

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLICUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان
Université Aboubakr Belkaïd - Tlemcen -
Faculté de TECHNOLOGIE



THESE

Présentée pour l'obtention du **grade de DOCTEUR EN SCIENCES**

En : ELECTRONIQUE

Spécialité : Microélectronique

Par : Benadla Nadjat

Sujet

Etude comparative de différentes cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités

Soutenue publiquement, le 02 /09 / 2020 , devant le jury composé de :

M : HAMDOUNE Abdelkader	Professeur	Univ-Tlemcen	Président
M: GHAF FOUR Kheireddine	Professeur	Univ-Tlemcen	Directeur de thèse
M: LASRI Boumédiène	Professeur	Univ-Saïda	Examineur 1
M: MERAD Lotfi	Professeur	E.S.S.A-Tlemcen	Examineur 2
Mme: BOUAZZA-GUEN Ahlam	Professeur	Univ-Tlemcen	Examineur 3
M: MESLI Sidi Mohammed	M.C.A	E.S.S.A-Tlemcen	Examineur 4

Remerciements

Je remercie ALLAH le miséricordieux de m'avoir donné la volonté de mener ce travail à terme.

Cette étude a été effectuée au sein de la faculté de technologie, sous la direction de Monsieur K.GHAFFOUR, Professeur à l'Université d'Abou Bekr Belkaïd-Tlemcen. Je lui exprime mes sincères remerciements pour son aide et ses conseils.

Je remercie infiniment Monsieur A. HAMDOUNE, Professeur à l'Université d'Abou Bekr Belkaïd-Tlemcen, de me faire l'honneur de présider ce jury.

Mes remerciements vont également aux membres du jury à savoir : Madame A. BOUAZZA Professeur à l'Université d'Abou Bekr Belkaïd-Tlemcen, Messieurs B.LASRI Professeur à l'Université de Saida, L.MERAD Professeur à l'école supérieure E.S.S.A. de Tlemcen et Monsieur S.M. MESLI M.C.A à l'école supérieure E.S.S.A. de Tlemcen d'avoir accepté d'examiner ce travail. Qu'ils trouvent ici mes sincères reconnaissances.

Enfin, je tiens à exprimer ma reconnaissance à mes sœurs Zahira M.C.A. à l'Université d'Abou Bekr Belkaïd-Tlemcen, et Lamia M.A.A. à l'Université d'Abou Bekr Belkaïd-Tlemcen, pour leurs aides et conseils.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à toutes les personnes qui m'ont aidé de près ou de loin à la réalisation de cette thèse plus particulièrement :

- A mes très chers parents, tout mon respect et affection en témoignage de leur soutien, sacrifice, patience, ainsi que pour leurs conseils et orientations dans ma vie.*
- A mes très chers sœurs, belles sœurs et frères.*
- A toute ma famille.*
- A tous mes enseignants.*
- A tous mes amis(es).*

Sommaire

1. INTRODUCTION GENERALE	1
2. Bibliographie	5
3. Chapitre I : Notions de base sur les cellules solaires	1
I. Introduction	6
I.1 Historique	6
I.2 Le rayonnement solaire et le nombre de masse	7
I.2.1 La cellule photovoltaïque	9
I.2.2 L'effet photovoltaïque	10
I.2.3 L'interaction photon/semi-conducteur.....	13
I.2.4 Jonction P-N	15
I.2.5 Les différents rendements d'une cellule photovoltaïque	23
I.2.6 Recombinaison des porteurs.....	26
I.2.7 Schéma électrique équivalent	27
I.2.8 Caractéristiques électriques et paramètres de la cellule photovoltaïque	28
I.2.9 Pertes physiques et technologiques.....	31
I.2.10 Limitation des pertes.....	33
I.3 Les filières des cellules solaires	37
4. Conclusion	38
5. Bibliographie	39
6. Chapitre II: Hétérojonction silicium amorphe/ silicium cristallin Etude théorique	42
II.1 Description du silicium	42
II.2 Cristallinité du silicium	44
II.2.1 Cas du silicium monocristallin.....	44
II.2.2 Cas du silicium multi-cristallin.....	49
II.2.3 Cas de silicium amorphe.....	51
II .3 Principe de base de l'hétérojonction a-Si:H/c-Si.....	56
II.3.1 Le modèle d'Anderson	57
II.3.2 Compléments au modèle d'Anderson.....	59
II.3.3 Influence de l'affinité électronique et de la discontinuité des bandes.....	60
II.4 Différentes hétérojonctions pour le photovoltaïque	60
II.4.1 La structure HIT (Hétérojonction Intrinsic Thin film)	61
7. Conclusion	64
8. Bibliographie	65
9. Chapitre III : Les structures des cellules solaires à contact arrières interdigités	67

10. III.	Introduction
68	
III.1 Les cellules solaires à contacts arrière interdigités.....	68
III.1.1 Structure et principe de fonctionnement d'une cellule solaire IBC.....	68
III.1.2 Procédé de fabrication des cellules solaires à contacts arrière interdigités IBC classique	70
III.1.3 La cellule photovoltaïque à contacts arrière interdigités à hétérojonction IBC-SiHJ	77
III.1.4 Structure et principe de fonctionnement d'une cellule solaire EWT.....	79
III.1.5 Structure et principe de fonctionnement d'une cellule solaire MWT.....	86
III.2 : La Sérigraphie.....	88
III.2.1 Écrans	90
III.2.2 Pâte de sérigraphie.....	90
III.2.3 Impression.....	91
III.2.4 Etuvage de la pâte	92
III.2.5 Déliantage de la pâte	93
III.2.6 Cuisson des contacts.....	93
11. Conclusion	94
12. Bibliographie	95
13. Chapitre IV : Simulation des cellules solaires à contacts arrières interdigités avec logiciel SILVACO	97
IV. Introduction.....	98
IV.1 Présentation du package des programmes SILVACO.....	98
IV.2 Les outils de simulation	100
IV.2.1 Les outils interactifs	101
IV.3 Présentation d'ATLAS.....	102
IV.3.1 Fichiers d'entrées et de sorties d'Atlas	102
IV.3.2 Les composants d'Atlas.....	103
IV.3.3 Logique de programmation.....	106
IV.3.4 Equation fondamentales et modèles physiques utilisés dans la simulation sous logiciel Silvaco	109
IV.3.5 Mécanisme de recombinaison	109
IV.4 Les modèles optiques.....	115
IV.5 Simulation de la structure IBC (Interdigitated Back Contact) à hétérojonction sous ATLAS/SILVACO	118
IV.6 Optimisation physiques et géométriques de la cellule solaire IBC-SiHJ	125
IV.6.1 Optimisation géométrique	125
IV.6.2 Optimisation des paramètres physiques.....	125
IV.7 Simulation de la structure EWT (Emitter Wrap Through) à hétérojonction sous ATLAS/SILVACO	129
IV.8 Optimisation physique et géométrique de la cellule solaire EWT.....	132
IV.8.1 Optimisation physique.....	132
IV.8.2 Optimisation géométrique	134
IV.9 Simulation de la structure MWT (MetalizationWrap Through) à hétérojonction sous ATLAS/SILVACO	137
IV.9.1 Optimisation géométrique	141

IV.10	Comparaison entre les trois structures simulées	143
14.	Conclusion	145
15.	Bibliographie	146
16.	Conclusion générale & perspectives	148

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Statistiques de l'installation de systèmes photovoltaïques de 2005 à 2016 [3].....	2
Figure.I. 1 : Définition de l'Air Masse [4].....	8
Figure.I. 2 : Représentation graphique des spectres AM0 et AM1.5	9
Figure.I. 3 : Schéma de principe de l'effet photovoltaïque (cellule conventionnelle)[6]	10
Figure.I. 4 : Schéma d'une cellule photovoltaïque en silicium [8].....	12
Figure.I. 5 : Mécanisme physique de production du courant photovoltaïque[8]	13
Figure.I. 6 : Transitions inter-bandes d'électrons dans un semi-conducteur.	14
Figure.I. 7 : Paramètres d'absorption du Silicium: a) profondeur de pénétration des photons en fonction de la longueur d'onde.....	14
Figure.I. 8 : Dopages n et p du silicium et leurs schémas de bandes associées [7].....	16
Figure.I. 9 : Structure de bandes d'une jonction pn[6].....	17
Figure.I. 10 : Explication de l'équation de continuité.....	20
Figure.I. 11 : Rendement quantique externe d'une cellule photovoltaïque en fonction de la longueur d'onde [5]	23
Figure.I. 12 : Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque [4].....	27
Figure.I. 13 : caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque:.....	30
Figure.I. 14 : pertes optiques et électriques dans une cellule photovoltaïque	31
Figure.I. 15 : Structure d'une cellule photovoltaïque standard à base de silicium [18]	35
Figure.I. 16 : principales filières des cellules photovoltaïques (Source : Hespul, 2014).....	37
Figure II. 1 : Comparaison du budget thermique et du temps du procédé pour les technologies associées aux cellules classiques et aux hétérojonctions amorphe / cristalline [1]	42
Figure II. 2 : Les semi-conducteurs dans le tableau périodique de Mendeleïev [2].....	43
Figure II. 3 : Représentation de l'atome de silicium faisant apparaître :.....	43
Figure II. 4 : Représentation de la maille élémentaire de type diamant du silicium [4].....	44
Figure II. 5 : Cellule solaire au silicium monocristallin [4]	44
Figure II. 6 : Cristallisation d'un lingot multi-cristallin par solidification dirigée [6]	47
Figure II. 7 : Cristallisation d'un lingot Cz ;.....	48
Figure II. 8 : Cristallisation d'un lingot F [6]	49
Figure II. 9 : Photo d'un substrat de silicium multi-cristallin (échelle : 10×10 cm ²).....	50
Figure II. 10 : Cellule photovoltaïque au silicium amorphe [4]	51
Figure II. 11 : Aspect cristallographique du silicium amorphe hydrogéné [1]	52
Figure II. 12 : Représentation schématique de l'orbitale moléculaire du Silicium et de la densité d'états résultante pour a-Si : H (traits pleins) en comparaison avec la densité d'états du c-Si (traits pointillés) [8].....	53
Figure II. 13 : Méthodes générales de dépôt de silicium en couches minces [11]	55
Figure II. 14 : Représentation des paramètres électroniques de deux matériaux isolés.	56
Figure II. 15 : Diagramme de bandes d'une hétérojonction a-Si : H(n)/c-Si(p)	57
Figure II. 16 : Diagramme de bandes d'une hétérojonction a-Si :H(p)/c-Si(n) à l'équilibre thermodynamique.....	58
Figure II. 17 : Diagramme de bandes d'énergie selon trois modèles :.....	59
Figure II. 18 : structure de la cellule HIT produite par Sanyo.....	62
FigureIII. 1 : Structure RCC A300 développée par sun power corp[3].....	70
FigureIII. 2 : Structure IBC type n développée par sunpower [4]	70

