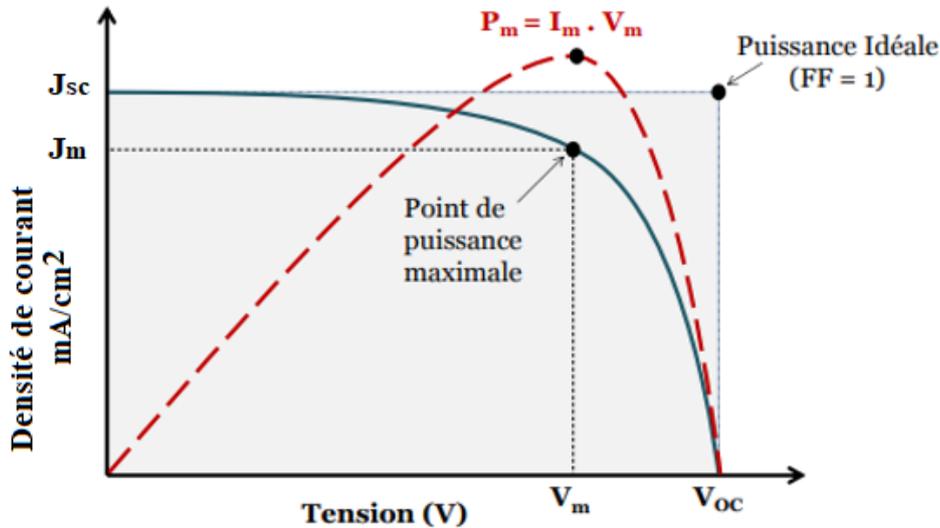


Figure 1.13 : Caractéristique courant-tension $J(V)$ et courbe de puissance d'une cellule photovoltaïque [7]

1.7.1. La densité du courant de court-circuit J_{sc}

La densité de courant de court-circuit correspond à la valeur maximum de la densité de courant débitée par la cellule. Dans ce cas, les deux électrodes qui contactent la zone P et la zone N sont en court-circuit et les porteurs minoritaires vont être drainés par le champ interne. C'est ce courant de porteurs minoritaires qui constitue le courant de court-circuit. Il est limité par des aspects optiques (absorption limitée du flux lumineux, réflectivité du substrat, absorption dans les couches d'encapsulation du module) et par la longueur effective de diffusion des porteurs minoritaires. Il dépend également de l'irradiance du rayonnement incident.

1.7.2. La tension en circuit ouvert V_{oc}

C'est la tension qui permet de réduire suffisamment la barrière de potentiel au niveau de la jonction PN pour obtenir un courant global nul. En effet, les porteurs photogénérés par le rayonnement et séparés par le champ interne vont s'accumuler de part et d'autre de la jonction (électrons coté N, trous coté P), induisant une auto-polarisation de la jonction dans le sens passant. Cette auto-polarisation génère un courant de diode dans le sens direct égal et opposé

au courant des porteurs photogénérés. La V_{OC} est liée au rapport entre J_{SC} et J_0 par l'équation (1.14), et donc aux recombinaisons des porteurs de charge dans le volume et en surface.

$$V_{CO} = \frac{AK_B T}{q} \ln \left(1 + \frac{J_{light}}{J_0} \right) \approx \frac{AK_B T}{q} \ln \left(\frac{J_{SC}}{J_0} \right) \quad (1.14)$$

1.7.3. Le Facteur de Forme FF

La courbe $J(V)$, représentée sur la figure 1.13, exprime la différence entre la puissance réelle débitée par la cellule et sa puissance idéale égale au produit $J_{SC} \times V_{OC}$. Le FF est limité par des résistances parasites et son expression est donnée par l'équation (1.15).

$$FF = \frac{V_{max} J_{max}}{V_{OC} J_{SC}} \quad (1.15)$$

1.7.4. Rendement de conversion η

Le rendement de conversion est le paramètre référence pour évaluer la qualité d'une cellule solaire. Il est défini comme le rapport entre la puissance maximale fournie par la cellule et la puissance incidente P_{in} par unité de surface. Il s'exprime selon l'équation (1.16) en fonction des paramètres extraits de la courbe $J(V)$ sous éclaircissement. La puissance incidente est prise égale à 1000 W/m^2 dans les conditions de tests standard STC.

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{V_{OC} * J_{SC} * FF}{P_{in}} \quad (1.16)$$

1.7.5 Efficacité Quantique

Les paramètres précédents caractérisent les performances globales de la cellule. Pour tenir compte de la répartition en longueur d'onde du rayonnement incident, on introduit la notion d'efficacité quantique.

L'efficacité quantique externe (EQE) est définie par le rapport du nombre d'électrons collectés aux contacts et du nombre de photons incidents.

$$EQE = \frac{I(\lambda)}{\Phi_p(\lambda).q} \quad (1.17)$$

$I(\lambda)$: le photo-courant.

$\Phi_p(\lambda)$: le flux de photons incidents.

q : la charge élémentaire.

L'efficacité quantique interne (EQI) prend en compte les pertes optiques (réflectivité R). Elle est donnée par le rapport du nombre d'électrons collectés aux contacts et du nombre de photons absorbés.

$$EQI = \frac{EQE}{1-R} \quad (1.18)$$

L'efficacité quantique permet de savoir dans quelle gamme de longueurs d'onde la cellule solaire fonctionne le mieux.

Expérimentalement, pour calculer le rendement quantique d'une cellule, on mesure la réponse spectrale de la cellule. La réponse spectrale SR est le rapport entre le courant photogénéré par la cellule et la puissance incidente pour chaque longueur d'onde :

$$SR = \frac{I(\lambda)}{P_{incidente}(\lambda)} \quad (1.19)$$

Le rendement quantique externe et la réponse spectrale sont liés par la relation :

$$SR = \frac{q\lambda}{hC} EQE \quad (1.20)$$

1.8. Les différents types de pertes dans une cellule solaire

En pratique, la conversion photovoltaïque n'est pas totale. Différentes pertes viennent influencer le rendement de la cellule qui est limité par ces pertes. Le rendement ne peut dépasser le maximum théorique de 31%, d'après la limite théorique de Shockley-Queisser [8]. De nouveaux concepts, dits de 3^{ème} génération permettraient d'améliorer ce rendement à 44% en exploitant les photons de haute et basse énergie [9]. Ces pertes peuvent être classées en deux catégories : pertes optiques et pertes électriques.

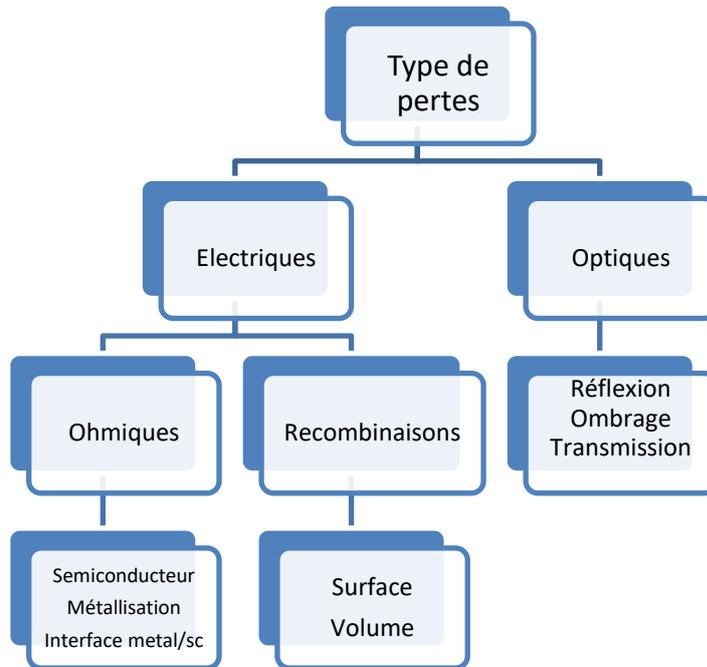


Figure 1.14 : Différents types de pertes dans les cellules solaires.

1.8.1. Les pertes optiques

Comme illustré sur la zone A de la figure 1.15, les photons dont l'énergie est inférieure à l'énergie de la bande interdite ne peuvent pas être absorbés. Ils ne contribuent pas à la création de paires électron-trou. Ceci entraîne une perte d'environ 27% sur le rendement.

Les photons dont l'énergie est supérieure à celle de la bande interdite (Zone B de la figure 1.15) perdent l'énergie en excès par thermalisation, qui ne participent donc à la création de paires électron-trou. Cette perte représente environ 28% de pertes

La face avant de la cellule solaire est recouverte par une grille en métal, qui empêche les photons de pénétrer dans le matériau. Les dimensions des métallisations sont alors un compromis entre les pertes optiques dues à la couverture partielle de l'émetteur et les pertes résistives liées à la géométrie de la métallisation.

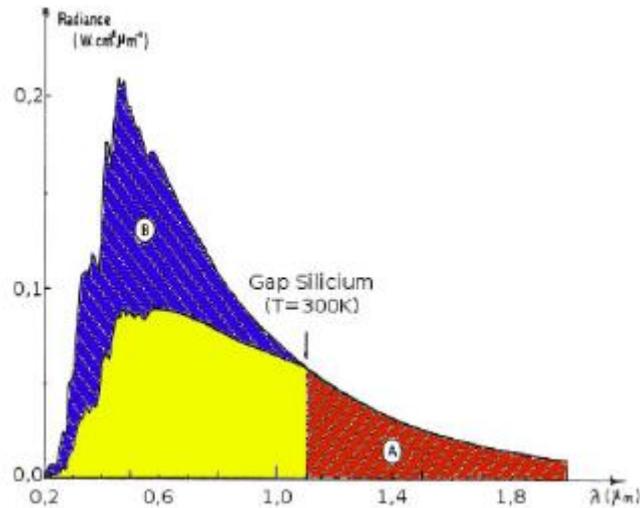


Figure 1.15 : Pertes optiques dans une cellule solaire à base de silicium [10].

1.8.2 Les pertes électriques

Pertes résistives : elles sont dues à la résistance série qui minimise le courant débité dans le circuit et aux résistances parallèles, telles que les courants de fuites sur les bords de la cellule photovoltaïque ou lorsque le métal de la face avant court-circuite l'émetteur,

Facteur de tension : la tension de circuit ouvert ne peut pas dépasser la tension du gap, il ne correspond qu'à une fraction de cette tension notamment à cause des recombinaisons Auger, qui la limitent [11],

Facteur de forme : Le caractère exponentiel de l'expression du courant rend impossible l'obtention d'une courbe $I(V)$ rectangulaire (100%). Le FF peut atteindre 89% [11],

Pertes par recombinaison : les porteurs de charge créés doivent diffuser jusqu'aux contacts pour participer à la conduction. Cependant, s'ils se recombinent avant d'atteindre les contacts, ils ne participeront plus à la génération du courant. Différents mécanismes existent entraînant la recombinaison de la paire électron-trou, en volume ou en surface [12].

1.8.3 Les différents types de recombinaisons

1.8.3.1 Recombinaisons radiatives :

a) La recombinaison bande à bande :

Se produit entre un électron de la bande de conduction et un trou de la bande de valence. Elle s'accompagne de l'émission d'un photon d'énergie proche de celle du gap du matériau

b) La recombinaison à travers les niveaux des impuretés :

On distingue trois cas, premier cas, le retour de l'électron excité de niveau des donneurs vers la bande de valence. Deuxième cas, le retour de l'électron excité de la bande de conduction vers le niveau des accepteurs. Troisième cas le retour de l'électron excité de niveau des donneurs vers le niveau des accepteurs.

c) Les recombinaisons dues aux isoélectriques (excitons) :

Les excitons représentent des atomes avec la même valence que les atomes auxquels elles se substituent dans le matériau. Ils n'ajoutent aucune charge supplémentaire dans le matériau hôte.

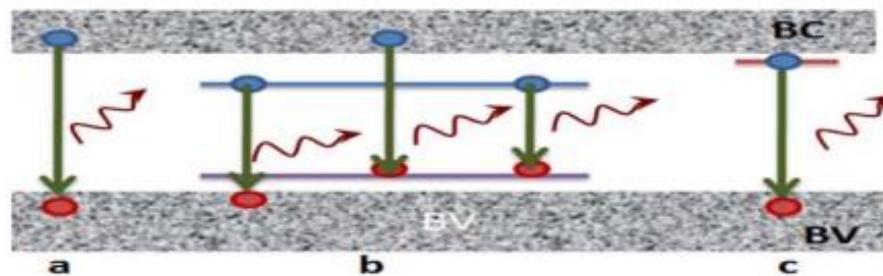


Figure 1.16 : Mécanismes de recombinaisons radiatives : a) Bande à bande, b) A travers des niveaux d'impuretés, c) Dues aux excitons [13].

1.8.3.2. Recombinaisons non radiatives :

a) La recombinaison de type Auger :

Elle se fait par transition directe bande à bande ou par l'intermédiaire d'un centre recombinant. L'énergie résiduelle est cédée à une troisième particule (électron ou trou) qui est

excitée à un état d'énergie supérieur (figure 1.17-a) puis transférée de façon non radiative au réseau.

b) La recombinaison de type Shockley-Read -Hall (SRH) :

C'est le mécanisme dominant dans la plupart des semi-conducteurs, cette recombinaison se fait en deux étapes, par l'intermédiaire d'un centre recombinant qui est un défaut ou une impureté qui introduit un niveau profond E_p dans la bande interdite (figure 1.17-b) [7].

Les quatre étapes possibles dans ce processus sont :

1. La capture d'un électron par un niveau piège (passage de l'électron de E_c vers E_p).
2. L'émission d'un électron à partir d'un niveau piège (passage de l'électron de E_p vers E_c).
3. L'émission d'un trou à partir d'un niveau piège (passage de l'électron de E_v vers E_p).
4. La capture d'un trou par un niveau piège (passage de l'électron de E_p vers E_v).

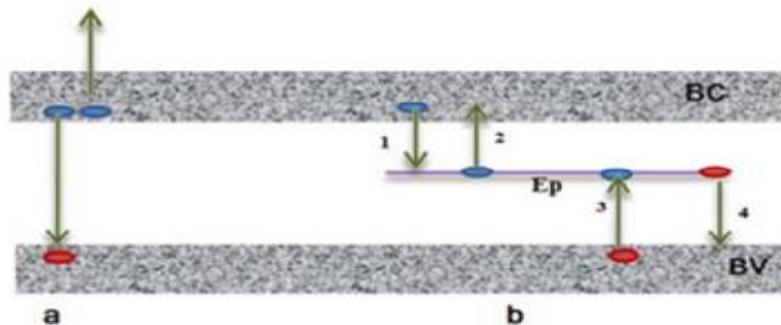


Figure 1.17 : Mécanismes de recombinaisons non radiatives : a) de type Auger, b) de type Shockley-Read -Hall (SRH) [13].

1.9. Influence des différents paramètres sur une cellule photovoltaïque

Les paramètres d'une cellule photovoltaïque sont directement liés à la caractéristique courant-tension qui varie selon les conditions climatiques et dépend principalement de l'atmosphère et des lieux des installations.

1.9.1. Influence de l'éclairement

L'éclairement est variable tout au long de la journée et ne peut pas être contrôlé. La meilleure solution est de choisir un endroit bien ensoleillé pour exposer les modules PV. La figure 1.18 montre des courbes $I(V)$ et $P(V)$ pour différents niveaux de rayonnements. On note une légère diminution de la tension du circuit ouvert suite à la diminution du flux lumineux, cependant le courant est très affecté par la fluctuation de l'éclairement.

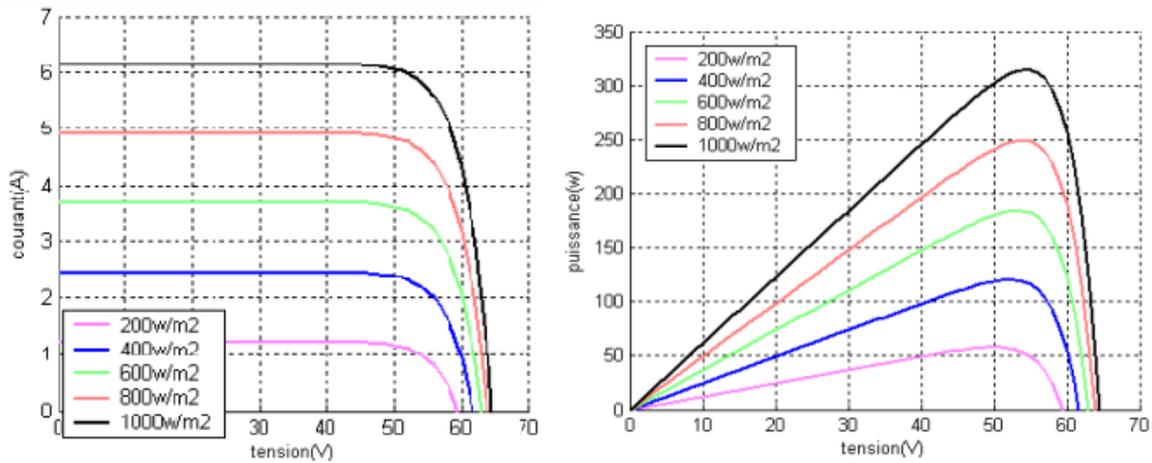


Figure 1.18 : Influence de l'éclairement sur les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ [14].

1.9.2. Influence de la température

La température est un paramètre très important dans le comportement des cellules PV.

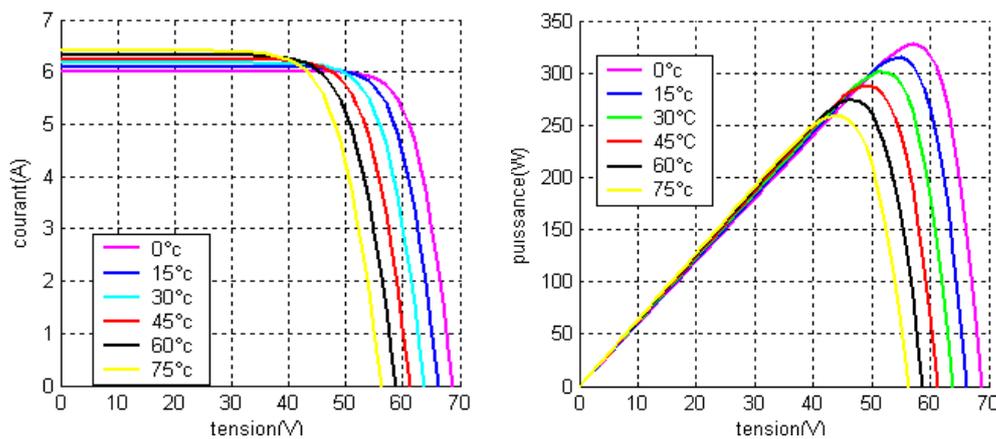


Figure 1.19 : Influence de la température sur les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ [14].

D'après la 1.19, nous pouvons constater que le courant augmente très faiblement avec la température, cependant la tension de circuit ouvert diminue, ce qui entraîne une diminution de la puissance maximale et par conséquent du rendement de la cellule.

1.10. Les filières photovoltaïques

Il existe plusieurs technologies et matériaux pour le développement et la fabrication de cellules solaires, avec des rendements en laboratoire variant de 13 % pour les cellules organiques à 47 % pour les cellules solaires à multi-jonctions sous concentrateur.

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

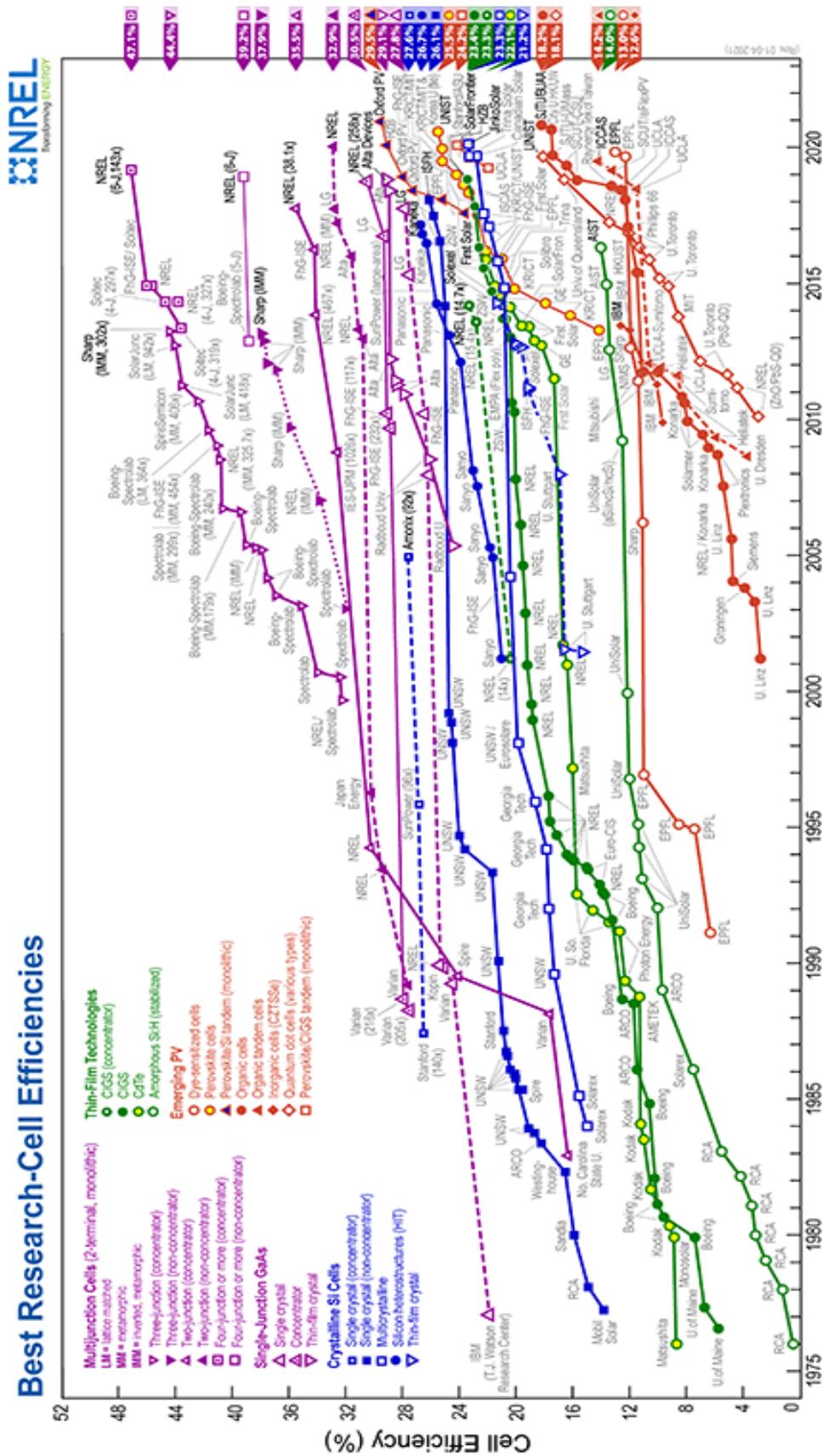


Figure 1.20 : Évolution des records de rendements de chaque filière de cellules photovoltaïques [15].

1.10.1. Les filières à base de silicium :

Le silicium est actuellement, et de loin, le matériau le plus utilisé pour la fabrication des cellules solaires. Près de 93% de la production mondiale des panneaux solaires est à base de silicium.

Le silicium présente principalement deux avantages :

- Abondance : il est le deuxième élément le plus abondant sur notre planète après l'oxygène, autant dire qu'il est quasiment inépuisable.
- Technologie mature : les technologies mises en œuvre sont, depuis plusieurs dizaines d'années, bien maîtrisées grâce à la technologie électronique.

La répartition des différentes technologies de cellules solaires photovoltaïques à base de silicium est représentée sur la figure 1.21. On distingue trois familles dans la filière silicium : les cellules monocristallines les cellules multicristallines, et les cellules amorphes.

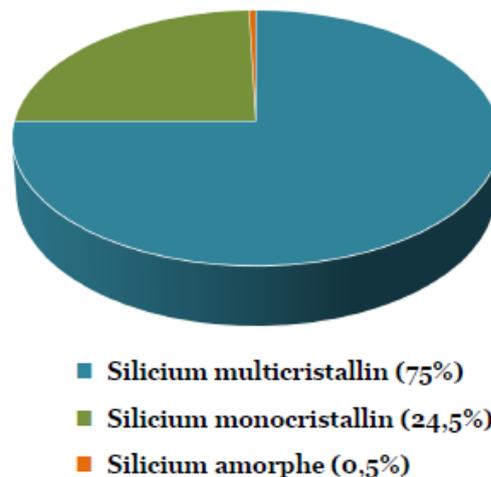


Figure 1.21 : Production photovoltaïque mondiale, pour la technologie silicium [16].

• Les cellules au silicium monocristallin :

Le silicium monocristallin (mono-Si), est un matériau composé d'un seul cristal parfaitement homogène, les cellules solaires issues de ce silicium ont une couleur caractéristique qui est généralement gris-noir métallique.

Les avantages de cette technologie sont une production de cellules solaires presque optimale. Les cellules monocristallines offrent les meilleurs rendements (~26 %) [15]. Les panneaux solaires à base de silicium monocristallin présentent une bonne durée de vie (d'environ 30 ans) [17]

Les inconvénients sont : un coût de production élevé, un rendement plus faible sous un faible éclairage et une baisse du rendement avec l'augmentation de la température.

- **Les cellules au silicium multicristallin :**

Contrairement au silicium monocristallin, le silicium multicristallin (mc-Si) est composé de plusieurs domaines cristallins de tailles variées et orientés de manière aléatoire dans le matériau. Les cellules solaires multicristallines ont donc un aspect non uniforme et sont de couleur bleue. Cette technologie a comme avantage : un coût de production moins élevé que pour les cellules monocristallines. Les panneaux ont également une bonne durée de vie. Son principal inconvénient est son rendement de conversion qui est légèrement inférieur à celui des cellules au mono-Si. Il est aux alentours de 23.3 % [15].

- **Les cellules au silicium amorphe hydrogéné :**

Les cellules solaires au silicium amorphe (a-Si :H) sont obtenues à partir d'un dépôt de silicium sur différents substrats comme du plastique, du verre ou encore du métal. Ces cellules solaires ont une couleur grise. Elles ont comme avantage un procédé de fabrication moins coûteux car il est réalisé à basse température et utilise moins de matériau que le silicium cristallin. En effet le a-Si :H possède un coefficient d'absorption beaucoup plus élevé que le silicium cristallin. C'est ce qui permet d'avoir des cellules avec des couches de l'ordre du micron d'épaisseur et qui permet de réduire significativement les coûts de production [18]. C'est une technologie très utilisée pour alimenter des petits objets du quotidien comme les calculatrices ou les montres solaires. Ces cellules ont également l'avantage de fonctionner sous faible luminosité et peuvent donc produire du courant même à l'intérieur d'une habitation.

Elles présentent comme inconvénient un rendement de conversion faible, d'environ 14% [15], par rapport aux autres technologies et une faible durée de vie des panneaux solaires.

1.10.2. Les filières à base de couches minces

Comme son nom l'indique, cette filière se base sur l'utilisation de couches minces dont les épaisseurs sont de l'ordre de quelques centaines de nanomètres à quelques micromètres. Cela est possible grâce à l'absorption bien plus importante dans ces matériaux en comparaison avec le silicium. Cette diminution des épaisseurs présente plusieurs avantages. Elle permet, tout d'abord, de réduire considérablement la quantité de matières premières utilisées, et aussi d'ouvrir de nouvelles applications, notamment dans le domaine de l'habitat, comme par exemple le placement de cellules photovoltaïques sur de grandes toiles à coller sur les murs ou toitures, pour générer de l'électricité.

Nous pouvons classer cette filière en trois catégories : les couches minces inorganiques, les couches minces organiques et les couches minces à base de matériaux III-V.

- **Les couches minces inorganiques :**

Les principaux matériaux utilisés pour cette catégorie de couches minces sont : le tellure de cadmium (CdTe), le CIGS (Cuivre Indium Gallium Sélénium) et le silicium amorphe hydrogéné (a-Si :H). Ces cellules en couches minces représentaient, en 2016, environ 5% de la production photovoltaïque [16].

Les cellules à base de CdTe sont en plein développement et elles occupent, depuis 2009, une part importante du marché des cellules en couches minces avec des rendements qui atteignent les 22 % pour une cellule et 19 % pour un module photovoltaïque [15]. Les inconvénients majeurs de cette technologie sont la toxicité cadmium et la rareté du tellure.

Les cellules à base de CIGS sont généralement sous forme d'une hétérojonction de type CIGS(p)/CdS(n)/ZnO(n) [19] dans les dispositifs à plus haut rendement. Les rendements record obtenus avec cette technologie sont de l'ordre de 23.4 % pour une cellule [15], 20 % pour un module. Les avantages de ces cellules en couches minces est l'utilisation de substrats légers et flexibles.

- **Les couches minces organiques :**

Les cellules photovoltaïques organiques sont constituées d'une ou de plusieurs couches minces de semi-conducteurs organiques. Ces cellules sont encore au stade du laboratoire et présentent déjà de nombreux avantages : une réduction des coûts de fabrication, un faible impact environnemental et une grande flexibilité d'utilisation. Leur développement à grande échelle est aujourd'hui freiné par la faible durée de vie des cellules et les faibles rendements qui les rendent difficilement compétitives avec les autres technologies. Les rendements maximaux actuels sont de l'ordre de 18% pour une cellule [15].

Un autre domaine de recherche sur le solaire, plus récent, concerne les cellules photovoltaïques à base de pérovskites [20][21]. Il s'agit d'un type de cellule photovoltaïque qui comprend un élément chimique ayant une structure de pérovskite, le plus souvent un hybride organique-inorganique de plomb ou un halogénure d'étain, dans sa couche active. C'est une nouvelle technologie pleine de promesses, mais elle se heurte également à des verrous très importants, comme leur mauvaise résistance à l'eau, et l'instabilité dans le temps. Actuellement le rendement record obtenu en laboratoire est de 25.5% [15].

- **Les couches minces à base de matériaux III-V :**

À côté de toutes ces filières, on trouve aussi celle des matériaux III-V, tels que l'arséniure de gallium, arséniure d'indium, nitrure de gallium, antimoniure de gallium, des alliages ternaires tels que $\text{In}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{As}$. Ils présentent généralement une haute mobilité électronique et une bande interdite directe. Après le Silicium, ce sont les deuxièmes matériaux semi-conducteurs les plus utilisés dans l'industrie des semi-conducteurs.

Les cellules solaires III-V sont essentiellement utilisées pour les systèmes multi-jonctions dans le but d'augmenter le rendement de la cellule solaire, en superposition de multiples cellules ayant des bandes d'énergie interdites différentes permettant ainsi une absorption plus large du spectre solaire. En effet, comme la composition de l'alliage III-V détermine son énergie de bande interdite, on peut donc plus facilement concevoir une cellule multi-jonctions avec différentes bandes interdites. La première jonction doit avoir une largeur de bande interdite pour absorber les photons les plus énergiques (UV) et reste transparente aux autres. La seconde jonction est adaptée pour les photons moins énergiques et ainsi de suite. C'est une technologie, à l'origine, utilisée pour des applications spatiales.

Ces cellules multi-jonctions donnent d'excellents rendements mais ils ont aussi des coûts de fabrication élevés. On utilise pour cette technologie, des cellules solaires sous forte concentration lumineuse. Cela consiste à capter le rayonnement solaire grâce à une série de dispositifs optiques (lentilles ou miroirs) pour le concentrer sur une cellule solaire de faible surface. La concentration varie de 2 à plus de 1000 fois la puissance lumineuse émise par le soleil. Elle s'exprime en unité dite "Soleil" ("Sun") qui indique par combien la densité de puissance incidente du soleil est multipliée. Comme le montre la figure 1.20, le rendement maximal des cellules multi-jonctions à base de III-V est de 47.1 % sous concentration.

La figure 1.22 représente quelques exemples d'applications de cellules solaires photovoltaïques.



Figure 1.22 : Exemples d'applications de cellules photovoltaïques : (a) Avion 100% solaire du projet Solar Impulse, qui a fait un tour du monde en 2016 [20]. (b) Panneaux solaires flottants au Japon [21]. (c) Tronçon routier de 1 km recouvert de panneaux photovoltaïques en Normandie (France) [22]. (d) Batterie solaire pour smartphone, utilisant des cellules solaires organiques imprimées [23].

1.11. Les logiciels de simulation

La simulation est devenue un outil essentiel pour le développement des recherches, notamment en photovoltaïque en raison du coût élevé et le temps important pour la réalisation des expériences. Plusieurs laboratoires ont développé leur propre logiciel de simulation. Les plus connus sont AMPS-1D développé par l'Université de Pennsylvanie par l'équipe du Professeur Fonash. D-AMPS est une version plus détaillée que AMPS-1D car elle prend en compte la réflectivité et texturation de surface des faces avant et arrière et simule la densité de défauts du silicium amorphe en implantant le « defect pool model » contrairement aux autres logiciels qui représentent la distribution de défauts liés aux liaisons pendantes par deux gaussiennes. Le logiciel AFORS-HET conçu spécialement pour simuler les hétérojonctions silicium amorphe/cristallin permet la simulation 1D d'un dispositif reposant sur les mécanismes de recombinaisons de type SRH et Auger à l'équilibre thermodynamique et sous éclairage. Nous pouvons également citer les logiciels Sentaurus, COMSOL, ATLAS Silvaco, PCID, PC2D, ASDMP et SCAPS-1D.

1.11.1 Présentation du logiciel ASDMP

Une partie de nos simulations a été réalisée par le logiciel ASDMP (Amorphous Semiconductor Device Modelling Program). Ce programme a été développé par Parsathy Chatterjee [26,27] et validé expérimentalement par l'équipe de recherche de laboratoire LPICM (Laboratoire de Physique des Interface et des Couches Minces) de l'école Polytechnique de Paris. Il se compose de deux parties : une partie électrique basée sur la résolution de l'équation de Poisson et des équations de continuité des électrons et des trous, et une partie optique qui tient compte des réflexions multiples, du piégeage optique et de la diffusion de la lumière par les rugosités, permettant ainsi la simulation des cellules solaires avec des interfaces texturées.

Ce logiciel a été conçu à la base pour modéliser des dispositifs à base de silicium amorphe. Il a été ensuite généralisé au silicium cristallin et aux cellules HIT.

Ce logiciel simule les caractéristiques $J(V)$ à l'obscurité et sous éclaircissement. Il détermine le champ électrique dans tout le dispositif, le taux de recombinaison, la densité des porteurs libres et piégés par les états du gap et la densité des électrons et des trous en fonction de la position.

```

TYPE OF DEVICE          0      ONLY ABS. REQD.          0
PROG. TYPE=1 MEANS AMORPHOUS SCHOTTKY BARRIER OR A 2-LAYER STRUCTURE.
PROG. TYPE=2 MEANS AMORPHOUS P-I-N OR ANY 3-LAYER STRUCTURE.
PROG. TYPE=3 MEANS AN N-LAYER STRUCTURE.
ONLY THDYN. EQUIL. VALUES REQD. IF YES=1, IF NO=0.
NTHSEM=NO. OF THICK SEMI LAYERS, NTHPT(IT), NTHPOS(IT) = NO. OF
INTERVALS, POSITION OF ITth SEMICONDUCTOR LAYER.
NTHSEM                   3
NTHPT, NTHPOS           300800 50 5 6 7
PROGRAM TYPE             3      TOTAL NO. OF X-PTS       1164
NLAYER                   7
NP_F                     0
IWHICH (0 OR 1)         0      ONLY THDYN. EQUIL.        0
NO. OF P-LAYERS          1      NO. OF N-LAYERS          5
NO. OF I-LAYERS          1
P-LAYER POSITIONS        1
N-LAYER POSITIONS        3 4 5 6 7
    
```

Figure 1.23 : Interface principale du logiciel ASDMP

Le logiciel ASDMP est conçu sous Fortran et fonctionne sous Linux. Afin de travailler sous environnement Windows, nous avons utilisé l'interface Cygwin pour pouvoir exécuter ASDMP. Ces différentes commandes sont sous Unix. Les différents fichiers de sortie sont obtenus après une exécution de courte durée.

1.11.2. Présentation du logiciel de simulation SCAPS-1D

Le simulateur SCAPS-1D « Solar Cell Capacitance Simulator in one Dimension » développé par Marc Burgelman, est un programme conçu pour fonctionner sous le système d'exploitation Windows. Il permet de simuler les caractéristiques J-V sous obscurité et sous éclairage des cellules solaires en films minces. Il possède une base de données contenant plusieurs types de cellules solaires d'extension « def ».

Il a été développé par la compagnie « LabWindows / CVI » software afin de simuler spécialement les cellules solaires à base de CdTe et Cu (In, Ga) Se₂. La dernière version a été développée par l'université de GENT de Belgique département d'électronique et système d'information (ELIS) [28].

Afin de simuler tous les paramètres d'une cellule photovoltaïque au moyen du logiciel SCAPS-1D, nous devons passer par la fenêtre principale suivante :

- **Fenêtre d'exécution (action panel) :**

C'est la fenêtre qui apparaît au moment de démarrer le logiciel, et qui contient 5 blocs notés de 1 à 5, comme indiqué sur la figure 1.24.

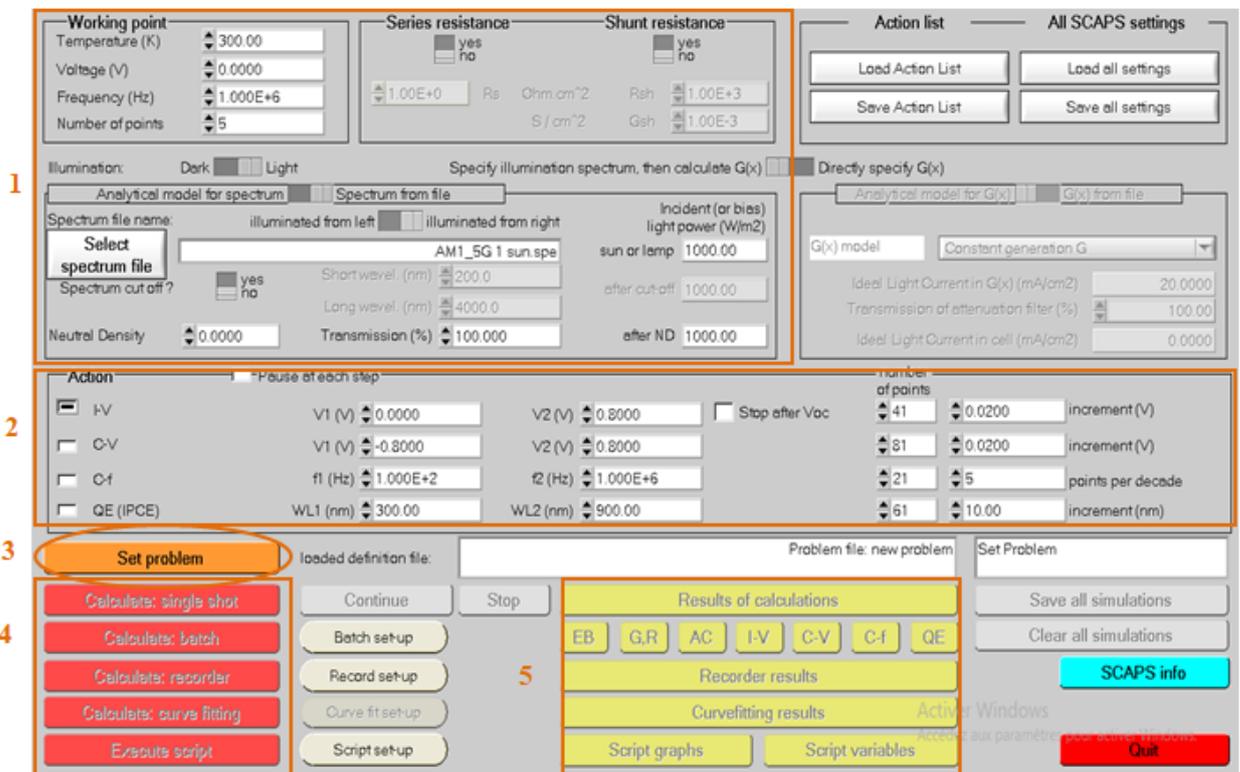


Figure 1.24: Panneau principal de démarrage de SCAPS-1D.