FigureIII. 3 : Représentation schématique de la structure IBC-SiHJ développé à l'université du Delaware [5]	77
FigureIII. 4 : Structure de la cellule solaire IBC-SHJ type n[7].....	77
FigureIII. 5 : Structure EWT[3]	80
FigureIII. 6 : Cellule élémentaire (EWT) engendrée par l'émetteur en face avant pour le calcul de la résistance série [6].....	83
Figure.III. 7 : Perforation des cellules EWT au laser (images SEM) [8]	84
Figure.III. 8 : Cellule photovoltaïque EWT : a) face avant ; b) face arrière.....	84
Figure.III. 9 : Structure MWT [12]	86
Figure.III. 10 : Cellule solaire MWT (156x156 mm) traités à Fraunhofer ISE [13].....	86
Figure.III. 11 : (a) Opération de sérigraphie des contacts,	89
Figure.III. 12 : Doigt de contact par sérigraphie ; illustration des pyramides de texture [16] Dans cette technologie, Les écrans et les pâtes sont les éléments primordiales	90
Figure.III. 13 : Illustrations des étapes d'impression (mouvement de la racle)[9].....	92
Figure.IV. 1 : Environnement de VWF [1].....	99
Figure.IV. 2 : Organigramme de la structure VWF [2].....	100
Figure.IV. 3 : Fichiers d'entrées et sorties d'Atlas [3].....	102
Figure.IV. 4 : Les composants (ou les modules) d'Atlas [3]	103
Figure.IV. 5 : Ordre des groupes des commandes dans un programme Atlas.....	106
Figure.IV. 6 : Représentation des recombinaisons radiatives (A), Auger (B) et SRH (C) [5].	111
Figure.IV. 7 : transmission et réflexion de la lumière [7]	116
Figure.IV. 8 : Fenêtre d'illumination définie dans le logiciel Atlas [12]	118
Figure.IV. 9 : schéma en coupe de la structure IBC [13].....	119
Figure.IV. 10 : Organigramme du programme de simulation Atlas	120
Figure.IV. 11 : Partie élémentaire (pitch) simulée (IBC-SiHJ)(l'échelle n'est pas respectée)	121
Figure.IV. 12 : La partie élémentaire simulée (zoomée).....	122
Figure.IV. 13 : Illustration du dopage (zoomée).....	123
Figure.IV. 14 : Illustration du maillage de la cellule IBC-SiHJ	123
Figure.IV. 15 : caractéristique I(V) de la cellule IBC-SiHJ	124
Figure.IV. 16 : l'influence de l'épaisseur du BSF sur le rendement de conversion.....	125
Figure.IV. 17 : l'influence du dopage de l'émetteur sur le rendement de conversion.....	126
Figure.IV. 18 : l'influence du dopage du BSF sur le rendement de conversion	126
Figure.IV. 19 : l'influence du dopage du substrat(c-Si :p) sur le rendement de conversion	127
Figure.IV. 20 : Caractéristique I (V) de la cellule IBC obtenue dans la mesure expérimentale	128
Figure.IV. 21 : Schéma en coupe de la structure EWT [15]	129
Figure.IV. 22 : Partie élémentaire (pitch) simulée (EWT)(l'échelle n'est pas respectée).....	129
Figure.IV. 23 : La partie élémentaire de la cellule EWT simulée.....	131
Figure.IV. 24 : La partie élémentaire de la cellule EWT agrandie au milieu	131
Figure.IV. 25 : caractéristique I(V) de la cellule EWT	132
Figure.IV. 26 : Effet du dopage de l'émetteur sur le rendement de conversion.....	133
Figure.IV. 27 : Effet du dopage de substrat(p) sur le rendement de conversion.....	133
Figure.IV. 28 : Effet du dopage du BSF sur le rendement de conversion	134
Figure.IV. 29 : Effet du diamètre de l'ouverture sur le rendement de conversion	134
Figure.IV. 30 : Effet de la longueur de contact argent sur le rendement de conversion	135
Figure.IV. 31 : (a) Schéma (l'échelle n'est pas respecté) de la surface de la cellule arrière de la cellule solaire EWT-DGB (avec contact à base rainurée profonde) ; (b) Image SEM d'un bord	

de trou sur la surface avant texturée et c) Image SEM de la surface arrière de la cellule [16]	135
Figure.IV. 32 : Schéma en coupe de la structure MWT [17]	137
Figure.IV. 33 : Partie élémentaire (pitch) simulée (MWT)(l'échelle n'est pas respectée)	137
Figure.IV. 34 : La partie élémentaire de la cellule MWT simulée	139
Figure.IV. 35 : Illustration du maillage de la cellule MWT	139
Figure.IV. 36 : Agrandissement en face avant de la cellule MWT	140
Figure.IV. 37 : Agrandissement au milieu de la cellule MWT	140
Figure.IV. 38 : caractéristique I(V) de la cellule MWT	141
Figure.IV. 39 : Effet de la longueur de la métallisation de l'argent en face avant sur la densité de courant	142
Figure.IV. 40 : Effet de la longueur de la métallisation de l'argent en face avant sur le rendement de conversion	142
Figure.IV. 41 : Tracé du rendement quantique interne des trois structures simulées	144

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II. 1. Propriétés physiques du Si [5]	46
Tableau II. 2: Performances de différentes hétérojonctions [11]	61
TableauIII. 1: Etapes technologiques de réalisation des cellules à jonction arrière standard[6] (l'échelle n'est pas respectée).....	71
TableauIII. 2 : Procédé d'élaboration d'une cellule photovoltaïque à contacts arrières interdigités par technologie de transfert de couche épitaxiée [2].....	74
TableauIII. 3: Procédé d'élaboration d'une cellule photovoltaïque à contacts arrières interdigités par technologie auto-aligné [5].....	75
TableauIII. 4: Principales performances des cellules IBC[6].	78
TableauIII. 5: Résultats expérimentaux des cellules Si-HJ à contacts en face arrière [6]	79
Tableau III. 6 : Séquence de traitement pour la fabrication de Cz-Si dispositifs MWT - PERC [7].	87
Tableau IV. 1: Paramètres de recombinaison AUGER définis dans Atlas [2].....	112
Tableau IV. 2: Paramètres de recombinaison SRH définis dans Atlas [2].....	114
Tableau IV. 3: Paramètres de recombinaison en surface définis dans Atlas [2].....	115
Tableau IV. 4: Paramètres de la cellule IBC-SiHJ (Interdigitated Back Contact).....	121
Tableau IV. 5: Résultats.....	124
Tableau IV. 6: Paramètres de la cellule EWT (Emitter Wrap Through)	130
Tableau IV. 7:Résultats :	132
Tableau IV. 8: Les résultats de simulation et expérimentaux relevés des cellules solaires EWT-DGB pour les trois différents espacements de trou considérés dans leur étude. Les incertitudes relatives aux valeurs expérimentales sont indiquées.....	136
Tableau IV. 9: Paramètres de la cellule MWT (Metalization Wrap Through)	138
Tableau IV. 10: Résultats :	141
Tableau IV. 11: Un récapitulatif des résultats obtenus pour les trois structures après optimisation :	143

Liste des abréviations

Abréviations	Signification
a-Si:H	Silicium amorphe hydrogéné
AM0	Air Mass hors atmosphère
AM1.5	Air Mass au niveau de la mer
ALD	Atomic Layer Deposition
Al ₂ O ₃	Oxyde d'aluminium
BSF	Back Surface Field
CVD	Dépôt chimique en phase vapeur (<i>chemical vapor deposition</i>)
ERFC	fonction d'erreur complémentaire
EWT	Emitter Wrap Through
HF	Acide Fluorhydrique
HfO ₂	Oxyde d'hafnium
HIT	Heterojunction with Intrinsic Thin layer
FSF	Frontal Surface Field
FZ	Float Zone
IBC	Interdigitated Back Contacts
La ₂ O ₃	Lanthanum oxide
LPCVD	Low pressure chemical vapor deposition
MBE	Molecular Beam Epitaxy
MOCVD	Metal organic chemical vapor deposition
MWT	Metallisation Wrap Through

mc-Si	Silicium multi cristallin
MG-Si	silicium de grade métallurgique
NREL	National Renewable Energy Laboratory
RISE-EWT	Rear Interdigitated Single Evaporation Emitter Wrap Through
PECVD	Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition
PERL	Passivated Emitter and Rear Locally diffused cell
PVD	Dépôt physique en phase vapeur (<i>physical vapor deposition</i>)
RCC	Rear Contact Cell
SEM	Scanning Electron Microscopy
SiN _x	nitruire de silicium
SiN _x :H	silicium hydrogéné
SiO ₂	Oxyde de silicium
SRH	Shockley-Read-Hall
TiO ₂	Oxyde de titane
ZCE	Zone de charge d'espace
ZrO ₂	dioxyde de zirconium
CZ	Czochralski

INTRODUCTION GENERALE

La demande mondiale en énergie électrique augmente rapidement et les combustibles fossiles tels que le pétrole, le gaz et le charbon, dont la majeure partie de l'énergie fournie, s'épuisent progressivement. Les sources d'énergie renouvelables devraient remplacer les sources d'énergie traditionnelles non renouvelables afin de répondre à la demande croissante d'énergie dans l'avenir. L'énergie renouvelable est nécessaire non seulement en raison de la pénurie inévitable de sources d'énergie fossile, mais aussi pour prévenir la pollution de l'air et le réchauffement climatique en raison des émissions élevées de dioxyde de carbone [1]. De plus, les risques en matière environnementales liés aux rejets de CO₂ dans l'atmosphère engendrent le phénomène de l'effet de serre [2]. Les principales sources d'énergie renouvelables telles que l'énergie éolienne et solaire sont propres, abondantes et abordables, ce qui en fait une alternative prometteuse aux combustibles fossiles existants.

Parmi les sources d'énergie renouvelables, l'énergie solaire présente le plus grand potentiel en termes de quantité disponible pour la population humaine, de flexibilité technologique et de disponibilité pour la conversion aux autres types d'énergie, et du coût des technologies de conversion. Avec les réductions de prix dans les systèmes photovoltaïques au cours des dernières années et la démonstration de l'approvisionnement en énergie dans différentes applications ont fait de l'énergie solaire un type populaire et important de source d'énergie.

La conversion de l'énergie solaire en énergie électrique peut se faire de deux façons :

1. L'énergie solaire thermique (ECS) utilise la vapeur générée par le rayonnement solaire concentré dans un turbogénérateur classique.
2. Les cellules photovoltaïques (PV) génèrent de l'électricité en absorbant directement les photons tombant sur la cellule [1].

Au cours des dernières années, l'énergie solaire photovoltaïque a connu une augmentation historique, passant de l'installation annuelle dans le monde de 29,5 GW_P en 2012 à une installation annuelle de 53,7 GW_P en 2015 (Figure 1) [3].

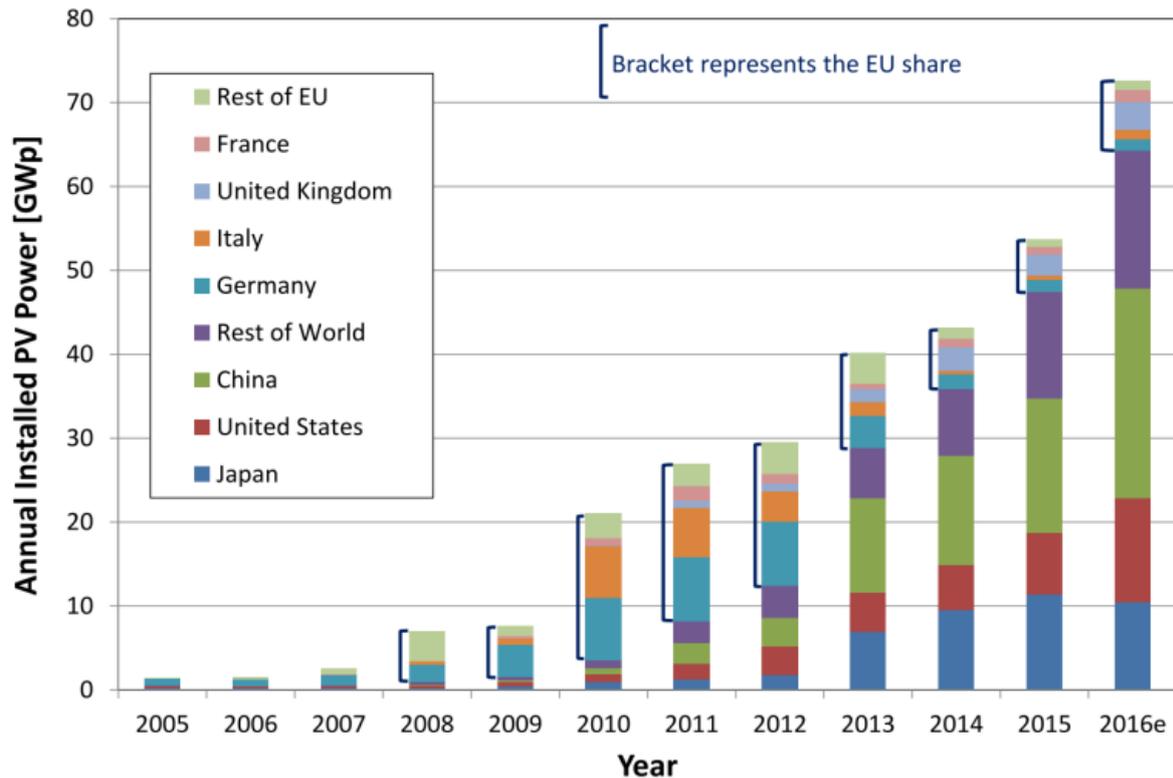


Figure IV. 1 : Statistiques de l'installation de systèmes photovoltaïques de 2005 à 2016 [3]

Les principes fondamentaux derrière cette technologie est l'effet photovoltaïque, dans lequel la lumière du soleil est directement convertie en électricité. L'énergie solaire présente plusieurs avantages nous citons les plus importants :

- ✓ C'est une énergie maîtrisable et adaptable à toute région.
- ✓ Permet de produire de l'électricité sans dégrader l'environnement.
- ✓ Les systèmes photovoltaïques n'exigent pas beaucoup d'entretien, comme ils sont silencieux et non polluants.
- ✓ Les frais de la maintenance sont relativement faibles.

Sur cette base, beaucoup de recherches et de développements ont été impliqués pour améliorer la technologie au cours des dernières décennies.

L'optimisation des performances des cellules solaires à base de silicium à hétérojonction (Si-HJ) liée à une réduction des coûts reste un problème clé pour la production industrielle. Ce genre de cellules a été découvert par Fuhs et All en 1974 [4]. Parmi les cellules les plus efficaces destinées à améliorer le rendement, sont les cellules à contacts arrière interdigités, ce sont des cellules d'actualité. En 1990 Sanyo a développé la

structure à contacts arrière interdigités IBC (Interdigitated Back Contacts) avec un rendement de conversion de 22,4%. Ce type de structure permettrait de réduire les pertes optiques et la résistivité dans la cellule solaire en limitant les recombinaisons de surface [4] comme il absorbe de la lumière beaucoup mieux que la cellule conventionnelle et son principal avantage est l'absence de contact sur la face avant qui réduit le taux d'ombrage.

Il existe deux autres structures à contact arrière interdigité, nous citons les cellules MWT (Metalisation Wrap Through) et les cellules EWT (Emitter Wrap Through). Le concept de la cellule MWT diffère de la structure IBC par la présence d'une jonction fortement dopée à l'avant et l'utilisation d'un laser permet de ramener des bus bar à l'arrière de la cellule à travers un nombre limité de perforations [2] en revanche, le concept EWT constitue un compromis entre les deux technologies précédentes.

L'étude comparative des trois structures fait le sujet de cette thèse. Nous proposons d'étudier ces trois structures en utilisant une combinaison entre le silicium multi-cristallin et le silicium amorphe. Cette comparaison vise l'extraction de la meilleure structure du côté rendement ainsi du côté minimisation des procédés de fabrication qui influent directement sur le coût.

Cette thèse se compose de quatre chapitres.

- Dans le premier, nous décrivons les notions préliminaires et le fonctionnement des cellules photovoltaïques industrielles, les pertes physiques et technologiques limitant le rendement de conversion.
- Dans le second chapitre, nous détaillons la théorie de l'hétérojonction silicium cristallin/amorphe.
- Dans le troisième chapitre, nous décrivons les différentes technologies et procédés de fabrication pour chaque structure ainsi que la méthode de sérigraphie.

- Les résultats obtenus par la simulation de la structure à contacts arrière interdigués pour les trois structures seront illustrés dans le quatrième chapitre. La première partie de ce chapitre est consacrée à l'exposition du logiciel de simulation de la société SILVACO et sa mise en œuvre dans le cadre de notre travail. La Deuxième partie est réservée pour les résultats obtenus de la simulation numérique.

Ce travail se termine par une conclusion générale et des perspectives.

Bibliographie

- [1] Beran Acar, « A numerical analysis of numerical analysis of interdigitated back contacted silicon solar cells », Middle East Technical University, mémoire de master, 2018.

- [2] Yannick Veschetti ,« Modélisation, caractérisation et réalisation de nouvelles structures photovoltaïques sur substrat de silicium mince », Université de Luis Pasteur Strasbourg Thèse de doctorat , 2005.

- [3] Jiali Zhou , « Fabrication of Silicon Heterojunction Interdigitated Back-contacted (SHJ-IBC) solar cells », Université de technologies Delft, mémoire de master, 2017.

- [4] Barrouba tani nadéra « Optimisation des paramètres géométriques et physiques de cellules photovoltaïques à contacts arrière interdigités », université Abou Bakr Bel kaid Tlemcen thèse de doctorat en microélectronique, 2015.

Chapitre I : Notions de base sur les cellules solaires

I. Introduction

Les technologies photovoltaïques ont dominé l'industrie de l'énergie solaire au cours des dernières années. Une cellule solaire photovoltaïque est un dispositif électronique ayant une structure de diode simple, ce que nous appelons une jonction p-n qui sépare la paire électron-trou créée par l'absorption d'un photon. Les supports séparés sont transportés vers les contacts métalliques externes des cellules et forment les courants électriques. Les détails techniques d'une cellule photovoltaïque seront donnés dans ce chapitre. Aujourd'hui, la plupart des cellules photovoltaïques sont en silicium cristallin (c-Si) qui est également un matériau majeur de l'industrie microélectronique à cause de sa disponibilité et de sa stabilité thermique. Dans notre étude nous avons utilisé le silicium cristallin et le silicium amorphe en formant une hétérojonction.

I.1 Historique

Le développement des cellules photovoltaïques a commencé en 1839 lorsque le français Alexandre Edmond Becquerel a mis en évidence l'apparition d'une tension aux bornes de deux électrodes immergées dans une solution électrolytique quand celle-ci était exposée à la lumière naturelle [1]. Ensuite, Albert Einstein a découvert que la lumière n'avait pas une trajectoire ondulatoire, mais que son énergie était portée par des particules (photons). L'énergie d'un photon est donnée par la relation :

$$E = hc/\lambda \quad (\text{I.1})$$

Où:

h représente la constante de Planck, c est la vitesse de la lumière dans le vide et λ est sa longueur d'onde [2].

En 1954 Chapain et al [3] ont développé la première cellule solaire au Silicium, avec un rendement énergétique de 6%. En 1958, une cellule avec un rendement de 9 % a été mise au point. Ainsi, les premiers satellites alimentés par des cellules solaires ont envoyés quelques années après dans l'espace. En 1973, la maison alimentée par des cellules photovoltaïques fût construite au sein de l'Université de Delaware (USA) pour la première fois. Dix ans plus tard, la première voiture alimentée par énergie photovoltaïque a parcouru une distance de 4 000 km

en Australie, et depuis cette époque, les recherches sur les cellules photovoltaïques développées à l'échelle industrielle, n'ont cessé de s'accroître. Actuellement, le rendement de conversion d'une cellule à base de Silicium multi-cristallin dépasse 20%.

I.2 Le rayonnement solaire et le nombre de masse

Le développement, l'optimisation et la caractérisation de cellules photovoltaïques nécessite la connaissance de la source d'énergie utilisée qui est le soleil qui est une source d'énergie inépuisable. Cette étoile distante de 150 millions de km de la terre est constituée d'environ 85% d'hydrogène et de 15% d'hélium [1]. Sa température délivrée est d'environ 5800 K, ceci conduit à une puissance de $9.5 * 10^{25}$ W.

Le rayonnement incident reçu par la terre en normale s'approche de 1400 W/m² avant d'aborder la couche atmosphérique. Le soleil émet donc un spectre dans des longueurs d'onde de 290 à 2770 nm qui comprend les rayons ultraviolets, les couleurs de l'arc-en-ciel et les rayons infrarouges. L'atmosphère terrestre joue le rôle d'un filtre et ne laisse passer qu'une partie de ce spectre [1]. En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire subit une atténuation et une modification de son spectre à cause des divers facteurs liés à la surface de la terre : absorption par les molécules des différentes couches de l'atmosphère, conditions climatiques, latitude du lieu d'observation et la saison.

La couche d'ozone par exemple, absorbe une partie du rayonnement sur une large bande de l'ultraviolet au visible, et l'oxygène présente deux bandes étroites d'atténuation vers 690 et 760 nm, respectivement. Enfin, la vapeur d'eau possède de nombreuses bandes d'absorption dans le visible et encore plus dans l'infrarouge. Ces divers effets font que le flux énergétique reçu au niveau du sol se réduit alors à 1000 W/m² avec un spectre décalé vers le rouge [4].

Afin de comparer et d'unifier les performances des cellules photovoltaïques élaborées dans les différents laboratoires du monde, il a été institué la notion d'Air Mass (AM), donnée par la relation (I.2). Celle-ci représente la quantité de la puissance absorbée par l'atmosphère.

$$AM = \frac{1}{\cos\theta} \quad (I.2)$$

A titre d'exemple, si le soleil est au zénith lieu d'observation alors $\theta=0^\circ$ et $AM=1$, la notation utilisée dans ce cas est AM1. AM0 correspond à l'irradiance hors atmosphère et elle est surtout utilisée pour prédire le comportement des cellules pour des applications spatiales [2].

Le spectre standard le plus étudié est AM1.5G correspondant à l'angle égal à 48.2° au-dessus de l'horizon, le terme G signifiant global car il tient compte à la fois des radiations directes et diffuses par opposition à AM1.5D qui ne tient compte que des radiations directes. AM1.5G fournit une irradiance de 970 W/m^2 , mais il a été arrondi à 1 kW/m^2 . On donne sur la Figure I.1 un schéma représentatif de quelques irradiances.

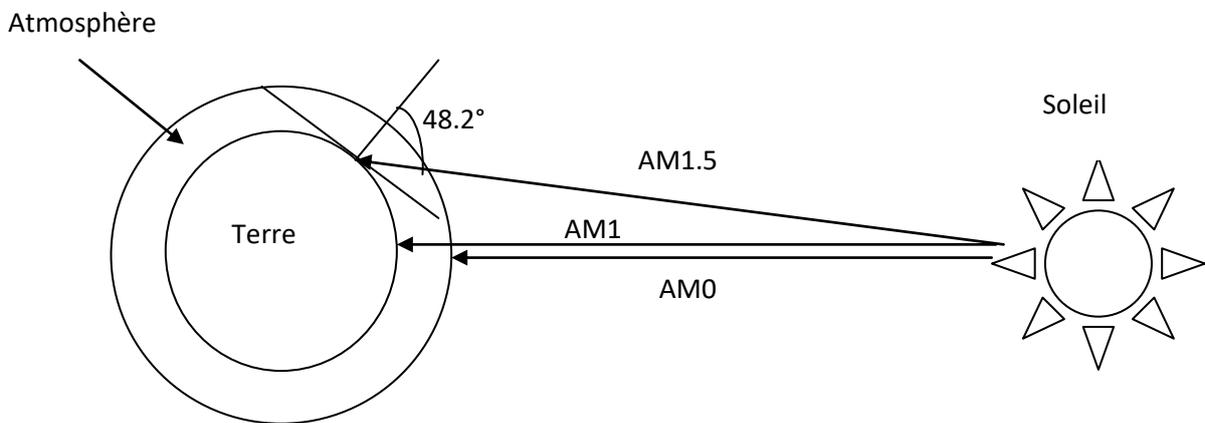


Figure.I. 1 : Définition de l'Air Masse [5]

L'intensité reçue à la surface de la terre notée I_D peut être calculée grâce à la formule empirique suivante :

$$I_D = 1.353(0.7^{AM})^{0.678} \quad (I.3)$$

Avec I_D donnée en KW/m^2 pour une surface perpendiculaire aux rayons incidents. Les spectres AM0 et AM1.5 sont représentés sur la Figure I.2.

Les cellules photovoltaïques sont souvent réunies dans des modules ou panneaux solaires et ceci dépend de la puissance recherchée.