(1) Bloc des conditions de simulation :

Ce bloc permet de fixer les conditions de simulation, comme par exemple le type de rayonnement solaire appliqué, la température de fonctionnement de la cellule, les résistances série et parallèle...etc. Lorsque nous déplaçons le bouton de «Dark » à «Light », nous avons ainsi fourni la condition la plus importante pour que la cellule photovoltaïque commence à fonctionner.

(2) Bloc de sélection des caractéristiques à simuler :

On peut choisir une ou plusieurs mesures à simuler : J-V, C-V, C-f et QE (λ). On peut ajuster également, les valeurs initiales et finales de l'intervalle, ainsi que le nombre d'itérations à effectuer.

(3) Bloc de définition de la structure de la cellule :

Le bouton « **Set problem** » sur le panneau d'action, permet de créer ou de modifier les structures des cellules solaires et de les enregistrer, ou bien de les charger à partir des fichiers standards ASCII (American Standard Code for Information Interchange) fournis par le logiciel.

Ce bouton permet d'accéder à une autre fenêtre importante, représentée dans la figure 1.25, qui nous permet de configurer la structure de cellule qui sera étudiée.

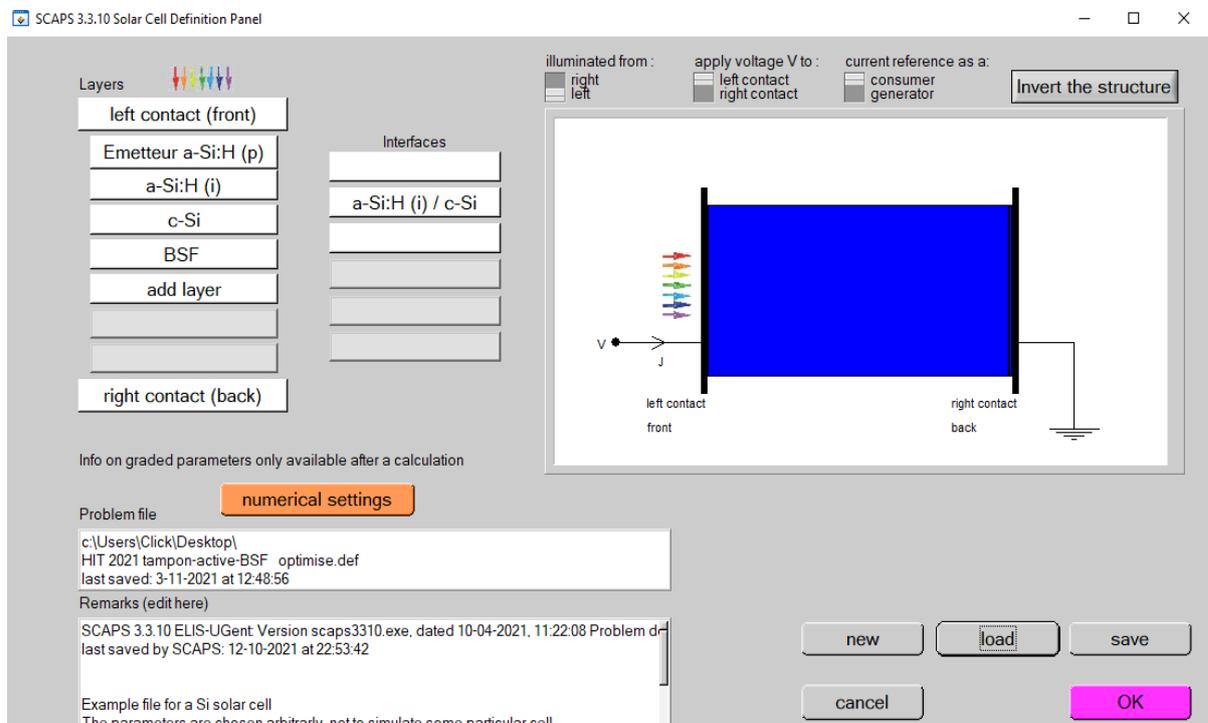


Figure 1.25: Fenêtre principale pour définir le dispositif.

Depuis cette fenêtre, nous pouvons ouvrir le fichier « def » avec le bouton « load » pour charger une structure d'une cellule lorsqu'elle est déjà enregistrée. Lorsque nous cliquons sur le bouton portant le nom d'une couche, la fenêtre présentée dans la figure 1.26 apparaît. Cette fenêtre permet de modifier les valeurs des paramètres et les défauts de la couche sélectionnée.

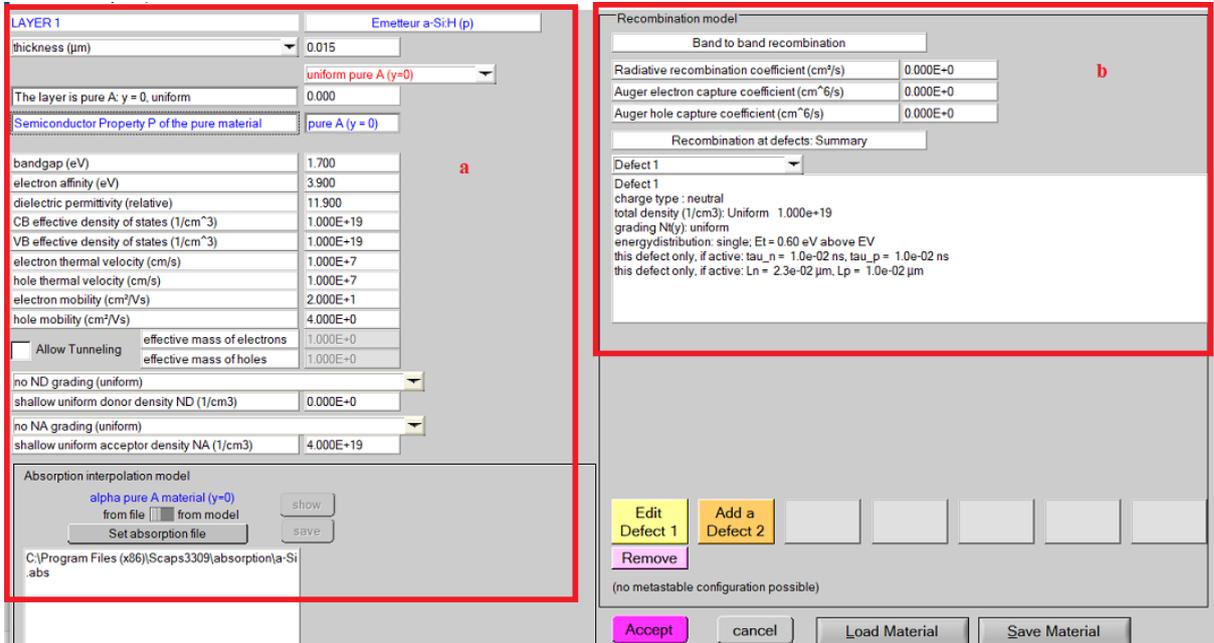


Figure 1.26 : La fenêtre de caractérisation des couches, a) Propriétés de la couche b) les défauts de la couche.

Pour plus de détails sur l'utilisation de ce logiciel, il est recommandé de se référer au manuel d'utilisation très complet mis à la disposition des utilisateurs sur le site internet suivant : <https://scaps.elis.ugent.be/SCAPS%20manual%20most%20recent.pdf>

1.12. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté tous les concepts nécessaires à la compréhension de l'énergie solaire photovoltaïque et particulièrement le fonctionnement et l'évaluation de la performance des cellules solaires.

Beaucoup d'innovations ont été nécessaires depuis la découverte de l'effet photovoltaïque pour obtenir les cellules que l'on trouve actuellement sur le marché. Diverses technologies subsistent, ayant chacune ses avantages et ses inconvénients. Les cellules basées sur un substrat de silicium sont les plus commercialisées et bien que cette filière ait atteint un déploiement industriel important, les recherches en laboratoire continuent et de nombreuses étapes d'optimisation sont achevées régulièrement afin d'augmenter les rendements de conversion et de diminuer le coût de fabrication des cellules de demain.

Références du chapitre 1

- [1] Agence Internationale de l'Energie, Renewable Energy Market Update Outlook for 2021 and 2022, mai 2021.
- [2] International Renewable Energy Agency (IRENA), « Renewable capacity statistics », 2020. https://www.irena.org/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Mar/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2020.pdf. Consulté le 10/09/2021
- [3] Ministère de l'Energie, « Énergies Nouvelles, Renouvelables et Maitrise de l'Energie », <https://www.energy.gov.dz/?rubrique=energies-nouvelles-renouvelables-et-maitrise-de-lrenergie>. Consulté le 18/09/2021.
- [4] PVEducation, «Standard Solar Spectra for space and terrestrial use» <https://www.pveducation.org/pvcdrom/appendices/standard-solar-spectra>. Consulté le 20/09/2021
- [5] A. Rogalski and M. Razeghi, « Semiconductor ultraviolet photodetectors", Optoelectronics Review, 79(10):7433, 1996.
- [6] H. Horsin Molinaro, B. Multon, « Energie électrique : génération photovoltaïque », Ressource pédagogique, Culture Sciences de l'Ingénieur, Ecole normale Paris -Saclay, 2020. <https://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr.sti/files/ressources/pedagogiques/11899/11899-energie-electrique-generation-photovoltaique-ensps.pdf>
- [7] A. Adaine, « Optimisation numérique de cellules solaires à très haut rendement à base d'InGaN », Thèse de Doctorat, Université de Lorraine (France), 2018.
- [8] W. Shockley, H.J. Queisser, « Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells». Journal of Applied Physics, 32(3), p.510, 1961.
- [9] M.A. Green, « Third generation photovoltaics: Solar cells for 2020 and beyond». Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures, 14(1–2), pp.65–70, 2002.
- [10] D. Réaux. « Cellules photovoltaïques à hétérojonctions de silicium (a-Si:H/c-Si) : modélisation des défauts et de la recombinaison à l'interface ». Thèse de doctorat, Science des matériaux, Université Paris-Saclay, 2017.
- [11] J. Szlufcik *et al.* « Low- cost industrial technologies of crystalline silicon solar cells», Proceedings of the IEEE, volume 85, pp. 711–730, 1997.
- [12] M.J. Kerr, « Surface, Emitter and Bulk Recombination in Silicon and Development of Silicon Nitride Passivated Solar Cells», Thèse de Doctorat, Australian National University, 2002.
- [13] S. Rebiai-Benahmed, « Composants optoélectroniques », support de cours, département d'électronique, université des frères Mentouri de constantine, 2011. <https://fac.umc.edu.dz/fstech/Electronique/2.pdf>
- [14] A. Zerdoudi, R. Chenin, « Etude de l'influence des différents paramètres sur un module photovoltaïque », Sciences & Technologie A-N°41, Juin 2015, 49-54.
- [15] National Center for Photovoltaics NREL. Best research cell efficiencies. 2020.

<https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html> Consulté le 01/07/2021

[16] I. S. E. Fraunhofer. « Photovoltaics report ». Fraunhofer ISE, Freiburg, 2021. <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>

[17] International Finance Corporation IFC, « Les centrales solaires photovoltaïques commerciales », Guide à l'intention des promoteurs de projets, 2015. https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/8eb4f142-da75-4756-b668-c27a37d88c28/Solar+Report+French_WEB.pdf?MOD=AJPERES&CVID=IKRWzqa

[18] L. Fang-I, Y. Jui-Fu, H. Yu-Chao and K. Shou-Yi, « Improvement of Amorphous Silicon Thin-Film Photovoltaic Cells with Zinc Oxide Nanorods », Crystals, 10, 1124, 2020.

[19] M.A. Green et al., « Solar cell efficiency tables (version 57) ». Progress in Photovoltaics : Research and Applications, 29 (1) pp 3-15, 2021.

[20] M. R. Jani *et al.*, « Exploring solar cell performance of inorganic Cs₂TiBr₆ halide double perovskite: A numerical study», Superlattices Microstruct., vol. 146, 106652, 2020.

[21] M. T. Islam *et al.*, « Numerical simulation studies of a fully inorganic Cs₂AgBiBr₆ perovskite solar device», Opt. Mater., vol. 105, 109957, 2020.

[22] Le Figaro, « Le tour du monde en avion solaire », 2016. <https://www.futura-sciences.com/sciences/actualites/avion-cinq-ans-apres-tour-monde-solar-impulse-progres-continue-92609/> consulté le 20/03/2020.

[23] Y. Rousseau, « Au Japon, le succès d'une PME lilloise dans le solaire flottant », Les echos, 2014. <https://www.lesechos.fr/2014/11/au-japon-le-succes-dune-pme-lilloise-dans-le-solaire-flottant-313001> consulté le 20/03/2020.

[24] G. Marcheteau, « Normandie. La première route solaire de France voit le jour », L'énergie, tout compris, 2017. <https://www.lenergioutcompris.fr/actualites-conseils/la-premiere-route-solaire-inauguree-en-normandie-48082>. Consulté le 20/03/2020.

[25] Neozone, « Le Heli-on de la société infinityPV est le chargeur solaire le plus compacte au monde », 2017. <https://www.neozone.org/mobiles/heli-on-le-chargeur-solaire-le-plus-compact-du-monde/> consulté le 20/03/2020.

[26] P. Chatterjee, « Photovoltaic performance of a-Si:H homojunction p-i-n solar cells: A computer simulation study » J. Appl. Phys. 76, 1301, 2004.

[27] P. Chatterjee, F. Leblanc, M. Favre, and J. Perrin. « The open circuit voltage in amorphous silicon p-i-n solar cells and its relationship to material, device and dark diode parameters » Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 426, 593, 1996.

[28] <http://scaps.elis.ugent.be/> consulté le 21/04/2020.

CHAPITRE 2

LES CELLULES SOLAIRES A BASE D'HETEROJONCTION SILICIUM AMORPHE/SILICIUM CRISTALLIN

CHAPITRE 2

LES CELLULES SOLAIRES A BASE D'HETEROJONCTION SILICIUM AMORPHE/SILICIUM CRISTALLIN

2.1. Introduction

L'élément le plus utilisé pour la fabrication des cellules solaires est le silicium car il présente de bonnes performances. La technologie qui se base sur ce matériau permet de fabriquer des cellules avec de hauts rendements (~26%) [1], mais avec un coût de production élevé. La qualité du matériau nécessaire pour réaliser des cellules solaires doit être d'une grande pureté, et représente une grande partie du prix de revient total.

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

En octobre 1997, l'entreprise japonaise Sanyo a commencé une production de masse de modules photovoltaïques à base de cellules HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin layer). Ces cellules sont à base d'hétérojonction de silicium. Une hétérojonction est obtenue lorsque deux matériaux semi-conducteurs différents sont associés. Sa réalisation s'effectue par croissance cristalline d'un matériau sur l'autre et nécessite l'utilisation de semi-conducteurs ayant des propriétés cristallines voisines. Dans le cas des cellules HIT l'hétérojonction est réalisé à partir du silicium amorphe et du silicium cristallin.

En combinant la bonne performance du silicium cristallin et le bas coût de production du silicium amorphe, cette technologie a permis d'atteindre de hauts rendements tout en diminuant le prix de revient (budget thermique plus bas, épaisseur des couches plus mince, ce qui conduit à un prix du matériau moins cher etc...).

Dans ce chapitre, nous commencerons par expliquer brièvement le principe de fonctionnement des cellules solaires à base d'hétérojonction, en rappelant d'abord quelques notions de base sur les semi-conducteurs et les jonctions P-N. Nous étudierons par la suite les

principales caractéristiques du silicium amorphe et du silicium cristallin, étant donné que ces deux matériaux rentrent dans l'élaboration des cellules solaires HIT. Nous présenterons enfin les principales avancées établies dans le développement des cellules photovoltaïques à hétérojonction, et nous détaillerons le rôle des différentes couches constituant les cellules HIT standards.

2.2. Rappel sur les semi-conducteurs

Dans un atome isolé, les électrons prennent des niveaux d'énergie discrets. Lorsque, les atomes sont rassemblés pour former un solide, les niveaux de chaque atome se différencient pour former des bandes continues d'énergies. Cette structure électronique de bandes nous permet de classer les matériaux en trois grandes familles : les métaux, les isolants et les semi-conducteurs (Figure 2.1). Pour un métal, tous les niveaux supérieurs au niveau de Fermi étant autorisés et la quasi-totalité de ces niveaux étant inoccupés à température ambiante, toutes les longueurs d'ondes peuvent être alors absorbées, mais cette énergie absorbée est convertie en phonons. Dans un isolant, le rayonnement solaire ne peut être absorbé par ce dernier car son gap (8-10 eV) est plus grand que les énergies de ce spectre. Par contre, un semi-conducteur a un gap plus faible que celui d'un isolant (0.6-2eV). A titre d'exemple, le silicium cristallin (Si) a un gap de 1.12 eV, le germanium (Ge) de 0.7 eV, l'arsenic de gallium (GaAs) de 1.42 eV. Par conséquent, le spectre solaire absorbé par les semi-conducteurs fournit de l'énergie aux électrons et les libère dans le cristal pour participer à la conduction [2].

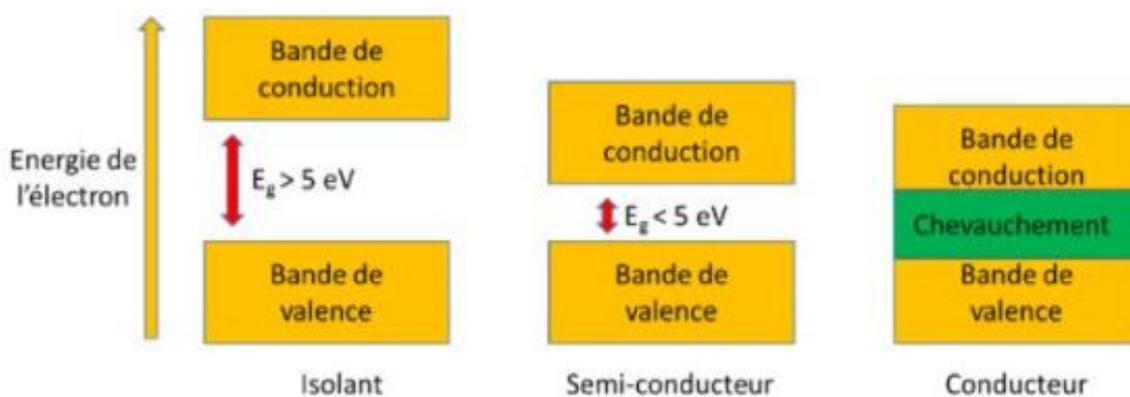


Figure 2.1 : Les trois grandes familles des matériaux.

2.2.1. Densité de porteurs à l'équilibre thermodynamique

Dans un semi-conducteur, l'énergie de l'agitation thermique permet le passage d'un électron de la bande de valence vers la bande de conduction laissant une lacune appelée « trou ». Le nombre d'électrons libres dans la bande de conduction est donné par le produit de la densité d'états $N_c(E)$ par la fonction de distribution de Fermi Dirac $f_n(E)$ intégré sur toute la bande de conduction :

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

Où

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

et

$$f_n(E) = \frac{1}{1 + \exp \frac{E - E_F}{k_B T}} \quad (2.3)$$

Cette intégrale donne :

$$n = N_c \exp \left(\frac{E_F - E_c}{k_B T} \right) \quad (2.4)$$

Où

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

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

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

Où

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

Le calcul donne alors :

$$p = N_v \exp\left(\frac{E_v - E_F}{k_B T}\right) \quad (2.8)$$

Où :

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

E_F est le niveau de Fermi, m_c^* et m_v^* sont respectivement les masses effectives de l'électron et du trou ; E_c est le niveau du bas de la bande de conduction ; E_v est le niveau de haut de la bande de valence ; T est la température absolue de matériau (en K) ; k_B est la constante de Boltzmann et \hbar la constante de Planck ($\hbar = h/2\pi$).

2.2.2. Semi-conducteur intrinsèque

Un semi-conducteur est dit intrinsèque s'il est à l'état pur dépourvu de toute impureté pouvant modifier les densités des porteurs. Dans ce cas-là, les densités d'électrons et de trous sont égales et on peut écrire :

$$n = p = n_i \quad (2.10)$$

Et donc :

$$n \cdot p = n_i^2 \quad (2.11)$$

En vertu des équations (2.4, 2.8, 2.11), on trouve le produit :

$$n \cdot p = N_c N_v \exp\left(-\frac{E_g}{k_B T}\right) \quad (2.12)$$

Par conséquent :

$$n_i = (N_c N_v)^{1/2} \exp\left(-\frac{E_g}{2k_B T}\right) \quad (2.13)$$

n_i est la densité intrinsèque des porteurs, c'est une caractéristique propre au semi-conducteur à une température donnée. La position du niveau de Fermi peut être repérée en écrivant : $n=p$, soit

$$N_c \exp\left(\frac{E_F - E_c}{k_B T}\right) = N_v \exp\left(\frac{E_v - E_F}{k_B T}\right) \quad (2.14)$$

$$E_{fi} = \frac{E_c + E_v}{2} + \frac{1}{2} k_B T \ln \frac{N_v}{N_c} \quad (2.15)$$

En remplaçant N_v et N_c par leurs expressions, on trouve :

$$E_{fi} = \frac{E_c + E_v}{2} + \frac{3}{4} k_B T \ln \frac{m_v^*}{m_c^*} \quad (2.16)$$

Puisque $m_v^* \simeq m_c^*$, on peut écrire :

$$E_{fi} \simeq \frac{E_c + E_v}{2} \quad (2.17)$$

Cette relation montre que le niveau de Fermi d'un semi-conducteur intrinsèque se trouve approximativement au milieu de la bande interdite (Figure 2.2).

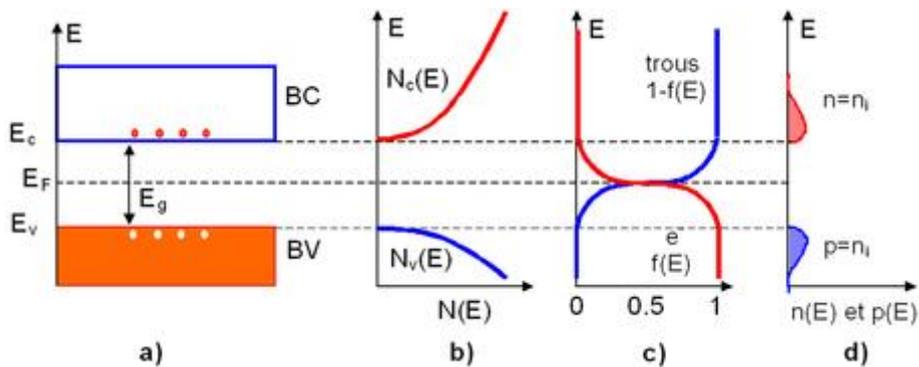


Figure 2.2: Semi-conducteur intrinsèque. a) Diagramme des bandes d'énergie b) Densités d'états énergétique c) Distributions de Fermi-Dirac d) Densités énergétiques de porteurs (les densités de porteurs n et p correspondent aux surfaces hachurées)

2.2.3. Semi-conducteur extrinsèque

Lorsqu'un semi-conducteur est dopé par des atomes spécifiques tel que le Bore (atome accepteur) ou le Phosphore (atome donneur), ses propriétés électriques sont modifiées considérablement. On dit qu'un semi-conducteur extrinsèque est de type N si la densité des donneurs (N_D) est supérieure à la densité des accepteurs (N_A), dans le cas inverse, le semi-conducteur est de type P. en se basant sur l'équation de neutralité et dans le cas où tous les atomes dopants sont ionisés, on a :

$$n + N_A = p + N_D \quad (2.18)$$

Dans le cas d'un semi-conducteur de type N, la densité des trous est négligeable, la densité des électrons (ici porteurs majoritaires) est :

$$n = N_D - N_A \quad (2.19)$$

En utilisant l'expression (2.11) on obtient la densité des trous (porteurs minoritaires) :

$$p = \frac{n_i^2}{N_D - N_A} \quad (2.20)$$

En combinant les expressions (2.4, 2.19), on obtient la position du niveau de Fermi :

$$E_F = E_c - k_B T \ln \frac{N_c}{N_D - N_A} \quad (2.21)$$

On remarque que le niveau de Fermi est au-dessus du milieu de la bande interdite et tend vers le bas de la bande de conduction lorsque le dopage augmente.

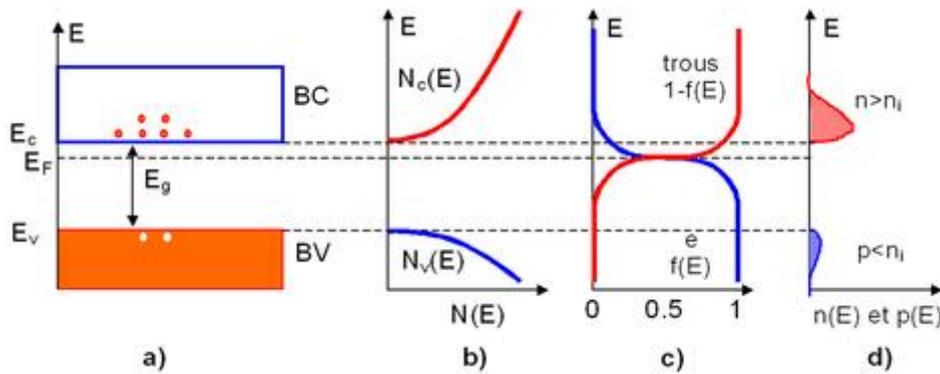


Figure 2.3 : Semi-conducteur dopé N. a) Diagramme des bandes d'énergie b) Densités d'état énergétique c) Distributions de Fermi-Dirac d) Densités énergétiques de porteurs (les densités de porteurs n et p correspondent aux surfaces hachurées)

Pour un semi-conducteur de type P et avec une procédure analogue, on obtient

$$p = N_A - N_D \quad (2.22)$$

$$p = \frac{n_i^2}{N_A - N_D} \quad (2.23)$$

$$E_F = E_v + k_B T \ln \frac{N_v}{N_A - N_D} \quad (2.24)$$

On remarque que le niveau de Fermi est au-dessous du milieu de la bande interdite et tend vers le bas de la bande de valence lorsque le dopage augmente.

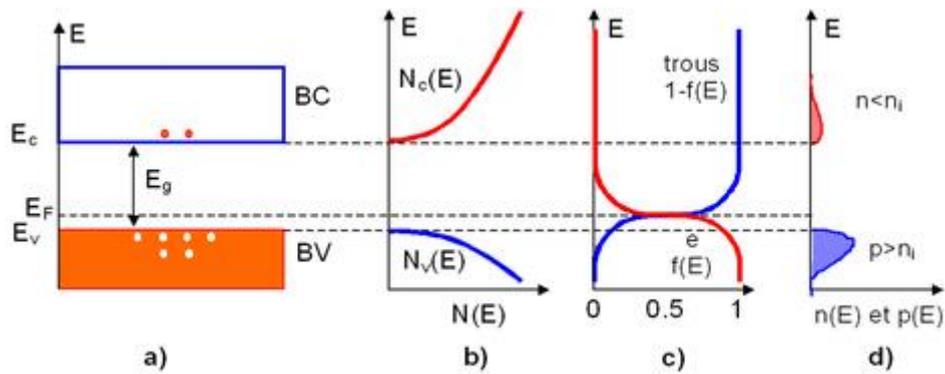


Figure 2.4 : Semi-conducteur type P. a) Diagramme des bandes d'énergie b) Densités d'états énergétique. c) Distributions de Fermi-Dirac d) Densités énergétiques de porteurs (les densités de porteurs n et p correspondent aux surfaces hachurées).

2.2.4. Jonction P-N

Dans les semi-conducteurs, la jonction P-N est un concept essentiel. La compréhension de la physique de la jonction P-N permet la compréhension du fonctionnement de nombreux dispositifs.

La mise en contact d'un semi-conducteur dopé P avec un autre dopé N fait apparaître un phénomène de diffusion dans la jonction. Les électrons majoritaires dans le côté N diffusent vers le côté P et les trous majoritaires dans le côté P diffusent vers le côté N. Au niveau de la jonction, les porteurs de charge (électrons et trous) se recombinent créant une zone dépourvue de porteurs mobiles, appelée Zone de Charge d'Espace (ZCE).

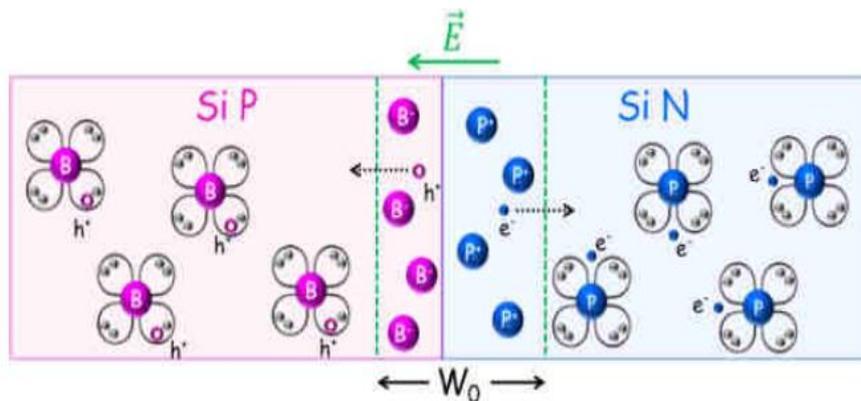


Figure 2.5 : La jonction P-N et la séparation de la paire électron-trou photogénérée.

2.2.4.1 Structure et comportement d'une jonction P-N à l'équilibre :

Soient deux semi-conducteurs de type P (silicium amorphe) et N (silicium cristallin) caractérisés par leurs niveaux de Fermi respectifs E_{Fp} et E_{Fn} . Chaque semi-conducteur possède une énergie de gap E_g .

Lorsqu'on effectue un contact entre ces deux semi-conducteurs, et à l'équilibre thermodynamique, la différence de potentiel au niveau de la jonction P-N induit une mise à l'équilibre des niveaux de Fermi de part et d'autre de cette jonction. Cet équilibre des niveaux de Fermi entraîne une courbure des bandes électroniques. La figure 2.6 présente le diagramme de bandes d'une hétérojonction. Dans ce diagramme on représente le maximum de la bande de valence (E_v) et le minimum de la bande de conduction (E_c) pour les matériaux présents : le silicium amorphe hydrogéné dopé P, le silicium cristallin dopé N et le silicium amorphe hydrogéné dopé N (champ de surface arrière). Sur ce diagramme sont aussi représentés les niveaux de Fermi (E_{Fn} et E_{Fp}) pour chacune des régions.

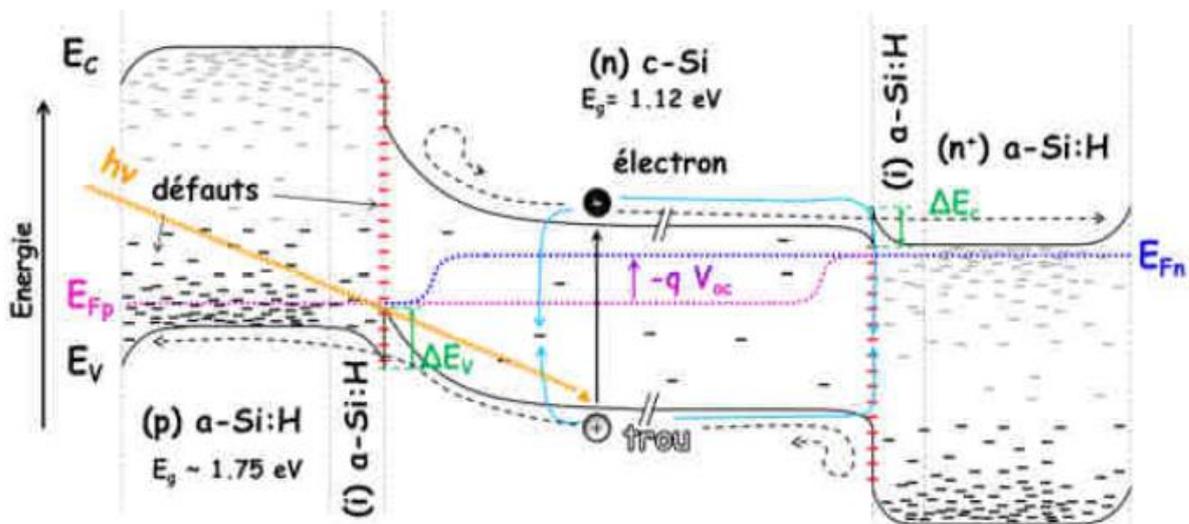


Figure 2.6 : La structure de bandes d'une cellule solaire de silicium à hétérojonction (p) a-Si :H/(i) a-Si :H/(n) c-Si/(i) a-Si :H/(n⁺) a-Si :H. les flèches noires en pointillé représentent le transport des porteurs de charges. Les flèches bleues représentent certaines recombinaisons possibles de ces porteurs (via les défauts du cristal et via les états d'interface) [3,4].

Dans cette cellule solaire à hétérojonction de silicium, une couche de silicium amorphe hydrogéné intrinsèque est ajoutée entre l'absorbeur à base de silicium cristallin et l'émetteur à base de silicium amorphe afin de mieux passiver la jonction amorphe-cristallin. En effet, il est difficile de passiver un cristal dopé avec une couche de silicium amorphe hydrogéné dopé qui est plus défectueuse qu'une couche de silicium amorphe hydrogéné intrinsèque.

2.2.4.2 La zone de charge d'espace (ZCE)

La différence de concentration en électrons et en trous apparait de part et d'autre de la surface de contact. Si le contact est établi entre la zone P et la zone N, on aura une diffusion des porteurs de charges libres (électrons et trous) du côté où ils sont majoritaires vers celui où ils sont minoritaires.

La diffusion des électrons et des trous permet de créer deux régions, une zone chargée positivement du côté du semi-conducteur N, et une zone chargée négativement du côté du semi-conducteur P. Cette zone de transition est appelée la Zone de Charge d'Espace (zone de déplétion, zone désertée).

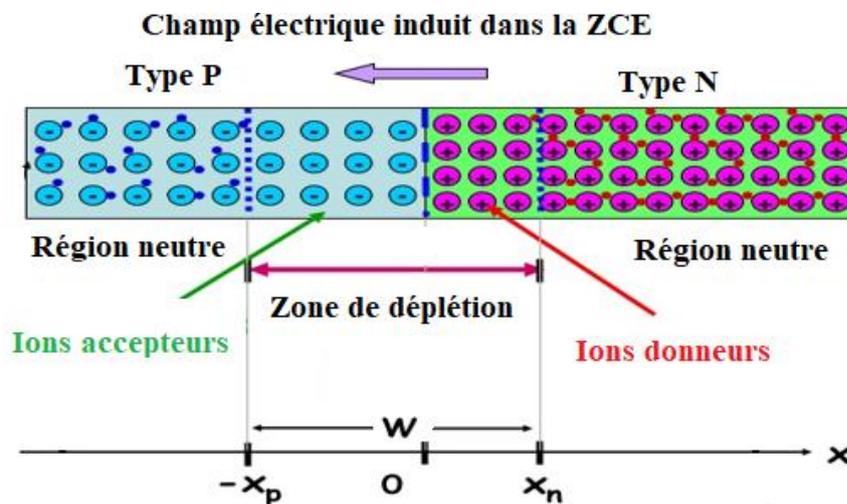


Figure 2.7 : Formation de la Zone de Charge d'Espace.

La formation de la jonction P-N engendre un champ électrique E_x dirigé du côté N (charge positive) vers le côté P (charge négative). Le potentiel correspondant est appelé potentiel de diffusion ou barrière de potentiel V_d . Le champ interne va s'opposer au phénomène de diffusion. En effet, un champ électrique ne favorise le mouvement des électrons que s'ils se déplacent dans la direction contraire du champ. Or la diffusion des électrons majoritaires se fait dans la même direction que le champ électrique. De la même manière, on sait que le champ électrique ne favorise le mouvement des trous que s'ils se déplacent dans la même direction que lui alors que la diffusion des trous se fait dans la direction contraire du champ électrique. Donc, le champ s'oppose également à la diffusion des trous.

2.2.4.3. Les caractéristiques d'une jonction P-N

a. La densité de charge :

Pour le modèle simple de la jonction abrupte (Figure 2.7), la densité de charge d'espace à travers la structure est donnée par les équations suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{ll} \rho(x) = 0 & \text{pour } x > x_n \text{ et } x < -x_p \quad (2.25) \\ \rho(x) = -qN_A & \text{pour } -x_p < x < 0 \quad (2.26) \\ \rho(x) = qN_D & \text{pour } 0 < x < x_n \quad (2.27) \end{array} \right.$$

b. Le champ électrique interne :

Le déplacement des porteurs libres peut entraîner la création d'une charge d'espace locale, qui est liée au potentiel interne dans le semi-conducteur par l'équation de Poisson :

$$\text{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_r \epsilon_0} = \frac{q}{\epsilon_r \epsilon_0} (p - n + N_D - N_A) \quad (2.28)$$

ϵ_r est la permittivité relative du semi-conducteur, ϵ_0 est la permittivité du vide et ρ est la densité locale de charge d'espace.

❖ Le champ électrique du côté N ($0 < x < x_n$) est donnée par l'équation de Poisson :

$$\frac{dE_n(x)}{dx} = \frac{\rho(x)}{\epsilon} = \frac{qN_D}{\epsilon} \quad (2.29)$$

avec $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$

L'intégration de cette équation en tenant compte de la condition limite : $E_n(x_n) = 0$, nous permet de trouver :

$$E_n = \frac{qN_D(x - x_n)}{\epsilon} \quad (2.30)$$

❖ Le champ électrique du coté P ($-x_p < x < 0$) est donnée par l'équation de Poisson :

$$\frac{dE_p(x)}{dx} = \frac{\rho(x)}{\epsilon} = \frac{-qN_A}{\epsilon} \quad (2.31)$$

L'intégration de cette équation en tenant compte de la condition limite : $E_p(-x_p) = 0$, on trouve :

$$E_p = \frac{-qN_A(x - x_p)}{\varepsilon} \quad (2.32)$$

c. Le potentiel de diffusion V_d :

Après le contact des deux semiconducteurs pour la formation de la jonction P-N, il existe une continuité à une échelle atomique du cristal de part et d'autre de la surface de la jonction.

La présence d'une charge d'espace entraîne l'existence d'un champ électrique et d'une variation de potentiel. Le potentiel varie d'une valeur V_p dans la région neutre de type P, à une valeur V_n dans la région neutre de type N.

La différence de potentiel entre ces deux régions constitue une barrière de potentiel que l'on appelle tension de diffusion, en raison du fait que c'est la barrière qui équilibre les forces de diffusion (Figure 2.8).