I.2.2 L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque repose principalement sur trois grands principes :

- L'absorption de photons
- La conversion de l'énergie absorbée en charges électriques libres
- La collecte de ces particules dans un circuit électrique extérieur

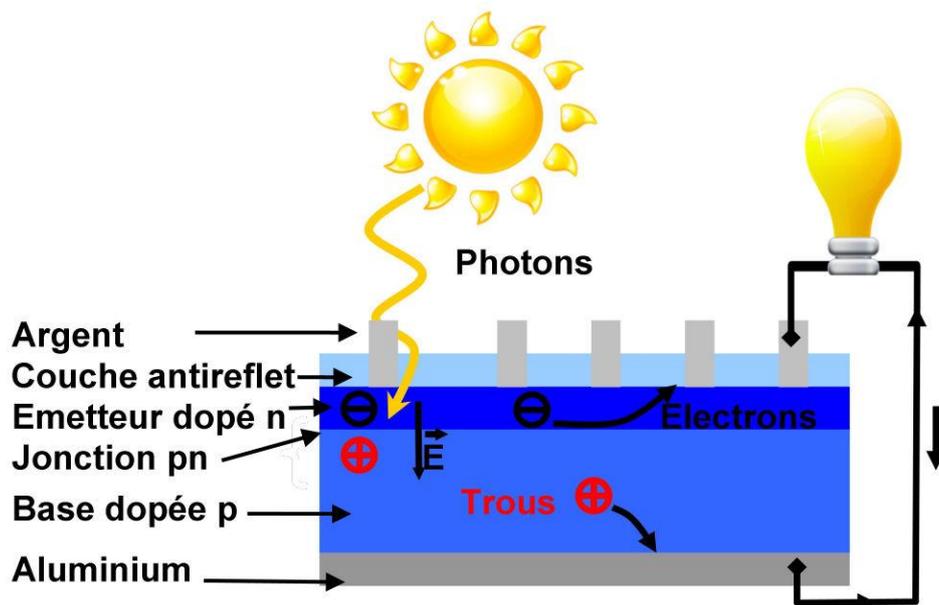


Figure.I. 3 : Schéma de principe de l'effet photovoltaïque (cellule conventionnelle)[7]

Dans un semi-conducteur exposé à un rayonnement lumineux, un photon d'énergie suffisante arrache un électron, créant un « trou ». Normalement, l'électron trouve rapidement un trou pour se remplacer et l'énergie apportée par le photon est ainsi dissipée. Mais le principe d'une cellule photovoltaïque est de forcer les électrons et les trous à se diriger chacun vers une face opposée du matériau au lieu de se recombiner en son sein. Ainsi, il apparaîtra une différence de potentiel et donc une tension entre les deux faces, comme dans une pile. Pour cela, on s'arrange pour créer un champ électrique permanent au moyen d'une jonction pn entre deux couches dopées respectivement p et n [8]. C'est grâce à la jonction ou à l'interface métallurgique de ces deux couches que la cellule produise de l'électricité.

Un dispositif photovoltaïque doit donc être constitué essentiellement :

- d'un matériau absorbant dans la gamme du spectre solaire.
- d'une structure de collecte, de résistance électrique la plus faible possible.
- Lorsque les deux semi-conducteurs constituent une jonction, un champ électrique s'établit [5] de deux types de semi-conducteurs qui forment une jonction ou se forme un champ électrique.

Les photons incidents créent des paires électrons/trous dans les zones n et p et dans la zone de charge d'espace. Les photo-porteurs se comportent différemment selon la région :

- Dans la zone n ou p, le champ électrique transporte les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge d'espace. Un photo-courant de diffusion est généré quand les porteurs sont majoritaires dans la zone n (pour les électrons) ou dans la zone p (pour les trous).
- Dans la zone de charge d'espace, les paires électron/trou créées sont dissociées par le champ électrique où un photo-courant de génération est créé, et dans lequel les électrons sont dirigés vers la région n et les trous vers la région p.

Ces deux photo-courants s'associent pour un photo-courant résultant I_{ph} , qui est un courant de porteurs minoritaires. Il est proportionnel à l'intensité lumineuse [3].

Le courant remis sur une charge par une cellule photovoltaïque exposé sous éclairage s'écrit :

$$I = I_{obs} - I_{ph} \quad (I.4)$$

Le courant I_{obs} est donné par la relation suivante :

$$I_{obs} = I_0 \left(\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right) \quad (I.5)$$

- Où V : tension aux bornes de la jonction.
 q : charge élémentaire ($q = 1.6 * 10^{-19}$ C)
 T : température (en degré Kelvin)
 k : constante de Boltzmann ($k = 1.38 * 10^{-23}$ J.K⁻¹)

I_0 est le courant de saturation en inverse de la diode. Le coefficient n est le facteur d'idéalité de la diode et il dépend de la qualité de la jonction (il est égal à 1 si la diode est idéale et égal à 2 si elle est entièrement dirigée par la génération/recombinaison avec des pièges situés au milieu de la bande interdite).

La Figure I.4 est une illustration schématique des phénomènes de photo génération et de collecte de porteurs.

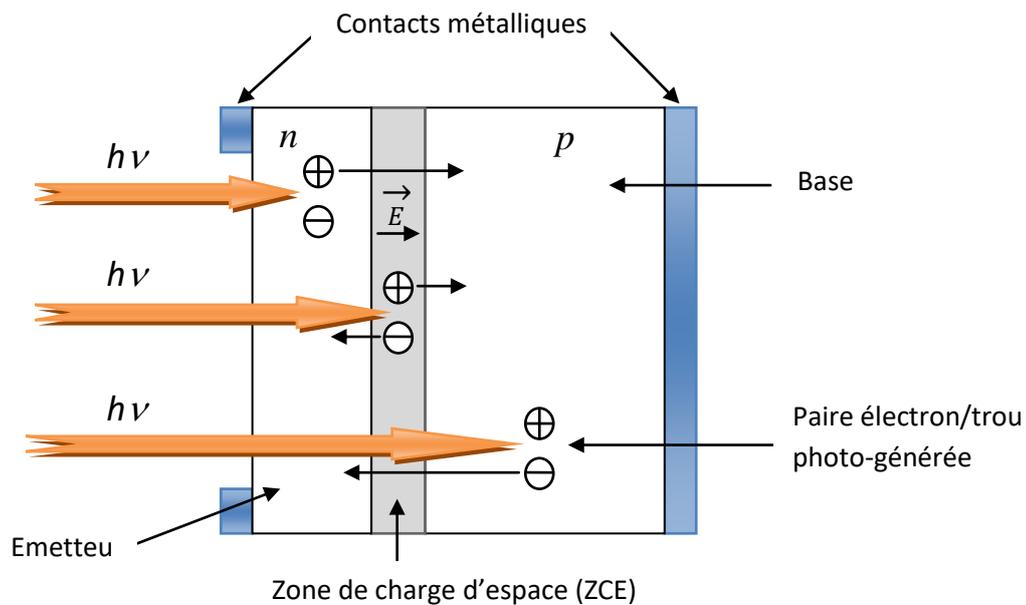


Figure.I. 4 : Schéma d'une cellule photovoltaïque en silicium [9]

Nous pouvons dire que la longueur de diffusion des électrons photo-générés est plus grande que celle des trous. La base présente une épaisseur relativement grande ($\sim 200-300 \mu\text{m}$) le plus souvent de type p et va fournir plus de porteurs. Afin de limiter les recombinaisons avec les porteurs majoritaires, elle est faiblement dopée (environ 10^{16} cm^{-3}). L'émetteur de type n, est de faible épaisseur ($\sim 0.5 \mu\text{m}$) et fortement dopé ($\sim 10^{20} \text{ cm}^{-3}$) afin d'obtenir un champ électrique suffisant dans la ZCE ($\sim 0.3 \mu\text{m}$). L'épaisseur de la cellule doit être choisie de manière

Nous signalons que la valeur du gap indirect du Silicium est de 1,124 eV à 300 K (ce qui correspond à une longueur d'onde de 1107 nm), mais celle du premier gap direct vaut 3,4 eV qui correspondent à 365 nm.

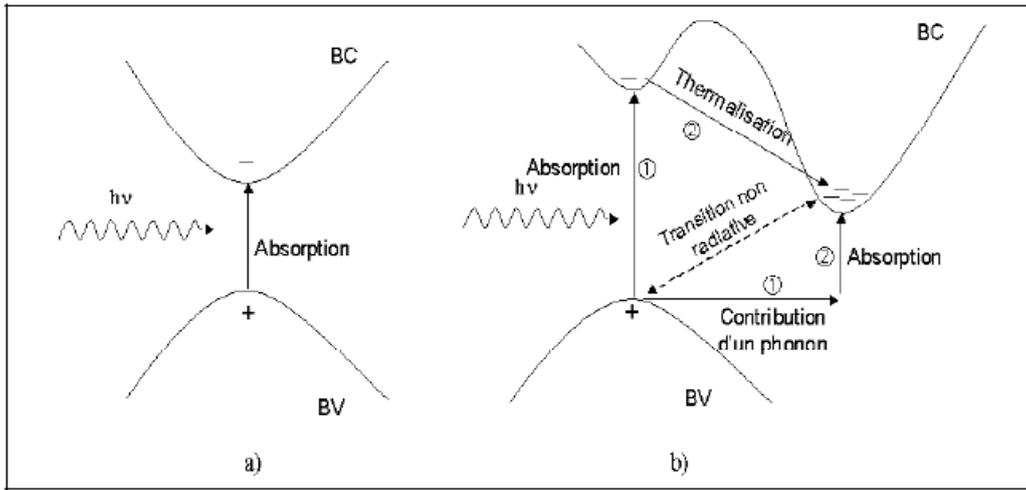


Figure.I. 6 : Transitions inter-bandes d'électrons dans un semi-conducteur. a) semi-conducteur à gap direct, b) semi-conducteur à gap indirect [6]

Dans le domaine du photovoltaïque, l'interaction entre les photons et un semi-conducteur est interprété par une caractéristique fondamentale du matériau : Le coefficient d'absorption donne une explication sur le nombre de photons absorbés par unité d'épaisseur du matériau en fonction de leur longueur d'onde. La Figure I.7 nous montre celui du Silicium. Nous observons que la majorité des photons incidents est absorbée dans les 100 premiers Angström du matériau et ceci pour des longueurs d'ondes inférieures à 365 nm.

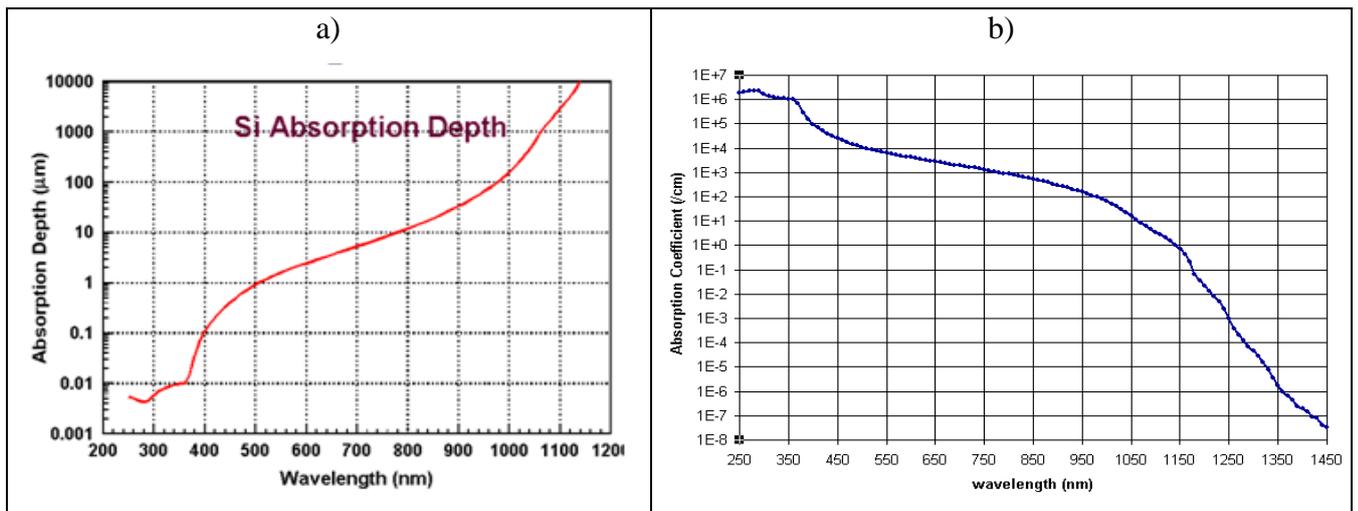


Figure.I. 7 : Paramètres d'absorption du Silicium: a) profondeur de pénétration des photons en fonction de la longueur d'onde. b) Coefficient d'absorption en fonction de la longueur d'onde [6]

Comme nous l'avons vu précédemment, ces transitions directes ne sont plus possibles pour des longueurs d'ondes plus grandes. Il faut alors qu'un photon au moins vient assister l'électron pour que ce dernier passe dans la bande de conduction. Ceci réduit la probabilité de transition. L'accroissement de la longueur d'onde des photons engendre donc une diminution du coefficient d'absorption. Lorsque l'énergie du photon devient inférieure à celle du gap du matériau, la transition est impossible et automatiquement le photon n'est pas absorbé.

L'interaction photon/électron au sein du semi-conducteur se traduit finalement par la génération d'une paire électron-trou, qui change localement la conductivité du matériau. La cellule photovoltaïque joue le rôle un générateur.

Il s'agit à présent de séparer les deux types de porteurs pour éviter qu'ils ne se recombinent entre eux et de les collecter dans un circuit électrique extérieur.