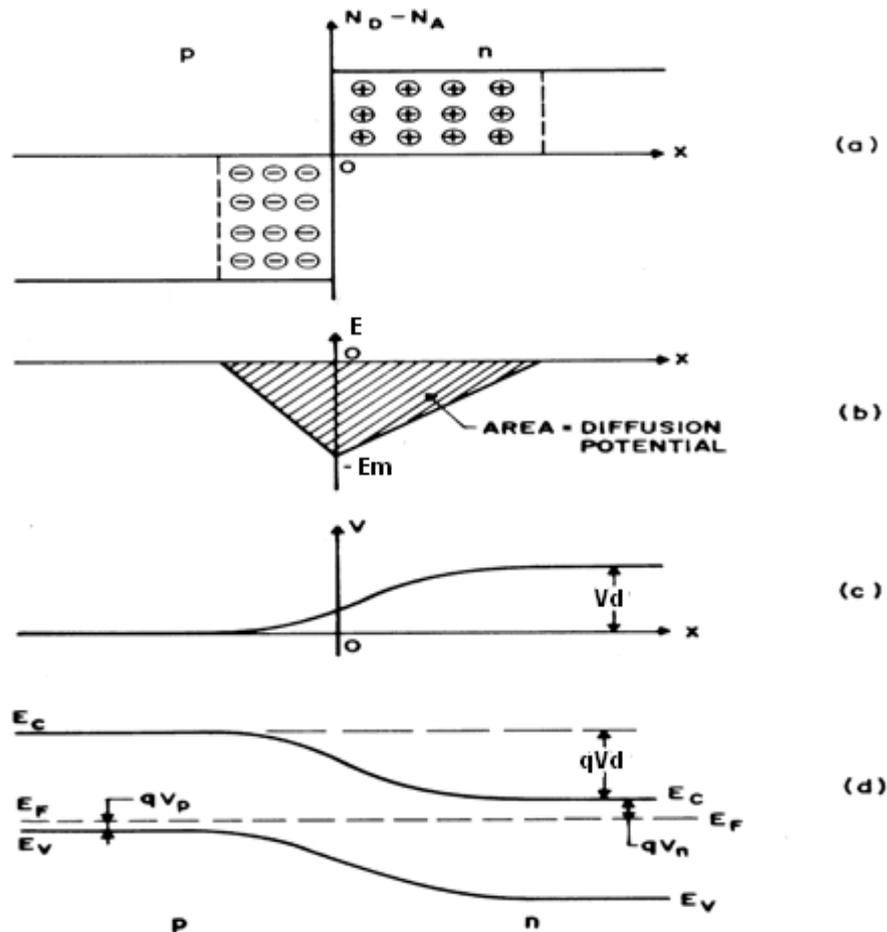


Figure 2.8 : Formation d'une jonction P-N (abrupte) à l'équilibre : a) distribution des impuretés ionisées ; b) distribution du champ électrique ; c) variation du potentiel ; d) diagramme des bandes d'énergie [2].

En l'intégrant l'équation de Poisson (2.28) à une dimension, on obtient le potentiel électrique V à travers la structure.

$$V = \frac{qN_A}{2\varepsilon}(x + x_p)^2 + V_p \quad \text{pour } -x_p < x < 0 \quad (2.33)$$

$$V = \frac{qN_D}{2\varepsilon}(x - x_n)^2 + V_n \quad \text{pour } 0 < x < x_n \quad (2.34)$$

La continuité du champ électrique E et du potentiel électrique V au point (x=0) (Figure 2.8.d), permet d'écrire les relations suivantes :

$$x_n = \left(\frac{2\varepsilon k_B T}{q^2 N_D} \right)^{\frac{1}{2}} \left[\frac{1}{1 + \frac{N_D}{N_A}} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.35)$$

$$x_p = - \left(\frac{2\varepsilon k_B T}{q^2 N_A} \right)^{\frac{1}{2}} \left[\frac{1}{1 + \frac{N_A}{N_D}} \ln \frac{N_D N_A}{n_i^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.36)$$

La tension de diffusion est par conséquent donnée par :

$$V_d = V_n - V_p = \frac{q}{2\varepsilon} (N_D x_n^2 + N_A x_p^2) \quad (2.37)$$

Le produit ($q V_d$) représente l'énergie potentielle qui correspond à la hauteur de la barrière de potentiel que doit franchir un trou pour passer de la région P à la région N et vice-versa.

d. Répartition des porteurs majoritaires et minoritaires :

Les densités de porteurs libres dans chacune des régions P et N en dehors de la ZCE sont données par :

- $P_p = N_A =$ densité des trous du côté « P ».
- $P_n = n_i^2/N_D =$ densité des trous du côté « N ».
- $n_n = N_D =$ densité des électrons du côté « N ».
- $n_p = n_i^2/N_A =$ densité des électrons du côté « P ».

e. Largeur de la zone de charge d'espace :

La largeur de la zone de charge d'espace à partir de la figure 2.7. est donnée par :

$$W = x_n + x_p \quad (2.38)$$

2.2.5 Le modèle d'Anderson

Le modèle d'Anderson établi en 1960 sert de point de départ aux autres modèles d'hétérojonction [5]. Le principe du modèle repose sur la prise en compte des propriétés électroniques des matériaux utilisés : permittivité électrique ϵ , affinité électronique χ et largeur de la bande interdite E_g . Les différences entre les valeurs de E_{g1} , E_{g2} et les affinités électroniques χ_1 , χ_2 engendrent une discontinuité au niveau de raccordement des bandes de conduction et de valence ΔE_C et ΔE_V . Le modèle d'Anderson ne prend pas en considération les états d'interface et s'appuie sur l'hypothèse que le transport du courant se fait par injection dans les régions quasi-neutres ou bien par recombinaison/génération dans la zone de charge d'espace (ZCE).

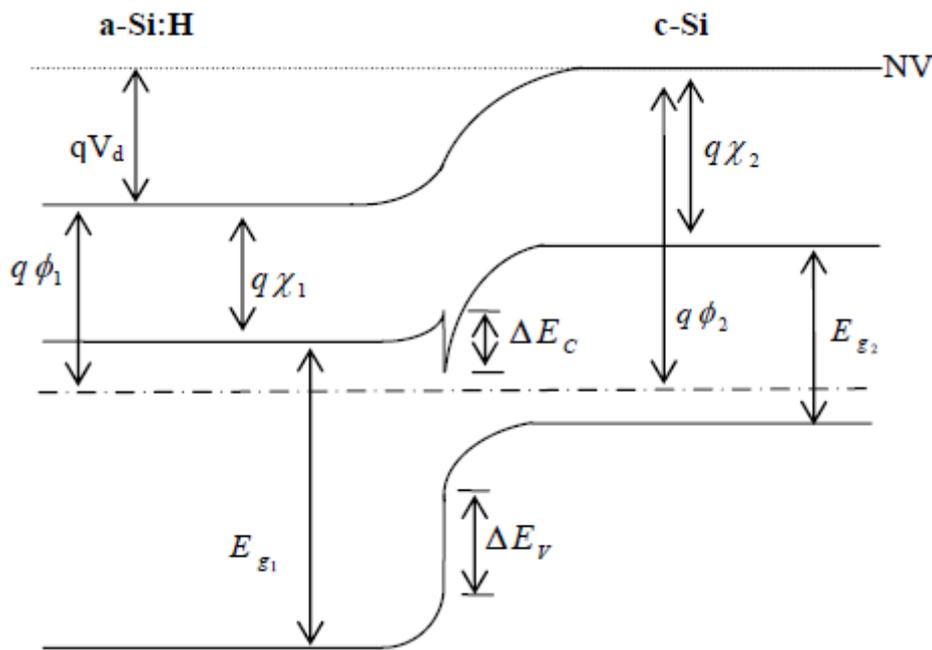


Figure 2.9. Diagramme de bandes d'une hétérojonction a-Si:H/c-Si à l'équilibre thermique.

En faisant l'hypothèse que les quasi-niveaux de Fermi ne varient pas à travers la zone de déplétion comme pour une homojonction, les discontinuités de bandes ΔE_C et ΔE_V sont données par :

$$\Delta E_C = (\chi_1 - \chi_2)q \quad (2.39)$$

$$\Delta E_V = (\chi_2 - \chi_1)q + E_{g2} - E_{g1} \quad (2.40)$$

Le potentiel induit :

$$qV_d = qV_{d1} + qV_{d2} = E_{g1} - \delta_n - \delta_p + \Delta E_C \quad (2.41)$$

Avec :

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

δ_n, δ_p : Différence d'énergie entre le niveau de Fermi et la bande de conduction ($\delta_n = E_C - E_f$) et la bande de valence ($\delta_p = E_f - E_V$) [6].

2.2.6. Les équations de base des semi-conducteurs

Les équations principales dans un semi-conducteur sont les équations des courants, les équations de continuité et l'équation de Poisson [7].

2.2.6.1 Equations de courant

Il existe deux types de courant dans un semi-conducteur :

❖ Lorsqu'on applique au semi-conducteur un champ électrique \vec{E} , il y a un déplacement des porteurs de charges, donc un courant de conduction \vec{J}_C donné par la loi d'Ohm.

$$\vec{J}_C = \sigma \vec{E} \quad (2.42)$$

Où σ est la conductivité du semi-conducteur. Pour les électrons, nous avons :

$$\vec{J}_n = nq\mu_n \vec{E} \quad (2.43)$$

Avec μ_n est la mobilité des électrons, n le nombre des électrons, q la charge de l'électron.

Et de façon similaire pour les trous :

$$\vec{J}_p = pq\mu_p \vec{E} \quad (2.44)$$

Avec μ_p la mobilité des trous.

Donc le courant total de conduction :

$$\vec{J}_C = \vec{J}_n + \vec{J}_p \quad (2.45)$$

$$\vec{J}_C = q(n\mu_n + p\mu_p) \vec{E} \quad (2.46)$$

❖ Lorsque le semi-conducteur se trouve sous l'effet d'une variation de température ou de lumière, soit généralement par une technologie appropriée comme le dopage. Ce gradient de concentration va provoquer un déplacement des porteurs de la région la plus peuplée à la région la moins peuplée. Ce phénomène est appelé processus de diffusion. On parle alors d'un courant de diffusion \vec{J}_D .

Pour les électrons :

$$\vec{J}_n = qD_n \vec{\nabla}n \quad (2.47)$$

Pour les trous :

$$\vec{J}_p = -qD_p \vec{\nabla}p \quad (2.48)$$

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

Le courant total de diffusion s'écrit :

$$\vec{J}_D = \vec{J}_n + \vec{J}_p \quad (2.49)$$

$$\vec{J}_D = q(D_n \vec{\nabla}n - D_p \vec{\nabla}p) \quad (2.50)$$

D'après les équations 2.43, 2-44, 2-47, 2-48 les courants totaux des électrons et des trous s'écrivent donc :

$$\vec{J}_n = q(n\mu_n \vec{E} + D_n \vec{\nabla}n) \quad (2.51)$$

$$\vec{J}_p = q(p\mu_p \vec{E} - D_p \vec{\nabla}p) \quad (2.52)$$

2.2.6.2 Equations de continuité

Les équations de continuité concernent les phénomènes de génération et de recombinaison des porteurs.

$$\frac{\partial n}{\partial t} = G_n - R_n + \frac{1}{e} \text{div}(J_n) \quad (2.53)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = G_p - R_p + \frac{1}{e} \text{div}(J_p) \quad (2.54)$$

Avec $G_{n,p}$: taux de génération des électrons et des trous respectivement.

$R_{n,p}$: taux de recombinaison des électrons et des trous respectivement.

2.2.6.3. Equation de Poisson

L'équation de Poisson décrit la dépendance du champ électrique en fonction de la densité de charges et de dopants.

$$\text{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_r \epsilon_0} = \frac{q}{\epsilon_r \epsilon_0} (p - n + N_D - N_A) \quad (2.55)$$

Avec : ρ : densité locale de charge d'espace.

ϵ_r : permittivité relative du semi-conducteur.

ϵ_0 : permittivité du vide.

N_D : densité de donneurs ionisés (cm^{-3}).

N_A : densité d'accepteurs ionisés (cm^{-3}).

2.3. Le silicium cristallin

La cellule solaire à hétérojonctions de silicium est en majorité constituée d'un substrat en silicium cristallin. Bien que l'on ne trouve pas le silicium à l'état pur dans la nature, il est particulièrement présent sous forme de composés en particulier dans la silice. Les propriétés de ce semi-conducteur sont extrêmement bien connues puisqu'il a fait la renommée de la *Silicon Valley* aux Etats-Unis et qu'il est extrêmement utilisé pour la fabrication de nombreux composants et dispositifs électroniques.

2.3.1. Description générale du silicium cristallin

Le silicium est un semi-conducteur simple qui appartient à la colonne IV de la classification périodique des éléments. A température ambiante, il cristallise dans une structure de type diamant (Figure 2.10) dans laquelle chaque atome de silicium est lié à quatre autres atomes dans un réseau cubique à faces centrées.

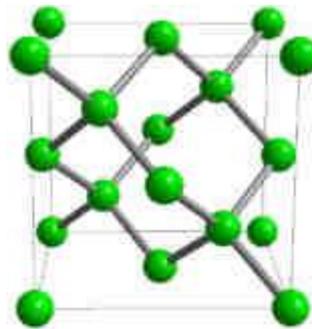


Figure 2.10 : Structure cristallographique du silicium de type diamant.

La relation de dispersion $E_{c,v}(\vec{k})$ du silicium, donnée à la figure 2.11, fait apparaître que le minimum de la bande de conduction E_C est décalé par rapport au maximum de la bande de valence E_V , ce qui caractérise les semi-conducteurs à gap indirect. A travers cette transition, l'interaction avec un phonon est nécessaire pour qu'un photon puisse être absorbé et produire une paire électron-trou. La largeur du premier gap direct vaut 3.4 eV ce qui est beaucoup plus grand que la largeur de 1.12 eV du gap indirect. Les transitions radiatives sont donc largement défavorisées dans le silicium cristallin par rapport aux semi-conducteurs à gap direct.

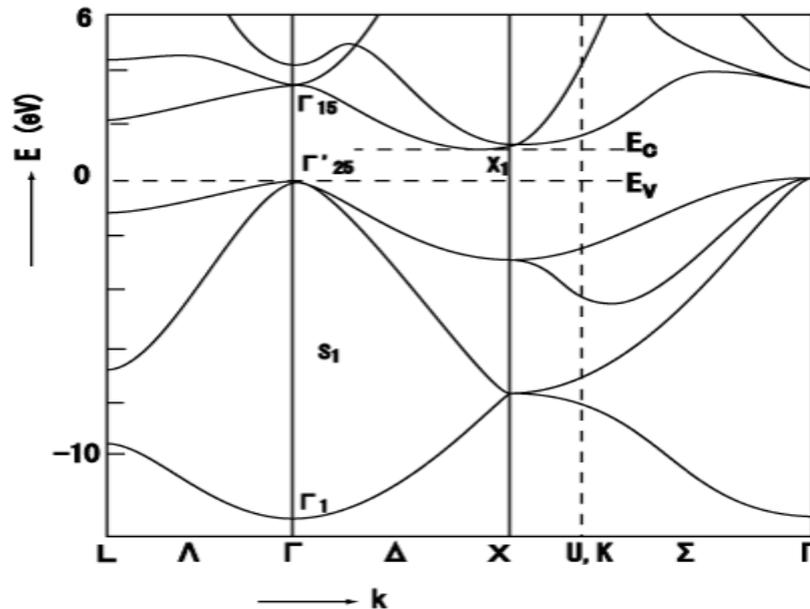


Figure 2.11 : Structure de bandes du silicium cristallin [7].

2.3.2 Dopage du silicium cristallin

Pour réaliser le dopage du silicium, on introduit d'autres atomes dans le réseau cristallin. Si l'on souhaite réaliser un dopage de type N, on introduit des atomes situés dans la colonne V de la classification périodique (phosphore, azote, arsenic ...). Les atomes dopants se lient à quatre atomes de silicium via des liaisons covalentes, huit électrons sont mis en commun et le neuvième électron de l'atome dopant, en excès, est délocalisé sur le réseau cristallin. L'atome dopant est ionisé X^+ et qualifié de *donneur* d'électrons. L'électron supplémentaire est *libre* dans le réseau. Dans ce type de dopage, les électrons sont les *porteurs majoritaires* et les trous les *porteurs minoritaires*.

En introduisant des atomes situés dans la colonne III de la classification périodique (bore, aluminium, gallium ...), les atomes dopants se lient également à quatre atomes de silicium via des liaisons covalentes et huit électrons sont alors nécessaires. L'atome dopant s'ionise X^- en utilisant un électron du réseau cristallin. Cet atome est qualifié d'atome *accepteur* d'électrons. Un trou libre apparaît donc dans le réseau. Dans ce cas les trous sont les *porteurs majoritaires* et les électrons les *porteurs minoritaires*. Pour les applications photovoltaïques, le silicium est généralement dopé avec des atomes de phosphore (type N) et de bore (type P).

2.3.3. Propriétés électriques du silicium cristallin

Les propriétés électroniques du silicium cristallin dépendent de plusieurs paramètres qui ne sont pas complètement indépendants. Un premier paramètre à prendre en compte est la densité de porteurs libres à l'équilibre notée n pour les électrons et p pour les trous (eq. (2.4) et (2.8)).

La largeur de la bande interdite du silicium cristallin varie avec la température. On peut la paramétrer en utilisant l'équation (2.56) :

$$E_g(T) = E_g(0) + \frac{\alpha T^2}{T + \beta} \quad (2.56)$$

En prenant l'énergie de gap à température nulle $E_g(0) = 1,17$ eV et les coefficients $\alpha = 4,73 \times 10^{-4}$ eV.K⁻¹ et $\beta = 636 \pm 50$ K [8].

Afin de satisfaire la condition de neutralité électrique du matériau, les concentrations de charges positives et de charges négatives doivent être égales. En tenant compte des charges des atomes dopants, cette condition s'écrit :

$$n + N_A^- = p + N_D^+ \quad (2.57)$$

Où N_A^- et N_D^+ sont respectivement les concentrations d'atomes accepteurs ionisés et d'atomes donneurs ionisés avec $N_A^- = 0$ en cas de dopage de type N et $N_D^+ = 0$ pour le dopage de type P. En régime d'épuisement des impuretés (spécifiquement à $T > 100$ K), tous les atomes donneurs et accepteurs sont ionisés, et pour des valeurs de $|N_A - N_D|$ grandes devant n_i , les concentrations n et p peuvent s'écrire simplement :

$$n = N_D = \frac{n_i^2}{N_A} \quad (2.58)$$

$$p = N_A = \frac{n_i^2}{N_D} \quad (2.59)$$

La mobilité μ des porteurs libres est également un autre paramètre important qui caractérise la facilité qu'ont les porteurs à se déplacer dans le matériau. Elle peut être mesurée par effet Hall ou par temps de vol [9, 10]. La paramétrisation de la mobilité dans le silicium cristallin est donnée par la relation (2.60) [11].

$$\mu = \mu_{i,min_1} \exp\left(-\frac{P_{c,i}}{N_{dop}}\right) + \frac{\mu_{i,max} - \mu_{i,min_2}}{1 + \frac{N_{dop}}{N_{i,ref_1}} x_{i,1}} - \frac{\mu_{i,1}}{1 + \frac{N_{i,ref_2}}{N_{dop}} x_{i,2}} \quad (2.60)$$

Les différents paramètres de l'équation sont résumés dans le Tableau 2.1.

Tableau 2.1 : Paramètres utilisés dans le calcul de mobilité des porteurs majoritaires dans le silicium cristallin [11].

Paramètre	Unité	Electrons i=n	Trous i=p
μ_{min_1}	$cm^2.V^{-1}.s^{-1}$	68.5	44.9
μ_{min_2}	$cm^2.V^{-1}.s^{-1}$		0
μ_{max}	$cm^2.V^{-1}.s^{-1}$	1414	470.5
μ_1	$cm^2.V^{-1}.s^{-1}$	56.1	29.0
P_c	cm^{-3}	0	$9.23 \cdot 10^{16}$
N_{ref_1}	cm^{-3}	$9.20 \cdot 10^{16}$	$2.23 \cdot 10^{17}$
N_{ref_2}	cm^{-3}	$3.41 \cdot 10^{20}$	$6.10 \cdot 10^{20}$
x_1	-	0.711	0.719
x_2	-	1.98	2.00

La mobilité des électrons est ainsi de l'ordre de $1360 \text{ cm}^2.V^{-1}.s^{-1}$ et celle des trous de l'ordre de $480 \text{ cm}^2.V^{-1}.s^{-1}$ pour un dopage de type N avec une concentration $N_{dopants}=10^{15} \text{ cm}^{-3}$ à la température de 300K.

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

$$\sigma = e(\mu_n n + \mu_p p) \quad (2.61)$$

Avec e la charge élémentaire. La résistivité est l'inverse de la conductivité :

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad (2.62)$$

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

2.4. Le silicium amorphe

Les études sur les matériaux semi-conducteurs amorphes se sont développées grâce à la recherche sur l'électrophotographie avec le sélénium dans un premier temps puis sur le silicium [12]. Les premières couches de silicium amorphe étaient déposées par pulvérisation ou évaporation et n'étaient pas hydrogénées [13]. A la fin des années 1960, de nouvelles techniques

de dépôt utilisant la décomposition chimique du silane SiH_4 par décharge lumineuse apparaissent et permettent l'utilisation de l'hydrogène qui modifie radicalement les propriétés du matériau [14, 15].

Les premières cellules à base de silicium amorphe hydrogéné apparaissent en 1976 [16] et seront utilisées quelques années plus tard dans les calculatrices. D'autres applications de ces matériaux apparaissent ensuite : transistors en couches minces, scanners optiques, écrans à cristaux liquides.

2.4.1 Description générale du matériau

Le silicium amorphe hydrogéné a-Si :H composé d'atomes de silicium et d'hydrogène en configuration désordonnée comme le montre la figure 2.12. A cause de sa configuration désordonnée et de la présence d'hydrogène, les propriétés du silicium amorphe sont très différentes de celles du silicium cristallin : on trouve des défauts dans la matrice cristalline, de nombreux atomes de silicium non tétraédriques ainsi que des déformations des angles et longueurs des liaisons entre les atomes.

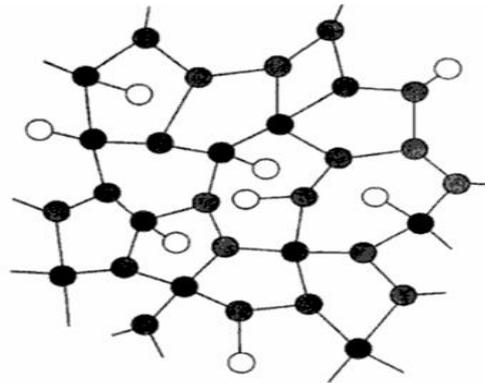


Figure 2.12 : Représentation du silicium amorphe hydrogéné. Les atomes de silicium sont représentés en noir et les atomes d'hydrogène en blanc [17].

Le théorème de Bloch utilisé pour la structure des bandes nécessite une structure périodique. Or, il n'existe pas de périodicité à grande échelle dans le silicium amorphe comme c'est le cas dans le réseau du silicium cristallin. Il existe cependant un ordre à courte distance ce qui signifie qu'un atome de silicium et ses plus proches voisins sont dans une configuration proche de celle qu'ils auraient eue au sein d'un réseau cristallin. Au-delà des quatre premiers voisins, les positions relatives des atomes sur le réseau sont totalement aléatoires et il n'est plus possible de parler de matrice cristalline ; il n'existe pas d'ordre à grande distance. Cet ordre à courte

distance permet de retrouver une structure de bandes, cependant la configuration désordonnée du a-Si :H modifie fortement la structure électronique par rapport à celle du silicium cristallin.

Dans un réseau cristallin, les défauts sont une rupture de la périodicité du réseau comme une lacune, une dislocation ou un atome en position interstitielle. Ces notions n'ont pas de sens dans un matériau dans lequel il n'y a pas de réseau. La notion de défaut utilisée dans le a-Si :H fait référence aux défauts de coordination : un atome de silicium peut avoir un excès ou un défaut de liaisons covalentes.

Le nombre de liaisons excédentaires ou en défaut de chaque atome de silicium par rapport à la configuration tétravalente est caractérisé par l'indice de coordination i_C :

$i_C = -2$: Lacune double $Si_{(2)}$

$i_C = -1$: Lacune pendante $Si_{(3)}$

$i_C = 0$: Liaison faible $Si_{(4)}$

$i_C = 1$: Liaison flottante $Si_{(5)}$

Les défauts du type liaisons pendantes ou *Dangling Bonds* sont les plus nombreux dans le silicium amorphe hydrogéné et sont notés D [18].

2.4.2 Rôle de l'hydrogène dans le silicium amorphe hydrogéné

Le silicium amorphe non hydrogéné possède une densité de défauts profonds dus aux liaisons pendantes de l'ordre de 10^{19} cm^{-3} . L'hydrogène incorporé passive la majorité des liaisons pendantes à travers l'équilibre représenté à la Figure 2.13. Lorsqu'il est hydrogéné, le silicium amorphe est beaucoup moins défectueux puisque la densité de défauts profonds est de l'ordre de 10^{16} cm^{-3} [19]. Il devient alors bien meilleur photoconducteur.

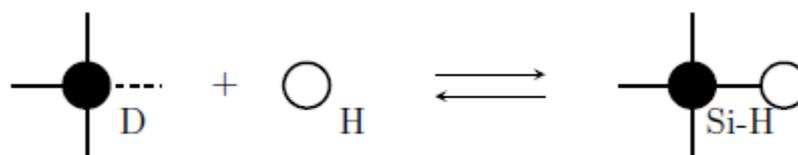


Figure 2.13 : Equilibre de passivation des liaisons pendantes des atomes de silicium par l'hydrogène.

La réduction des défauts augmente l'efficacité des atomes dopants. L'introduction d'hydrogène facilite donc la variation du niveau de Fermi avec le dopage des couches [14].

L'hydrogène a également la capacité d'élargir le gap du silicium amorphe. La largeur de bande interdite du silicium amorphe (a-Si) est d'environ 1.55 eV et peut atteindre 2.10 eV pour les matériaux a-Si :H comportant une forte concentration d'hydrogène [20].

Néanmoins l'incorporation de l'hydrogène dans le silicium amorphe n'a pas que de bons côtés, puisqu'il peut être à l'origine de la rupture de liaisons faibles Si—Si selon l'équilibre donné dans la figure 2.14.

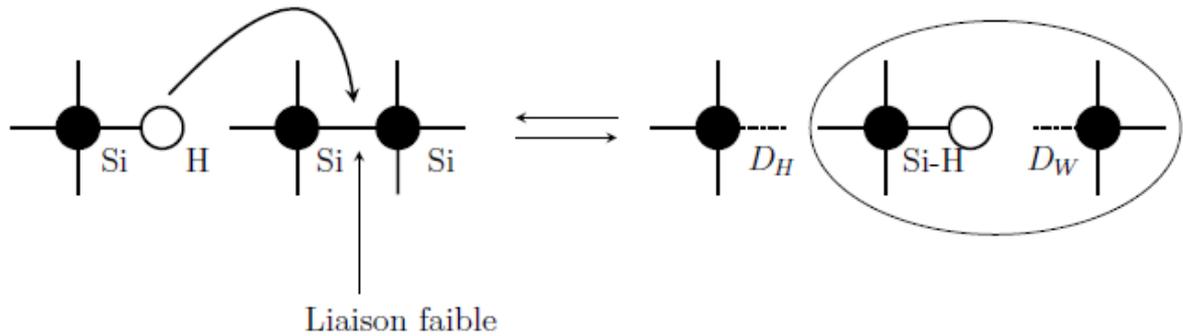


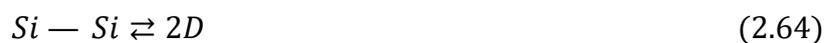
Figure 2.14 : Equilibre de rupture des liaisons faibles Si—Si par l'hydrogène dans le a-Si :H.

Dans cet équilibre, Si—H...D doit être considérée comme une seule espèce dans laquelle une liaison Si—Si a été hydrogénée. On caractérise les réactions de formation des liaisons pendantes à l'aide d'un indice i correspondant au nombre de liaisons Si—H intervenant dans la réaction. Dans le cas de l'équilibre de la figure 2.14, l'indice $i = 1$.

Une liaison faible Si—Si peut également être dissociée pour former deux liaisons pendantes D selon l'équilibre suivant :



Dans lequel l'espèce Si—H...H — Si est formée. Dans cet équilibre, l'indice est $i=2$. L'hydrogène n'est pas le seul responsable de la formation des liaisons pendantes puisqu'il existe également un équilibre entre les atomes de silicium liés par une liaison simple Si—Si et ces mêmes atomes avec chacun une liaison pendante :



Puisqu'il n'y a pas d'intervention de liaison Si — H l'indice $i=0$ dans cet équilibre.

La densité de liaisons pendantes dans le a-Si :H est donc le résultat d'un équilibre thermochimique entre la formation et la stabilisation des liaisons pendantes par ces différentes

transitions. Cependant la réaction associée à l'indice $i=2$ serait la réaction prépondérante dans la formation des liaisons pendantes [13].

La proportion d'hydrogène dans le a-Si :H est comprise entre 6% et 40%, cependant la concentration d'atomes actifs d'hydrogène est beaucoup plus faible dans le a-Si :H puisque la majorité des atomes d'hydrogène n'intervient pas dans des liaisons $Si - H$ mais s'assemble pour former des agrégats. Le rapport des atomes d'hydrogène actifs sur le total des atomes d'hydrogène est généralement pris égal à $1/10$ [13].

2.4.3 Procédé de fabrication du silicium amorphe hydrogéné

Depuis les années 1970, la technique adoptée industriellement et dans les laboratoires pour la synthèse des couches de silicium amorphe hydrogéné est le dépôt chimique vapeur assisté par plasma radiofréquence [13] dit PECVD (Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition). La figure 2.115 représente un schéma simplifié du réacteur PECVD.

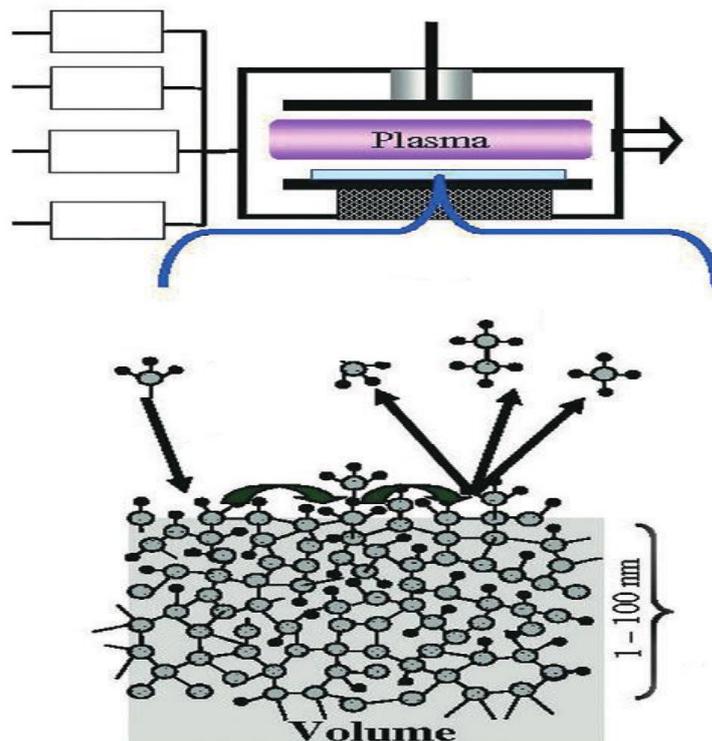


Figure 2.15 : Dépôt du silicium amorphe hydrogéné par décomposition chimique des gaz réactifs dans un plasma de décharge [21].

Le silane et le dihydrogène sont utilisés comme gaz-sources et sont complétés par un gaz dopant, généralement le diborane B_2H_6 ou la phosphine PH_3 . Dans le plasma, les collisions inélastiques entre les électrons de haute énergie accélérés par le champ électrique

radiofréquence et le silane génèrent des radicaux, des ions et des espèces excitées [22]. Les espèces réactives produites dans le plasma se condensent sur le substrat en formant une couche mince désordonnée. Le dépôt se déroule à relativement basse température et peut se réaliser sur une très grande surface.

Il existe d'autres méthodes de dépôt chimique en phase vapeur CVD (Chemical Vapor Deposition) comme la CVD à plasma micro-ondes qui est un plasma à haute densité ou la CVD assistée par filament chaud qui engendre une formation plus importante de radicaux.

2.4.4 Densité d'états dans le silicium amorphe hydrogéné

Dans l'approximation de Born-Oppenheimer, le mouvement des électrons de valence est découplé de celui des ions de cœur. Les électrons de valence subissent un potentiel effectif résultant des ions de cœur et des autres électrons de valence.

La distorsion des angles des liaisons et la modification des distances interatomiques modifient les potentiels effectifs et conduisent à la création d'états électronique localisés dans la bande interdite à proximité des bandes de valence et de conduction que l'on appelle *queues de bandes*.

Les liaisons pendantes et les impuretés font apparaître des états électroniques vers le milieu de la bande interdite que l'on qualifie de *défauts profonds*.

La figure 2.16 représente une distribution d'états typique dans le silicium amorphe hydrogéné. Les bords de bandes du a-Si :H sont moins abrupts que ceux de c-Si. Les états dans ces queues de bandes sont localisés et participent à l'absorption des photons [23].

Les densités d'états de la queue de bande de valence $N_{QBV}(E)$ et de la queue de bande de conduction $N_{QBC}(E)$ sont généralement définies à l'aide de distributions exponentielles [7] :

$$N_{QBV}(E) = N_V \exp\left(-\frac{E - E_V}{k_B T_V}\right) \quad (2.65)$$

$$N_{QBC}(E) = N_C \exp\left(-\frac{E_C - E}{k_B T_C}\right) \quad (2.66)$$

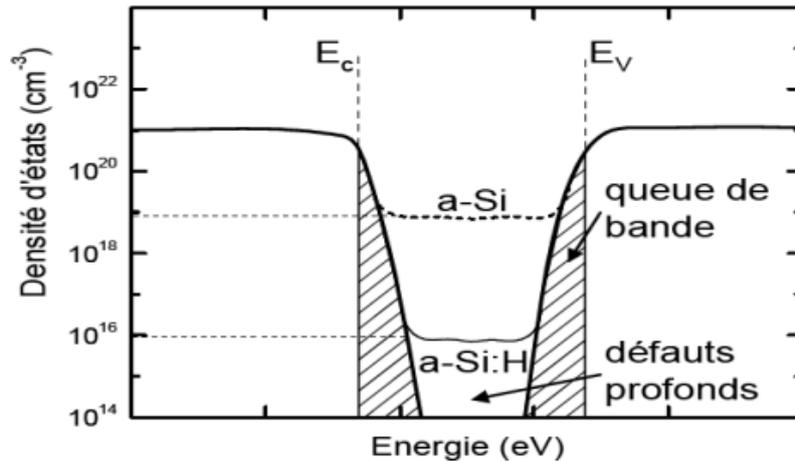


Figure 2.16 : Densité d'états typique du a-Si :H

Avec N_C et N_V les densités d'états d'intersection en bord de bande et T_C et T_V des grandeurs de la dimension d'une température et caractéristiques de la largeur des queues de bandes. La largeur de la queue de bande de valence, aussi appelée *énergie d'Urbach* $E_u = k_B T_V$, est associée au désordre dans le matériau. Les états de la bande de valence sont généralement associés à des défauts donneurs ($0/+$) et ceux de la bande de conduction à des défauts accepteurs ($0/-$).

Les défauts profonds et les queues de bandes n'étant pas complètement indépendants, un modèle complet a été initié par Winer en 1990 [24] et a ensuite surtout été développé par Powell et Deane [25, 26] sous le nom de réservoir de défauts *DPM (Defect-Pool Model)*.

2.4.4.1 Défauts amphotères

D'après le principe d'exclusion de Pauli, deux électrons ne peuvent pas se trouver au même endroit dans le même état quantique, ce qui signifie qu'un état électronique peut contenir au maximum deux électrons qui sont alors de spin opposé. Un état localisé dans la bande interdite peut donc être successivement : vide d'électrons, occupé par un seul électron, rempli avec deux électrons. Ces défauts, qui peuvent ainsi avoir trois niveaux de charges différents, sont qualifiés d'amphotères. Dans le cas des liaisons pendantes, les trois états possibles sont donc :

- D^+ : état sans électron, chargé positivement
- D^0 : état neutre occupé par un seul électron
- D^- : état occupé par deux électrons, chargé négativement

Lors de la transition $D^0 + e^- \rightleftharpoons D^-$, il existe une interaction entre l'électron déjà capturé et l'électron libre ce qui modifie l'énergie de cette transition par rapport à la transition $D^+ +$

$e^- \Rightarrow D^0$. La différence d'énergie qui sépare ces deux transitions est appelée énergie de corrélation U et se définit par la relation :

$$U = \frac{e^2}{4\pi\epsilon d} - W_r \quad (2.67)$$

Où ϵ est la permittivité du matériau, d la distance entre les deux électrons et W_r est l'énergie de relaxation qui traduit la possibilité qu'un changement de configuration ait lieu lors de la capture d'un électron supplémentaire. Cette énergie de corrélation est difficile à calculer par manque de valeurs précises de la distance inter-électronique d et de la permittivité locale ϵ . La valeur de l'énergie de corrélation est estimée expérimentalement à $U=0.3\pm 0.1\text{eV}$ pour a-Si :H [19].

2.4.5 Dopage du silicium amorphe

Dans le cas du silicium cristallin, nous avons vu que l'introduction des atomes dopants dans la structure cristalline entraîne l'apparition de porteurs libres dans la bande de conduction ou de valence. Dans le cas du silicium amorphe, à cause de l'absence de matrice cristalline, la configuration tétraédrique n'est plus la configuration privilégiée par les atomes dopants. Même si le dopage est facilité dans a-Si :H par rapport à a-Si grâce à la passivation des défauts, l'efficacité reste faible. Une grande proportion de l'ordre de 99% des atomes dopants ne s'ionisent pas et ne libèrent donc pas de porteurs libres.

De plus, parmi la quantité relativement faible de porteurs libérés par les atomes dopants, la majorité est piégée par les liaisons pendantes [19]. Au final, la proportion de porteurs libres par rapport à la quantité d'atomes dopants est de l'ordre de 10^{-4} [13].

Comme dans le silicium cristallin, le dopage fait varier le niveau de Fermi. L'introduction d'une grande concentration de dopants dans a-Si :H provoque l'augmentation de la densité des défauts profonds [27]. Il est intéressant de noter que le a-Si :H est intrinsèquement légèrement de type N puisque le niveau de Fermi est plus proche de E_C que de E_V . Un micro-dopage de type P permet donc de réduire légèrement la quantité de défauts profonds [28].

2.4.6 Caractérisation du silicium amorphe hydrogéné a-Si :H

L'ellipsométrie est une technique très utilisée pour caractériser les couches minces de a-Si :H. C'est une technique de mesure polyvalente, rapide, non destructive, sans contact qui permet de définir les propriétés optiques, l'épaisseur, la structure, la rugosité de surface...etc.

De nombreuses autres techniques de caractérisation de matériau et de cellules solaires existent. Parmi ces techniques, essentiellement basées sur les propriétés photoconductrices des films minces, on peut effectuer des mesures de conductivité et de photoconductivité qui donnent l'énergie d'activation et le produit mobilité-durée de vie des porteurs majoritaires.

2.5. Etat de l'art des cellules hétérojonction HIT :

Les cellules HIT sont développées depuis la fin des années 90. Depuis, plusieurs centres de recherches et de développement s'investissent de plus en plus pour l'amélioration des performances de ce type de cellules.

Le tableau 2.2 résume l'évolution des paramètres photovoltaïques des cellules HIT en fonction des technologies introduites dans le procédé de fabrication.