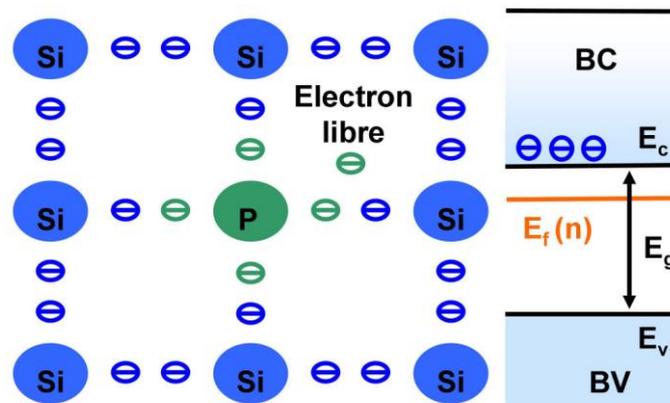
L'absorption est caractérisée par le taux de génération optique, noté G . Il s'agit du taux de création de paires électron-trou (en $\text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$). En général, les porteurs minoritaires n'existeront que pour un temps égal à leur durée de vie τ . Ils sont donc métastables. La grandeur τ définit la durée de vie moyenne avant que les porteurs ne se recombinent et elle est associée à la longueur de diffusion L_D et au coefficient de diffusion D du matériau par la relation :

$$L_D = \sqrt{D * \tau} \quad (\text{I.6})$$

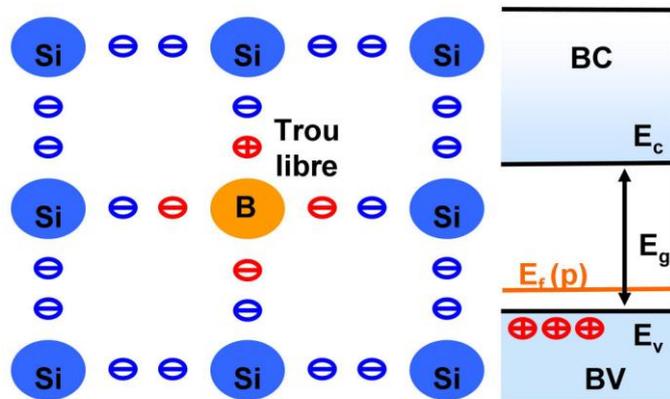
I.2.4 Jonction P-N

Dans l'industrie photovoltaïque, le dopage en phosphore et en bore sont respectivement de l'ordre de 10^{20} cm^{-3} et de 10^{16} cm^{-3} . Les concentrations en électrons et en trous sont donc considérablement altérées.

Ces modifications déplacent le niveau de Fermi E_f (situé initialement au milieu du gap) vers la bande de conduction pour le silicium dopé n et vers la bande de valence pour le silicium dopé p. La figure I.8 schématise les modifications dues au dopage dans les deux cas.



a) Silicium dopé n et schéma des bandes associé.



b) Silicium dopé p et schéma des bandes associé

Figure.I. 8 : Dopages n et p du silicium et leurs schémas de bandes associées [8]

Si le silicium de type n est mis au contact du silicium de type p, les électrons libres de la zone n vont pénétrer dans la zone p et se recombiner avec les trous qui sont majoritaires dans cette zone à l'inverse, les trous de la zone p vont pénétrer du côté n et se recombiner avec les électrons majoritaires. C'est le phénomène de diffusion. Il tend à ramener le système à l'équilibre. Or, ces trous et ces électrons qui quittent les zones p et n brisent localement l'électron-neutralité et laissent apparaître derrière eux des ions fixes de bore et de phosphore. Ces derniers qui sont chargés négativement et positivement forment une zone de charge d'espace ZCE (appelée zone de déplétion) dans laquelle les porteurs de charge sont absents et ne neutralisent plus les donneurs ionisés. Par conséquent, il y a formation d'un champ électrique interne E (c'est ce champ qui permet par la suite la séparation des paires photos générées) orienté de la zone n (zone positive) vers la zone p (zone négative). Il entraîne

les porteurs de charge dans le sens opposé au phénomène de diffusion. Les trous minoritaires de la zone n vont vers les électrons minoritaires de la zone p et inversement. C'est le phénomène de dérive. L'équilibre est atteint lorsque le phénomène de diffusion est compensé exactement par celui de dérive (dû au champ électrique). En d'autres termes, il y a compensation des courants de porteurs majoritaires (courant de diffusion) et minoritaires (courant de dérive) : le courant total est nul comme le montre la figure I.9, la structure de bandes d'une telle structure est composée de trois zones.

Sur celle-ci, les zones p et n qui sont non perturbées sont représentées aux extrémités. La zone de charge d'espace, qui est la seule où l'électro-neutralité n'est pas conservée en tout point, est située entre les deux. Il faut également noter que la formation de la jonction pn résulte en un alignement des niveaux de Fermi des deux matériaux par décalage des bandes de valence et de conduction. Il y a formation d'une barrière de potentiel à l'interface.

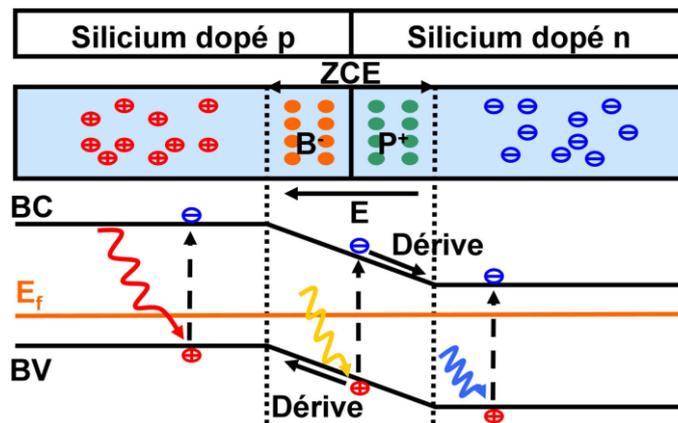


Figure.I. 9 : Structure de bandes d'une jonction pn [7]

Comme c'est le cas dans un semi-conducteur classique il y aura génération des paires électron-trou si la jonction est éclairée. En fonction de l'énergie du photon incident et donc de la profondeur de pénétration de ce dernier.

- ✓ Si la paire électron-trou est générée à l'extérieur de la zone de déplétion : les électrons et les trous qui sont minoritaires dans les zones p et n risquent de se recombiner. En effet, ils sont métastables et caractérisés par une faible durée de vie dans ces zones. Néanmoins, s'ils arrivent à proximité du champ interne, celui-ci les happe et les propulse vers les zones n et p où ils deviennent majoritaires et stables.
- ✓ Si la paire électron-trou est générée dans la zone de charge d'espace : elle est immédiatement dissociée par le champ. Les porteurs de charge rejoignent les zones où ils sont majoritaires.

Ces deux courants s'ajoutent pour former un courant photo-généré I_{ph} proportionnel à l'éclairement. Si la jonction n'est pas connectée, le circuit est ouvert. Les porteurs de charge vont s'accumuler dans les zones où ils sont majoritaires. L'équilibre instauré est rompu et la jonction devient polarisée en direct. Cela se traduit par une diminution de la barrière de potentiel qui favorise le courant des porteurs majoritaires. La situation est la même que si la jonction était polarisée dans l'obscurité par l'application d'un potentiel positif sur la zone p. Un courant d'obscurité (ou de saturation de la diode) I_{obs} apparaît dans le sens direct. Il est opposé au sens du courant photo-généré. Dans cette configuration, il est possible de mesurer la tension qu'il faudrait appliquer aux bornes de la jonction pour annuler le photo-courant, c'est la tension de circuit ouvert V_{oc} à l'inverse, si les bornes de la jonction sont reliées à un circuit extérieur non résistif, les électrons photo-générés vont pouvoir quitter la zone n pour rejoindre la zone p (via le circuit extérieur) où ils pourront se recombiner avec les trous. Ils vont donc donner naissance à un courant de court-circuit I_{cc} . Dans le cas idéal, celui-ci sera égal au courant photo-généré. Enfin, si la jonction pn est reliée à une résistance non infinie et non nulle, elle se trouve entre les deux configurations précédentes : une puissance électrique est produite. La zone dopée p est appelée la base et la zone dopée n est appelée l'émetteur. Le champ interne est intense. Le photo-courant est indépendant de la tension.

Trois équations décrivant le transport de charges dans un semi-conducteur ont été données par Shockley :

- Les équations des courants de conduction sous l'effet d'un champ électrique et de diffusion pour les électrons et les trous s'expriment par :

$$\vec{J}_n = q \cdot n \cdot \mu_n \cdot \vec{E} + q \cdot D_n \cdot \vec{\nabla} n \quad (I.7)$$

$$\vec{J}_p = q \cdot p \cdot \mu_p \cdot \vec{E} + q \cdot D_p \cdot \vec{\nabla} p \quad (I.8)$$

Tels que :

$\mu_{n,p}$ représente la mobilité des électrons et des trous respectivement.

$D_{n,p}$ représente le coefficient de diffusion des électrons et des trous respectivement.

n : est la concentration d'électrons libres.

p : est la concentration de trous libres.

- Les équations de continuité concernant les phénomènes de génération de porteurs et de recombinaison :

$$\frac{\partial n}{\partial t} = G_n - R_n + \frac{1}{e} \operatorname{div}(J_n) \quad (I.9)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = G_p - R_p + \frac{1}{e} \operatorname{div}(J_p) \quad (I.10)$$

Où G_n et R_n représentent respectivement le taux de génération et le taux de recombinaison des électrons. quant aux G_p et R_p , désignent les taux de génération et de recombinaison des trous.

I.2.4.1 Démonstration de l'équation de continuité

Considérons un barreau de semi-conducteur parcouru par un courant quelconque et, envisageons dans le plan perpendiculaire à O_x un élément de volume de section unité et d'épaisseur Δ_x .

Soit $F_p(x)$ le flux des trous traversant le plan de section unité situé à l'abscisse x (figure I.10) et $F_p(x+\Delta_x)$ le flux des trous traversant le plan situé à l'abscisse $x+\Delta_x$.

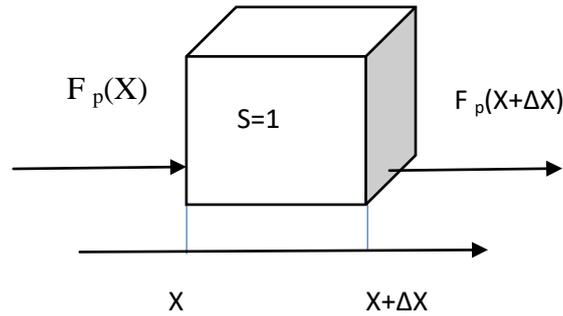


Figure.I. 10 : Explication de l'équation de continuité

✓ Cas où les phénomènes de génération-recombinaison sont négligés

Soit Δp l'accroissement du nombre de trous entre les deux plans pendant l'intervalle de temps Δt :

$$\Delta p = (F_p(x) - F_p(x+\Delta x)) \Delta t \quad (\text{I.11})$$

La variation de la densité des porteurs entre les deux plans est donc :

$$\Delta p = \frac{\Delta p}{\Delta v} = \frac{\Delta p}{\Delta x} = \frac{(F_p(x) - F_p(x+\Delta x)) \Delta t}{\Delta x} \quad (\text{I.12})$$

En faisons $\Delta x \rightarrow 0$ et $\Delta t \rightarrow 0$, nous obtenons la 2eme loi de FICK :

$$\frac{\partial p}{\partial t} = - \frac{\partial F_p(x)}{\partial x} \quad (\text{I.13})$$

Dans le cas général :

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\text{div } F_p \quad (\text{I.14})$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\text{div } F_n \quad (\text{I.15})$$

✓ **Cas où les phénomènes de génération-recombinaison sont pris en compte**

Nous supposons que dans le volume de semi-conducteur compris entre les deux plans il existe :

- Un phénomène de génération caractérisé par un taux de génération G .
- Un phénomène de recombinaison caractérisé par un taux net de recombinaison U_n pour les électrons et U_p pour les trous.