D'après le tableau 2.2, une cellule composée d'une couche de Silicium dopé (n) (n-c-Si), et d'une couche mince de Silicium amorphe hydrogéné dopé (p) (p-a-Si :H), une couche antireflet (TCO) et un métal pour la collecte des porteurs de charges donne un rendement de 12,3% qui est largement inférieur au rendement d'une cellule conventionnelle.

L'ajout d'une couche de silicium amorphe hydrogéné intrinsèque (i-a-Si :H) entre la couche (p-a-Si :H) et la couche (n-c-Si) a amélioré les résultats obtenus. Un rendement de 14,8% est atteint. Le rôle de cette couche est de passiver les états d'interface silicium amorphe/cristallin.

Un autre succès est obtenu avec l'insertion des surfaces de texturation et de la base (BSF pour Back Surface Field). La texturation des surfaces aide à réduire la réflexion et par conséquent à faciliter l'absorption du rayonnement. Quant à la couche BSF, elle réduit les recombinaisons des porteurs de charges à l'arrière de la cellule. Dans ce cas, le rendement est augmenté jusqu'à 18,7%. L'ajout d'une deuxième couche de passivation à base de silicium intrinsèque a permis d'atteindre un rendement de 21.5 %.

Après des recherches de perfectionnement et d'optimisation des matériaux, et de la structure des cellules HIT (symétrisation de la cellule, double illumination), les rendements ont pu être encore améliorés par l'entreprise Sanyo (racheté par Panasonic) qui annonce une efficacité de 23% en 2009 [29].

Enfin, une efficacité de 26,7 % a été obtenue en mars 2017 pour une cellule HIT utilisant une approche de contacts arrière interdigités par Kaneka [32].

Tableau 2.2 : Evolution des performances de cellules HIT sur substrat N.

Substrat de type c-Si (n)	V _{oc} (mV)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)	Ref
ITO/a-Si :H(p)/c-Si(n)/métal	570	30.0	72.0	12.3	[30]
ITO/a-Si :H(p)/a-Si :H(i)/c-Si(n)/métal	600	33.5	74.0	14.8	[30]
ITO/a-Si :H(p)/a-Si :H(i)/c-Si(n)/BSF/métal+Texturation	638	37.9	77.5	18.7	[31]
ITO/a-Si :H(p)/a-Si :H(i)/c-Si(n)/ a-Si :H(i)/a-Si :H(n ⁺)/métal+Texturation	712	38.4	78.7	21.5	[32]
ITO/a-Si :H(p)/a-Si :H(i)/c-Si(n)/a-Si :H(n ⁺)/métal+Texturation+IBC ¹	738	42.65	84.9	26.7	[33]

La majorité de la production de cellules solaires à base de silicium cristallin (monocristallin et multicristallin) se base sur des technologies à homojonction de silicium. Cette technologie présente pourtant des limitations du rendement de conversion. En effet, l'insertion d'impuretés dopantes pour l'élaboration de l'émetteur, ainsi que le contact direct entre la métallisation et le silicium surdopé augmentent les phénomènes de recombinaisons de charges et limitent ainsi l'efficacité des cellules [34, 35].

Ainsi, pour s'affranchir de ces limitations, les structures à contacts passivés ont été développées. Ces structures visent à délocaliser la prise de contact grâce à l'introduction de couches passivantes entre le silicium et la métallisation. La plus connue reste l'hétérojonction de silicium qui bien que très performante (rendement de conversion > 25% [36]) et déjà industrialisée, peine à augmenter ses parts du marché car son procédé d'élaboration nécessite la création de nouvelles lignes de production. L'introduction de fines couches de silicium amorphe dopé permet la création de contact passivé mais rend la structure sensible aux températures supérieures à 250 °c. De plus ces structures intègrent des couches d'Oxydes Transparents Conducteurs OTC à base d'indium afin d'assurer une bonne collecte des porteurs de charge générés jusqu'à l'électrode. Or, le coût que représente l'indium, couplé à sa possible toxicité, représente un frein pour certains industriels [37]. Il semble alors nécessaire de développer des couches d'OTC pauvres en Indium, voire qui n'utilisent pas du tout ce matériau.

¹ Interdigitated Back Contacts

2.6. Le rôle de chaque couche dans la cellule hétérojonction de silicium HIT

Une cellule solaire HIT de type N standard est constituée d'une succession de couches représentées sur la figure 2.17. Nous allons dans ce qui suit détailler le rôle et les caractéristiques de chaque couche.

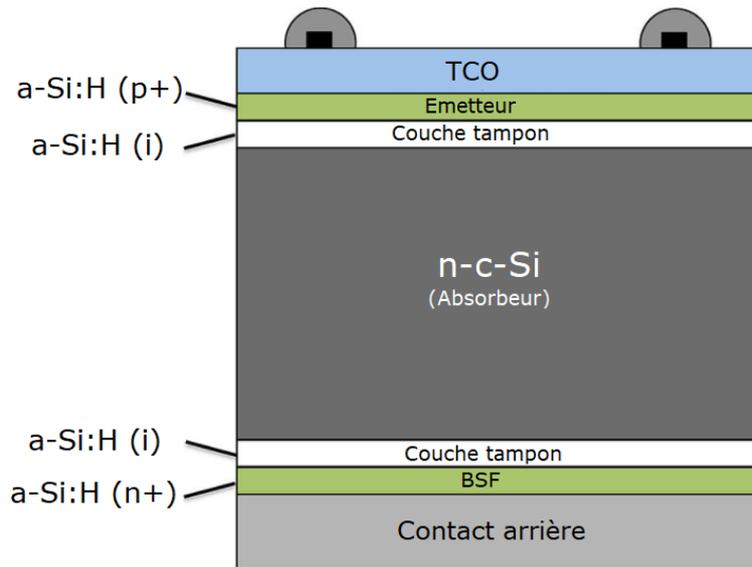


Figure 2.17 : Structure d'une cellule photovoltaïque HIT standard.

2.6.1 Les contacts métalliques

Les contacts sont en général déposés par sérigraphie [38]. Pour qu'un contact puisse assurer une forte conduction de charges, les doigts doivent être les plus larges, les plus hauts et les plus courts possible. Les doigts de sérigraphie possèdent une largeur minimale de 100 μm et une épaisseur de 10 μm à 20 μm permettant de conduire une forte densité de courant. La qualité de contact sur la surface avant dépend fortement du niveau de dopage en surface et du type de texturation. Pour réduire le taux d'ombrage sans engendrer une augmentation de la résistance série, il est nécessaire de diminuer leur hauteur. Pour cela, de nouvelles techniques utilisant des écrans de sérigraphie adaptés [39] ou des encres métalliques liquides sont en cours de développement [40]. Les concepts de contacts enterrés (Buried Contacts) [41] ou contacts déposés en biais (Angle Buried Contact) [42] pourraient également être adoptés par l'industrie.

2.6.2. La couche antireflet TCO

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

- ❖ 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.
- ❖ Une bonne conductivité pour assurer la collecte des porteurs.
- ❖ 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 : les oxydes de Zinc, les oxydes d'étain et les oxydes d'Indium qui peuvent être dopés avec un grand nombre d'éléments atomiques (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 d'excellentes propriétés : une transparence supérieure à 90% dans le spectre visible, une résistivité faible de $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ pour les meilleurs ITO, et une très bonne adhérence sur une multitude de substrats. Pour les cellules à contact arrière, les TCO en face avant sont remplacés par des matériaux qui joueront à la fois le rôle de couche antireflet et de couche de passivation [43]. Le nitrure de silicium (SiN_x) est généralement utilisé pour ce type de structure.

2.6.3. L'émetteur à base de Silicium amorphe hydrogéné

C'est une couche fine (quelques nanomètres) très résistive qui contribue à réduire considérablement le coût du PV car elle consomme moins de matériau et assure une économie thermique (faible température lors de sa fabrication ; environ 200°C par PECVD).

L'émetteur est connu pour son fort coefficient d'absorption et aussi pour la rapidité de sa réalisation (environ 2 minutes). Son rôle principal est la formation de la jonction P-N indispensable au transport et à la collecte des charges.

2.6.4. La couche tampon à base de silicium amorphe hydrogéné intrinsèque

Le silicium amorphe hydrogéné intrinsèque est déposé entre l'émetteur en silicium amorphe hydrogéné et le wafer de Silicium cristallin (c-Si). Son rôle est de permettre la passivation de l'interface a-Si :H/c-Si afin de limiter les recombinaisons au niveau cette jonction.

La couche de silicium amorphe hydrogéné intrinsèque est connue sous le nom de couche tampon car elle ne perturbe pas le champ électrique à l'interface. Elle diminue considérablement la densité des défauts au niveau de l'interface. Son épaisseur doit être contrôlée à cause de sa forte résistivité.

2.6.5. La couche active à base de silicium cristallin (c-Si)

La couche active, appelée aussi absorbeur, est la partie de la cellule photovoltaïque où les photons seront absorbés pour être convertis en paires électron-trou. Cette couche est réalisée à partir de wafer de silicium cristallin sur une épaisseur généralement de 300 μm . Le silicium cristallin étant un matériau qui présente peu de défauts, le taux de recombinaison y est faible, induisant une bonne génération de courant photogénéré.

2.6.6. Le Back Surface Field (BSF)

Le Back Surface Field 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. Cette couche BSF permet donc de réduire les recombinaisons sur la face arrière et d'assurer une meilleure collecte des porteurs de charges.

2.7. Conclusion

Les cellules à hétérojonction de silicium bénéficient des avantageuses propriétés du silicium cristallin et du silicium amorphe. Le silicium cristallin est un matériau bien maîtrisé par l'industrie, avec une structure cristalline bien arrangée, peu de défauts et une bonne mobilité des porteurs de charge dans la cellule. Les propriétés du silicium amorphe varient en fonction de la concentration d'hydrogène et de la position du niveau de Fermi. Le rôle de l'hydrogène dans le a-Si :H est multiple et complexe mais il offre l'avantage d'élargir la bande interdite et de réduire considérablement les défauts de coordination, spécialement les liaisons pendantes, en formant des liaisons Si-H.

De plus les différentes études qui ont été menées sur les cellules solaires à hétérojonction de silicium ont permis de mettre en relief les point forts suivants :

- L'émetteur amorphe présente une faible absorption grâce aux faibles épaisseurs de cette couches. La grande largeur de la bande interdite du silicium amorphe conduit à une structure de bandes adaptée.
- Le procédé de fabrication est réalisé à de faibles températures ($\sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$), ce qui induit un faible budget thermique en comparaison avec les cellules solaires mono-jonctions. Cela est

également bénéfique pour la durée de vie des porteurs minoritaires qui n'est pas dégradée dans les matériaux sensibles à des variations de températures importantes.

- Le procédé de fabrication est relativement simple.
- L'effet Staebler-Wronski concernant l'instabilité du silicium amorphe dopé n'est pas observé pour les cellules HIT.
- Les cellules HIT ont une meilleure tenue en température et répondent aux problèmes de manque de matière première étant donné que l'utilisation de substrats minces est possible (particulièrement grâce à la diminution du stress mécanique et thermique dû à la basse température d'élaboration)

Références du chapitre 2

[1] C. Hollemann, *et al.*, « 26.1%-efficient POLO-IBC cells: Quantification of electrical and optical loss mechanisms », *Prog Photovolt Res. Appl.* 26, 3 (2019).

[2] A. Mekemeche, « Modélisation à deux dimensions des propriétés physiques de cellules solaires au silicium à base de substrat de type n. Etude de quelques cas particuliers de cellules innovantes », Thèse de doctorat, Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem, 2017.

[3] W. G. J. H. M. van Sark, L. Korte, et F. Roca, « Physics and Technology of Amorphous-Crystalline Heterostructure Silicon Solar Cells », *Engineering Materials*, Vol. 0., Springer Berlin Heidelberg, 2012.

[4] O. Madani Ghahfarokhi, « Investigation of microcrystalline silicon emitters and DC sputtered ZnO: Al as front contact in silicon heterojunction solar cells », Thèse de doctorat, Université d'Oldenbourg, 2014.

[5] R.L. Anderson, « Germanium-Gallium Arsenide Heterojunctions » *IBM. J. Res. Dev.* 4, 283, 1960.

[6] Y. Veschetti, « Modélisation, caractérisation et réalisation de nouvelles structures photovoltaïques sur substrat de silicium minces », Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur Strasbourg I, 2005.

[7] D. Réaux, « Cellules photovoltaïques à hétérojonctions de silicium (a-Si:H/c-Si) : modélisation des défauts et de la recombinaison à l'interface », Thèse de doctorat, Université Paris-Saclay, France, 2017.

[8] V. Alex, S. Finkbeiner et J. Weber, « Temperature dependence of the indirect energy gap in crystalline silicon », *Journal of Applied Physics*, vol. 79, page 6943, 1996.

[9] P. Norton, T. Braggins et H. H. Levinstein, « Impurity and Lattice Scattering Parameters as Determined from Hall and Mobility Analysis in n-Type Silicon », *Physical Review B*, 1973.

[10] C. Canali, C. Jacoboni, G. Ottaviani et A. Alberigi-Quaranta, « High field diffusion of electrons in silicon », *Applied Physics Letters*, 1975.

- [11] G. Masetti, M. Severi et S. Solmi, « Modeling of carrier mobility against carrier concentration in arsenic-phosphorus, and boron-doped silicon », IEEE Transactions on Electron Devices, 1983.
- [12] C. Ngô, H. Ngô, « Physique des semiconducteurs », 4^{ème} édition Dunod, 2012.
- [13] R. A. Street, « Hydrogenated amorphous silicon », Cambridge Solid State Science, 1991.
- [14] P. G. Spear W. E. et Lecomber, « Substitutional doping of amorphous silicon », Solid State Communications, 1975.
- [15] R. C. Chittick, J. H. Alexander et H. F. Sterling, « The preparation and properties of amorphous silicon », Journal of The Electrochemical Society, 1969.
- [16] D. E. Carlson & C. R. Wronski, « Amorphous silicon solar cell », Applied Physics Letters, 28, 671, 1976.
- [17] J. Damon-Lacoste, « Vers une ingénierie de bandes des cellules solaires à hétérojonctions a-Si :H/c-Si. Rôle prépondérant de l'hydrogène », Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique de Paris, 2007.
- [18] M. Stutzmann, D. K. Biegelsen, « Microscopic nature of coordination defects in amorphous silicon », Physical Review B, 40, 9834, 1989.
- [19] M. Stutzmann, D. K. D. K. Biegelsen et R. A. Street, « Detailed investigation of doping in hydrogenated amorphous silicon and germanium », Physical Review B, 35, 5666, 1987.
- [20] K. Fukutani, M. Kanbe, W. Futako, B. Kaplan, T. Kamiya, C. Fortmann et I. Shimizu, « Band gap tuning of a-Si:H from 1.55 eV to 2.10 eV by intentionally promoting structural relaxation », Journal of Non-Crystalline Solids, 1988.
- [21] P. Roca i Cabarrocas, T. Nguyen-Tran, Y Djeridane, A Abramov, E. Johnson et G. Patriarche, « Synthesis of silicon nanocrystals in silane plasmas for nanoelectronics and large area electronic devices », Journal of Physics D: Applied Physics, 2007.
- [22] J.E. Bourée, P. Roca i Cabarrocas, « Cellules solaires en couches minces à base de silicium », Reflets de la physique, 2007.
- [23] S. K. Jamil Al-Ani, *et al.*, « The High Energy Region of the Absorption Edge of a-Si:H, a Theoretical Study » Materials Sciences and Applications, 3, 8, 2012.
- [24] K. Winer, « Defect formation in a-Si:H », Physical Review B, 1990.
- [25] M. J. Powell, S. C. Deane, « Improved defect-pool model for charged defects in amorphous silicon », Physical Review B, 88, 10815, 1993.
- [26] M. J. Powell, S. C. Deane, « Defect-pool model and the hydrogen density of states in hydrogenated amorphous silicon », Physical Review B, 1996.
- [27] R. A. Street, « Doping and the Fermi Energy in Amorphous Silicon », Physical Review Letters, 49, 1187, 1982.
- [28] R. A. Street, D. K. Biegelsen et J. C. Knights, « Defect states in doped and compensated a-Si:H », Physical Review B, 1981.

- [29] T. Kinoshita et al., « The Approaches for High Efficiency HITTM Solar Cell with Very Thin (<100 μm) Silicon Wafer over 23% », 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, pp 871 – 874, Hamburg, 2009.
- [30] T. Sawada, N. Tereda, S. Tsuge, T. Baba, T. Takahama, K. Wakisaka, S. Tsuda et S. Nakano, « High-efficiency a-Si:H/c-Si heterojunction solar cell », Proceedings of 1st WCPEC, Hawaii, 1994.
- [31] T. Takahama *et al.*, « High Efficiency Single and poly-crystalline Silicon Solar Cells using ACJ-HIT structure », 11th E.C. photovoltaics solar energy conference, Montreux, 1992.
- [32] M. Taguchi, A. Terakawa, E. Maruyaman, and M. Tanaka, « Obtaining a higher Voc in HIT cells », Prog. Photovolt Res. Appl. 13, 481–488, 2005.
- [33] K. Yoshikawa, H. Kawasaki, W. Yoshida, *et al.*, « Silicon heterojunction solar cell with interdigitated back contacts for a photoconversion efficiency over 26% » Nat Energ. 2:17032, 2017.
- [34] A. Richter, R. Müller *et al.*, « Design rules for high-efficiency both-sides-contacted silicon solar cells with balanced charge carrier transport and recombination losses », Nat Energy 6, 429–438 (2021).
- [35] P. P. Altermatt et K. R. McIntosh, « A Roadmap for PERC Cell Efficiency towards 22%, Focused on Technology-related Constraints », *Energy Procedia*, vol. 55, p. 17-21, 2014.
- [36] S. Saomoto, « World's Highest Conversion Efficiency of 26.33% Achieved in a Crystalline Silicon Solar Cell — A World First in a Practical Cell Size ». New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO) ; Kaneka Corporation, 2016.
- [37] T. Minami, « Transparent conducting oxide semiconductors for transparent electrodes », *Semicond. Sci. Technol.*, vol. 20, no 4, p. S35, 2005.
- [38] A. Dziedzic, J. Nijs, J. Szlufcik, « Thick-film Fine line Fabrication Techniques Application to Front Metallization of Solar Cells », *Hybrid circuits*, N°30, 1993.
- [39] B. Raabe, F. Huster, M. McCann, P. Fath, « High aspect ratio screen printed fingers », Proceedings of 20st European PV Solar Energy Conference, Barcelona, 2005.
- [40] S. Xinjie Sun *et al.*, « Mechanism of silver/glass interaction in the metallization of crystalline silicon solar cells », *Mater. Res. Express* 7, 016315, 2020.
- [41] J. Arumughan, T. Pernau, A. Hauser, I. Melnyk, « Simplified edge isolation of buried contact solar cells », *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 87, 1–4, p. 705, 2005.
- [42] M. McCann, « Angle Buried Contact: A front contacting scheme for high efficiency cells with low shading losses », Proceedings of 20st European PV Solar Energy Conference, Barcelona, 2005.
- [43] L. Basset, « Contact electrodes for heterojunction silicon solar cells: Evaluations and optimizations of the electron contact ». Thèse de doctorat, spécialité : Micro et Nanotechnologies, Acoustique et Télécommunications, Université de Lille, 2020.

CHAPITRE 3

OPTIMISATION DE LA STRUCTURE A HETEROJONCTION DE SILICIUM HIT DE TYPE N

CHAPITRE 3

OPTIMISATION DE LA STRUCTURE A HETEROJONCTION DE SILICIUM HIT DE TYPE N

3.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser à l'optimisation par simulation de la cellule solaire à hétérojonction de silicium HIT de type N, ayant la structure : ITO/p-a-Si :H/i-a-Si :H/n-c-Si/BSF/Al, afin d'obtenir un rendement optimal dépassant le record de 26.7% établi en 2017 [1] et qui n'a toujours pas été dépassé jusqu'à présent. Nous allons également étudier et analyser les phénomènes de génération, de recombinaisons et de transport, responsables de la performance de la cellule étudiée.

Nous présenterons la structure de la cellule à modéliser et à optimiser, en détaillant les propriétés des différentes couches utilisées comme paramètres d'entrée dans la simulation. Pour réaliser nos simulations, nous utiliserons dans un premier temps le logiciel ASDMP (Amorphous Semiconductor Device Modeling Program) afin d'optimiser l'émetteur à base de silicium amorphe hydrogéné dopé P, ensuite nous modéliserons la même cellule en utilisant le logiciel SCAPS-1D (Solar Cell Capacitance Simulator one Dimension) version 3.3.10 afin de vérifier l'équivalence des deux logiciels. Nous poursuivrons par la suite l'optimisation des couches restantes (Couche de passivation, Absorbeur, BSF). Nous présenterons les résultats obtenus et discuterons l'influence des différents paramètres sur la performance de la cellule étudiée. Physiquement, ces paramètres sont très corrélés, toutefois nous avons fait varier ces paramètres indépendamment de façon à pouvoir estimer et comprendre leur impact sur les caractéristiques de sortie de la cellule.

3.2. Présentation de la cellule

La cellule solaire HIT à hétérojonction de silicium avec couche de passivation, qui fait l'objet de notre travail, est représentée sur la figure 3.1. Elle est constituée des couches suivantes :

- Une couche d'Oxyde Transparent Conducteur (TCO : Transparent Conductive Oxide) à base d'ITO (Indium Tin Oxide) permettant d'établir le contact entre le silicium amorphe dopé

et les contacts métalliques. Elle a pour effet de limiter les pertes par résistance et joue également le rôle d'une couche anti-réfléchissante

- Une couche de silicium amorphe hydrogéné dopé P pour constituer l'émetteur (p-a-Si :H).
- Une couche tampon composée de silicium amorphe hydrogéné intrinsèque (i-a-Si :H) dont l'épaisseur et l'énergie du gap seront optimisées. Cette couche intrinsèque représente la spécificité des cellules HIT. Elle permet de passiver les défauts de surface existant à l'interface p-a-Si :H/n-c-Si.
- Une couche active (absorbeur) à base de silicium cristallin dopé N (n-c-Si) pour laquelle l'influence de l'épaisseur, de la densité de dopage et de la densité de défauts est étudiée.
- Une couche BSF (Back Surface Field) à base de silicium fortement dopée n^{++} -c-Si qui constitue la face arrière de la cellule. Cette couche génère un champ électrique sur la face arrière repoussant les porteurs minoritaires vers la base et permettant ainsi une meilleure collecte des porteurs photogénérés. Les paramètres géométriques et électriques de cette couche sont également étudiés et optimisés.

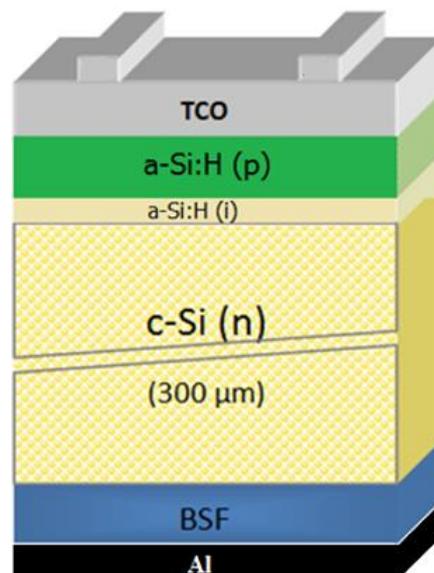


Figure 3.1 : L'hétérostructure ITO/p-a-Si :H/i-a-Si :H/n-c-Si/BSF/Al utilisée dans nos simulations.

Tableau 3.1 : Paramètres caractéristiques de la cellule HIT étudiée [2-4].

	ITO	p-a Si:H	i-a-Si :H	n-c-Si	n-c-Si	BSF
Epaisseur W	84,5nm	110Å	30 Å	32 Å	298.9968 µm	1 µm
Energie de gap E_g (eV)		1,8	1,9	1,12	1,12	1,12
Densité de dopage des donneurs N_D (cm^{-3})		0	0	9.10^{14}	9.10^{14}	5.10^{18}
Densité de dopage des accepteurs N_A (cm^{-3})		2.10^{19}	0	0	0	0
Affinité électronique χ (eV)		3,9	3,95	4,22	4,22	4,22
Permittivité relative ϵ		11.9	11.9	11.9	11.9	11.9
Densité de défauts donneurs N_{DTOT} (cm^{-3})		1.10^{19}	7.10^{14}	$1.7.10^{18}$	3.10^{11}	3.10^{11}
Densité de défauts accepteurs N_{ATOT} (cm^{-3})		1.10^{19}	7.10^{14}	$1.7.10^{18}$	3.10^{11}	3.10^{11}
Vitesse thermique V_{th} (cm/s)		10^7	10^7	10^7	10^7	10^7
Mobilité des électrons μ_n (cm^2/Vs)		20	30	1000	1000	1000
Mobilité des trous μ_p (cm^2/Vs)		4	12	450	450	450
Densité d'états effective dans la BC N_C (cm^{-3})		1.10^{19}	2.10^{20}	5.10^{18}	5.10^{18}	5.10^{18}
Densité d'états effective dans la BV N_V (cm^{-3})		1.10^{19}	2.10^{20}	5.10^{18}	5.10^{18}	5.10^{18}

La vitesse thermique v_{th} des électrons est la même que celle des trous pour toutes les couches qui constituent la cellule. En utilisant la relation 3.1, cette vitesse est égale à 10^7 cm/s pour une température $T=300K$.

$$\frac{m_e v_{th}^2}{2} = \frac{3k_B T}{2} \quad (3.1)$$

3.3. Optimisation de l'émetteur (p-a-Si :H)

Dans le but d'optimiser les paramètres géométriques, électriques et optiques de l'émetteur, nous avons effectué une série de simulations sur notre cellule, en utilisant le logiciel ASDMP. Nous avons d'abord travaillé avec les paramètres donnés dans le tableau 3.1 afin d'obtenir les caractéristiques de la cellule (Densité de courant de court-circuit J_{SC} , tension de circuit ouvert V_{OC} , Facteur de Forme FF et le rendement de conversion η). Ensuite, nous avons étudié et optimisé l'effet de l'épaisseur, de l'énergie de gap et la densité de dopage du silicium amorphe hydrogéné dopé p constituant l'émetteur sur les paramètres photovoltaïques de la cellule.

3.3.1. Effet de l'épaisseur de l'émetteur sur la performance de la cellule

Nous avons fait varier l'épaisseur de l'émetteur de 50Å à 230Å en fixant le gap à 1.8eV et la densité de dopage à $2.10^{19} \text{ cm}^{-3}$. Nous avons tracé la variation des paramètres photovoltaïques en fonction de l'épaisseur de l'émetteur et nous avons obtenus les courbes de la figure 3.2.

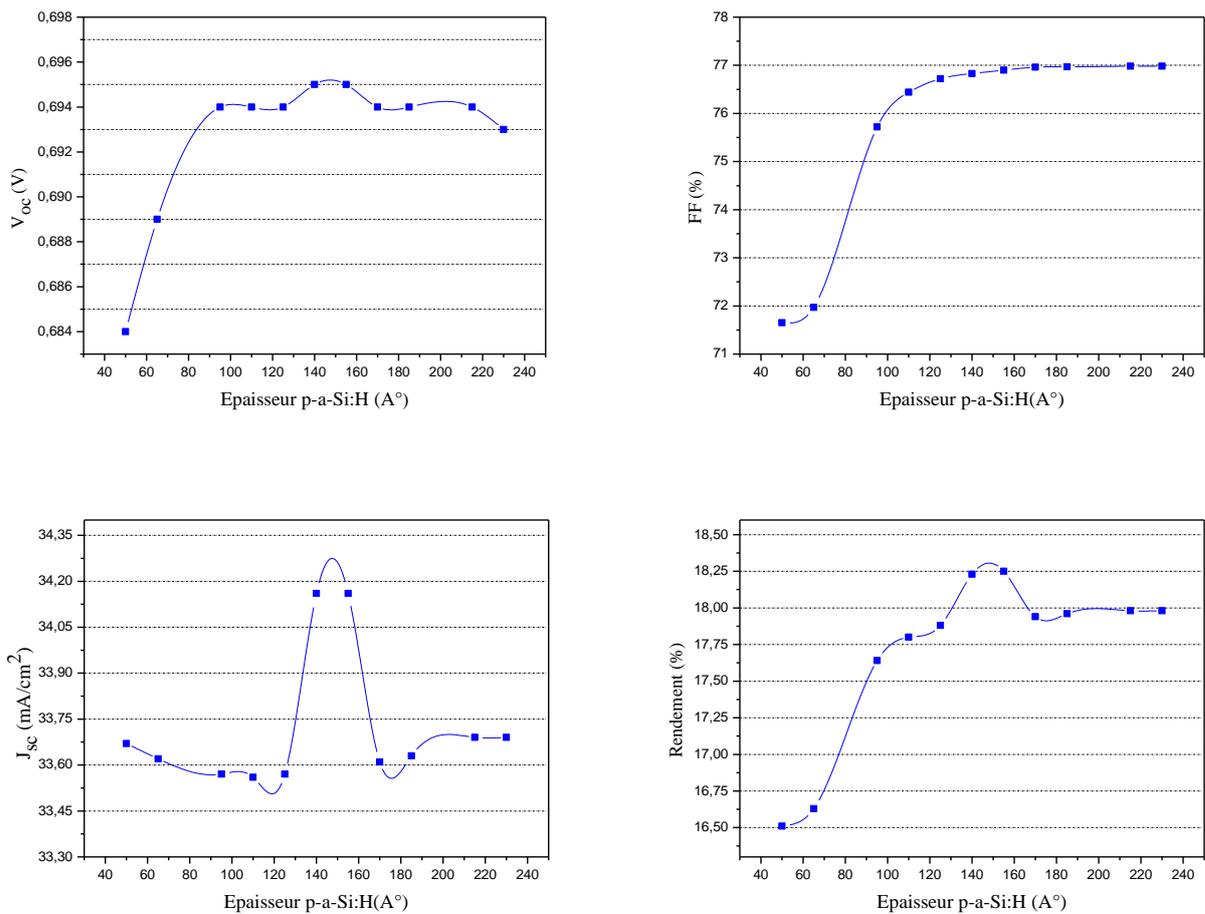


Figure 3.2 : Variation des paramètres PV en fonction de l'épaisseur de l'émetteur.

D'après la figure 3.2, nous observerons un pic de la densité de courant de court-circuit, lorsque l'épaisseur de l'émetteur varie entre 140 Å et 155 Å d'épaisseur. Cela peut être expliqué par un compromis entre une bonne absorption de la lumière dans la couche active n-c-Si et un bon potentiel de diffusion engendré.

La faible densité de courant observée pour des épaisseurs inférieures à 140Å est due au faible potentiel induit résultant du faible champ électrique créé au niveau de la jonction, occasionnant une baisse de séparation et de la collecte des porteurs. Pour des valeurs de l'épaisseur supérieures à 155Å, la densité de courant de court-circuit diminue de nouveau, car les porteurs photogénérés doivent parcourir des distances plus grandes que leurs longueurs de diffusion, et seront plus susceptibles de se recombiner avant d'être collectés. Le rendement suit la même tendance que la densité de courant de court-circuit.

Afin vérifier le faible potentiel induit pour les faibles épaisseurs de l'émetteur, nous avons tracé sur la figure 3.3 le champ électrique généré au niveau de la jonction p-a-Si :H/n-c-Si pour différentes valeurs de l'épaisseur de l'émetteur (50Å, 155Å, 230Å).

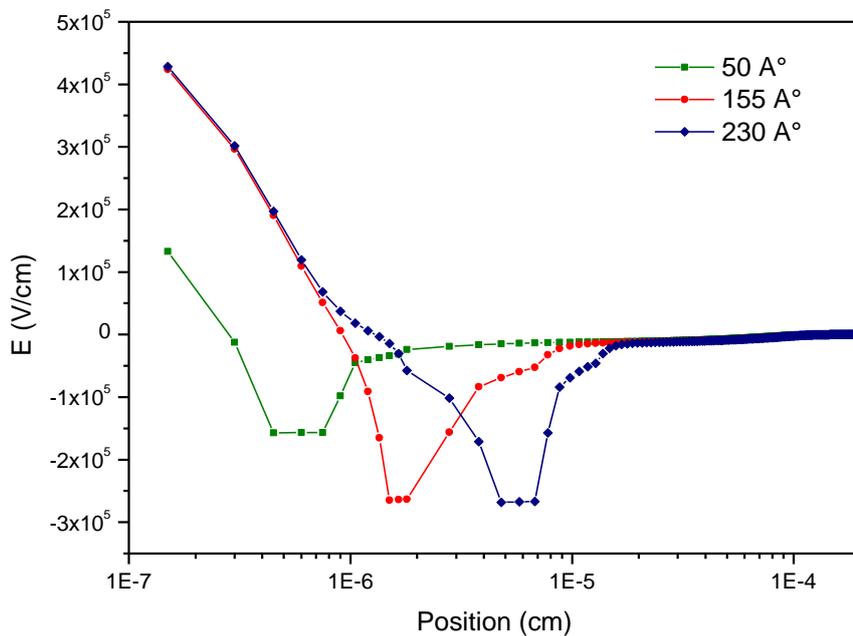


Figure 3.3 : Champ électrique dans la zone de déplétion en fonction de la position dans le dispositif pour 3 épaisseurs de l'émetteur (50Å, 155Å, 230Å).

Les courbes obtenues sont en accord avec l'interprétation donnée précédemment. En effet, plus l'épaisseur de l'émetteur est petite, plus le champ électrique est faible, conduisant à une

réduction de la tension en circuit ouvert, comme nous pouvons le constater sur la figure 3.2. Ce faible champ électrique engendre une faible séparation des paires électron/trou induisant une diminution de la collecte des porteurs minoritaires photogénérés, qui ne peuvent pas atteindre la zone où ils sont majoritaires pour être collectés.

Sur la figure 3.4, nous avons tracé le taux de recombinaison en fonction de la position dans la cellule pour les trois épaisseurs de l'émetteur.

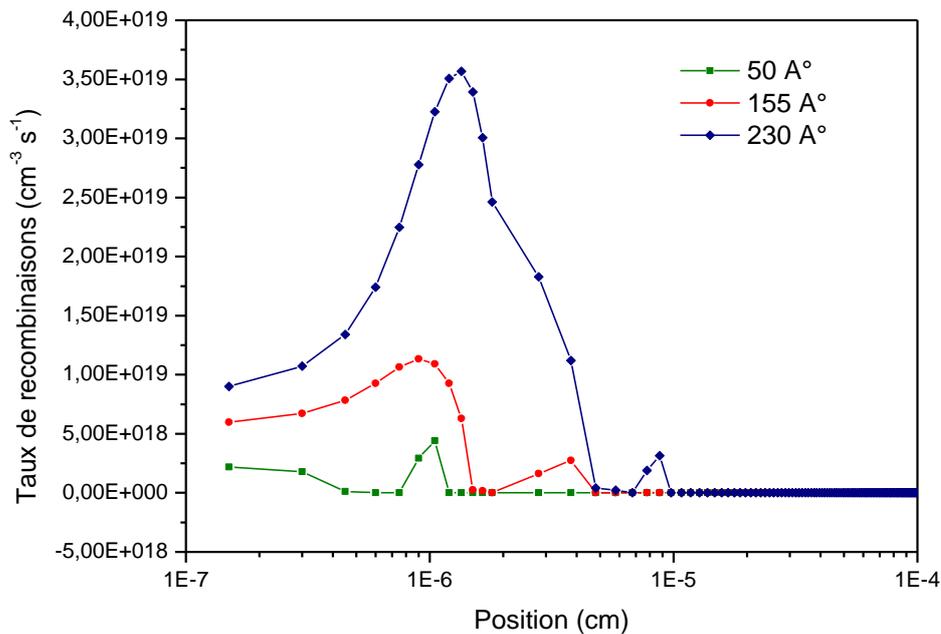


Figure 3.4 : Taux de recombinaison en fonction de la position dans le dispositif pour 3 épaisseurs de l'émetteur (50Å, 155Å, 230Å).

Nous pouvons constater à partir de la figure 3.4 que plus l'épaisseur de l'émetteur augmente, plus le taux de recombinaison est important. Ces résultats s'expliquent par le fait que la longueur de diffusion des porteurs photogénérés devient faible par rapport à l'épaisseur de l'émetteur, et par conséquent, les porteurs de charges se recombinent avant d'être collectés. Par ailleurs la grande densité de défauts qui existe dans le silicium amorphe hydrogéné contribue grandement à ce fort taux de recombinaison lorsque l'épaisseur de la couche p-a-Si:H augmente [4].

3.3.2. Choix du meilleur matériau constituant l'émetteur selon son énergie de gap

Nous allons dans ce qui suit nous intéresser à l'énergie de gap du matériau utilisé pour l'élaboration de l'émetteur avec une épaisseur optimisée de 155 Å, et une densité de dopage de

$2.10^{19} \text{ cm}^{-3}$. Nous avons à cet effet fait varier l'énergie de gap de l'émetteur de 1.6eV (Silicium amorphe faiblement hydrogéné) [5] à 2 eV (Nitrure de silicium amorphe hydrogéné (a-SiNx :H) [6]. Le tableau 3.2 regroupe les différents gaps des matériaux que nous avons utilisés.

Tableau 3.2 : Différents matériaux de gaps différents pour l'élaboration de l'émetteur.

Les matériaux	a-Si :H faiblement hydrogéné	a-Si :H	a-SiC :H	pm-Si :H	a-SiNx :H
L'énergie de gap (eV)	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0
Références	[5]	[7]	[7]	[8]	[6]

La figure 3.5 représente la variation des paramètres photovoltaïques en fonction du gap de l'émetteur.

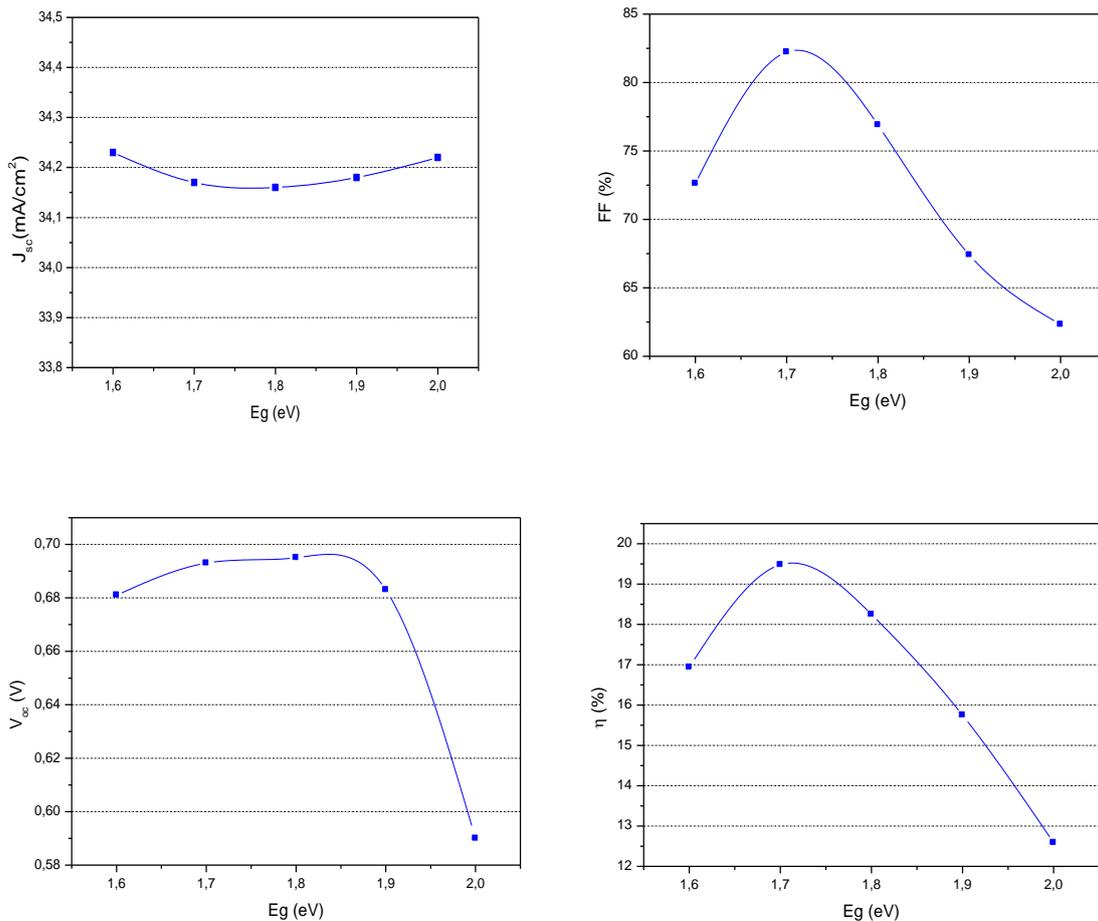


Figure 3.5 : Variation des paramètres photovoltaïques en fonction du gap de l'émetteur.

Nous pouvons remarquer que la performance de la cellule est détériorée pour une énergie de gap faible (1.6 eV) puis commence à s'améliorer lorsque l'énergie du gap augmente jusqu'à obtenir un rendement maximal de 19.48 % pour un gap de 1.7 eV. Cependant, pour des valeurs de gap supérieures à 1.7 eV le rendement décroît considérablement jusqu'à atteindre 12.50 % pour un gap 2 eV.

Afin de comprendre ces résultats, nous avons tracé sur la figure 3.6 le champ électrique engendré au niveau de la jonction p-a-Si :H/n-c-Si pour 3 gaps différents (1.6 eV, 1.7 eV, 2 eV). Nous pouvons constater que le champ électrique augmente avec l'augmentation du gap du matériau.

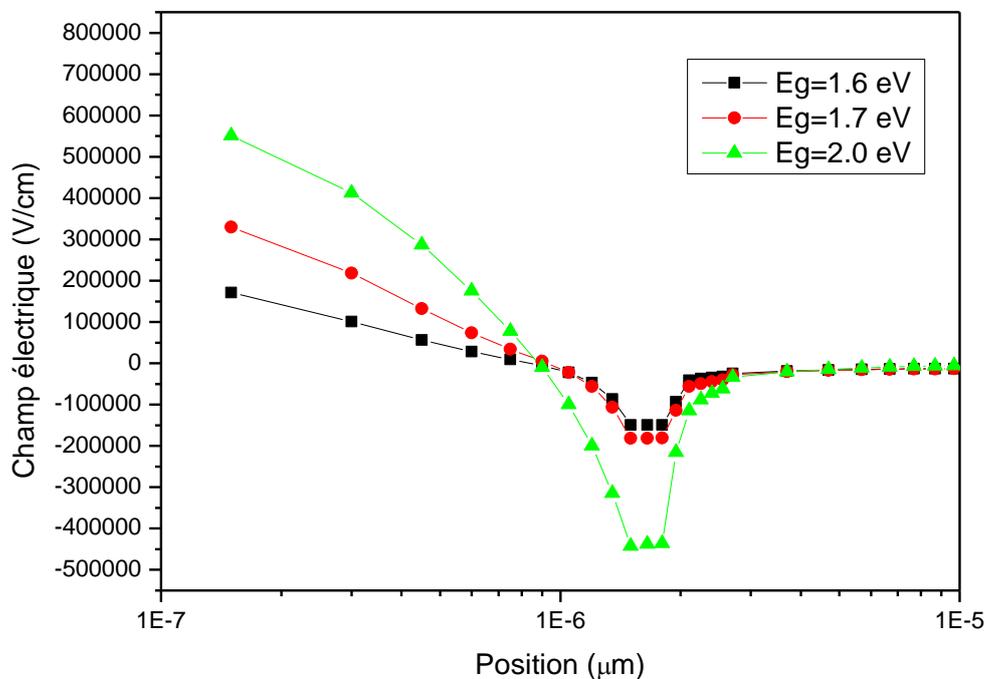


Figure 3.6 : Champ électrique dans la zone de déplétion en fonction de la position dans le dispositif pour 3 énergies de gap de l'émetteur (1.6 eV, 1.7 eV, 2 eV).

Cependant, malgré l'augmentation du champ électrique, nous constatons que le rendement de la cellule étudiée est amoindri pour de grandes énergies de gap. Afin de comprendre pourquoi le rendement de la cellule n'augmente plus avec l'augmentation du champ électrique, nous avons tracé sur la figure 3.7 le diagramme de bande de la cellule pour 3 différents gaps de l'émetteur (1.6 eV, 1.7 eV, 2 eV).

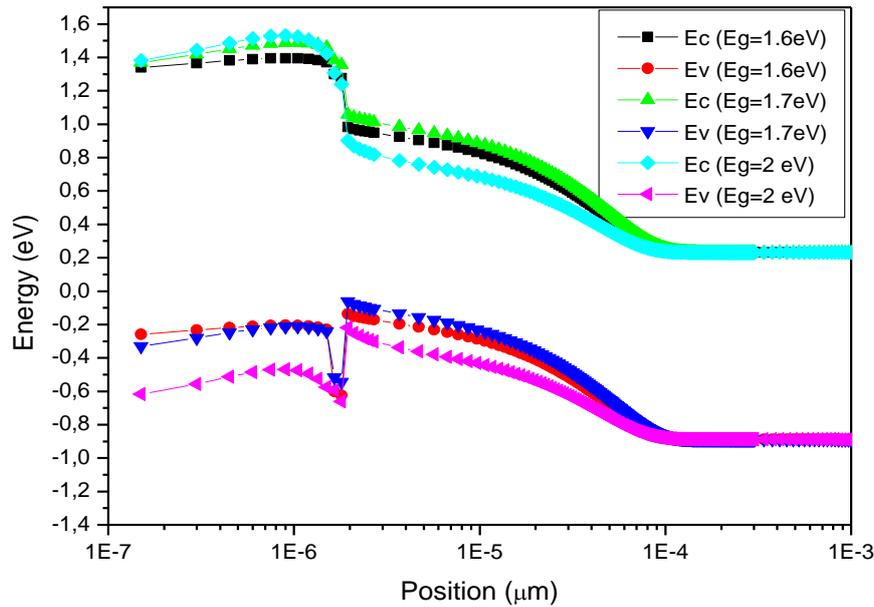


Figure 3.7 : Diagramme de bandes de la face avant de cellule étudiée pour 3 différents gaps de l'émetteur.

Nous pouvons clairement constater que l'augmentation de l'énergie du gap induit une barrière de potentiel dans la bande de valence au niveau de l'interface (ITO/p-a-Si :H). Cette barrière bloque le passage des trous photogénérés de l'émetteur vers les contacts avant, augmentant ainsi le taux de recombinaisons dans la face avant de la cellule [9].

Pour confirmer cela, nous avons tracé sur la figure 3.8 le taux de recombinaisons au niveau de la face avant de la cellule pour 3 énergies de gap de l'émetteur (1.6 eV, 1.7 eV, 2 eV).

Les courbes obtenues confirment bien l'interprétation donnée précédemment, car le taux de recombinaisons diminue lorsque le gap passe 1.6 eV à 1.7 eV (grâce à l'augmentation du champ électrique induit), puis augmente largement lorsque le gap passe de 1.7 eV à 2 eV à cause de la barrière de potentiel engendrée par l'élargissement de la bande interdite. La variation du taux de recombinaisons est particulièrement prononcée au niveau du contact avant de la cellule.

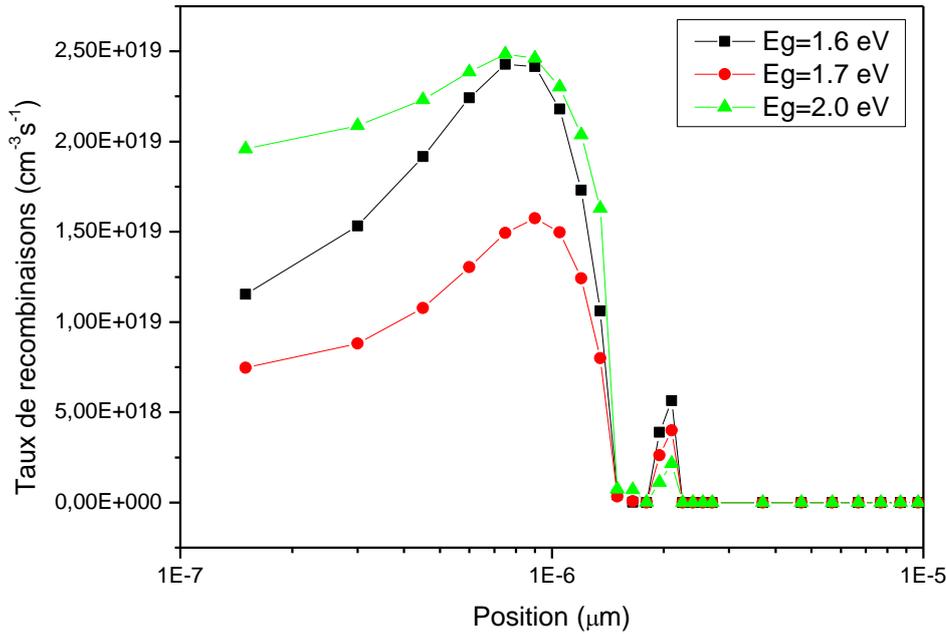


Figure 3.8 : Taux de recombinaisons en fonction de la position dans le dispositif pour 3 gaps de l'émetteur.

3.3.3. Optimisation de la densité de dopage de l'émetteur

Dans le but de mettre en évidence l'importance de la densité de dopage de l'émetteur sur l'efficacité de la cellule, nous avons fait varier la densité de dopage N_A du silicium amorphe hydrogéné dopé P de 10^{19} cm^{-3} à 10^{20} cm^{-3} , avec un gap optimisé de 1.7 eV et une épaisseur optimisée de 155 Å. Nous avons tracé la variation des paramètres photovoltaïques en fonction de la densité de dopage sur la figure 3.9.

Les graphes obtenus nous permettent de constater qu'à partir d'une densité de dopage de l'émetteur de $3 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, tous les paramètres photovoltaïques se stabilisent. Nous avons ainsi obtenu ainsi un rendement de maximal de 19.85% à partir d'une densité de dopage de $4 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$.

Cela peut être expliqué par le fait qu'il y a un équilibre qui s'opère entre l'augmentation du champ électrique généré qui améliore la performance de la cellule et l'augmentation du taux de recombinaison qui détériore le rendement de la cellule.

En effet, comme nous pouvons le constater sur la figure 3.10., l'augmentation de la densité de dopage de l'émetteur engendre un fort champ électrique créée au niveau de la jonction p-a-Si :H/n-c-Si.

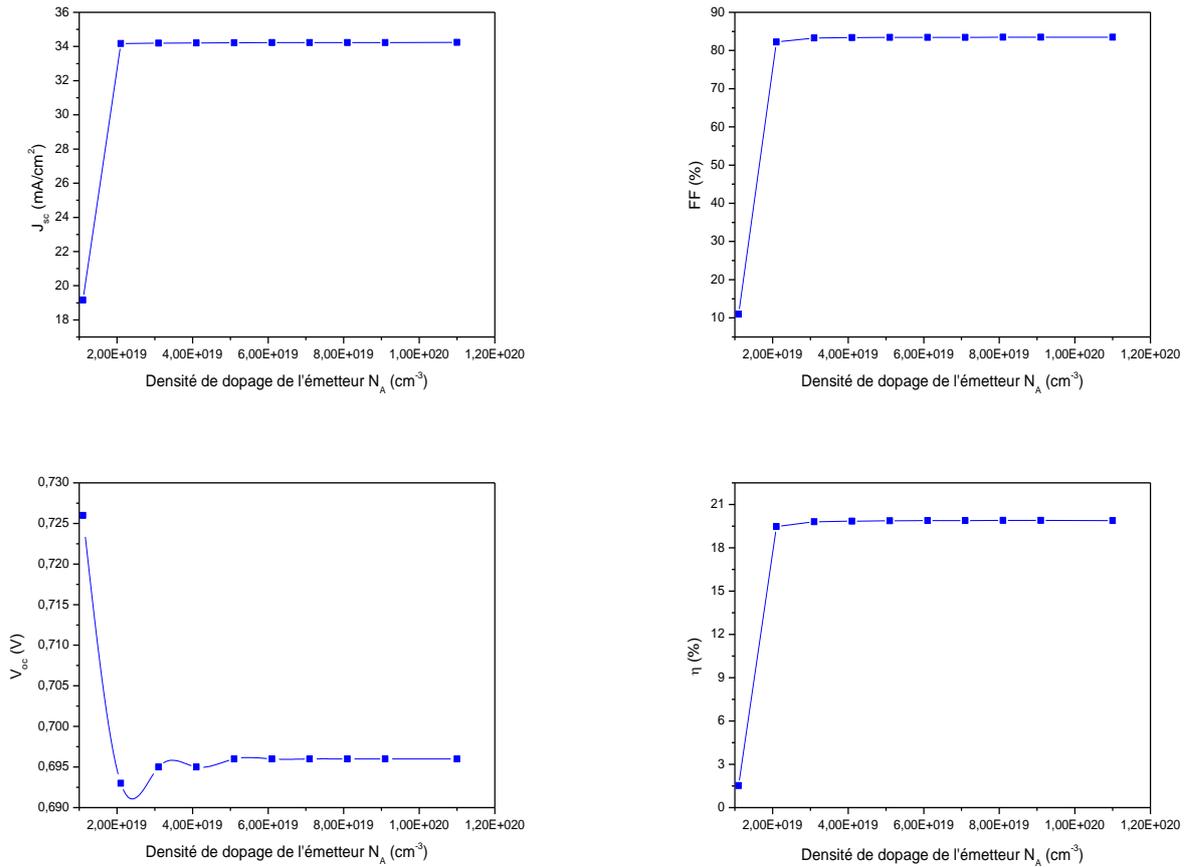


Figure 3.9 : Variation des paramètres photovoltaïques en fonction de la densité de dopage de l'émetteur.

D'un autre côté, les porteurs de charges se recombinent plus lorsque l'émetteur est fortement dopé. En effet, l'augmentation de la densité de dopage du silicium amorphe hydrogéné revient à introduire des impuretés et par conséquent plus de défauts, ce qui crée des centres recombinants supplémentaires et augmente ainsi le taux de recombinaison que nous avons représenté sur la figure 3.11.

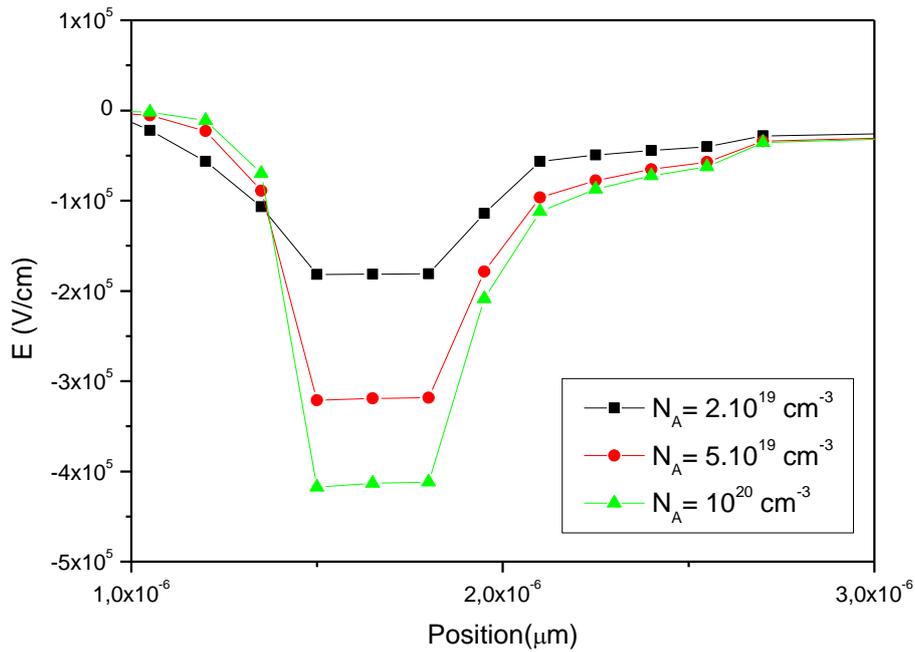


Figure 3.10 : Champ électrique au niveau de la jonction p-a-Si :H/n-c-Si pour 3 densités de dopage de l'émetteur ($2.10^{19} \text{ cm}^{-3}$, $5.10^{19} \text{ cm}^{-3}$ et 10^{20} cm^{-3}).

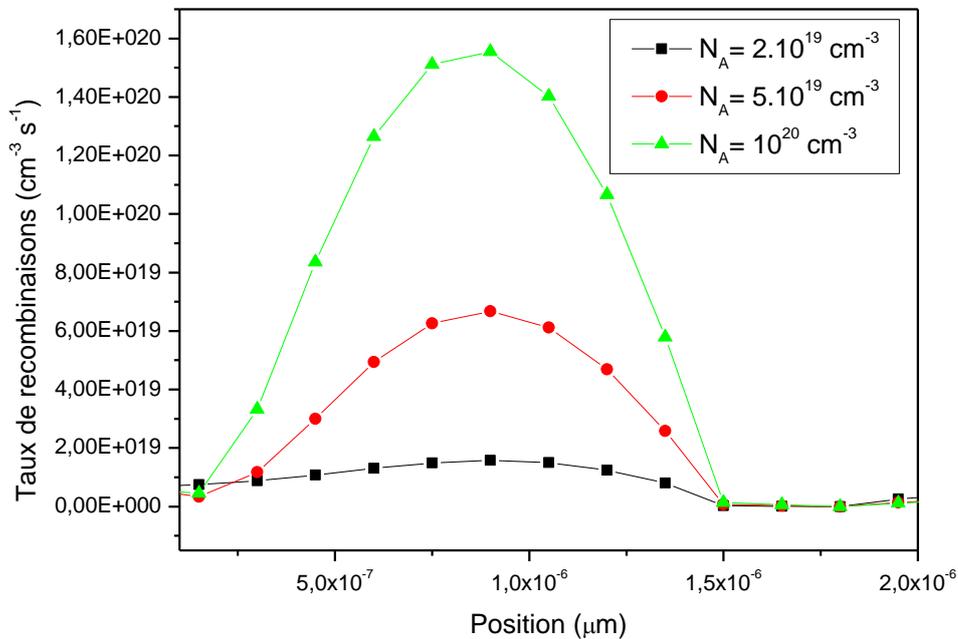


Figure 3.11 : Taux de recombinaisons en fonction de la position dans le dispositif pour 3 densités de dopage de l'émetteur ($2.10^{19} \text{ cm}^{-3}$, $5.10^{19} \text{ cm}^{-3}$ et 10^{20} cm^{-3}).

Les paramètres optimisés de l'émetteur sont résumés dans le tableau 3.3.

Tableau 3.3 : Les paramètres optimisés de l'émetteur.

Epaisseur (nm)	E_g (eV)	N_D (cm^{-3})	N_A (cm^{-3})	χ (eV)	N_t (cm^{-3})	μ_n (cm^2/Vs)	μ_p (cm^2/Vs)	N_C (cm^{-3})	N_V (cm^{-3})	ε	V_{th} (cm/s)
15.5	1.7	0	4.10^{19}	3.9	1.10^{19}	20	4	1.10^{19}	1.10^{19}	11.9	10^7

3.4. Optimisation de la couche de passivation intrinsèque i-a-Si :H

Afin d'éviter les recombinaisons à l'interface silicium amorphe/silicium cristallin, induites par les liaisons pendantes à la surface du cristal, une couche de passivation est ajoutée au niveau de cette interface. Dans les cellules solaires à hétérojonction HIT, la passivation des liaisons pendantes à la surface du cristal s'effectue grâce à l'hydrogène par l'ajout d'une couche mince de silicium amorphe hydrogéné intrinsèque. La réalisation de ce type de couches nécessite un faible budget thermique puisque le dépôt est généralement effectué par PECVD à une température aux alentours de 200°C.

Dans ce qui suit, nous allons choisir le matériau adéquat pour l'élaboration de la couche intrinsèque, qui est réalisée à base de silicium amorphe hydrogéné, en optimisant son épaisseur et son énergie de gap. Toutes les simulations qui suivent ont été réalisées par le logiciel SCAPS-1D.

3.4.1. Effet de l'épaisseur de la couche de passivation sur la performance de la cellule

Dans le but d'optimiser cette couche de passivation, nous avons fixé dans un premier temps l'énergie de gap du silicium amorphe hydrogéné à 1.9 eV et nous avons modifié son épaisseur de 1 nm à 20 nm. Nous avons tracé la variation des paramètres PV en fonction de l'épaisseur de la couche de passivation, et nous avons obtenu les courbes de la figure 3.12.

Nous remarquons que la densité de courant de court-circuit J_{sc} , le Facteur de Forme FF et le rendement de conversion η diminuent considérablement lorsque l'épaisseur de la couche tampon (i-a-Si :H) passe de 1 nm à 20 nm, alors que la tension en circuit ouvert augmente sensiblement mais reste quasiment aux alentours de 0.66 V.

Bien que le rôle de cette couche soit principalement d'éliminer les défauts présents à l'interface p-a-Si :H/n-c-Si, nous remarquons que l'augmentation de son épaisseur influe négativement sur la performance de la cellule. En effet, le rendement de conversion passe de 20% pour une épaisseur de 1 nm à 11 % lorsque l'épaisseur est de 20 nm. Il est donc important

de bien contrôler l'épaisseur de la couche intrinsèque qui doit être de l'ordre de quelques nanomètres.

Pour comprendre pourquoi une forte épaisseur de cette couche de passivation dégrade la qualité de la cellule, nous avons tracé sur la figure 3.13 le champ électrique, en fonction de la position dans la cellule, généré au niveau de la jonction p-a-Si :H/n-c-Si pour deux différentes valeurs de l'épaisseur de la couche de passivation (3 nm et 20 nm).

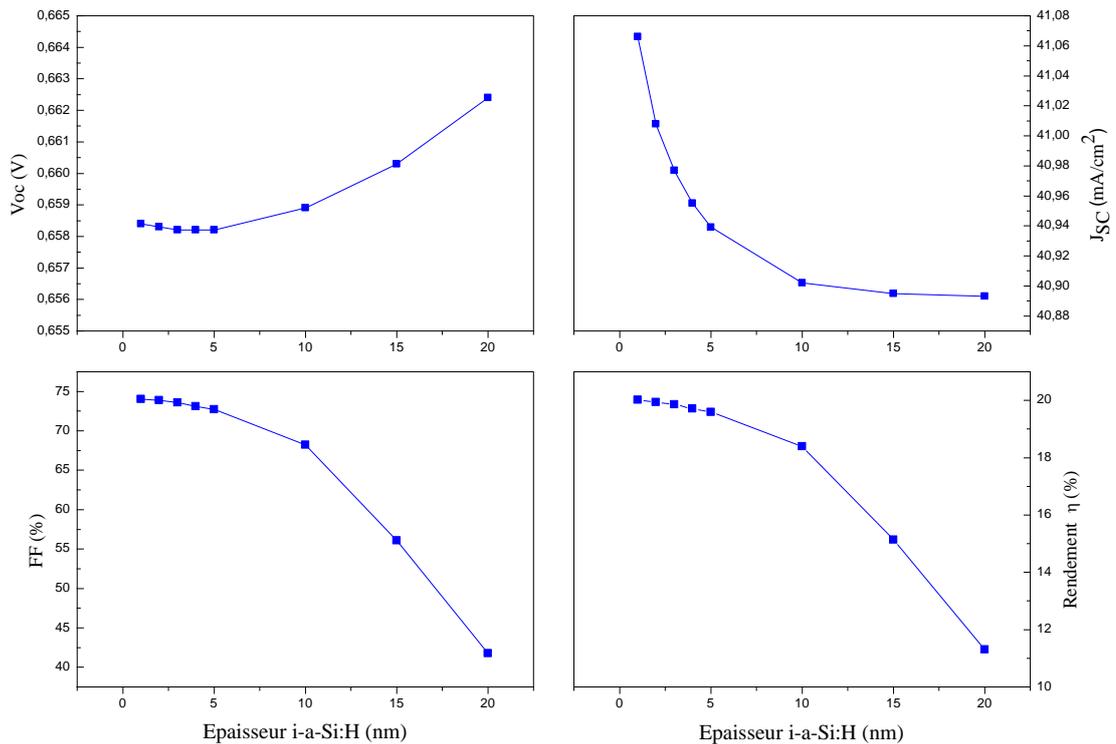


Figure 3.12 : Variation des paramètres photovoltaïques en fonction de l'épaisseur de la couche de passivation (i-a-Si :H).

Les courbes obtenues sur la figure 3.13 montrent que pour une faible épaisseur de la couche intrinsèque (3 nm), un champ électrique puissant est observé au niveau de la jonction PN (p-a-Si :H/n-c-Si), et par conséquent, une meilleure séparation des porteurs de charges photogénérés est obtenue engendrant ainsi une baisse du taux de recombinaison et une performance améliorée de la cellule.

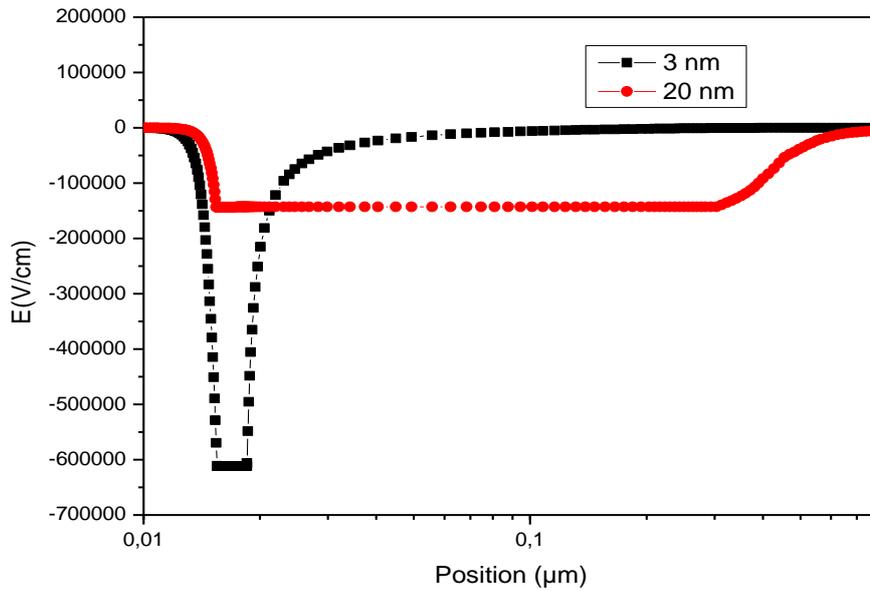


Figure 3.13 : Champ électrique induit au niveau de l'interface p-a-Si :H/n-c-Si en fonction de la position pour deux épaisseurs de la couche de passivation (3nm et 20nm).

Pour confirmer l'interprétation donnée précédemment, nous avons tracé sur la figure 3.14 le taux de recombinaison en fonction de la position dans la cellule pour les deux épaisseurs de la couche de passivation. Nous distinguons clairement que le taux de recombinaison est plus important lorsque l'épaisseur de la couche intrinsèque augmente. Ces résultats peuvent s'expliquer par la distance plus importante que doivent parcourir les porteurs photogénérés par rapport à leur longueur de diffusion lorsque la couche de passivation est plus épaisse.

De plus, le silicium amorphe ayant un fort coefficient d'absorption, il est plus intéressant d'avoir une fine couche afin d'éviter les pertes d'absorption et de permettre à la couche active d'absorber le maximum de photons incidents. La densité de défauts qui existe dans le silicium amorphe hydrogéné participe également au fort taux de recombinaison constaté lorsque l'épaisseur de la couche tampon augmente.

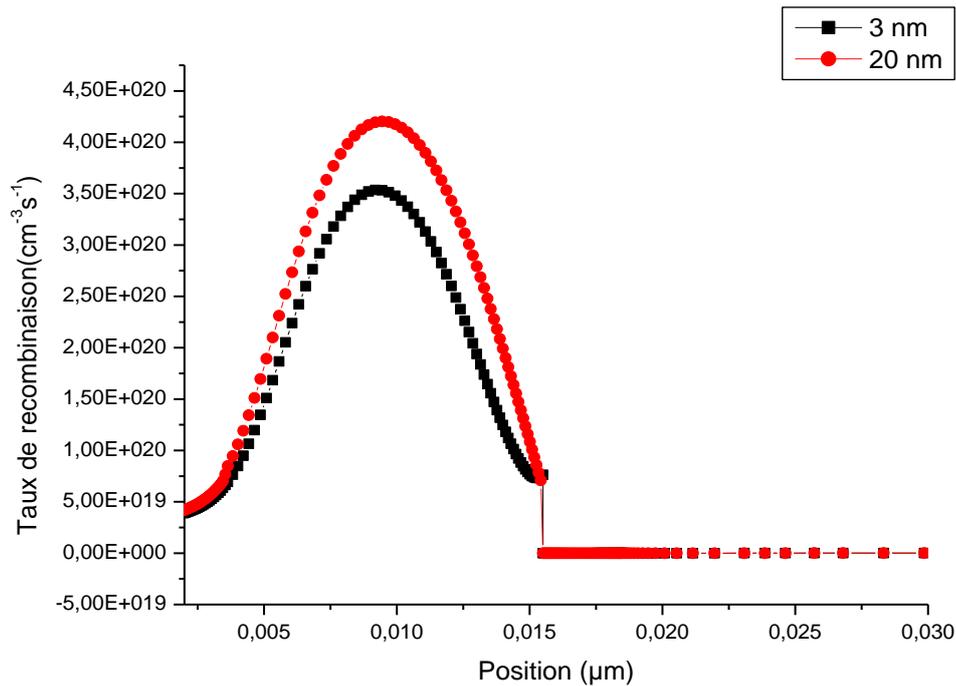


Figure 3.14 : Taux de recombinaison à l'interface p-a-Si :H/n-c-Si en fonction de la position pour deux épaisseurs de la couche de passivation (3nm et 20nm).

Nous avons choisi de fixer la valeur optimale de l'épaisseur de la couche tampon à 3 nm pour la suite de nos simulations en nous appuyant sur des études expérimentales qui montrent qu'il est possible d'obtenir des couches ultraminces de silicium amorphe hydrogéné par la technique PECVD ayant une épaisseur de plus de 3 nm [10, 11, 12]. De plus, R.W.Collins *et al.* [13] ont montré que lorsque l'épaisseur de la couche mince est réduite, le degré de l'ordre structural augmente, ce qui implique une meilleure passivation.

3.4.2. Effet du gap de la couche de passivation sur la performance de la cellule

Nous allons maintenant nous intéresser à l'effet du gap de la couche de passivation sur l'efficacité de la cellule. Comme cette couche est élaborée à base de silicium amorphe, nous avons fait varier l'énergie de gap de 1.6 eV à 2 eV, tout en fixant l'épaisseur à 3 nm.

Nous avons tracé la variation des paramètres PV en fonction de l'énergie du gap de la couche de passivation et nous avons obtenu les courbes de la figure 3.15.

D'après les résultats obtenus, c'est le silicium amorphe faiblement hydrogéné avec un gap de 1.6 eV qui donne les meilleurs résultats. Lorsque l'énergie du gap varie entre 1.6 eV et 1.9 eV, les paramètres photovoltaïques restent quasiment constants avec une légère baisse du

rendement de conversion qui passe de 20.08 % à 19.85 %. Cependant, lorsque le gap est pris égal à 2 eV, nous constatons une énorme chute de la densité de courant de court-circuit qui passe de 41.04 mA/cm² à 33.31 mA/cm² et du Facteur de Forme qui chute de 74.29 % à 25.48 % ainsi que le rendement qui atteint une valeur extrêmement faible de 5.65%.

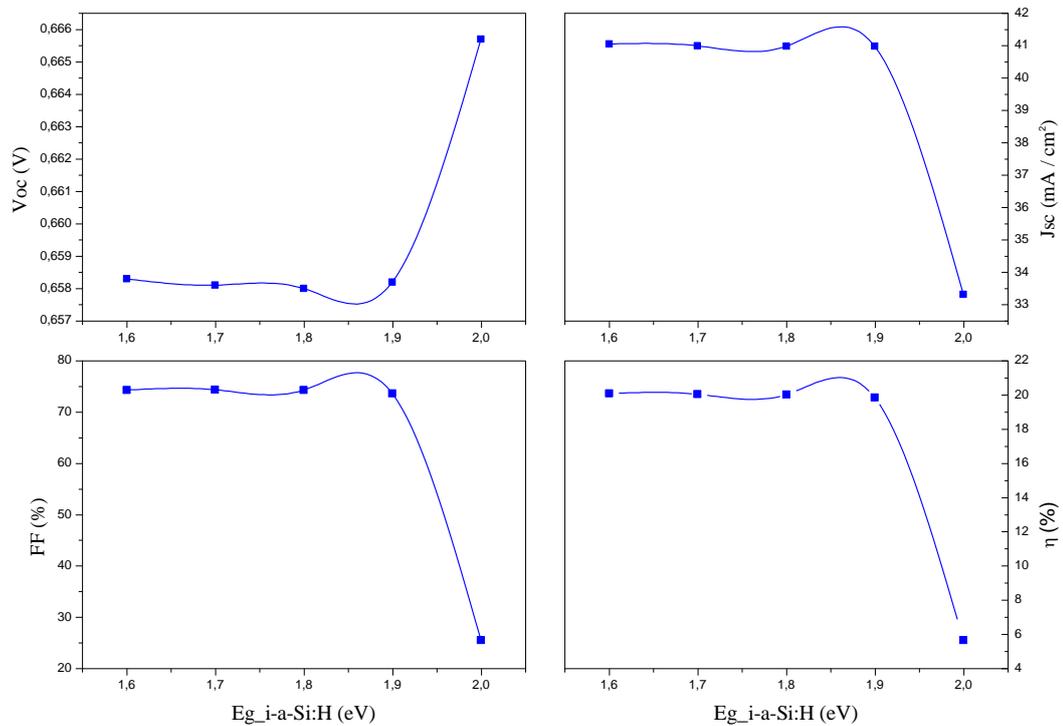


Figure 3.15 : Variation des paramètres photovoltaïques en fonction de l'énergie de gap de la couche de passivation.

Nous avons tracé sur la figure 3.16 le rendement quantique externe (RQE) de la cellule pour deux valeurs extrêmes du gap de la couche de passivation (1.6 eV e 2.0 eV). Nous avons constaté que le RQE est très faible pour un gap de 2 eV et quasiment nul lorsque la longueur d'onde des photons incidents est au-delà de 400 nm. Cela est dû au fait que le gap de la couche intrinsèque devient plus grand par rapport à celui de l'émetteur (1.7 eV) mais également trop important par rapport à celui de l'absorbeur (1.12 eV).

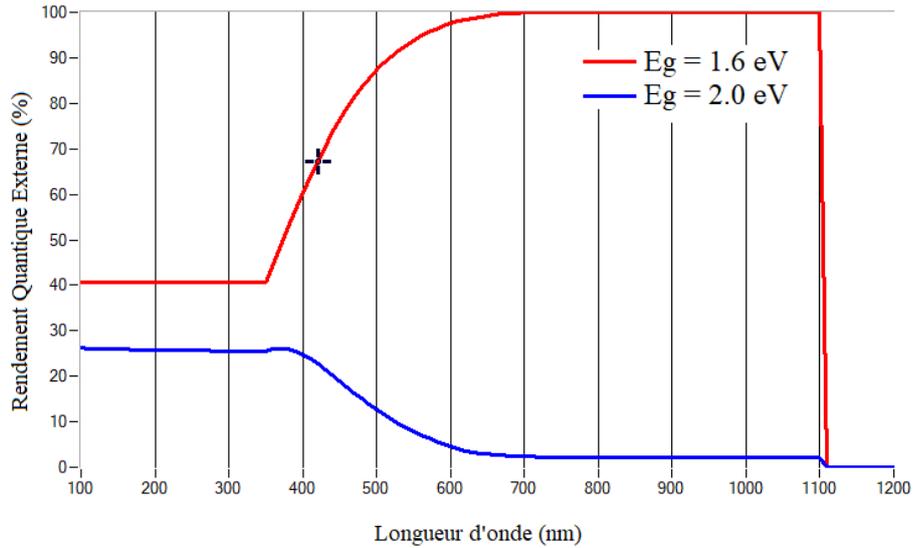


Figure 3.16 : Rendement quantique externe de la cellule pour deux valeurs du gap de la couche de passivation.

La mauvaise transition de gap au niveau de la face avant de la cellule engendre une importante barrière de potentiel au niveau de la bande de valence du diagramme de bandes représenté sur la figure 3.17. En effet, la barrière observée est très importante au niveau de la jonction p-a-Si :H/n-c-Si, avec une hauteur de l'ordre de 0.65 eV.

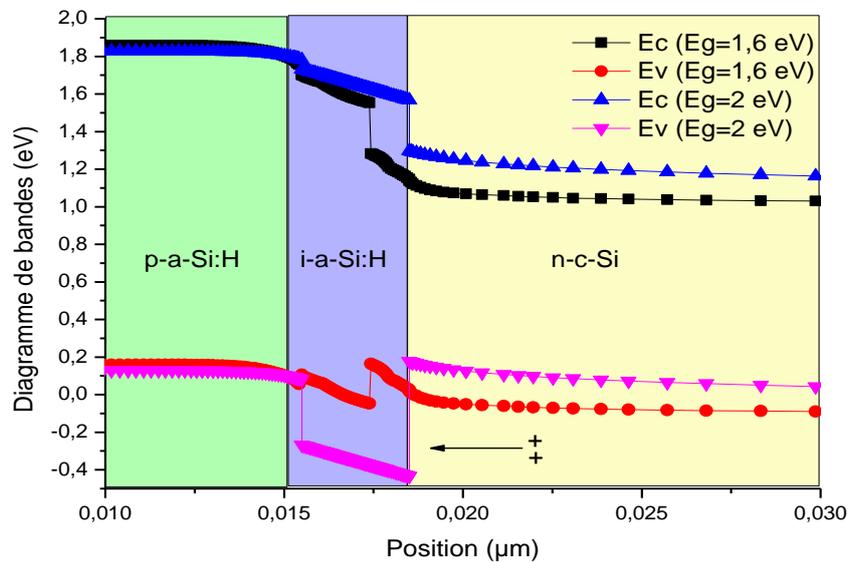


Figure 3.17 : Diagramme de bandes de la cellule pour deux valeurs du gap de la couche de passivation.

Cette barrière bloque le passage des trous minoritaires photogénérés au niveau de la couche active, ce qui provoque beaucoup de recombinaisons au niveau de la face avant de la cellule. Le fort taux de recombinaison, représenté sur la figure 3.18, induit une mauvaise collecte des trous par les contacts avant de la cellule, ce qui engendre une baisse de la densité de courant de court-circuit et du Facteur de Forme et par conséquent du rendement de conversion, expliquant le très mauvais rendement quantique externe observé sur la figure 3.16.