Les relations (I.14) et (I.15) deviennent :

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\text{div } \mathbf{F}_p + G - U_p \quad (\text{I.16})$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\text{div } \mathbf{F}_n + G - U_n \quad (\text{I.17})$$

Comme $\vec{j}_n = -q \vec{F}_n$ et $\vec{j}_p = -q \vec{F}_p$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q} \text{div } \mathbf{j}_p + G - U_p \quad (\text{I.18})$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\frac{1}{q} \text{div } \mathbf{j}_n + G - U_n \quad (\text{I.19})$$

En utilisant les relations des courants des électrons et des trous :

$$\vec{J}_n = q D_n \text{grad } n + q n \mu_n \mathbf{E} \quad \text{et} \quad \vec{J}_p = q D_p \text{grad } p + q p \mu_p \mathbf{E}$$

Nous obtenons :

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \text{div}[D_p \text{grad } p - p \mu_p \mathbf{E}] + G - U_p \quad (\text{I.20})$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \text{div}[D_n \text{grad } n - n \mu_n \mathbf{E}] + G - U_n \quad (\text{I.21})$$

Ces dernières équations représentent les équations de continuité, elles régissent les conditions d'équilibre dynamique des porteurs dans les semi-conducteurs [10].

G et P sont les taux de génération pour les électrons et les trous par des agents externes. U_n et U_p sont respectivement les taux de recombinaisons (internes) pour les électrons et les trous, J_n et J_p sont les densités des courants des électrons et des trous.

Enfin, l'équation de Poisson décrit la dépendance du champ électrique E en fonction de la densité de charges et de dopants :

$$\Delta E = -\frac{e}{\epsilon} (Nd - Na + p - n) \quad (I.22)$$

avec e , ϵ , Nd et Na sont respectivement le potentiel électrostatique, la permittivité électrique, la densité de donneurs ionisés et la densité d'accepteurs ionisés.

I.2.4.2 Démonstration de l'équation de poisson

En un point quelconque, il existe une charge d'espace si la somme algébrique de toutes les charges électriques n'est pas nulle. Dans un semi-conducteur les charges peuvent être mobiles : électrons et trous ou fixes : donneurs, accepteurs ionisés, centres profonds occupés [10].

$$\rho_v = q(N_{D^+} - N_{A^-} + P - n) \quad (I.23)$$

Toute charge d'espace $\rho_v(x, y, z)$ engendre un champ électrique E (loi de gauss).

$$\text{div } \vec{E} = \rho_v(x, y, z) / \epsilon \quad (I.24)$$

$$\vec{E} = -\text{grad } v \quad (I.25)$$

Nous obtenons l'équation de poisson :

$$\Delta v = -\rho v(x,y,z) / E \quad (I.26)$$

L'intégration de cette équation permet de calculer l'évolution du potentiel en tout point d'un composant semi-conducteur à partir de la charge [10].

I.2.5 Les différents rendements d'une cellule photovoltaïque

Les photons incidents sur une cellule solaire ont une certaine probabilité d'être absorbés puis de générer une paire électron-trou qui participe au courant I_{cc} fourni par la cellule. Cette probabilité est déterminée par la connaissance des rendements quantiques QE (efficacités quantique). Ces efficacités sont le rendement quantique externe et interne.

I.2.5.1 Rendement quantique externe

Le rendement quantique externe, noté EQE (ou RQE), appelé aussi IPCE (Incident Photons to Current conversion Efficiency), est le rendement d'électrons générés par photon incident. Il est donné en fonction de la longueur d'onde dans la figure I.11.

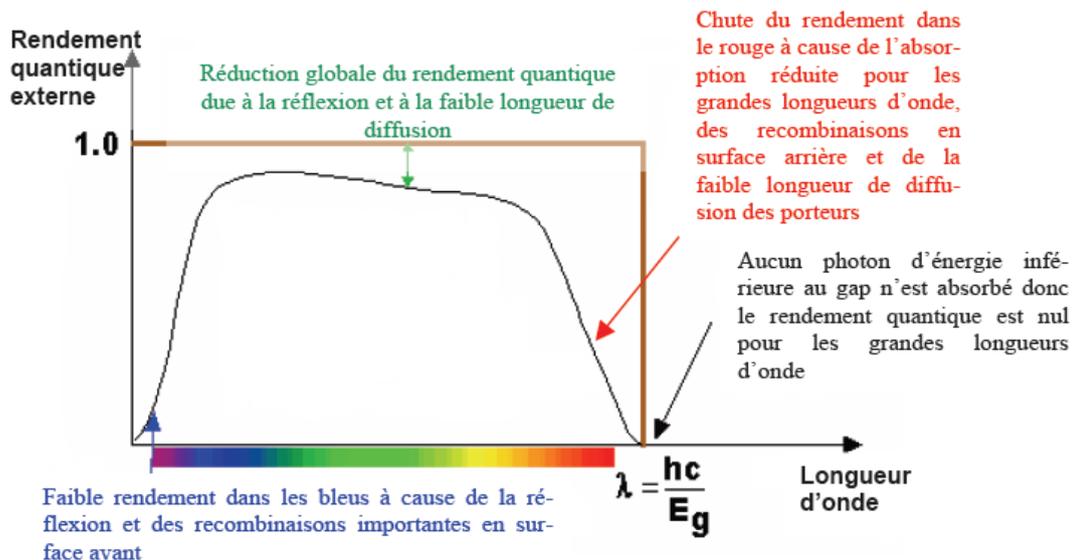


Figure.I. 11 : Rendement quantique externe d'une cellule photovoltaïque en fonction de la longueur d'onde [6]

Le photo-courant mesuré, défini comme étant le nombre d'électrons collectés par unité de temps et de surface est donné par la relation suivante :

$$\frac{I_{cc}/S}{q} = \frac{J_{cc}}{q} \quad (I.27)$$

J_{cc} est la densité de courant en A/cm^2 .

L'intensité de la lumière monochromatique incidente exprimée comme étant le nombre de photons de longueur d'onde par unité de temps et de surface :

$$\frac{\phi_i/S}{E_{photon}} = \frac{E_e}{hc/\lambda} \quad (I.28)$$

ϕ_i est le flux énergétique incident en watt et E_e l'éclairement à la surface en W/cm^2

$$EQE = \frac{I_{cc}(\lambda)}{\phi_i(\lambda)} \times \frac{hc}{q\lambda} = \frac{J_{cc}(\lambda)}{E_e(\lambda)} \times \frac{hc}{q\lambda}$$

Et donc :

$$EQE = \frac{1.24 J_{cc}(\lambda)}{\lambda E_e(\lambda)} \quad (I.29)$$

1.2.5.2 Réponse spectrale

La réponse spectrale de la cellule, notée $R_s(\lambda)$ est donnée par le rapport suivant :

$$R_s(\lambda) = \frac{J_{cc}(\lambda)}{E_e(\lambda)} \quad (I.30)$$

Elle représente la sensibilité de la cellule pour chaque longueur d'onde et elle est souvent utilisée dans le marché de l'électronique comme caractéristique des photodiodes. Le rendement quantique externe EQE peut être ainsi exprimé comme suit :

$$EQE = R_S(\lambda) \frac{1.24}{\lambda} \quad (I.31)$$

Par conséquent, d'après les définitions de ces paramètres, le rendement quantique externe EQE dépend du coefficient d'absorption des matériaux utilisés, de l'énergie d'ionisation, de la largeur de la ZCE et de l'efficacité de collecte. Il est mesuré en fonction de la longueur d'onde de la source monochromatique.

I.2.5.3 Rendement quantique interne

Le rendement quantique est le rapport entre le nombre d'électrons dans le circuit externe et le nombre des photons incidents. Dans ce cas, les photons incidents sont considérés en soustrayant ceux perdus par réflexion à la surface de la cellule et absorption incomplète. Cette grandeur s'appelle le rendement quantique interne RQI ou IQE (Internal quantum efficiency). Elle est déduite à partir de la mesure du rendement quantique EQE et de la réflectivité $R(\lambda)$ tel que :

$$IQE = \frac{EQE(\lambda)}{1 - R(\lambda)} \quad (I.32)$$

L'efficacité ou rendement η de la cellule est le rapport entre la densité de puissance maximale qui peut être générée par la cellule et la densité de puissance de l'illumination (Puissance incidente).

$$\eta = \frac{P_{\max}}{\phi_i} = FF \frac{I_{cc} V_{co}}{\phi_i} = FF \frac{J_{cc} V_{co}}{\phi_i} \quad (I.33)$$

Sous les conditions standards d'irradiance AM1.5, le rendement est donné par :

$$\eta = FF \frac{I_{cc} V_{co}}{\phi_i} \quad (I.34)$$

Ce Rendement maximal peut être optimisé en améliorant les trois termes se trouvant dans le numérateur de l'équation I.34.

I.2.6 Recombinaison des porteurs

I.2.6.1 Recombinaison volumique

Les recombinaisons volumiques dans les semi-conducteurs se résument en trois mécanismes principaux, qui sont décrits brièvement dans cette partie : recombinaison radiative, Auger et multi photons.

I.2.6.1.1 Recombinaison RSH (Shockley-Read-Hall)

Ce type de recombinaison concerne les défauts cristallographiques et les impuretés métalliques (Cu, Fe, Au, Al,...) présents dans le matériau est reposant les recombinaisons assistés par les multi photons. En prenant le cas du silicium, les impuretés provoquent l'apparition de niveaux d'énergie discrets dans la bande interdite[11]. La chute de la durée de vie des porteurs de charge est dûe aux niveaux profonds d'énergie en créant des centres de recombinaison. Ils sont déterminés par leur position énergétique, densité de concentration dans la bande interdite, et leur section efficace de capture des porteurs. Le taux de recombinaison RSH est en fonction du niveau d'injection [12].

I.2.6.1.2 Recombinaison Auger

Recombinaison Auger exprime la transmission de l'énergie de recombinaison d'une paire électron-trou à un autre électron qui se trouve exciter sur un niveau d'énergie plus élevé. Ce processus se manifeste lorsque la densité de concentration des porteurs libres dépasse 10^{17} cm^{-3} . Nous pouvons dire que la participation de phonons (mode vibration du réseau cristallin) entraîne le phénomène de « thermalisation » de la cellule. La recombinaison est compliqué dans la réalité, elle est dominée par un fort taux d'injection et pour de fortes densités de dopants [13].

I.2.6.1.3 Recombinaison radiative

C'est l'opération inverse de la création d'une paire (électron-trous) par un photon. Ce processus est le facteur dominant dans le semi-conducteur à gap direct comme GaAs [14]. Par contre, le silicium cristallin à gap indirect est relativement rare. La recombinaison radiative est alors occultée par les deux mécanismes décrits précédemment.

I.2.6.2 Recombinaison surfacique

L'état électronique de la surface est également critique sur les paramètres de la cellule. La rupture de continuité du réseau cristallin à la surface engendre la présence des liaisons non saturées ou liaisons pendantes, responsable d'une répartition quasi-continue d'états d'énergie dans la bande interdite. La qualité d'une surface est généralement donnée par la valeur de la vitesse de recombinaison de surface. Les liaisons pendantes peuvent être saturées par le dépôt d'une couche antireflet à la surface pour passiver la surface qui est non conductrice. La notion de densité d'état d'interface $D_{it}(E)$ exprimée en $\text{cm}^2 \cdot \text{eV}^{-1}$ est utilisée pour caractériser les niveaux d'énergie introduits par les défauts de surface [15]. Les techniques de passivation reposent en premier sur la diminution de la densité d'état d'interface $D_{it}(E)$ et en second sur la diminution, par effet de champ, de la densité de porteurs susceptible d'être recombiné à la surface. Certains matériaux hydrogénés réalisés par CVD comme a-SiN_x: H, a-Si: H, a-SiC: H contiennent une certaine quantité d'hydrogène qui peut passiver les liaisons pendantes. Donc les valeurs de la densité d'état d'interface (D_{it}) obtenues avec ces matériaux sont en général supérieures à celles du SiO₂ thermique. Pour atteindre d'excellentes propriétés passivantes, les matériaux déposés à basse température, utilisent également le mécanisme d'effet de champ [16].

I.2.7 Schéma électrique équivalent

Pour tenir compte des limitations de la cellule et calculer le courant réellement délivré à la charge du circuit extérieur, on introduit un modèle comportant deux diodes, une résistance série et une résistance parallèle. Ce modèle est représenté par le schéma électrique donné sur la Figure I.12.