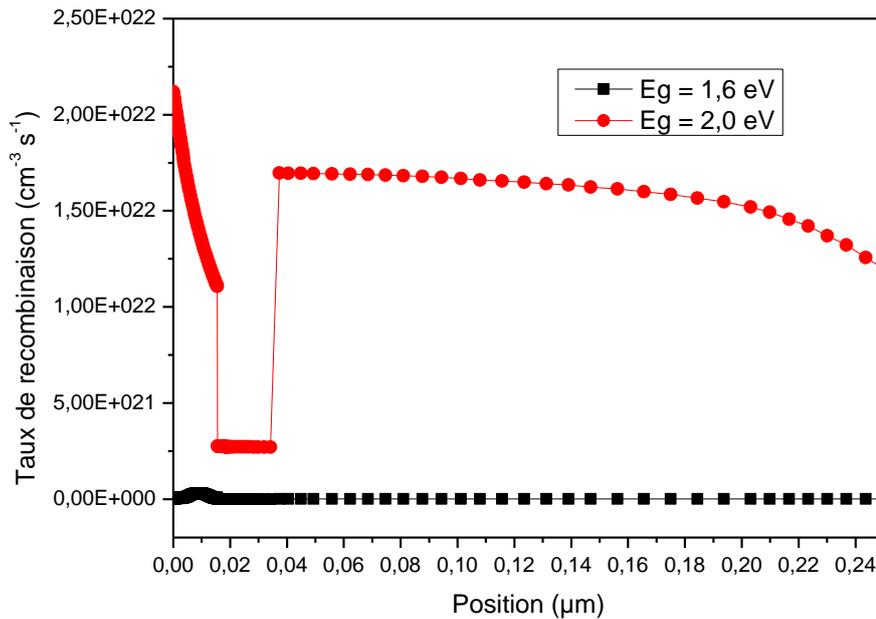


Figure 3.18 : Taux de recombinaisons au niveau de la face avant de la cellule pour deux valeurs du gap de la couche de passivation.

Les paramètres optimisés de la couche intrinsèque sont résumés dans le tableau 3.4.

Tableau 3.4 : Les paramètres optimisés de la couche de passivation.

Epaisseur (nm)	E_g (eV)	N_D (cm^{-3})	N_A (cm^{-3})	χ (eV)	N_t (cm^{-3})	μ_n (cm^2/Vs)	μ_p (cm^2/Vs)	N_C (cm^{-3})	N_V (cm^{-3})	ϵ	V_{th} (cm/s)
3	1.6	0	0	3.95	7.10^{14}	30	12	2.10^{20}	2.10^{20}	11.9	10^7

3.5. Optimisation de l'absorbeur (n-c-Si)

Dans les cellules solaires HIT, l'absorbeur est élaboré à partir d'un substrat en silicium cristallin c-Si dopé N, avec une épaisseur beaucoup plus importante par rapport aux autres couches constituant la cellule, et joue le rôle de la couche active. Il est évidemment possible de réaliser des cellules HIT sur substrat de type P, mais l'industrie et la recherche se sont

principalement orientées vers les cellules HIT sur substrat de type N car elles offrent de meilleurs rendements. Nous allons dans ce qui suit, nous intéresser à l'influence de l'épaisseur, de la densité de dopage et de la densité de défauts de l'absorbeur sur les paramètres de sortie de la cellule.

3.5.1. Effet de l'épaisseur et de la densité des défauts de l'absorbeur sur la performance de la cellule

3.5.1.1. En présence de la couche BSF

Nous avons fait varier l'épaisseur de l'absorbeur de 100 μm à 400 μm pour différentes valeurs de la densité de défauts N_t . La variation des paramètres photovoltaïques est présentée sur la figure 3.19.

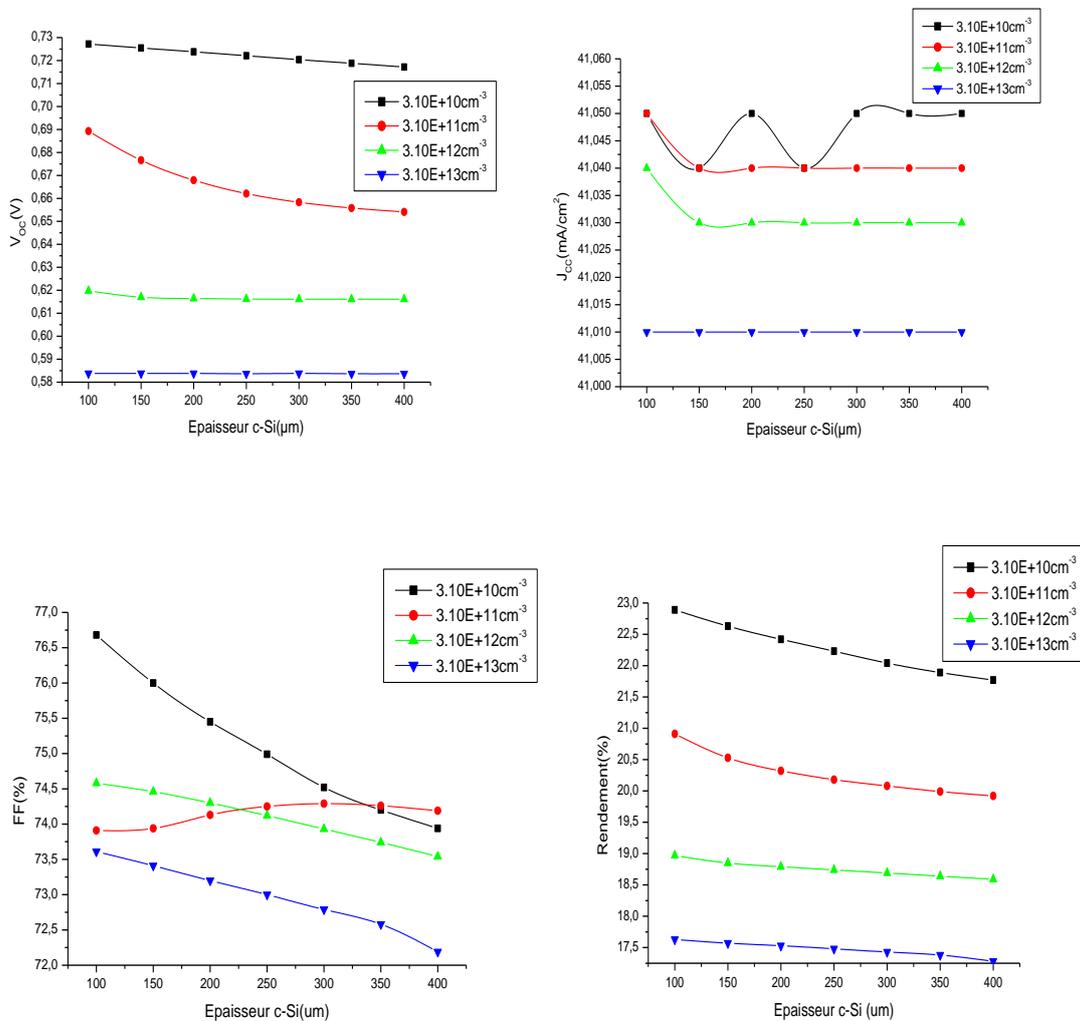


Figure 3.19 : Effet de l'épaisseur et de la densité de défauts de l'absorbeur n-c-Si sur les paramètres PV de la cellule HIT étudiée en présence de la couche BSF.

A partir de la figure 3.19, nous remarquons une nette amélioration des paramètres PV lorsque la densité de défauts dans le silicium cristallin est faible. En effet, comme nous pouvons le constater à partir du tableau 3.5, la durée de vie des porteurs de charges (électrons et trous) diminue considérablement avec l'augmentation de la densité de défauts et passe de 330 μs pour une densité de défauts $N_t = 3.10^{10} \text{ cm}^{-3}$ à 0.33 μs pour une densité de défauts $N_t = 3.10^{13} \text{ cm}^{-3}$, ce qui implique un taux de recombinaisons moins important.

$$\tau_{n,p} = \frac{1}{\sigma v_{th} N_t} \quad (3.2)$$

Avec :

$\tau_{n,p}$: La durée de vie des électrons et des trous respectivement.

σ : La section efficace de capture.

v_{th} : La vitesse thermique.

N_t : La densité de défauts.

Plus la durée de vie des porteurs est grande, plus la longueur de diffusion sera grande. En effet, si les porteurs minoritaires se recombinent moins rapidement, ils pourront diffuser sur une plus grande distance. En conséquence, la longueur de diffusion peut varier de quelques dizaines à quelques centaines de μm selon la pureté du matériau, c'est pourquoi il est préférable d'utiliser un monocristal afin d'obtenir de meilleurs résultats.

Comme nous pouvons le constater à partir du tableau 3.5, les longueurs de diffusions des électrons et des trous diminuent avec l'augmentation de la densité de défauts. Pour une durée de vie équivalente, la longueur de diffusion des électrons est plus importante que celle des trous à cause de la différence des mobilités.

$$L_{n,p} = \sqrt{D_{n,p} \tau_{n,p}} = \sqrt{\frac{\mu_{n,p} K T}{q} \tau_{n,p}} \quad (3.3)$$

Lorsque la densité de défauts passe de $N_t = 3.10^{10} \text{ cm}^{-3}$ à $N_t = 3.10^{13} \text{ cm}^{-3}$, la longueur de diffusion des électrons passe de 930 à 29 μm , et la longueur de diffusion des trous passe de 620 à 20 μm , c'est pour cette raison que les porteurs de charges se recombinent avant d'atteindre les contacts avant et arrière de la cellule et que les paramètres PV sont plus faibles.

Tableau 3.5 : Variation des longueurs de diffusion et des durées de vie des porteurs de charges en fonctions de la densité de défauts dans l'absorbeur (n-c-Si).

Densité de défauts dans le n-c-Si $N_t(\text{cm}^{-3})$	Longueur de diffusion des électrons $L_n(\mu\text{m})$	Longueur de diffusion des trous $L_p(\mu\text{m})$	Durée de vie des électrons $\tau_n(\mu\text{s})$	Durée de vie des trous $\tau_p(\mu\text{s})$
$3 \cdot 10^{10}$	930	620	330	330
$3 \cdot 10^{11}$	290	200	33	33
$3 \cdot 10^{12}$	93	62	3.3	3.3
$3 \cdot 10^{13}$	29	20	0.33	0.33

Nous remarquons, toujours à partir de la figure 3.19, que plus l'épaisseur de l'absorbeur est importante, plus la performance de la cellule est amoindrie. Cela est du à l'augmentation du taux de recombinaison total que nous avons représenté sur la figure 3.20 et qui devient important lorsque la couche n-c-Si devient épaisse. En effet, plus nous diminuons l'épaisseur de l'absorbeur, plus les champs électriques au niveau de la jonction BSF/n-c-Si et de la jonction n-c-Si/p-a-Si :H sont rapprochés et agissent efficacement de part et d'autre de l'absorbeur pour la séparation et la collecte des porteurs de charges photogénérés. Cela engendre une amélioration notable du Facteur de Forme qui est à l'origine de l'augmentation du rendement de conversion. Ainsi, en réduisant la quantité de silicium cristallin utilisé, nous obtenons une meilleure performance de la cellule.

Dans le but de confirmer l'interprétation donnée précédemment, nous avons éliminé la couche BSF de la structure de la cellule et nous avons refait les mêmes simulations afin d'analyser l'effet de de l'épaisseur de l'absorbeur avec différentes densités de défauts sur les paramètres de sortie de la cellule sans champ électrique arrière.

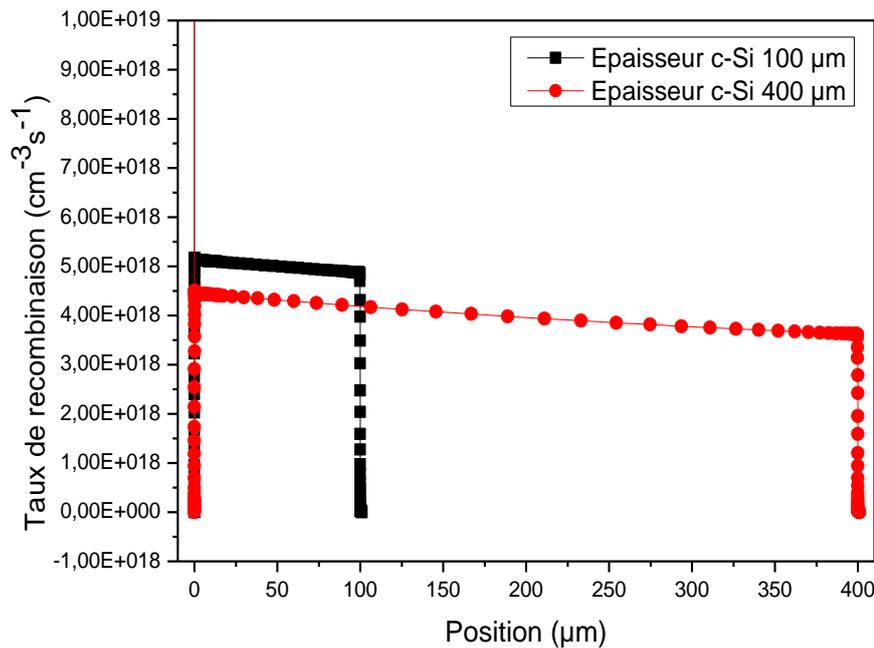


Figure 3.20 : Taux de recombinaison pour deux valeurs de l'épaisseur de l'absorbeur n-c-Si (100 μm et 400 μm) en fonction de la position dans la cellule étudiée.

3.5.1.2. En l'absence de la couche BSF

La suite de nos simulation a été réalisée après la suppression de la couche BSF. Nous avons étudié l'effet de la variation des paramètres PV en fonction de l'épaisseur et la densité de défauts de l'absorbeur (n-c-Si). La figure 3.21 montre les courbes obtenus.

D'après les graphes de la figure 3.21, nous ne remarquons aucun changement de la densité de courant de court-circuit qui reste égale à $41,04 \text{ mA/cm}^2$ pour les différentes valeurs de la densité de défauts, alors que les autres paramètres PV (V_{oc} , FF et η) diminuent lorsque la densité de défauts devient importante.

Ce qui est intéressant à remarquer, c'est que sans la couche BSF le comportement de la cellule change vis-à-vis de l'épaisseur de l'absorbeur. En effet, le rendement de la cellule est dans ce cas amélioré lorsque l'absorbeur est plus épais avec des densités de défauts assez faibles, dans la plage $3,10^{10} \text{ cm}^{-3}$ - $3,10^{11} \text{ cm}^{-3}$, ce qui est différent de ce que l'on a constaté lorsque la couche BSF est présente (Voir Figure 3.19). Cependant, lorsque la densité de défauts atteint $3,10^{12} \text{ cm}^{-3}$, le rendement de la cellule chute lorsqu'on augmente l'épaisseur de

l'absorbeur car la quantité de défauts devient importante ce qui augmente le taux de recombinaison, représenté sur la figure 3.22, et détériore ainsi la performance de la cellule.

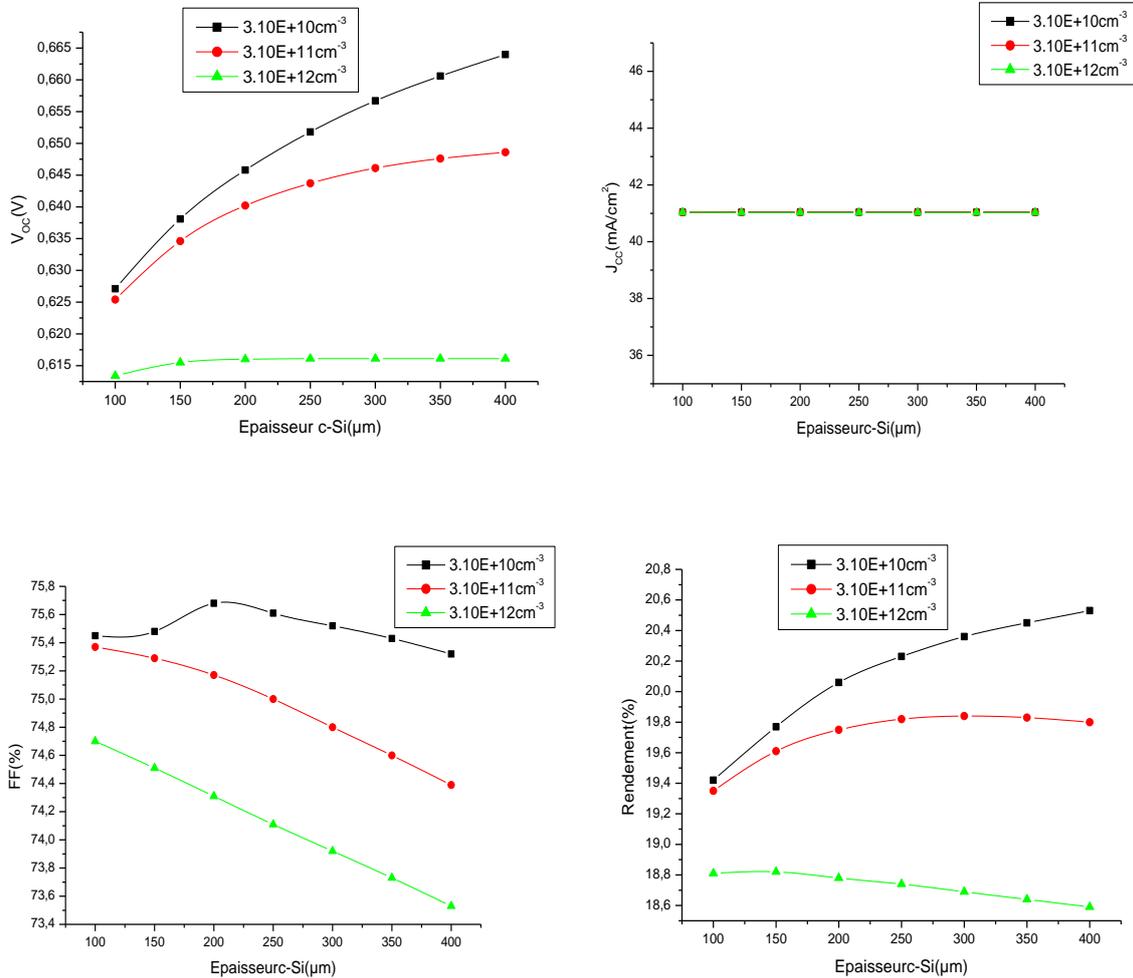


Figure 3.21 : Effet de l'épaisseur et de la densité de défauts de l'absorbeur n-c-Si sur les paramètres PV de la cellule HIT étudiée en absence de la couche BSF.

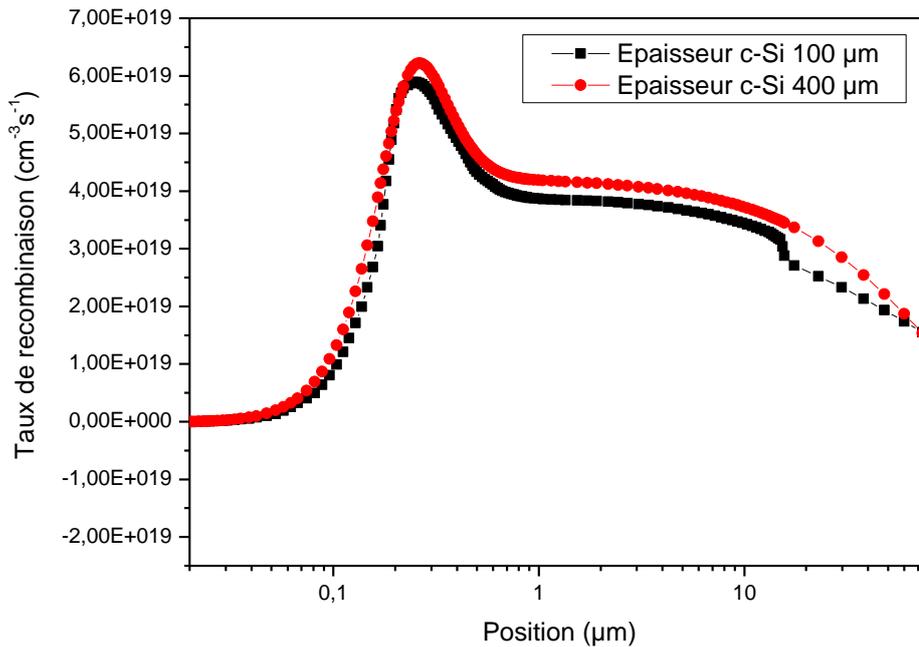


Figure 3.22 : Taux de recombinaison pour deux valeurs de l'épaisseur de l'absorbeur n-c-Si (100 μm et 400 μm) pour une densité de défauts $N_t = 3.10^{12} \text{ cm}^{-3}$ et en l'absence de la couche BSF en fonction de la position dans la cellule étudiée.

3.5.2. Effet du dopage de l'absorbeur sur la performance de la cellule

Nous fixons l'épaisseur optimale de l'absorbeur à 100 μm et sa densité de défauts à $N_t = 3.10^{10} \text{ cm}^{-3}$ et nous modifions son dopage de $N_D = 9.10^{11} \text{ cm}^{-3}$ à $N_D = 1.10^{17} \text{ cm}^{-3}$. Les résultats obtenus sont représentés sur la figure 3.23 qui montre la variation des paramètres PV en fonction de la densité de dopage. Nous remarquons que la tension en circuit-ouvert reste constante aux environs de 0.727 V lorsque la densité de dopage de l'absorbeur est inférieure ou égale à 10^{15} cm^{-3} . A partir d'une densité supérieure à 10^{15} cm^{-3} , le V_{oc} augmente et atteint 0.757 V pour une densité de dopage $N_D = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. Nous pouvons attribuer cette augmentation du V_{oc} à un champ électrique induit au niveau de la jonction p-a-Si :H/n-c-Si plus étalé du côté de la couche active, bien que sa valeur maximale est la même pour les deux valeurs du dopage (Figure 3.24)

La densité de courant de court-circuit reste quasiment inchangée aux alentours de 41 mA/cm^2 quelle que soit la valeur de la densité de dopage. Le Facteur de Forme et le rendement de conversion suivent l'allure du V_{oc} . Le rendement est nettement amélioré à partir d'une valeur de la densité de dopage de 10^{14} cm^{-3} et atteint 24.7% pour $N_D = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$.

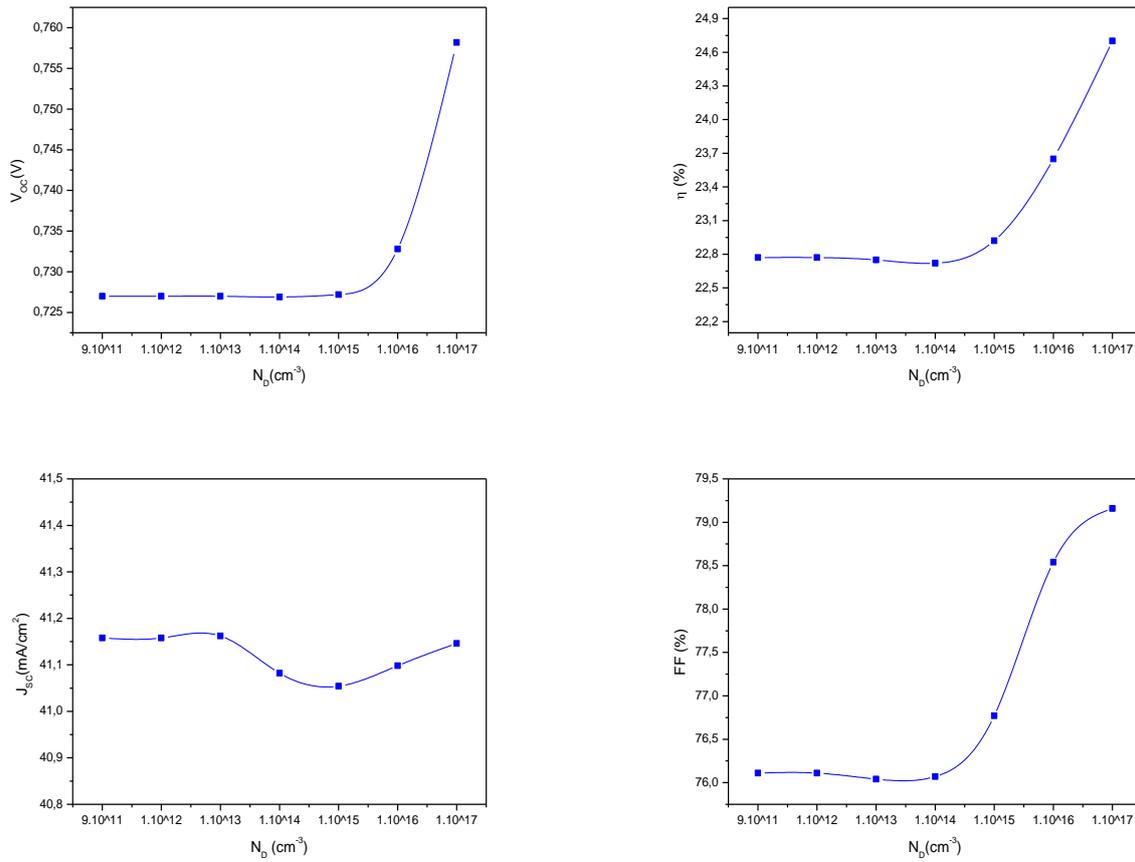


Figure 3.23 : Influence de la densité de dopage de l'absorbeur sur les paramètres PV de la cellule étudiée.

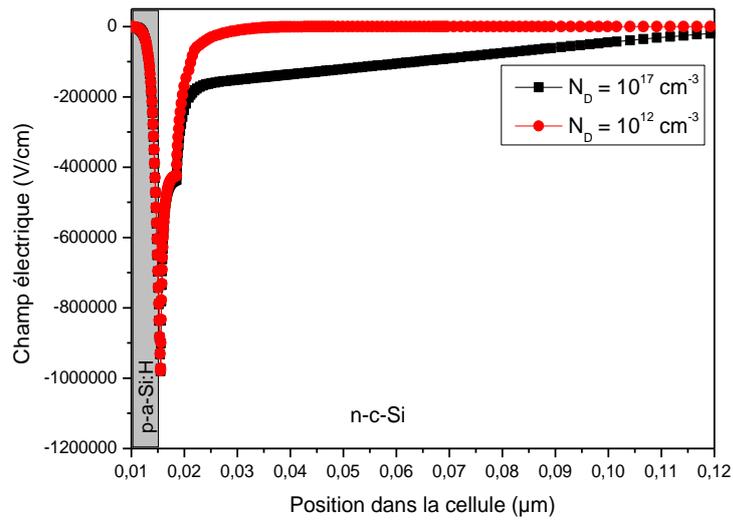


Figure 3.24 : Champ électrique induit au niveau de l'interface p-a-Si :H/n-c-Si en fonction de la densité de dopage de la couche active.

Les paramètres optimisés de la couche active sont résumés dans le tableau 3.6.

Tableau 3.6 : Les paramètres optimisés de l'absorbeur.

Épaisseur (μm)	E_g (eV)	N_D (cm^{-3})	N_A (cm^{-3})	χ (eV)	N_t (cm^{-3})	μ_n (cm^2/Vs)	μ_p (cm^2/Vs)	N_C (cm^{-3})	N_V (cm^{-3})	ϵ	V_{th} (cm/s)
100	1.12	1.10^{17}	0	4.22	3.10^{10}	1000	450	5.10^{18}	2.10^{18}	11.9	10^7

3.6. Optimisation de la couche BSF

Nous terminons notre travail par l'optimisation de la dernière couche de la face arrière qui est la couche BSF. Cette dernière est une région fortement dopée à l'arrière de la plaquette de silicium cristallin (n-c-Si) avec la même polarité que le reste de la plaquette. Son rôle est de créer un champ électrique afin de repousser les trous minoritaires de la couche active vers l'émetteur, de réduire les recombinaisons à l'arrière du silicium cristallin, ainsi que d'améliorer la collecte des porteurs photogénérés.

Cette couche est généralement élaborée par des techniques standard de diffusion à haute température (diffusion thermique) [14,15] ou bien par implantation ionique [15]. D'autres études ont montré que la couche BSF peut être élaborée à partir de silicium amorphe hydrogéné a-Si :H [16,17]. La structure obtenue est alors appelée double HIT, où l'émetteur et la couche BSF sont à base de silicium amorphe hydrogéné, engendrant des hétérojonctions sur les deux faces de la plaquette de silicium monocristallin.

Dans ce qui suit, nous allons optimiser les paramètres de la couche BSF, en étudiant l'effet de sa densité de dopage et de son épaisseur sur les paramètres de sortie de la cellule. Nous avons à cet effet varié l'épaisseur de 500 nm à 2 μm et la densité de dopage de 10^{16} à 10^{20} cm^{-3} . Les résultats obtenus sont représentés sur la figure 3.25 qui montre la variation des paramètres PV en fonction de la densité de dopage pour différentes valeurs de l'épaisseur de la couche BSF.

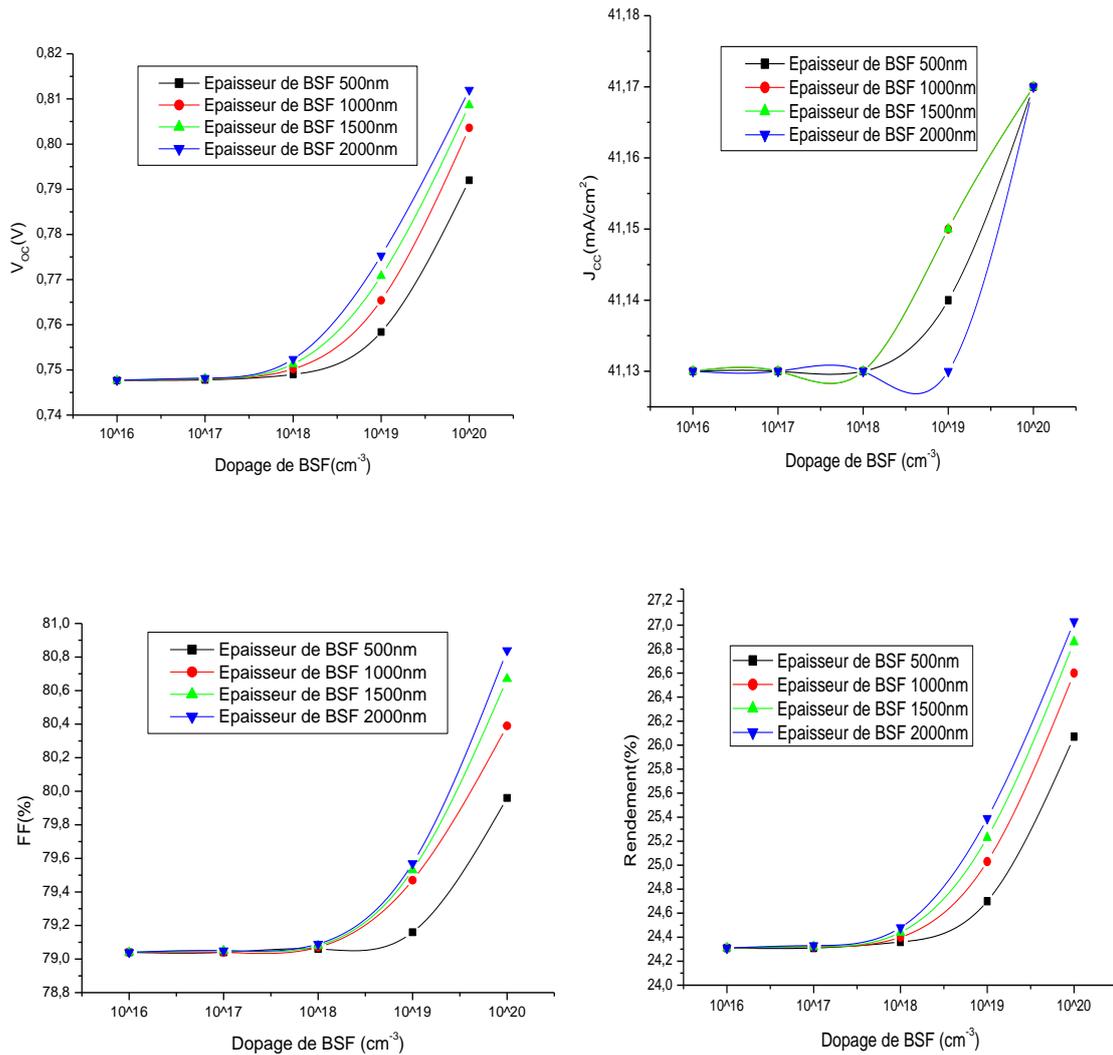


Figure 3.25 : Effet de la densité de dopage de la couche BSF sur les paramètres PV de la cellule étudiée pour différentes valeurs de l'épaisseur.

Nous observons que les paramètres PV suivent une même évolution. L'augmentation de la densité de dopage et de l'épaisseur de la couche BSF correspond à l'augmentation des paramètres photovoltaïques.

L'amélioration observée de la performance de la cellule revient au fait que cette couche arrière permet de créer un fort champ électrique au niveau de la jonction BSF/n-c-Si, comme nous pouvons le constater sur la figure 3.26. Nous voyons clairement que le champ électrique est extrêmement fort lorsque la densité de dopage est importante ce qui permet d'obtenir une bonne séparation et collecte des porteurs de charges photogénérés.

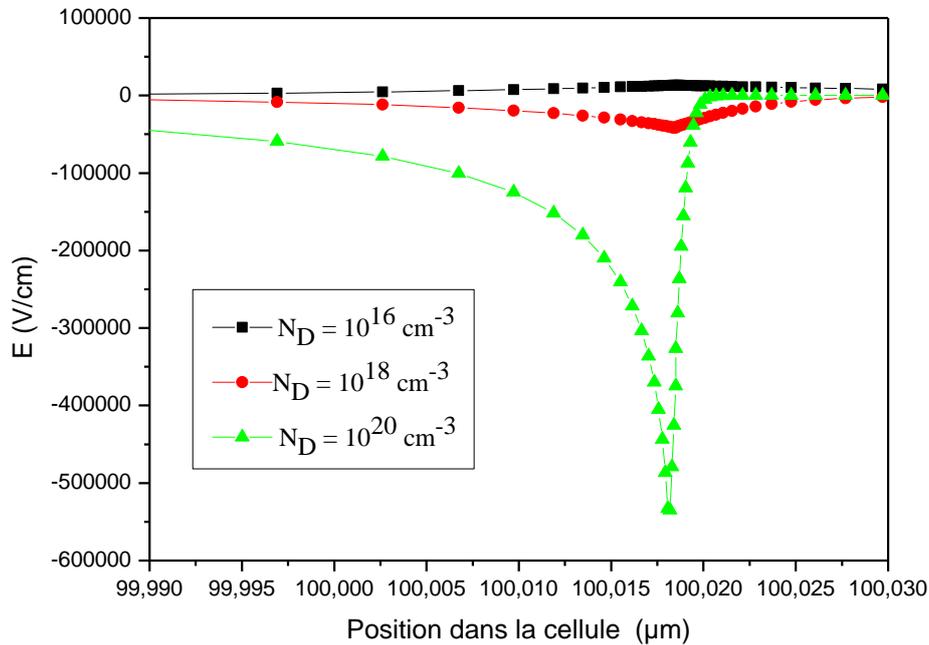


Figure 3.26: Champ électrique induit au niveau de la jonction n-c-Si/BSF pour différentes densités de dopage de la couche BSF.

Nous fixons donc la valeur optimale de la densité de dopage du BSF à $N_D = 10^{20} \text{ cm}^{-3}$. Expérimentalement, le dopage peut être réalisé par diffusion d'Aluminium dans le wafer de silicium cristallin, car le contact arrière est lui-même élaboré par une couche d'Aluminium.

Le taux de recombinaison tracé sur la figure 3.27, pour deux épaisseurs du BSF (500 nm et 2 μm) et pour une densité de dopage de 10^{20} cm^{-3} , reste quasiment inchangé au niveau de toute la cellule. Cela implique que l'effet bénéfique de l'augmentation de l'épaisseur de la couche BSF est certainement lié à la présence d'un champ électrique plus étendu dans la couche active par rapport à une faible épaisseur de la couche (Figure 3.28) qui va améliorer la tension en circuit ouvert et par conséquent le rendement en puissance de la cellule. La valeur maximale du champ électrique au niveau de la jonction n-c-Si/BSF reste quant à elle la même, quel que soit l'épaisseur de la couche BSF.

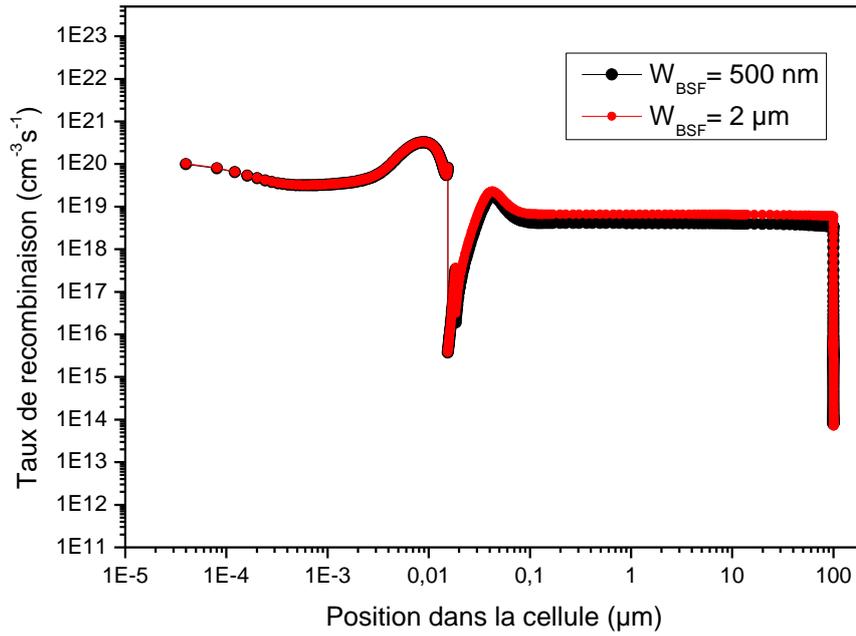


Figure 3.27 : Taux de recombinaison au niveau de la cellule pour différentes épaisseurs de la couche BSF.

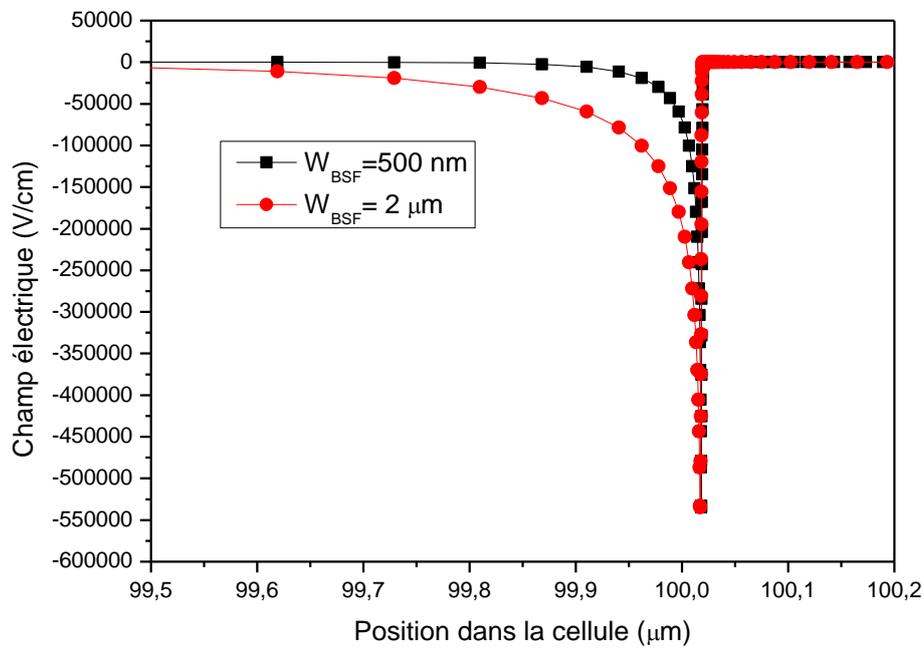


Figure 3.28: Champ électrique induit au niveau de la jonction n-c-Si/BSF pour différentes épaisseurs de la couche BSF.

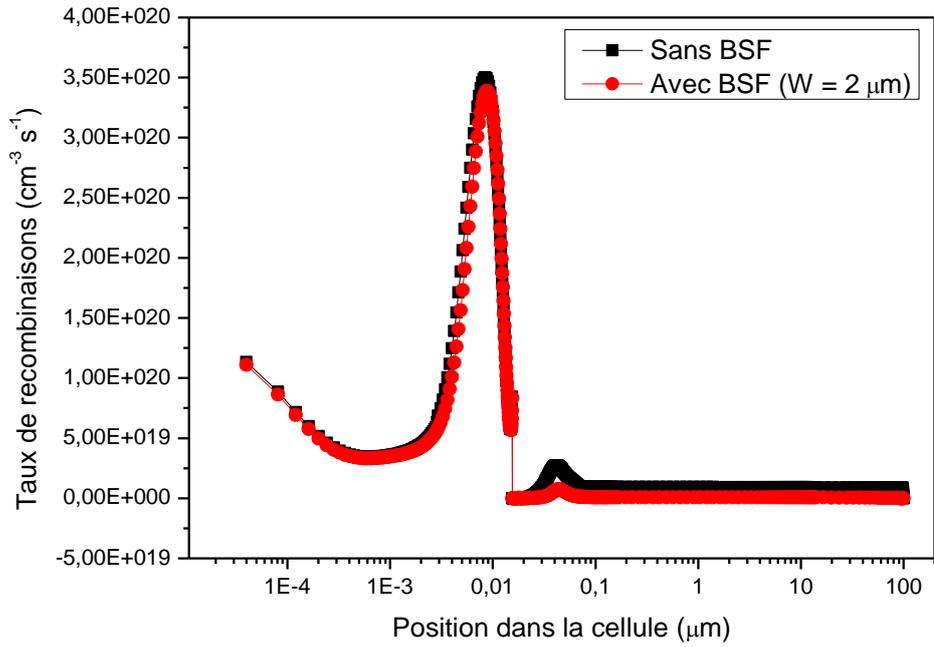


Figure 3.29. Taux de recombinaison en fonction de la position dans la cellule avec et sans couche BSF.

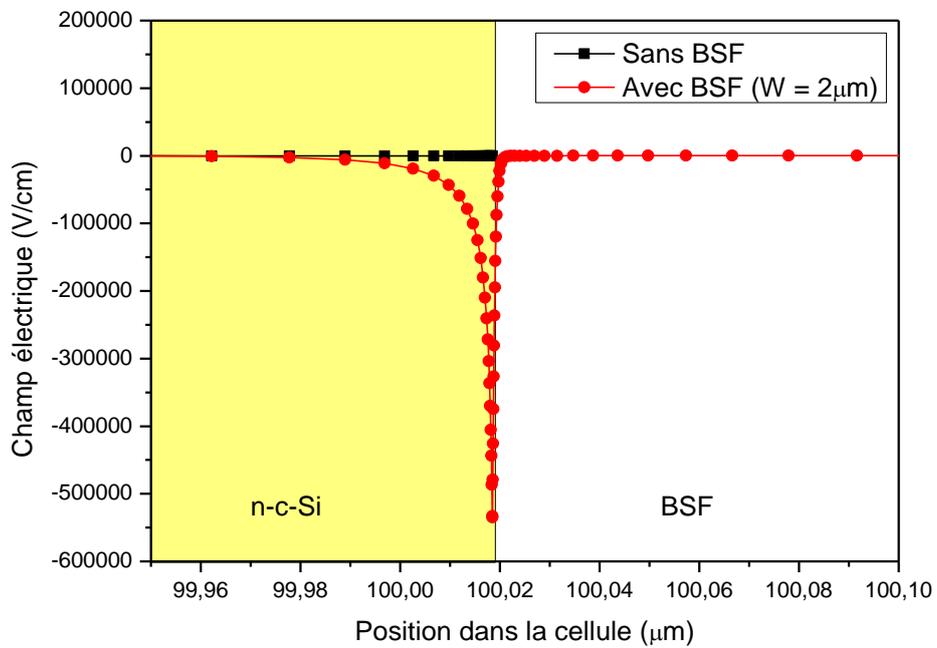


Figure 3.30. Champ électrique en fonction de la position dans la cellule avec et sans couche BSF.

L'apport de la couche BSF est donc évident ; il permet d'améliorer le rendement de conversion de la cellule de plus de 10% par rapport à une cellule solaire sans BSF (Tableau 3.7), en réduisant le taux de recombinaison au niveau de la face avant de la cellule (Figure 3.29). En effet, bien que le champ électrique soit engendré au niveau de la face arrière de la cellule (n-c-Si/BSF) comme nous pouvons clairement le voir sur la figure 3.30, c'est les porteurs minoritaires (les trous) qui vont être rétrodiffusés, et qui pourront facilement atteindre le contact avant de la cellule avant d'être recombinaisonnés, ce qui fait diminuer le taux de recombinaison au niveau de l'émetteur.

Tableau 3.7 : Paramètres PV de la cellule étudiée avec et sans couche BSF.

Paramètres PV	Voc (V)	Jsc (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
Cellule avec BSF	0.82	41.18	80.36	27.03
Cellule sans BSF	0.75	41.13	79.04	24.31

De plus, comme nous l'avons montré lors de l'optimisation de la couche active, le fait d'introduire un champ électrique arrière va permettre de réduire l'épaisseur optimale de l'absorbeur, qui est réalisé à partir de silicium cristallin, et qui constitue une part importante du prix de fabrication de la cellule. Le coût de la cellule sera donc réduit avec un absorbeur de 100 μm d'épaisseur grâce à une couche BSF bien paramétrée.

Les paramètres optimisés de la couche BSF sont résumés dans le tableau 3.8.

Tableau 3.8 : Les paramètres optimisés de la couche BSF.

Epaisseur (μm)	E _g (eV)	N _D (cm ⁻³)	N _A (cm ⁻³)	χ(eV)	N _t (cm ⁻³)	μ _n (cm ² /Vs)	μ _p (cm ² /Vs)	N _C (cm ⁻³)	N _V (cm ⁻³)	ε	V _{th} (cm/s)
2	1.12	1.10 ²⁰	0	4.22	3.10 ¹⁰	1000	450	5.10 ¹⁸	5.10 ¹⁸	11.9	10 ⁷

3.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats de simulations que nous avons obtenus, dans le but d'optimiser les cellules solaires HIT de type N ayant la structure ITO/p-a-Si :H/i-a-Si :H/n-c-Si/BSF/Al.

Nous avons étudié dans un premier temps l'influence des caractéristiques de l'émetteur élaboré à base de silicium amorphe hydrogéné dopé P (p-a-Si:H) sur les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire. Nous avons utilisé le logiciel ASDMP pour réaliser nos simulations et nous avons montré que l'épaisseur idéale de l'émetteur (p-a-Si:H) ne doit pas être trop mince pour avoir un champ électrique suffisant au niveau de la jonction p-a-Si:H/n-c-Si, car ce dernier a un rôle très important dans la collecte des porteurs de charges, et pas trop épaisse, afin qu'un maximum de porteurs soit transmis dans la couche active. Une épaisseur optimale de 155 Å a permis d'atteindre les meilleures valeurs des paramètres photovoltaïques avec un rendement de 18.25 %.

Nous nous sommes par la suite intéressés à l'énergie de gap de l'émetteur, et nous avons remarqué que la cellule n'est pas performante pour une faible énergie de gap, puis commence à s'améliorer lorsque l'énergie du gap augmente jusqu'à obtenir un rendement maximal de 19.48% pour un gap de 1.7 eV. Au-delà de cette valeur de gap le rendement diminue énormément. L'explication est que malgré l'augmentation du champ électrique lorsque le gap augmente, une barrière de potentiel est créée à l'interface (ITO/p-a-Si:H) ce qui bloque le passage des porteurs photogénérés, et augmente le taux de recombinaisons diminuant ainsi l'efficacité de la cellule étudiée. Concernant l'effet de la densité de dopage de l'émetteur sur la qualité de la cellule, nous avons obtenu un rendement maximal de 19.85 % à partir d'une densité de dopage de $4.10^{19} \text{ cm}^{-3}$. Au-delà de cette valeur le rendement se stabilise à cause de l'augmentation du taux de recombinaisons engendré par la grande quantité de défauts dans le silicium amorphe hydrogéné, défavorablement sensible au dopage. Le rendement de conversion ne diminue pas car l'augmentation de la densité de dopage augmente le champ électrique qui est favorable au bon fonctionnement de la cellule.

Dans un deuxième temps, nous avons choisi de travailler avec le logiciel SCAPS-1D. La première étape a été de retrouver les mêmes résultats obtenus précédemment par le logiciel ASDMP, ce qui a été réalisé avec succès. Ceci nous a permis de valider la cellule HIT modélisée au niveau du simulateur SCAPS-1D.

Nous avons commencé par optimiser la couche de passivation qui fait la spécificité des cellules solaires HIT et qui est à base de silicium amorphe hydrogéné intrinsèque. Le rôle de cette couche est de passiver les défauts à l'interface (p-a-Si:H/n-c-Si). Nous avons conclu que l'épaisseur de cette couche (i-a-Si:H) doit être très mince (de l'ordre de 3 nm), car dans ce cas un champ électrique puissant a été observé, ce qui a donné une meilleure séparation des porteurs de charges et ainsi une meilleure performance. Nous avons également trouvé que c'est le

silicium amorphe faiblement hydrogéné avec un gap de 1.6 eV qui donne les meilleurs résultats. Avec des gaps plus élevés, une importante barrière de potentiel est engendrée dans la bande de valence du diagramme de bandes au niveau de l'interface i-a-Si :H/n-c-Si avec une hauteur de l'ordre de 0.65 eV. Cette barrière est bien-sûr néfaste pour la collecte des trous par le contact avant de la cellule. La couche de passivation ainsi optimisée a permis d'atteindre un rendement de 20.08 %.

L'analyse effectuée sur l'absorbeur à base de silicium cristallin a permis d'optimiser cette couche mais aussi de mettre en évidence l'importance de la présence d'un champ de surface arrière pour améliorer la performance de la cellule et de réduire l'épaisseur de la couche active. L'optimisation de cette couche en présence de la couche BSF a permis d'obtenir un rendement maximal de 22.89 % pour une épaisseur de 100 μm et une densité des défauts $N_t = 3.10^{10}\text{cm}^{-3}$. Ces deux conditions donnent aux porteurs de charges photogénérés une durée de vie importante de $\tau_{n,p} = 330\mu\text{s}$. En l'absence de la couche BSF, l'optimisation de la couche active montre que tous les paramètres photovoltaïques diminuent considérablement dans les mêmes conditions de l'absorbeur (épaisseur 100 μm et $N_t = 3.10^{10}\text{cm}^{-3}$) avec un rendement de 19.42 %. Cela permet d'entrevoir la possibilité d'utiliser une couche BSF pour réduire l'épaisseur optimale de la couche active, induisant ainsi une réduction du coût de revient de la cellule. Une densité de dopage de 10^{17}cm^{-3} a permis d'atteindre un rendement de 24.70 %.

L'optimisation de la dernière couche constituant la face arrière de la cellule, qui est une couche fortement dopée au sein même du wafer de silicium cristallin, a également été effectuée. Un rendement record de 27.03 % a été atteint pour une épaisseur de 2 μm et une forte densité de dopage de 10^{20}cm^{-3} . L'apport de la couche BSF a été clairement démontré et a conduit à l'amélioration du rendement de conversion de la cellule de plus de 10% par rapport à une cellule solaire sans BSF.

Références du chapitres 3

- [1] K. Yoshikawa, H. Kawasaki, W. Yoshida, *et al.* « Silicon heterojunction solar cell with interdigitated back contacts for a photoconversion efficiency over 26% », *Nat Energ.* 2:17032, 2017.
- [2] M. Yamaguchi, K. H. Lee, K. Araki, N. Kojima, H. Yamada, Y. Katsumata. « Analysis for efficiency potential of high efficiency and next generation solar cells ». *Prog Photovolt Res Appl.*, 1–10, 2017.
- [3] S. Chakraborty, A. Datta, M. Labrune, P. Roca iCabarrocas, P. Chatterjee, « A modelling study of the performance of conventional diffused P/N junction and heterojunction solar cells at different temperatures », *EPJ Photovoltaics* 4, 40101, 2013.

- [4] W.L. Rahal, D. Rached, « Influence of Characteristic Energies and Charge Carriers Mobility on the Performance of a HIT Solar Cell », *J. Nano- Electron. Phys.*, 9 (4) 04001, 2017.
- [5] W. Futako, *et al.*, « Fabrication of narrow-band-gap hydrogenated amorphous silicon by chemical annealing », *J. Appl. Phys.* 84 (3) 1333, 1993.
- [6] J. Barbé, «Fabrication et caractérisation de nanocristaux de silicium en capsulés dans des matrices siliciées amorphes : rôle des interfaces et de la matrice sur les propriétés structurales, optiques et électriques», Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, 2013.
- [7] Y. Poissant, P. Chatterjee, P. Roca iCabarrocas, « No benefit from microcrystalline silicon N layers in single junction amorphous silicon p-i-np-i-n solar cells », *J. Appl. Phys.* 93, 170, 2003.
- [8] D. Vinh Ai *et al.*, « High-Efficiency Heterojunction with Intrinsic Thin-Layer Solar Cells: A Review », *Curr. Photovolt. Res.* 1 (2), 73–81, 2013.
- [9] F. Azzemou, D. Rached, 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 », *Optik* 217, 164802, 2020.
- [10] T.F.Schulze, «Structural, electronic and transport properties of amorphous/crystalline silicon heterojunctions », Thèse de Doctorat, Berlin, 2011.
- [11] L. Zhao *et al.*, «Physical criteria for the interface passivation layer in hydrogenated amorphous/crystalline silicon heterojunction solar cell », *J. Phys. D: Appl. Phys.* 51, 045501, 2018.
- [12] Y. Abdulraheem, I. Gordon, T. Bearda, H. Meddeb, and J. Poortmans, « Optical band gap of ultra-thin amorphous silicon films deposited on crystalline silicon by PECVD », *AIP Advances* 4, 057122, 2014.
- [13] R.W.Collins *et al.*, « Real time analysis of amorphous and microcrystalline silicon film growth by multichannel ellipsometry », *Thin Solid Films* 364, 129, 2000.
- [14] T. Rahman, A. To, M.E. Pollard *et al.*, « Minimising bulk lifetime degradation during the processing of interdigitated back contact silicon solar cells », *Prog Photovolt Res Appl.*, vol. 26, Issue 1, 2018.
- [15] A. Florakis *et al.*, « Simulation of the Phosphorus Profiles in a c-Si Solar Cell Fabricated Using POCl₃ Diffusion or Ion Implantation and Annealing », *Energy Procedia*, vol. 38, 2013.
- [16] W.L.Rahal, D.Rached, F. Mahi, F. Azzemou, « Simulation and Optimization of Back Surface Field for Efficient HIT solar Cells», *Silicon*, 14, 2999–3003 (2022).
- [17] X. Yanget *al.*, « HIT Solar Cells with N-Type Low-Cost Metallurgical Si », *Advances in Opto-Electronics*, 7368175, 5, 2018.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

La demande mondiale en énergie évolue rapidement et les ressources naturelles telles que les énergies fossiles s'amenuisent à cause du développement important de l'industrie ces dernières années. Pour couvrir les besoins en énergie, des recherches sont orientées vers les énergies renouvelables. Une des énergies renouvelables qui peut honorer la demande, particulièrement en Algérie, est l'énergie solaire photovoltaïque. C'est une énergie propre, silencieuse, disponible et gratuite. Cela explique pourquoi son utilisation connaît une croissance significative dans le monde.

Le principal objectif des recherches effectuées dans le domaine de l'énergie photovoltaïque est l'amélioration des performances des cellules solaires, tout en réduisant le coût de fabrication et en simplifiant les techniques d'élaboration.

Ce travail de thèse a pour objectif d'optimiser des structures de cellules solaires à base d'hétérojonction de silicium amorphe/silicium cristallin dans le but d'améliorer leurs rendements de conversion, tout en réduisant leur coût de revient. Nous avons utilisé une approche de simulation basée sur des paramètres expérimentaux comme paramètres d'entrée pour la modélisation des différentes couches constituant le dispositif. En effet, comme le coût de l'expérience est élevé, les outils de simulations sont devenus essentielles pour prédire le développement des recherches notamment en photovoltaïque, gagnant du temps et de l'argent. Dans notre étude, nous avons utilisé deux logiciels ASDMP et SCAPS-1D pour réaliser nos simulations.

Notre thèse est divisée en trois chapitres complémentaires qui nous ont permis d'aller à l'essentiel pour la compréhension de la thématique traitée :

Des généralités sur l'énergie photovoltaïque ainsi que le principe de fonctionnement des cellules solaires ont été abordées dans le premier chapitre. La modélisation et la simulation des cellules solaires y ont également été traitées.

Dans le deuxième chapitre, les cellules solaires à base d'hétérojonction silicium amorphe/silicium cristallin ont été étudiées, avec des rappels sur les semi-conducteurs et sur la jonction PN qui représente le cœur des photopiles.

Les principaux résultats, issus de l'optimisation des cellules HIT de type N ayant la structure *ITO/p-a-Si :H/i-a-Si :H/n-c-Si/BSF/Al*, ont été présentés dans le troisième chapitre. Ils peuvent être résumés dans les points suivants :

L'optimisation de l'émetteur, à l'aide du logiciel ASDMP a montré que l'épaisseur idéale de cette couche est de 155Å pour un rendement de 18.25%. Une énergie de gap optimale de 1.7 eV a permis l'obtention d'un rendement de 19.48%. Cette valeur du gap est caractéristique du silicium amorphe hydrogéné standard, facilement réalisable grâce à la technique de dépôt PECVD. Une densité de dopage de 4.10^{19}cm^{-3} a été retenue comme valeur idéale pour l'obtention d'un rendement de conversion de 19.85%.

Nous avons choisi de travailler avec un second logiciel (SCAPS-1D) pour la suite des simulations. Nous avons d'abord vérifié que les résultats d'optimisation de l'émetteur obtenus par le logiciel ASDMP, peuvent être retrouvés par le SCAPS-1D. Nous avons trouvé que les deux logiciels sont équivalents et donnent les mêmes résultats.

Nous avons continué avec l'optimisation de la couche de passivation (i-a-Si :H) qui fait la spécificité des cellules solaires HIT. Nous avons conclu que l'épaisseur optimale de cette couche est de l'ordre 3 nm, et une énergie de gap de 1.6 eV pour atteindre un rendement de 20.08 %. La valeur de gap de 1.6 eV, correspond à du silicium amorphe faiblement hydrogéné.

Par la suite, l'analyse effectuée sur l'absorbeur à base de silicium monocristallin a permis d'optimiser cette couche et de mettre en évidence l'importance de la présence d'un champ de surface arrière pour améliorer la performance et réduire l'épaisseur de la couche active. L'optimisation de cette couche en présence du champ de surface arrière a généré un rendement de 22.89 % pour une épaisseur de 100 μm , et une densité des défauts $N_t = 3.10^{10}\text{cm}^{-3}$. Ces résultats sont très intéressants, du fait que la quantité de silicium cristallin utilisé est réduite, ce qui a des retombées économiques avantageuses pour l'élaboration de ce type de cellules solaires. Nous avons montré qu'en l'absence de la couche BSF, tous les paramètres photovoltaïques diminuent considérablement (pour les mêmes paramètres de la couche active : 100 μm et $N_t = 3.10^{10}\text{cm}^{-3}$) avec un rendement de 19.42%, montrant ainsi le rôle important de d'une couche fortement dopée au niveau de la face arrière de la cellule. Le rendement a pu être augmenté à 24.70% pour une densité de dopage du silicium cristallin de 10^{17}cm^{-3} .

L'optimisation de la dernière couche de la face arrière BSF ($n^{++}\text{-c-Si}$), a permis d'obtenir un rendement en puissance record de 27.03 % pour une épaisseur de 2 μm et une densité de dopage de 10^{20}cm^{-3} . La présence de la couche BSF dans la cellule solaire a clairement démontré

l'amélioration du rendement de conversion de la cellule de plus de 10 % par rapport à une cellule solaire sans BSF. De plus, le fait d'utiliser du silicium cristallin fortement dopé au niveau de la face arrière du wafer de silicium (par diffusion ou par implantation ionique) permet d'éviter une étape de dépôt supplémentaire comme dans le cas où le BSF est réalisé à partir d'une couche de silicium amorphe hydrogéné fortement dopé N.

Dans le cadre de l'amélioration de ce travail, il serait nécessaire de faire une étude plus approfondie sur les défauts des différents matériaux utilisés dans les cellules HIT.

L'étude de l'Oxyde Transparent Conducteur reste également à accomplir. Le remplacement de l'ITO par du ZnO, qui est plus disponible et moins cher, est une alternative intéressante. Il serait également nécessaire d'étudier la métallisation et d'évaluer l'apport des différents métaux qui peuvent être utilisés pour réaliser les contacts de la cellule.

Il pourrait également être intéressant de refaire cette étude avec une structure différente, comme par exemple une structure HIT double face, où l'illumination est appliquée sur les faces avant et arrière de la cellule.

PRODUCTION SCIENTIFIQUE



Contents lists available at ScienceDirect

Optik

journal homepage: www.elsevier.com/locate/ijleo

Original research article

Optimisation of emitter properties for silicon heterojunction solar cell ITO/p-a-Si:H/i-a-Si:H/n-c-Si/BSF/Al

F. Azzemou^{a,*}, D. Rached^b, W.L. Rahal^{a,c}^a *Département de Physique, Faculté des Sciences Exactes et de l'Informatique, Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem, Algeria*^b *Laboratoire de Physique des Plasmas, Matériaux Conducteurs et leurs Applications (LPPMCA), Département de Physique Energétique, Faculté de Physique, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, USTO-MB, BP1505 Oran, Algeria*^c *Laboratoire d'Analyse et d'Application des Rayonnements, Département de Physique, Faculté de Génie Physique, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, USTO-MB, BP1505 Oran, Algeria*

ARTICLE INFO

Keywords:

Solar cell
Silicon heterojunction
Thickness
Doping density
Gap energy
Efficiency
ASDMP

ABSTRACT

In this study, the performance of silicon Heterojunction with Intrinsic Thin layer (HIT) solar cell was numerically simulated and optimized by Amorphous Semiconductor Device Modelling Program (ASDMP). In this work we have not only studied the influence of physical and geometric parameters of the emitter on the performance of the cell, we have also studied the conduction and recombination phenomena which are the basis of the improvement / deterioration of the studied solar cell.

We were able to conclude that a compromise must be made in the choice of the thickness of the emitter: Not too thin to have a sufficient electric field at the junction p-a-Si: H / n-c-Si, and not too thick, so that a maximum of photons are transmitted to the active layer, and so that the diffusion length of the charge carriers is at least equal to the thickness of the emitter. A thickness of the p-Si: H layer of 155Å^o has achieved the best values of the cell parameters, with an efficiency of 18.25 %.

The performance of the HIT studied cell is improved by increasing the doping density of the emitter layer made of p-type hydrogenated amorphous silicon (p-a-Si: H). Despite the deterioration of the material by the doping, the rate of recombination decreases on the active layer (n-c-Si) because of the higher electric field strength. We achieved an efficiency of 19.8 % by optimizing both of gap energy and doping density.

1. Introduction

Converting light energy into electrical energy is not absolute; there are losses that affect the performance of photovoltaic cells which are due to the nature of the material and the used technology. Technological advances in solar cell silicon heterojunction have evolved much in recent years due to their efficiency of energy conversion, but also of their relatively simple manufacturing process [1–3]. For example, work [4] reports an efficiency of 26.4 % under the AM1.5 spectrum. However, according to estimates made in several works such as [5], the energy efficiency of silicon-based solar cells under non-concentrated solar radiation could reach 30 %.

The parameters which strongly affect the behaviour of HIT solar cells are electrical and geometrical parameters of the buffer layer which is made of hydrogenated amorphous silicon (a-Si: H) [6,7]. In the following, we will study the influence of this layer thickness, as well as its doping density and the gap energy, on the photovoltaic parameters (J_{SC} , V_{OC} , FF, η) of an n-type HIT solar cell. To carry

* Corresponding author.

E-mail address: azzemou.fatiha@yahoo.com (F. Azzemou).

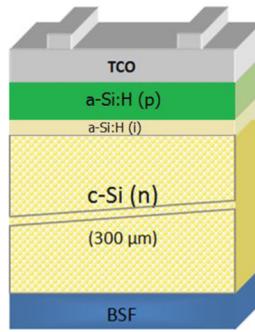


Fig. 1. Schematic representation of the simulated structure ITO/p-a-Si:H/i-a-Si:H/n-c-Si/BSF/Al.

out our simulations, we used the ASDMP software (Amorphous Semiconductor Device Modelling program).

2. Presentation of the studied cell

The HIT solar cell that we’ve studied has the following structure: ITO/ p-a-Si:H / i-a-Si:H / n-c-Si / BSF/Al and is represented in Fig. 1. It consists of a substrate of crystalline silicon doped n (n-c-Si) with a thickness of 300 μm on which is deposited, on the front face, intrinsic amorphous silicon (i-a-Si: H) over a thickness of 30Å°. This intrinsic layer represents the specificity of HIT cells and allows the passivation of the surface defects existing at the p-a-Si:H/n-c-Si interface. Then, a layer of p-doped amorphous silicon is deposited to constitute the emitter (p-a-Si:H) over a thickness which we will change from 50Å° to 230Å° during our simulations. An anti-reflective layer (TCO: Transparent Conductive Oxide) based on ITO (Indium Tin Oxide) is deposited on the amorphous silicon doped p to form the front contact.

On the back face, a highly doped n⁺⁺-c-Si layer (N_D=5.10¹⁸ cm⁻³) with a thickness of 1 μm constitutes the Back Surface Field (BSF) and finally a layer of aluminum is added to constitute the back contact of the studied cell.

The parameters of each layer are summarized in Table 1.

3. Simulation model

The different parameters of our device were determined by ASDMP (Amorphous Semiconductor Device Modeling Program) developed by Professor Parsathi Chatterjee [8–10]. Prof. Roca's group at École polytechnique de Paris, France, has demonstrated experimentally that ASDMP model mimics the performance of p-i-n and HIT solar cells with data from solar cell performance [11–13].

ASDMP examines the behaviour of semiconductor device structures under steady state in one dimension by solving simultaneously Poisson’s equation and the continuity equations for free electrons and free holes using finite differences and Newton-Raphson method. These equations are:

Poisson’s equation:

$$\frac{\partial^2 \Psi(x)}{\partial x^2} = \frac{\rho(x)}{\epsilon} \tag{1}$$

The holes continuity equation:

Table 1
Principal input parameters.

	ITO	p-a Si:H	i-a-Si :H	n-c-Si	n-c-Si	BSF
D	84,5nm	50 – 235 Å°	30 Å°	32 Å°	298.9968 μm	1 μm
E _g (eV)		1,7 - 2	1,9	1,12	1,12	1,12
N _D (cm ⁻³)		0	0	9.10 ¹⁴	9.10 ¹⁴	5.10 ¹⁸
N _A (cm ⁻³)		10 ¹⁹ - 10 ²⁰	0	0	0	0
χ (eV)		3,9	3,95	4,22	4,22	4,22
N _{D(TOT)} (cm ⁻³)		1 .10 ¹⁹	7.10 ¹⁴	1.7 .10 ¹⁸	3.10 ¹¹	3.10 ¹¹
N _{A(TOT)} (cm ⁻³)		1.10 ¹⁹	7 .10 ¹⁴	1.7 .10 ¹⁸	3.10 ¹¹	3.10 ¹¹
μ _n (cm ² /Vs)		20	30	1000	1000	1000
μ _p (cm ² /Vs)		4	12	450	450	450
N _C (cm ⁻³)		1.10 ¹⁹	2.10 ²⁰	5 .10 ¹⁸	5 .10 ¹⁸	5.10 ¹⁸
N _V (cm ⁻³)		1.10 ¹⁹	2.10 ²⁰	5 .10 ¹⁸	5.10 ¹⁸	5.10 ¹⁸

$$G(x) - R(p(x), n(x)) - \frac{1}{q} \frac{\partial J_p(x)}{\partial x} = 0 \tag{2}$$

The electrons continuity equation:

$$G(x) - R(p(x), n(x)) + \frac{1}{q} \frac{\partial J_n(x)}{\partial x} = 0 \tag{3}$$

The effective charge density:

$$\rho(x) = q [p(x) - n(x) + p_T(x) - n_T(x) + N_{net}^+] \tag{4}$$

$\epsilon(x)$ is the dielectric permittivity of the semiconductor. $\Psi(x)$ is the potential energy of an electron at the vacuum level, and $\rho(x)$ is the space charge density in the semiconductor. $J_n(x)$ and $J_p(x)$ are the electron and hole current, respectively, and q is the charge of electron. The term $G(x)$ represents the net optical generation of free electron-hole pairs per unit volume, while $R(x)$ represents the net recombination of free carriers per unit volume. The boundary conditions used for the Poisson's equation are:

$$\psi(0) = \psi_{b0} + \chi_0 - \psi_{bL} - \chi_L - V \tag{5}$$

and

$$\psi(L) = 0 \tag{6}$$

Where $\Psi(0)$ [$\Psi(L)$] is the vacuum level at $x = 0$ (L), ψ_{b0} (ψ_{bL}) the front (back) contact barrier height and χ_0 (χ_L) the electron affinity of the material at $x = 0$ (L).

The optical part of the software integrates the semi-empirical model of François Leblanc [14]. The generation factor is calculated by taking into account multiple reflections and diffusion by rough interfaces.

4. Results and discussions

4.1. Effect of emitter thickness on cell performance

As the maximum amount of light must reach the crystalline silicon (active layer in HIT solar cells), the emitter must be as thin as possible in order to improve the quality of the cell. We have varied the thickness of the emitter (p-a-Si:H) from 50Å to 230Å, and we plot its influence on the output parameters of the cell (Fig. 2).

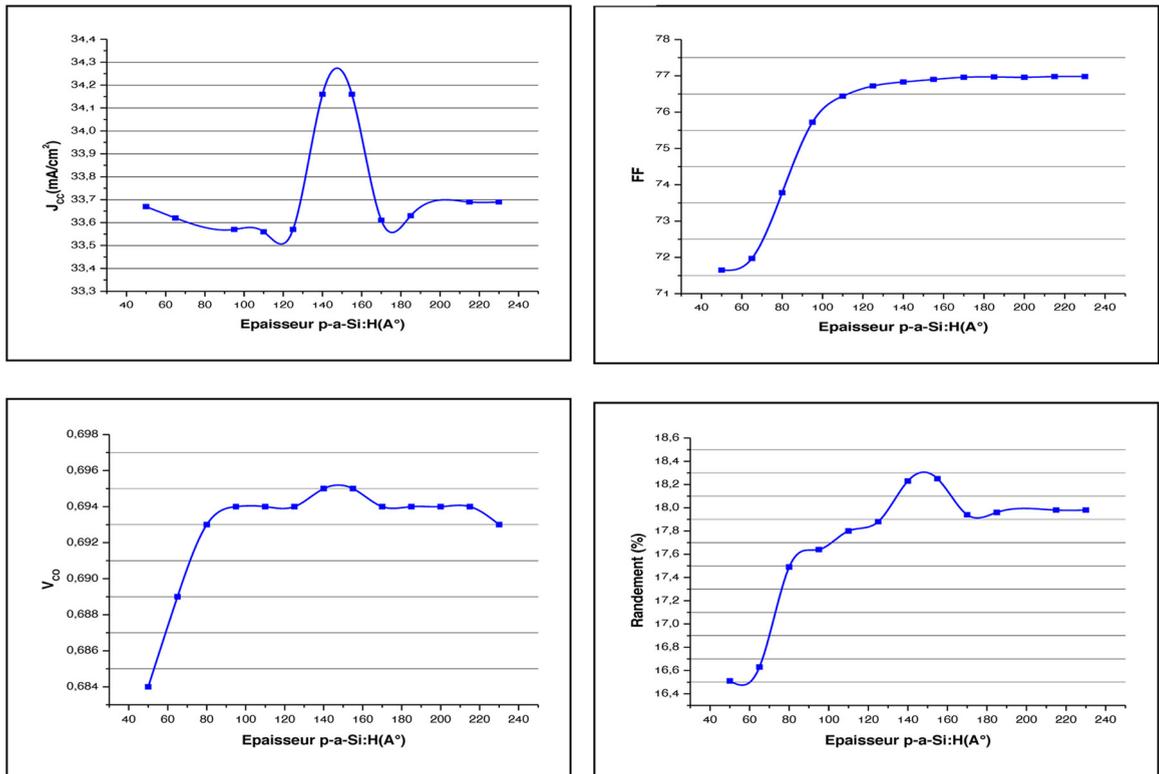


Fig. 2. Variation of photovoltaic parameters as a function of the thickness of the emitter.

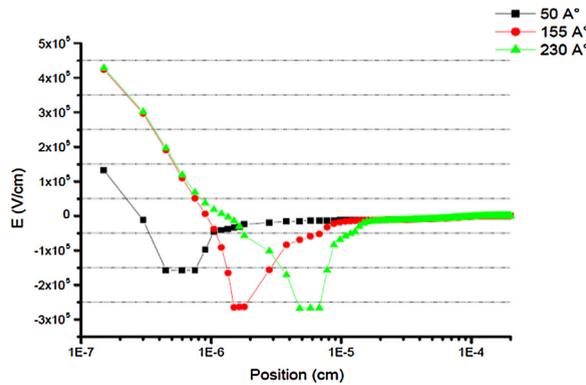


Fig. 3. Electric field in the depletion zone as a function of the position in the device for 3 thicknesses of p-a-Si: H (50Å°, 155Å° and 230Å°).

We can note that between 140Å° and 155Å° of thickness, a peak of current density is observed, due to the good light absorption by the active layer (n-c-Si) and the high generated diffusion potential. The low current density observed for thicknesses less than 140Å° is due to the low induced potential resulting from the weak electric field created at the junction, causing a drop in the collection of charge carriers. For values of thickness greater than 155Å°, the short-circuit current decreases again, because the photogenerated carriers have to travel longer distances than their diffusion lengths, and will be more likely to recombine than to be collected. The cell efficiency follows the same variation as the short circuit current density.

In Fig. 3, we have plot the electric field generated at the junction p-a-Si: H/n-c-Si for different values of the emitter thickness (50Å°, 155Å° and 230 Å°).

The curves obtained confirm the interpretation given above. We can notice that for smaller emitter thickness, the electric field is weaker, which generates a poor collection of the photogenerated minority carriers which cannot reach the zone where they will be collected.

Fig. 4 illustrates the recombination rate according to the position in the cell for different values of the emitter thickness. It is apparent that the recombination rate increases with the increase of the emitter thickness

These results can be explained by the fact that the diffusion length of the photogenerated carriers becomes small compared to the thickness of the emitter, and therefore, they recombine before being collected. Furthermore, the high density of defects which exists in hydrogenated amorphous silicon contributes greatly to this high rate of recombination when the thickness of the p-a-Si: H layer increases [15].

4.2. Choice of the best material constituting the emitter according to its gap

The second step of the emitter optimization concerns the energy gap of the material used for the elaboration of this layer. For this purpose, we have chosen several materials, with different gap energies, resumed in Table 2.

Fig. 5 represents photovoltaic parameters variation for an emitter thickness of 155Å° vs the energy band. We can notice that the cell performance is reduced for a small gap (1.6 eV) then begins to improve when the gap energy increases until obtaining a maximum efficiency of 19.48 % for a gap of 1.7 eV. For gap values greater than 1.7 eV the efficiency decreases considerably until reaching 12.5 % for an energy gap of 2 eV.

Fig. 6 represents the electric field generated at the junction p-a-Si: H/n-c-Si for 3 different gaps (1.6 eV, 1.7 eV, 2 eV). We can observe that the electric field increases with the increase of the material gap.

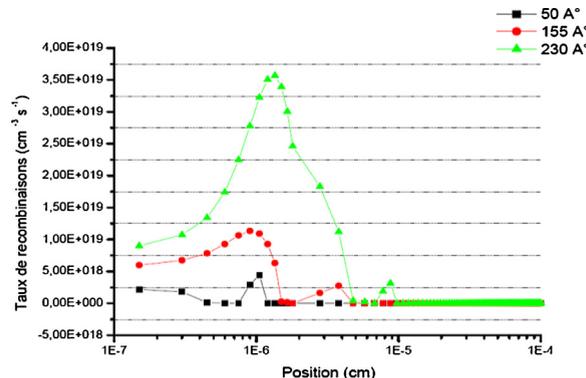


Fig. 4. Recombination rate as a function of the position in the device for 3 thicknesses of the layer p-a-Si:H.

Table 2
Different Materials used for the emitter elaboration.

Materials	a-Si:H weakly hydrogenated	a-Si:H	a-SiC:H	pm-Si:H	a-SiNx: H
Gap energy (eV)	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0
Reference	[16]	[6]	[6]	[7]	[17]

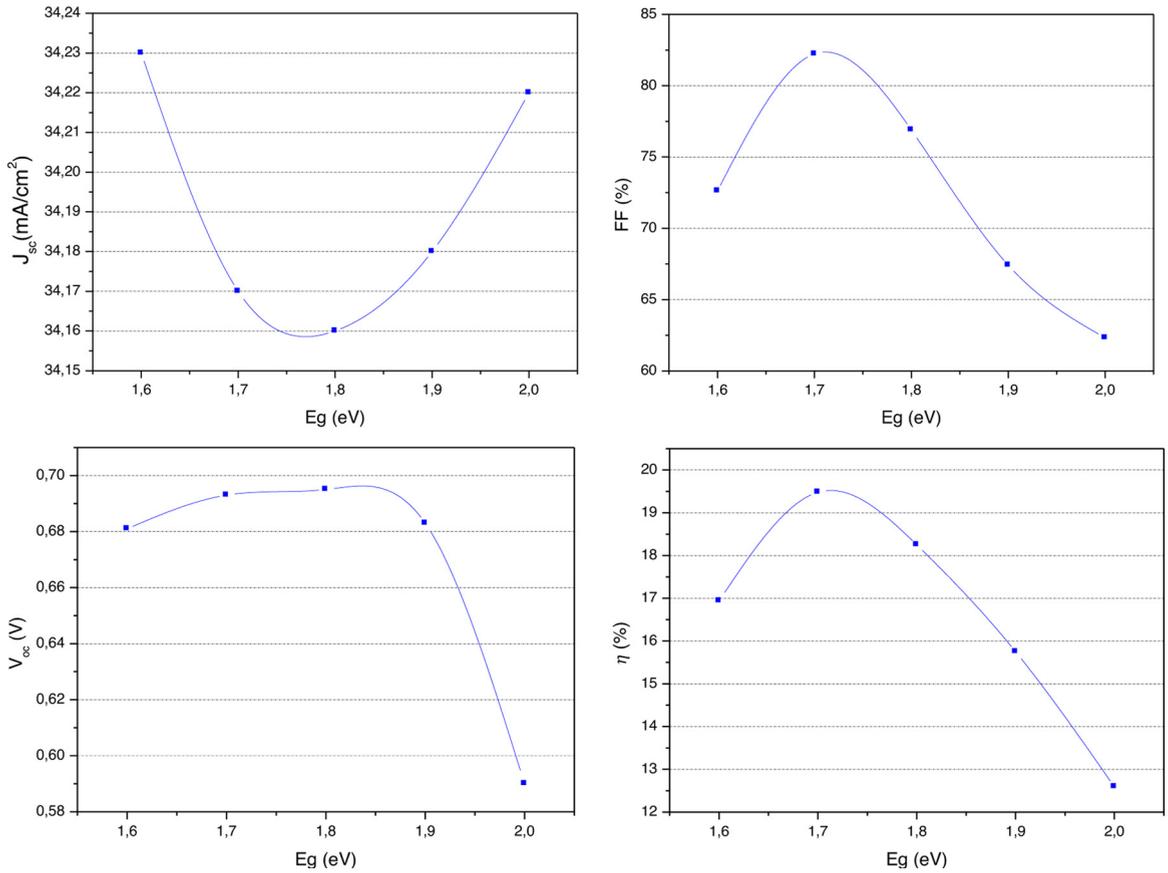


Fig. 5. Variation of photovoltaic parameters as a function of emitter gap.