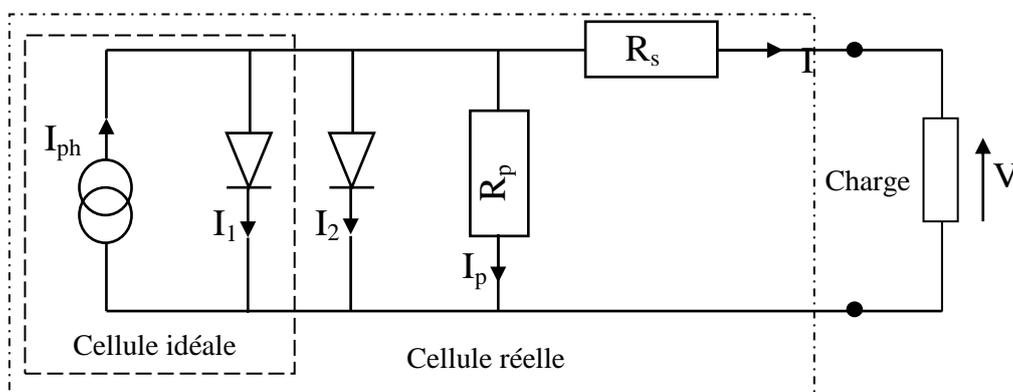


Figure.I. 12 : Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque [5]

L'équation du courant devient :

$$I = I_1 + I_2 + I_p - I_{ph} \quad (I.35)$$

$$I = I_{01} \left(\exp \left(\frac{q(V-IR_s)}{n_1 kT} \right) - 1 \right) + I_{02} \left(\exp \left(\frac{q(V-IR_s)}{n_2 kT} \right) - 1 \right) + \frac{V-IR_s}{R_p} - I_{ph} \quad (I.36)$$

Le schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque est composé d'une source de courant et de deux diodes en parallèle. La source de courant indique le courant photo-généré I_{ph} . La première diode dont le facteur d'idéalité ($n_1 \approx 1$) convient au courant de diffusion dans la base et l'émetteur. I_{01} est le courant de saturation de ce phénomène. I_{02} est le courant de génération/recombinaison ou d'effet tunnel dans la zone de charge d'espace, avec n_2 le facteur d'idéalité de la seconde diode ($n_2 \approx 2$).

Pour modéliser les courants de fuite qui existent dans la structure, la résistance parallèle R_p doit être ajoutée. Ces courants de fuite peuvent avoir lieu lorsque l'émetteur est percé à haute température sous l'effet de la diffusion des contacts métalliques. Elle peut être due à un court-circuit sur les extrémités de la cellule. La valeur de la résistance R_p doit être importante. La résistance série R_s modélise la résistance interne de la cellule et elle est due à la résistivité des différentes couches de la cellule : émetteur, base et contacts métalliques (en particulier aux interfaces métal/semi-conducteur). Pour limiter son impact sur le courant de la cellule, nous devons optimiser les contacts métal/semi-conducteur en diminuant la résistivité du matériau pour avoir une faible résistance R_s .

I.2.8 Caractéristiques électriques et paramètres de la cellule photovoltaïque

Afin d'obtenir un générateur électrique autonome, il faut que la diode soit polarisée en direct. L'effet photovoltaïque est une génération d'une puissance électrique. En effet, en circuit ouvert, la photo-génération de porteurs entraîne une augmentation du nombre d'électrons du côté n de la jonction et de trous du côté p. Un champ électrique est fourni dans le sens opposé du champ existant au paravant dans la jonction à cause de la séparation de ces charges. Ce pendant, nous retrouvons un nouveau équilibre pour lequel une tension existe entre les terminaux du circuit extérieur. C'est la tension de circuit ouvert V_{oc} , pour laquelle le courant photo-généré et le courant d'obscurité se compensent ($I = 0$). C'est la tension

maximale fournie par la cellule solaire, qui permet d'évaluer le nombre de recombinaisons dans la structure. Donc nous aurons une relation inversement proportionnelle entre le V_{oc} est la recombinaisons. V_{oc} représente la tension en circuit ouvert qui désigne la tension aux bornes de la cellule en absence de tout courant, sans circuit de charge pour un éclairement fixe. Cette grandeur est donnée par la relation :

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \log \left(1 + \frac{I_{cc}}{I_0} \right) \quad (I.37)$$

Le courant de court-circuit I_{cc} est un autre paramètre important dans la cellule photovoltaïque. C'est le courant maximum que l'on peut sortir de la structure correspondant au courant photogénéré. Ce courant découle du taux de génération optique G et de la longueur de diffusion L_D des porteurs. Cette grandeur est donnée par l'équation analytique :

$$I_{cc} = I_{ph} - I_0 \exp \left[\left(\frac{qR_s I_{cc}}{nkT} \right) - 1 \right] - \frac{R_s I_{cc}}{R_p} \quad (I.38)$$

La caractéristique $I(V)$ d'une cellule solaire est la superposition d'un courant de diode sous obscurité et d'un courant photo-généré (voir Figure I.13.a). L'éclairement de la structure a pour effet de déplacer la courbe $I(V)$ de la diode vers les courants inverses. Puisque la photodiode est considérée comme un générateur, la convention est d'inverser l'axe des courants, comme illustré par la Figure I.13.b. Notons que la cellule photovoltaïque n'exige pas le courant et la tension de fonctionnement, seule la courbe $I(V)$ est fixée. C'est la valeur de l'impédance de la charge aux bornes de la cellule qui va imposer le point de fonctionnement. Il est donc essentiel de choisir une charge telle que la puissance délivrée soit maximale. Cette puissance est défini par la tension V_m et le courant I_m .

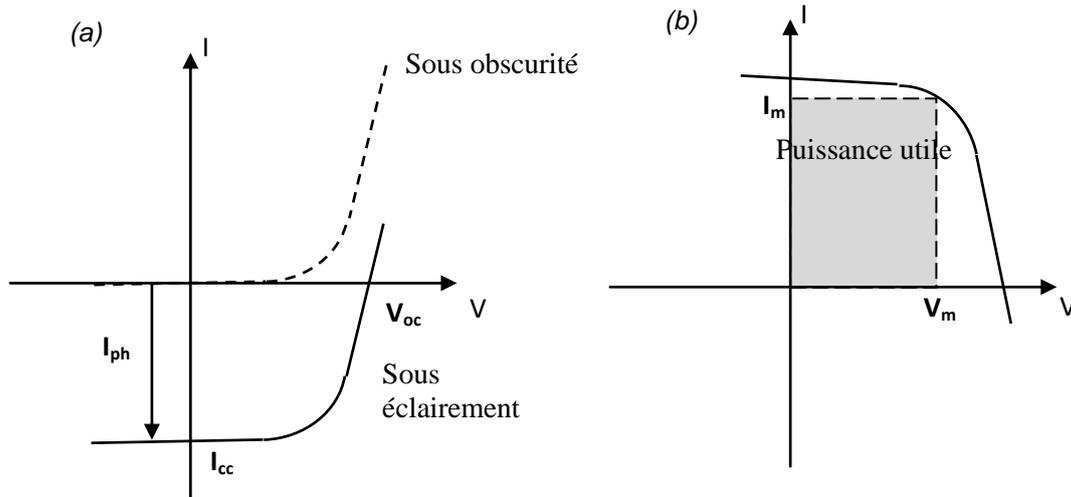


Figure.I. 13 : caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque:
(a) caractéristiques courant-tension, b) la courbe $I(V)$ [17]

La qualité électrique de la cellule est définie par le facteur de forme FF , qui est représenté par l'équation suivante :

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{cc} V_{oc}} \quad (I.39)$$

Le point de fonctionnement de la cellule sur la courbe $I(V)$ est déterminé par l'impédance de la charge. Il est donc important de pouvoir travailler avec les valeurs V_m et I_m afin de définir la puissance maximale.

Le rendement η est un autre paramètre primordial qui est défini par le rapport entre la puissance fournie et la puissance incidente P_{in} :

$$\eta = \frac{V_m I_m}{P_{in}} = \frac{FF \cdot V_{oc} I_{cc}}{P_{in}} \quad (I.40)$$

Pour comparer le rendement des cellules solaires, la puissance incidente doit être prise comme identique, sous les conditions d'ensoleillement standard AM1.5 et à 25°C. Afin de comparer la production photovoltaïque avec les autres sources d'énergie, la littérature utilise souvent l'unité Watt crête (W_c ou W_p en anglais peak Watt). Elle correspond à la puissance nominale d'une cellule photovoltaïque [4].

I.2.9 Pertes physiques et technologiques

Depuis les années 80, la majorité des recherches du secteur photovoltaïque se sont concentrés à élever le niveau du rendement d'une façon optimale en se basant sur la réduction maximale des différentes pertes. Les considérations et les calculs suivants correspondent exclusivement aux cellules solaires au Silicium cristallin. La Figure I.14 donne une vue d'ensemble sur les différents mécanismes des pertes. Ceux-ci peuvent être divisés principalement en deux secteurs [6].

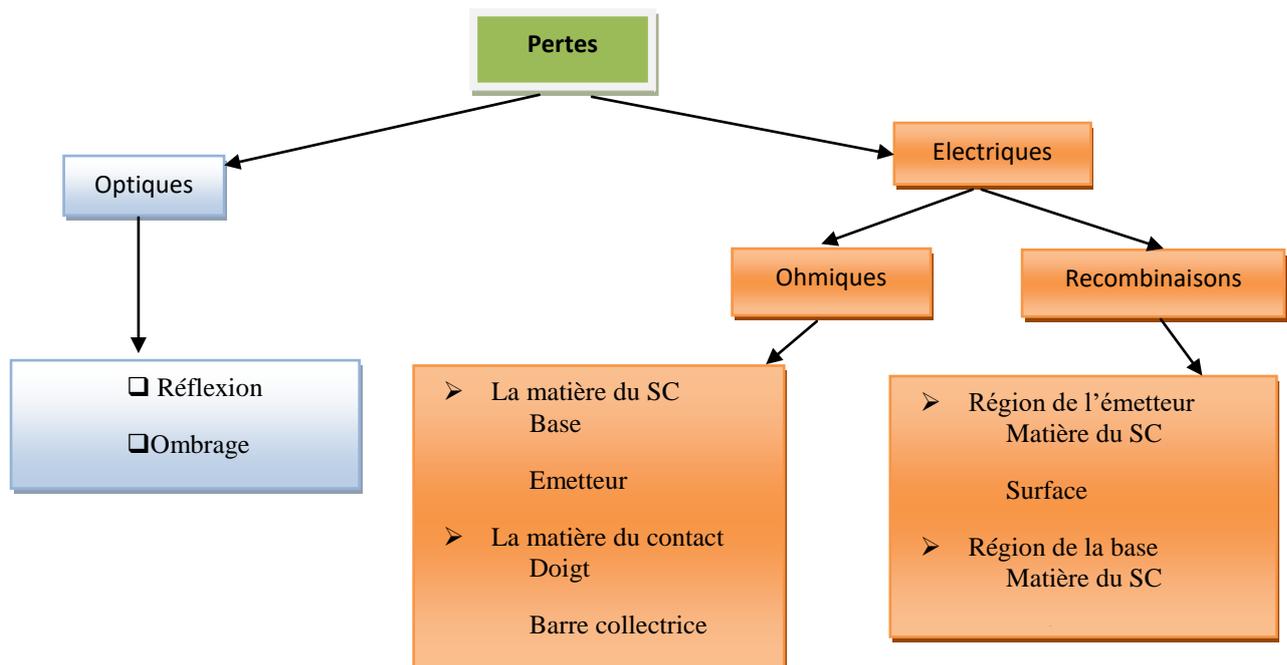


Figure.I. 14 : pertes optiques et électriques dans une cellule photovoltaïque

Les pertes optiques affectent le rayonnement solaire incident par réflexion et par ombrage de la lumière aussi bien que par une absorption incomplète des longueurs d'onde. Par contre, les pertes électriques ont un effet néfaste sur le courant et surtout, la tension d'une cellule solaire [18].

Le rendement de conversion photovoltaïque peut être exprimé en prenant en compte les facteurs de pertes :

$$\eta = \frac{\int_0^{\lambda_g} P(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} P(\lambda) d\lambda} \cdot \frac{E_g \int_0^{\lambda_g} N(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\lambda_g} P(\lambda) d\lambda} \cdot \frac{qV_{oc}}{E_g} \cdot FF \cdot (1 - R) \cdot \frac{S - S_{m\acute{e}tal}}{S} \cdot \eta_{\alpha} \cdot \eta_{col} \quad (I.41)$$

Les différents facteurs de pertes sont dus soit aux restrictions purement physiques liées au matériau, soit aux limitations technologiques induites par le processus de fabrication. Des choix technologiques appropriés peuvent cependant avoir des conséquences sur les limitations intrinsèques du matériau.