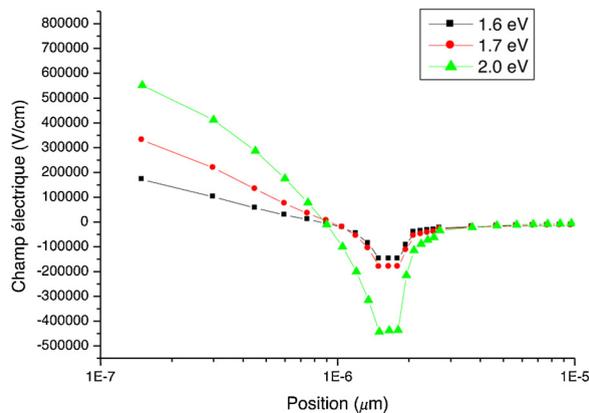


Fig. 6. Electric field according to the position in the device for 3 emitter gaps (1.6 eV, 1.7 eV, 2 eV).

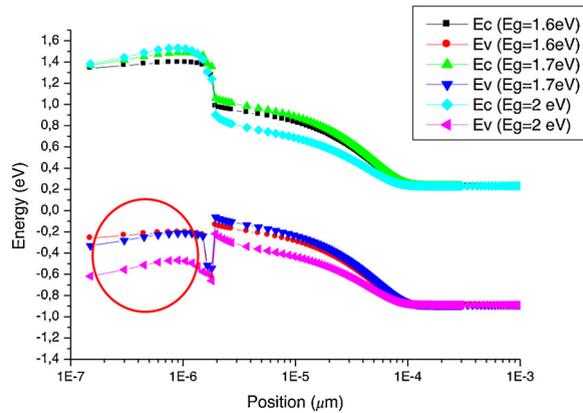


Fig. 7. Band diagram of the studied structure for 3 different gaps of the emitter.

Despite the increase of the electric field, the cell efficiency is reduced for big energy gaps. In order to understand why the efficiency of the cell no longer increases with the increase of the electric field, we plot on the Fig. 7. The band diagram of the studied structure and we can see that a big increase of the gap energy induces a potential barrier at the interface (ITO / p-a-Si: H) which blocks the passage of photogenerated charge carriers, thus increasing the recombination rate at the front face of the cell [18].

Fig. 8 confirms the interpretation given above, because the recombination rate decreases when the gap passes 1.6 eV–1.7 eV (due to the increase of the electric field), then increases largely when the gap passes from 1.7 eV to 2 eV because of the potential barrier induced by the widening of the forbidden band.

4.3. Optimization of emitter doping

In order to finalize the optimization of the emitter, we were interested in its doping density, which we varied from 10^{19} cm^{-3} to 10^{20} cm^{-3} , and we plotted the variation of photovoltaic parameters according to doping. (Fig. 9)

The efficiency of the cell necessarily increased with the increase in the doping density of the emitter. The strong electric field created at the junction p-a-Si: H/n-c-Si is responsible of this enhancement. We thus obtained efficiency of 19.8 % from a doping rate of $4.10^{19} \text{ cm}^{-3}$.

5. Conclusions

A simulation study was carried out as a first step to optimize the buffer layer, using ASDMP software, in order to obtain high efficiency HIT solar cells. The optimized parameters will help to set the deposition conditions by PECVD during the development of these photoconverters.

We have been able to show that a thickness of the p-a-Si:H layer of 155\AA makes it possible to reach the best values of the cell parameters with an efficiency of 18.25 %. For a thickness less than 155\AA , the layer is too thin thus generating a weak electric field at the junction p-a-Si: H/n-c-Si. The latter has a very important role in the collection of charge carriers. The increase in the width of the emitter beyond 155\AA causes a drop in the efficiency of the cell. The choice of an energy gap of the emitter of 1.7 eV made it possible to raise the efficiency to 19.48 %, and finally the optimization of the doping density of the emitter further improved the performance

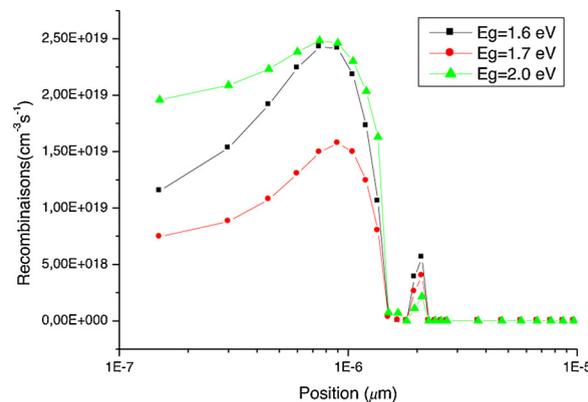


Fig. 8. Recombination rate as a function of the position for 3 gaps of the emitter.

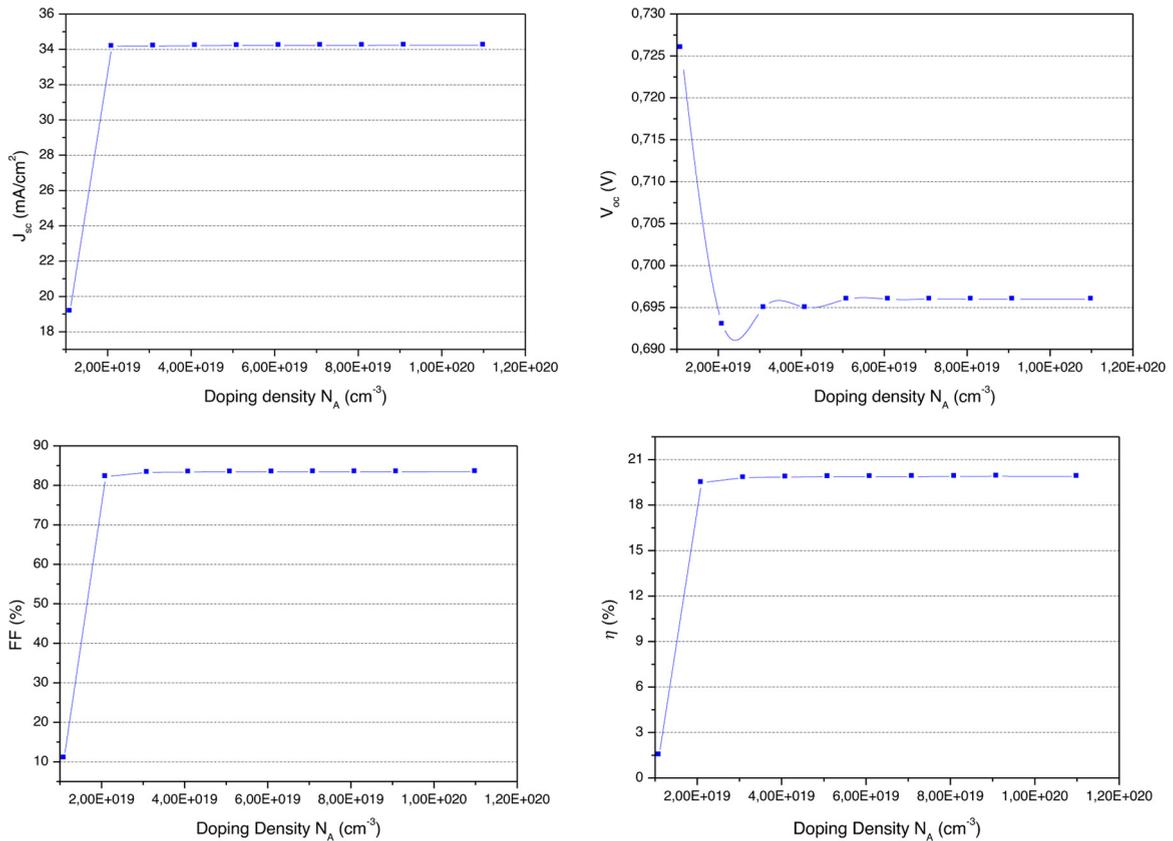


Fig. 9. Variation of photovoltaic parameters as a function of the emitter doping density.

of the cell with an efficiency of 19.8 %.

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

References

- [1] K. Yamamoto, D. Adachi, H. Uzu, M. Ichikawa, T. Terashita, T. Meguro, N. Nakanishi, M. Yoshimi, J.L. Hernández, *Jpn. J. Appl. Phys.* 54 (2015) 08KD15.
- [2] D. Adachi, J.L. Hernández, K. Yamamoto, *Appl. Phys. Lett.* 107 (2015) 233506.
- [3] M.A. Green, Y. Hishikawa, W. Warta, E.D. Dunlop, D.H. Levi, J. HohlEbinger, A.W.H. Ho-Baillie, *Prog. Photovoltaics* 25 (2017) 668.
- [4] K. Yoshikawa, H. Kawasaki, W. Yoshida, et al., Silicon heterojunction solar cell with interdigitated back contacts for a photoconversion efficiency over 26%, *Nat. Energy* 2 (5) (2017) 17032.
- [5] W. Shockley, H.J. Queisser, Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells, *J. Appl. Phys.* 32 (1961) 510–519.
- [6] Y. Poissant, P. Chatterjee, P. Roca i Cabarrocas, *J. Appl. Phys.* 93 (2003) 170.
- [7] Vinh Ai Dao, et al., High-Efficiency Heterojunction with Intrinsic Thin-Layer Solar Cells: A Review, *Curr. Photovolt. Res.* 1 (2) (2013) 73–81.
- [8] P. Chatterjee, M. Favre, F. Leblanc, J. Perrin, *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* 426 (1996) 593.
- [9] P. Chatterjee, *J. Appl. Phys.* 76 (2) (1994) 1301–1313.
- [10] P. Chatterjee, *J. Appl. Phys.* 79 (9) (1996) 7339–7347.
- [11] P. Nandita, Ph.D. thesis, energy research unit, Indian association for the cultivation of science, Jadavpur, calcutta, India, 2000.
- [12] N. Palit, P. Chatterjee, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 53 (3) (1998) 235.
- [13] U. Dutta, P. Chatterjee, P. Roca i Cabarrocas, P. Chaudhuri, R. Vanderhaghen, *J. Non-Cryst. Solids* 338 (2004) 677.
- [14] F. Leblanc, J. Perrin, J. Schmitt, *J. Appl. Phys.* 75 (1994) 1074.
- [15] W.L. Rahal, D. Rached, *J. Nano- Electron. Phys.* 9 (4) (2017) 04001.
- [16] W. Futako, et al., *J. Appl. Phys.* 84 (3) (1998) 1333.
- [17] Jérémy BARBÉ, PhD Thesis, Université de Toulouse, Fabrication et caractérisation de nanocristaux de silicium encapsulés dans des matrices siliciées amorphes : rôle des interfaces et de la matrice sur les propriétés structurales, optiques et électriques, 2013.
- [18] D. Rached, M. Mostefaoui, *Thin Solid Films* 516 (2008) 5087.



Simulation and Optimization of Back Surface Field for Efficient HIT Solar Cells

Wassila Leila Rahal^{1,2} · Djaaffar Rached³ · Fatma Mahi¹ · Fatiha Azzemou¹

Received: 26 January 2021 / Accepted: 23 March 2021

© Springer Nature B.V. 2021

Abstract

We investigate an appropriate material for the optimisation of Back Surface Field (BSF) layer in Heterojunction with Intrinsic thin layer (HIT) solar cells: ITO/p-a-Si:H/i-a-Si:H/n-c-Si/BSF/Ag. The obtained results show that it is important to choose hydrogenated amorphous silicon to create the BSF layer instead of crystalline silicon as in the case for conventional HIT solar cells. The use of hydrogenated amorphous silicon creates a significant band discontinuity at the valence band due to the presence of the heterojunction at the interface n-c-Si/n+-a-Si:H. We also show that increasing the BSF layer thickness degrades the solar cell J-V characteristic due to the low diffusion length and lifetime of the minority carriers and also because of the increase of the recombination rate in this heavily doped layer. The global device optimization was performed with SCAPS-1D software under STC conditions and the results show that a considerable efficiency of 27.44 % can be achieved.

Keywords Solar cell · Hydrogenated amorphous silicon · Heterojunction · BSF · SCAPS-1D

1 Introduction

Heterojunctions with Intrinsic Thin layer solar cells (HIT) have received much attention in recent years in theoretical and experimental studies due to their good energy conversion and relatively simple structure [1–8]. HIT solar cells have lot of advantages, compared with other crystalline silicon photovoltaic technologies, in terms of operating temperatures as well as the possibility of developing bifacial modules. [9–16]. In 2013, Sanyo company reported that a conversion

efficiency of 24.7 % was reached for HIT solar cells. [17]. In 2017, a record efficiency of 26.4 % has been achieved [18]. However, according to estimations made in several works such as [19], the energy efficiency of silicon-based solar cells could reach 30 %.

In order to reach high-efficiency HIT solar cells, several parameters must be understood and adjusted judiciously. In a conventional HIT solar cell, BSF layer is a highly doped region, at the back of the crystalline wafer layer and is generally elaborated by high temperature diffusion procedures. The BSF region extend to 1 μm into the c-Si wafer and have a high acceptor doping level of 10^{18} cm^{-3} compared to 10^{14} cm^{-3} in the rest of the c-Si substrate [20].

With the development of thin film deposition processes, silicon films with different gap energies can be produced under different deposition conditions. In general, the band gap of amorphous silicon varies from 1.6 eV to 2 eV [21–24].

In this study, we optimize with numerical simulation a HIT n-c-Si solar cell with the structure: ITO/p-a-Si:H/i-a-Si:H/n-c-Si/BSF/Ag. We also investigate the use of different amorphous silicon materials, for constituting a strongly doped layer on the back side of the c-Si bulk and compare the obtained results with a BSF directly diffused in the crystalline bulk.

✉ Wassila Leila Rahal
leila.rahal@univ-mosta.dz

¹ Département de Physique, Faculté des Sciences Exactes et de l'Informatique, Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem, Mostaganem, Algeria

² Laboratoire d'Analyse et d'Application des Rayonnements, Département de Physique, Faculté de Génie Physique, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, USTO-MB, Oran BP1505, Algeria

³ Laboratoire de Physique des Plasmas, Matériaux Conducteurs et leurs Applications (LPPMCA), Département de Physique Energétique, Faculté de Physique, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, USTO-MB, Oran BP1505, Algeria

2 Numerical Modelling and Solar Cell Parameters

To realise our simulations, we've used the SCAPS-1D software [25–27]. Developed by the Professor Mark Burgelman, this software is available to researchers free of charge, and allows the study of semiconductor-based devices by solving the Poisson equation (Eq. 1), and the continuity equations for free electrons and holes (Eq. 2 and Eq. 3).

$$\frac{\partial^2 \Psi(x)}{\partial x^2} = -\frac{\rho(x)}{\varepsilon} = \frac{q}{\varepsilon} [n - p + N_A^- - N_D^+] \quad (1)$$

$$G(x) - R(p(x), n(x)) - \frac{1}{q} \frac{\partial j_n(x)}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$G(x) - R(p(x), n(x)) - \frac{1}{q} \frac{\partial j_p(x)}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

The HIT solar cell that we studied is represented in Fig. 1. It consists of a n-doped crystalline silicon substrate (n-c-Si) with a thickness of 300 μm on which is deposited a layer of intrinsic amorphous silicon (i-a-Si: H) with a thickness of 50 \AA . The intrinsic layer allows the passivation of the surface defects existing at the p-a-Si:H/n-c-Si interface. A layer of p-doped amorphous silicon is deposited on the passivation layer to create the emitter (p-a-Si:H) with an optimized thickness of 50 \AA [28]. An anti-reflective layer (TCO: Transparent Conductive Oxide) based on ITO (Indium Tin Oxide) is deposited on the emitter. On the back of the solar cell, a highly doped layer creates the Back Surface Field (BSF). This layer generates a potential barrier high and drive back the minority carriers towards the bulk thus allowing better collection of the photogenerated carriers. Our study focused on this last layer. The principal used parameters are summarized in Table 1.

3 Results and Discussions

In order to optimize the studied cell, we performed a series of simulations under STC conditions using SCAPS-1D software. We initially used the parameters given in Table 1 in order to obtain the photovoltaics (PV) characteristics of the cell (Short-circuit current density J_{sc} , open circuit voltage V_{oc} , Fill Factor FF and the conversion efficiency η). We studied the effect of different silicon-based materials available for BSF elaboration on the cell performance, then we studied the BSF layer thickness of the best material found. The simulation was done by varying a single parameter, keeping the others constant, then by fixing the parameter studied at its optimal value for the following simulations.

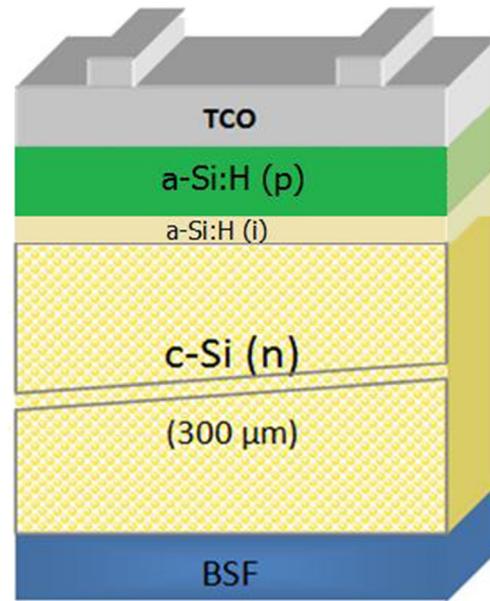


Fig. 1 Schematic representation of the simulated structure ITO/p-a-Si:H/i-a-Si:H/n-c-Si/BSF/Ag

3.1 Effect of Different Amorphous Silicon Materials for BSF Elaboration on the Cell Performance

We first choose the appropriate material for the development of BSF: Crystalline silicon or hydrogenated amorphous silicon? We set the thickness of the BSF layer at 40 nm and its doping at 10^{15} cm^{-3} and we modify the gap. The energy gap $E_g = 1.12 \text{ eV}$ corresponds to crystalline silicon and the energy gap varying from 1.6 eV to 2 eV corresponds to different hydrogenated amorphous silicon materials. We summarize in Table 2 the obtained results.

According to Table 2, hydrogenated amorphous silicon gives better results compared to crystalline silicon with an

Table 1 Principal input parameters of n-type HIT solar cell

	p-a Si:H	i-a-Si:H	n-c-Si	BSF
Thickness	50 \AA	50 \AA	300 μm	Variable
E_g (eV)	1.72	1.72	1.12	1.12 / 1.7-2
N_D (cm^{-3})	0	0	10^{14}	$10^{15}/10^{20}$
N_A (cm^{-3})	10^{19}	0	0	0
χ (eV)	3.9	3.9	4.05	4.05/3.9
N_t (cm^{-3})	10^{21}	10^{13}	10^{11}	$10^{11}/10^{21}$
μ_n (cm^2/Vs)	20	30	1450	1450/20
μ_p (cm^2/Vs)	5	10	450	450/5
N_C (cm^{-3})	10^{20}	10^{20}	10^{19}	$10^{19}/10^{20}$
N_V (cm^{-3})	10^{20}	10^{20}	10^{19}	$10^{19}/10^{20}$
ε	11.9	11.9	4.05	4.05/11.9
V_{th} (cm/s)	10^7	10^7	10^7	10^7

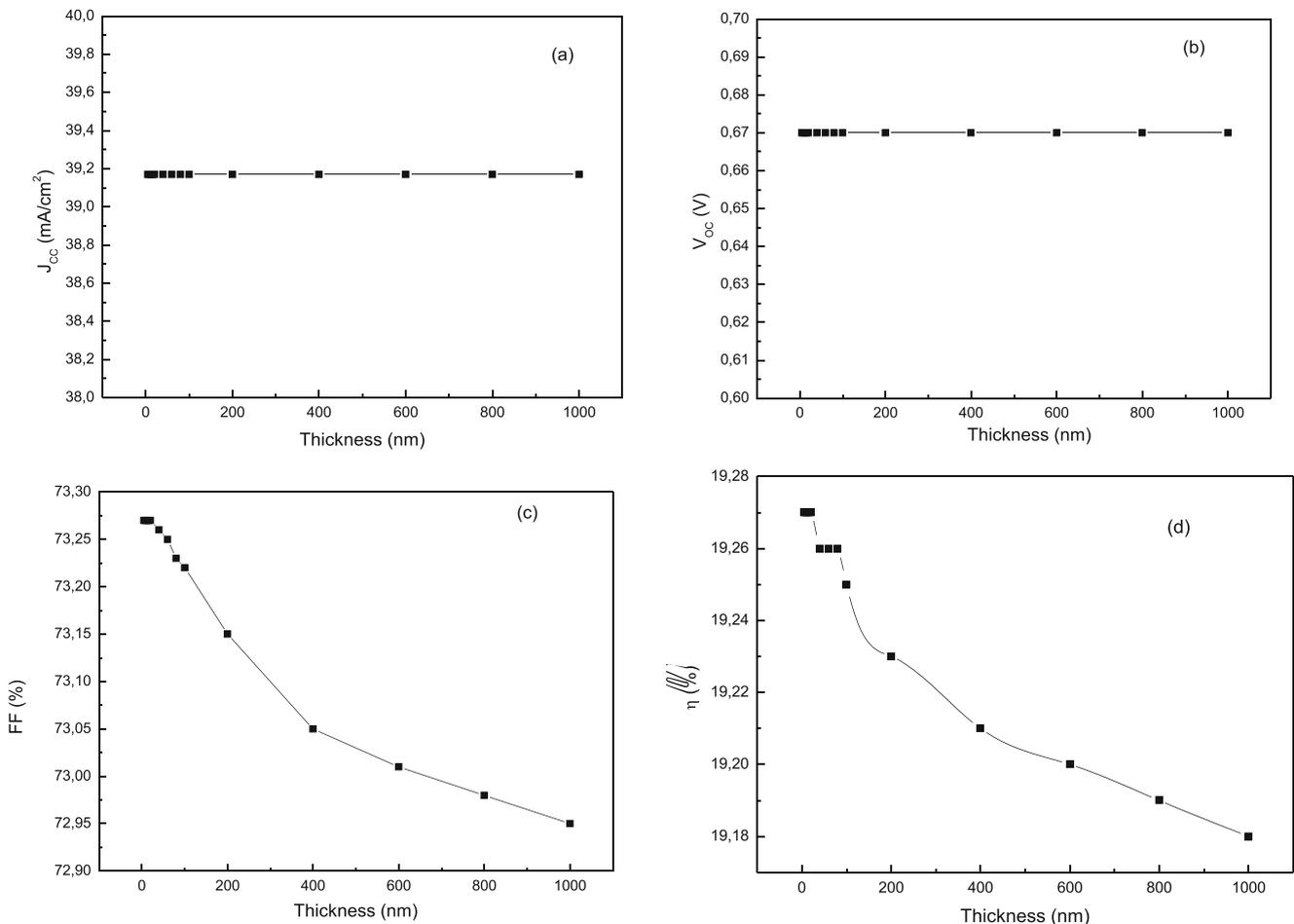
Table 2 Effect of the BSF gap energy on the studied cell PV parameters

Materials	Eg (eV)	Experimental references for the gap energy	V _{oc} (V)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
c-Si	1.12	[12]	0.58	38.07	75.78	16.87
a-Si:H weakly hydrogenated	1.6	[21]	0.67	39.17	73.27	19.27
a-Si:H	1.7	[22]	0.67	39.17	73.27	19.27
a-SiC:H	1.8	[22]	0.67	39.17	73.26	19.27
pm-Si:H	1.9	[23]	0.67	39.17	73.26	19.27
a-SiNx: H	2	[24]	0.67	39.17	73.26	19.26

efficiency of 19.27 % for a-Si: H instead of 16.87 % for c-Si. This can be explained by the fact that in the case of a heterojunction (nc-Si / n++ a-Si: H), there is creation of a band discontinuity allowing the retro-diffusion of minority carriers. This discontinuity does not exist in the case of a homojunction (nc-Si / n++ c-Si). We can also observe that the use of different amorphous silicon materials does not affect the performance of the cell so much. Indeed, the BSF layer is located on the rear side of the cell and the photons absorption does not play an important role here.

3.2 Effect of the BSF Layer Thickness on the Cell Performance

The material that gives the best results for the BSF layer elaboration is the hydrogenated amorphous silicon with gap energy of 1.7 eV. Experimentally, the BSF layer can be deposited on the crystalline silicon substrate using the PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) deposition process, the thickness of the layer can therefore vary from a few nm to a few μm [29]. We thus varied the BSF layer thickness from

**Fig. 2** Influence of the thickness of the BSF layer on the PV parameters of the studied cell: **a** J_{sc}. **b** V_{oc}. **c** FF. **(d)** η

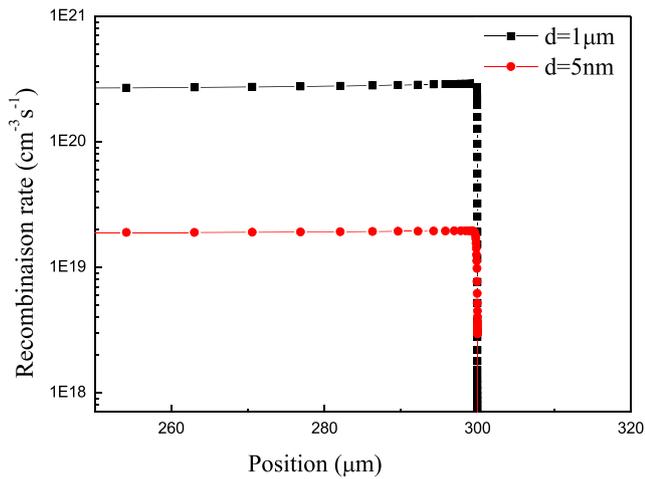


Fig. 3 Recombination rate at the interface n-c-Si/n⁺⁺a-Si:H for thickness $d = 5$ nm and $d = 1$ μm

5 nm to 1 μm , while fixing the donors doping density $N_D = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ and the gap energy $E_g = 1.7$ eV.

We plotted the variation of photovoltaic parameters according to the thickness of the BSF layer and we obtained the curves illustrated in Fig. 2.

The J_{sc} and V_{oc} remain constant regardless of the BSF layer thickness. This can be explained by the fact that the electric field at the junctions p-a-Si:H/n-c-Si and n-c-Si/n⁺⁺a-Si:H operates at the metallurgical junction and the thickness of the layers which constitute the junction has no influence on it and consequently on collecting the photogenerated carriers. The Fill Factor decreases while increasing thickness. Indeed, it goes from 73.27 % for a thickness of 5 nm to 72.95 % for a thickness of 1 μm . This can be explained by the variation of the series resistance of the device which increases with the thickness of the a-Si-H, since it is linked to the resistivity of the material, causing a deterioration of the overall device performance. On the other hand, as the BSF is made from hydrogenated amorphous silicon with high density of defects, when the thickness of the BSF layer increases the defect density grows, thus inducing a high recombination rate which degrades the efficiency of the cell (Fig. 3). The efficiency follows the curve of the FF and decreases from 19.27 to 19.18 % when the BSF layer thickness increases from 5 nm to 1 μm .

To further enhance the performance of the cell, we have optimized the parameters of all layers constituting the cell

Table 3 Optimised solar cell parameters

Layer	Thickness d (nm)	Doping density N_A (cm^{-3})	Doping density N_D (cm^{-3})	Gap energy E_g (eV)	Defects density N_t (cm^{-3})
p-a-Si:H	5	10^{19}	-	1.72	10^{21}
i-a-Si:H	5	-	-	1.72	10^{13}
n-c-Si	3.10^5	-	10^{18}	1.12	10^{11}
BSF	5	-	10^{20}	1.7	10^{21}

Table 4 Output parameters for HIT solar cell with and without BSF

	V_{co} (V)	J_{sc} (mA/cm^2)	FF (%)	η (%)
Cell with BSF	0.84	38.75	83.51	27.44
Cell without BSF	0.80	37.08	85.76	25.57

(Emitter p-a-Si:H, intrinsic layer i-a-Si:H and active layer n-c-Si) and we summarized the optimized values in Table 3.

Using the parameters given in Table 3, we obtain a short-circuit current density $J_{sc} = 38.75 \text{ mA}/\text{cm}^2$, an open circuit voltage $V_{oc} = 0.84$ V, a Fill Factor $FF = 83.51$ % and a conversion efficiency $\eta = 27.44$ %.

3.3 Highlighting the Contribution of the BSF Layer on the Quality of the Studied Cell

In order to highlight the importance of the BSF layer on the cell efficiency, we simulated the studied cell with and without the BSF layer. As can be seen from Table 4, all the photovoltaic parameters (V_{oc} , J_{sc} , FF and η) decrease when the BSF layer is removed.

Figure 4 shows the electric field at the back side of the cell with and without BSF layer. When the BSF layer is removed, the n / n⁺ junction at the rear face of the cell does not exist and therefore there is no electric field ($E = 0$ V/cm). In the presence of the BSF layer, a strong electric field is observed at the n-c-Si / BSF junction. This field is negative because it is directed from the BSF layer to the active layer and reaches a maximum value of 9.10^6 V/cm. It is through this electrical field that the cell performance is improved.

4 Conclusions

The main objective of this work is to study the influence of the BSF layer on the photovoltaic parameters of a HIT solar cell, having the structure ITO / p-a-Si:H/i-a-Si:H/n-c-Si/BSF/Ag, and to understand how to improve cell efficiency by optimizing this important layer.

The simulations performed with SCAPS-1D software showed that to obtain good quality photovoltaic cells, it is important to choose hydrogenated amorphous silicon to constitute the BSF

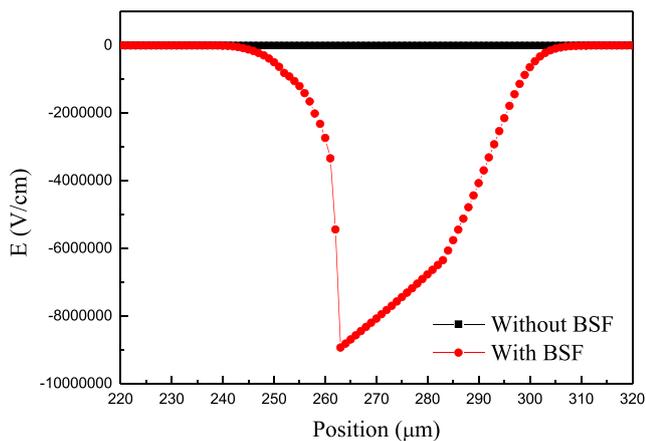


Fig. 4 Induced electric field at the rear face of the cell with and without BSF layer

layer instead of using crystalline silicon as it is done by Panasonic company (previously Sanyo). The use of hydrogenated amorphous silicon with a gap of 1.7 eV creates a significant band discontinuity at the valence band while we are in the presence of a heterojunction (n-c-Si/n⁺⁺a-Si:H) instead of a homojunction (n-c-Si/n⁺⁺c-Si). This band discontinuity prevents minority holes from passing from the n layer to the BSF layer and from recombining. It is also necessary to decrease the thickness of the BSF layer to 5 nm, in order to decrease the defects density and consequently decrease the recombination rate. An efficiency of 27.44 % could be achieved after the optimization of all the layers constituting the cell, which are the active layer n-c-Si, the passivation layer i-a-Si: H and the emitter p-a-Si: H.

Acknowledgements The authors would like to acknowledge Dr. Marc Burgelman at the University of Gent, Belgium for providing the SCAPS-1D simulator.

Author Contributions W.L.Rahal conceived the study, coordinated the conduct of the study, interpreted the data, and drafted the manuscript; D. Rached participated in the design of the study, assisted in interpreting the data, and helped to draft the manuscript; F. Mahi participated in the design of the study, assisted in interpreting the data; F.Azzemou assisted in interpreting the data, and helped to draft the manuscript. All authors read and approved the final manuscript.

Data Availability

All data and software application support their published claims and comply with field standards.

Declarations This study and all procedures performed involving human participants were in accordance with the ethical standards.

Conflict of Interest The authors have no conflicts of interest to declare that are relevant to the content of this article.

Consent to Participate All authors consent to participate to this publication.

Consent for Publication All authors consent to the publication of the manuscript in SILICON, should the article be accepted by the Editor-in-chief upon completion of the refereeing process.

References

1. Tanaka M, Taguchi M, Matsuyama T, Sawada T, Tsuda S, Nakano S, Hanafusa H, Kumano Y (1992) *Jpn J Appl Phys* 31:3518
2. Sawada T, Terada N, Tsuge S, Baba T, Takahama T, Wakisaka K, Tsuda S, Nakano S (1994) *Proc. 24th IEEE Photovoltaic Specialists Conf* 1219
3. Zhao L, Zhou CL, Li HL, Diao HW, Wang WJ (2008) *Sol Energy Mater Sol Cells* 92:673
4. Taguchi M, Kawamoto K, Tsuge S, Baba T, Sakata H, Morizane M, Uchihashi K, Nakamura N, Kiyama S, Oota O (2000) *Prog Photovoltaics* 8:503
5. Yamamoto K, Adachi D, Uzu H, Ichikawa M, Terashita T, Meguro T, Nakanishi N, Yoshimi M, Hernández JL (2015) *Jpn J Appl Phys* 54:08KD15
6. Adachi D, Hernández JL, Yamamoto K (2015) *Appl Phys Lett* 107: 233506
7. Green MA, Dunlop ED, Hohl Ebinger J, Yoshita M, Ho-Baillie AWH (2019) *Prog Photovolt* 27:565
8. Cao Yu et al (2018) *Jpn J Appl Phys* 57:08RB15
9. De Wolf S, Descoeurdes A, Holman ZC, Ballif C (2012) *Green* 2:7
10. Schmidt M, Korte L, Laades A, Stangl R, Schubert C, Angermann H, Conrad E, Maydell KV (2007) *Thin Solid Films* 515:7475
11. King DL, Kratochvil JA, Boyson WE (1997) *Proc. 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conf.* 1183
12. Mishima T, Taguchi M, Sakata H, Maruyama E (2011) *Sol Energy Mater Sol Cells* 95:18
13. Makrides G, Zinsser B, Georghiou GE, Schubert M, Werner JH (2009) *Sol Energy Mater Sol Cells* 93:1095
14. Ishii T, Otani K, Takashima T, Kawai S (2011) *Sol Energy Mater Sol Cells* 95:386
15. Aste N, Pero CD, Leonforte F (2014) *Sol Energy* 109:1
16. Abdallah A, Martinez D, Figgis B, El Daif O (2016) *Renew Energy* 97:860
17. Taguchi M, Yano A, Tohoda S, Matsuyama K, Nakamura Y, Nishiwaki T, Fujita K, Maruyama E (2014) *IEEE J Photovolt* 4:96
18. Yoshikawa K, Kawasaki H, Yoshida W et al (2017) *Nat Energy* 5: 17032
19. Shockley W, Queisser HJ (1961) *J Appl Phys* 32:510
20. Nath M, Chatterjee P, Damon-Lacoste J, Roca i Cabarrocas P (2008) *J Appl Phys* 103:034506
21. Futako W et al (1998) *J Appl Phys* 84:1333
22. Poissant Y, Chatterjee P, Roca i Cabarrocas P (2003) *J Appl Phys* 93:170
23. Dao VA et al (2013) *Curr Photovolt Res* 1:73
24. Barbé J (2013) *Fabrication et caractérisation de nanocristaux de silicium encapsulés dans des matrices siliciées amorphes: rôle des interfaces et de la matrice sur les propriétés structurales, optiques et électriques.* PhD Thesis. Université de Toulouse, France
25. Burgelman M, Verschraegen J, Degraeve S, Nollet P (2004) *Prog Photovolt Res Apl* 12:143
26. Verschraegen J, Burgelman M (2007) *Thin Solid Films* 515:6276
27. De cock K, Khelifi S, Burgelman M (2011) *Thin Solid Films* 2011: 7481
28. Azzemou F, Rached D, Rahal WL (2020) *Optik* 217:164802
29. Rahal WL, Rached D (2020) *Optik* 223:165575

Publisher's Note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Terms and Conditions

Springer Nature journal content, brought to you courtesy of Springer Nature Customer Service Center GmbH (“Springer Nature”).

Springer Nature supports a reasonable amount of sharing of research papers by authors, subscribers and authorised users (“Users”), for small-scale personal, non-commercial use provided that all copyright, trade and service marks and other proprietary notices are maintained. By accessing, sharing, receiving or otherwise using the Springer Nature journal content you agree to these terms of use (“Terms”). For these purposes, Springer Nature considers academic use (by researchers and students) to be non-commercial.

These Terms are supplementary and will apply in addition to any applicable website terms and conditions, a relevant site licence or a personal subscription. These Terms will prevail over any conflict or ambiguity with regards to the relevant terms, a site licence or a personal subscription (to the extent of the conflict or ambiguity only). For Creative Commons-licensed articles, the terms of the Creative Commons license used will apply.

We collect and use personal data to provide access to the Springer Nature journal content. We may also use these personal data internally within ResearchGate and Springer Nature and as agreed share it, in an anonymised way, for purposes of tracking, analysis and reporting. We will not otherwise disclose your personal data outside the ResearchGate or the Springer Nature group of companies unless we have your permission as detailed in the Privacy Policy.

While Users may use the Springer Nature journal content for small scale, personal non-commercial use, it is important to note that Users may not:

1. use such content for the purpose of providing other users with access on a regular or large scale basis or as a means to circumvent access control;
2. use such content where to do so would be considered a criminal or statutory offence in any jurisdiction, or gives rise to civil liability, or is otherwise unlawful;
3. falsely or misleadingly imply or suggest endorsement, approval, sponsorship, or association unless explicitly agreed to by Springer Nature in writing;
4. use bots or other automated methods to access the content or redirect messages
5. override any security feature or exclusionary protocol; or
6. share the content in order to create substitute for Springer Nature products or services or a systematic database of Springer Nature journal content.

In line with the restriction against commercial use, Springer Nature does not permit the creation of a product or service that creates revenue, royalties, rent or income from our content or its inclusion as part of a paid for service or for other commercial gain. Springer Nature journal content cannot be used for inter-library loans and librarians may not upload Springer Nature journal content on a large scale into their, or any other, institutional repository.

These terms of use are reviewed regularly and may be amended at any time. Springer Nature is not obligated to publish any information or content on this website and may remove it or features or functionality at our sole discretion, at any time with or without notice. Springer Nature may revoke this licence to you at any time and remove access to any copies of the Springer Nature journal content which have been saved.

To the fullest extent permitted by law, Springer Nature makes no warranties, representations or guarantees to Users, either express or implied with respect to the Springer nature journal content and all parties disclaim and waive any implied warranties or warranties imposed by law, including merchantability or fitness for any particular purpose.

Please note that these rights do not automatically extend to content, data or other material published by Springer Nature that may be licensed from third parties.

If you would like to use or distribute our Springer Nature journal content to a wider audience or on a regular basis or in any other manner not expressly permitted by these Terms, please contact Springer Nature at

onlineservice@springernature.com