I.2.9.1 Pertes physiques

- a) **Pertes par les photons de grande longueur d'onde** : tous les photons possédant une longueur d'onde supérieure à celle associée au gap du semi-conducteur ($\lambda > \lambda_g$) ne peuvent générer de paire électron/trou et ils sont donc perdus. Les mécanismes d'absorption assistée par photons permettent néanmoins de repousser la limite inférieure de l'énergie correspondant au gap du matériau (1.052 eV au lieu de 1.124 eV dans le cas d'une absorption assistée par un phonon dans le silicium). Sous un éclairage normal AM1.5, ces pertes sont évaluées à 23.5% dans le cas du silicium.
- b) **Pertes dues à l'énergie excédentaire des photons** : un photon absorbé produit rien qu'une paire électron/trou. Une chaleur est dissipée quand l'énergie est supérieure à la largeur de la bande interdite. Sous un éclairage standard AM1.5, ces pertes sont évaluées à 33% de la puissance totale dans le cas du silicium.
- c) **Facteur de tension** : c'est le rapport de la tension maximale développée par la cellule (V_{oc}) et par la tension de gap E_g/q . La tension aux bornes d'une cellule n'est qu'une fraction de la tension de gap à cause notamment de la chute de potentiel au niveau des contacts et de la jonction. Les meilleures valeurs obtenues de V_{oc} sont de l'ordre de 720 mV.
- d) **Facteur de forme FF** : les équations courant-tension sont régies par les équations de Boltzmann sous forme exponentielle ($\exp[qV/kT]$). La courbe $I(V)$ ne peut donc avoir une forme rectangulaire et, même dans le cas d'une cellule

idéale, le facteur de forme ne peut dépasser 84%. Ce terme dépend fortement des paramètres technologiques modélisés par les résistances série et parallèle.

I.2.9.2 Pertes technologiques

- a) **Réfectivité** : une partie de l'énergie incidente est réfléchiée par la surface (non métallique) de la cellule. Le coefficient de réflexion R peut être optimisé par la mise en œuvre de traitements de surface adéquats et de couche antireflet.
- b) **Taux d'ombrage** : les contacts métalliques (de surface $S_{\text{métal}}$) présents sur la face avant entraînent des pertes de puissance puisqu'ils couvrent en partie la surface de la cellule. Le taux d'ombrage consiste à avoir un arrangement entre les pertes dues à la couverture des contacts et celles dues à la résistance série (largeur des doigts et du busbar de la grille de métallisation).
- c) **Rendement d'absorption** : à cause de l'épaisseur limitée de la cellule, une part non négligeable de photons, ayant néanmoins l'énergie requise, traverse l'épaisseur de la structure sans être absorbés. Des techniques de piégeage par réflexion sur la face arrière peuvent augmenter de manière significative l'absorption, particulièrement dans le cas des cellules en couches minces.
- c) **Rendement de collecte**: Il représente le rapport entre le nombre de porteurs réellement collectés et le nombre total de porteurs photogénérés. En effet, la recombinaison des porteurs peut se faire soit dans le volume ou bien dans la surface de la cellule. Ce phénomène dépend directement de la durée de vie τ des porteurs minoritaires. Ces recombinaisons peuvent être réduites en mettant en œuvre différents traitements tels que la passivation, le gettering et autres.

Ces différents facteurs peuvent être optimisés à l'aide de procédés technologiques utilisés lors de la fabrication des cellules photovoltaïques [18].

I.2.10 Limitation des pertes

La recherche et les techniques actuelles ont permis de réduire, parfois significativement, les pertes de rendement. La Figure I.15 indique la coupe transversale d'une

cellule photovoltaïque en silicium qui conçoit les optimisations industrielles les plus courantes :

a) *L'émetteur* :

L'émetteur (dopage type N) est réalisé par dopage en surface d'un substrat de silicium de type P. En pratique, on réalise un émetteur de faible épaisseur mais fortement dopé. Ce fort dopage permet de limiter la résistance du contact metal/semiconducteur (créé par la connexion entre les contacts métalliques et l'émetteur) et de créer un champ électrique suffisant au niveau de la ZCE.

b) *La texturisation de la surface* :

La réflexion est à l'origine de pertes importantes pour la cellule. La texturisation est utilisée afin de diminuer la réflectivité de la surface de la cellule. Cette opération cible surface afin de la transformer en relief micrométrique de forme pyramidale. Le relief créé permet d'augmenter la surface et induit des réflexions multiples sur les facettes des pyramides [9]. La texturisation assure ainsi le piégeage d'un maximum de lumière réduisant les pertes liées à la réflectivité.

Différents procédés sont utilisés afin de réaliser la texturisation : texturisation mécanique, plasma ou laser, attaques chimiques de la surface (KOH, NaOH, acides). Ces méthodes peuvent faire passer la réflectivité effective de 39% à moins de 10%.

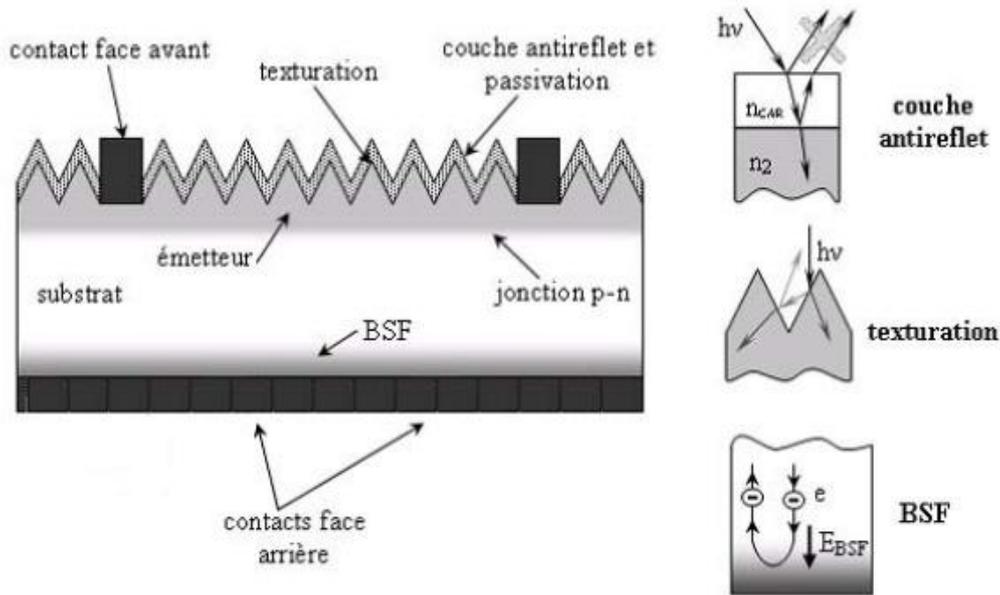


Figure.I. 15 : Structure d'une cellule photovoltaïque standard à base de silicium [19]

c) **Les contacts face avant et face arrière :**

Les contacts constituent la structure de collecte qui récupère et envoie les porteurs photo-générés vers le circuit externe. Pour assurer efficacement cette tâche, les contacts doivent être ohmiques. De mauvais contacts entraînent une forte résistance série qui aura fondamentalement une répercussion sur le facteur de forme de la cellule et sur le courant récupéré [19].

d) **La passivation :**

Sur les surfaces de la cellule, le réseau cristallin s'interrompt brutalement. Certaines liaisons électroniques du silicium sont pendantes et deviennent des centres de recombinaisons pour les porteurs de charges. A ces liaisons s'ajoutent les impuretés présentes dans le réseau cristallin et les défauts du cristal (dislocations). La passivation est l'amélioration de la qualité électronique en surface et en volume en neutralisant les sites actifs, sources de recombinaisons. Les deux mécanismes de passivation de la surface qui permettent de réduire les recombinaisons sont [19] :

➤ **Passivation par neutralisation des défauts d'interface**

C'est une passivation chimique des défauts de l'interface par un matériau ayant une affinité chimique forte avec le substrat (SiN, SiO₂, ...). Les atomes de ce matériau comblent les liaisons pendantes et induisent une diminution de la valeur de D_{if} .

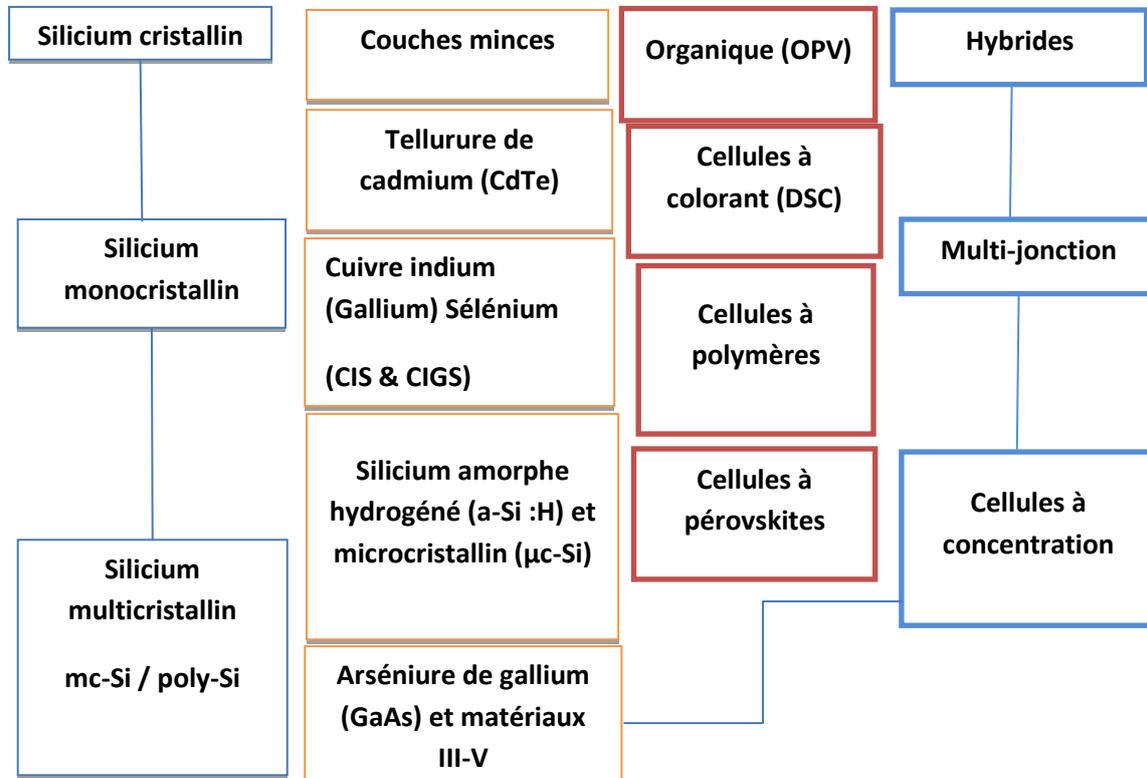
➤ **Passivation par effet de champ**

Pendant la réalisation du BSF, des phénomènes de passivation des défauts volumiques (gettering) peuvent également apparaître. Cette étape technologique agit donc doublement sur la longueur de diffusion des porteurs, en diminuant à la fois les recombinaisons volumiques et surfaciques [20].

La présence de charges dans certains matériaux déposés (comme dans le nitrure de silicium déposé par plasma) entraîne l'existence d'un potentiel de surface et d'une courbure de bande au sein du silicium (on note Q_f la densité de charges fixes). Cette courbure réduit la concentration d'un des deux types de porteurs en surface et limite le taux de recombinaison entre eux. La passivation par effet de champ peut également être mise en place à l'aide d'un dopage supplémentaire. C'est ce qui est fait habituellement sur la face arrière des cellules. La différence de niveau de dopage entre la base et la face arrière engendre une barrière de potentiel qui écarte les porteurs minoritaires dans la base et les éloignent du bord du cristal. Ce dopage est généralement réalisé grâce aux contacts arrière à base d'aluminium qui viennent former un alliage avec le silicium lors de leur recuit. Dans ce cas, il se forme une zone dopée P^+ sur l'ensemble de la face arrière de la cellule (on parle de BSF ou champ de surface arrière). Une bonne passivation impose d'avoir de faibles valeurs de D_{if} et de grandes valeurs de Q_f . La passivation en volume se fait essentiellement par diffusion d'hydrogène, soit par hydrogénation du substrat, soit par un recuit haute température d'une couche hydrogénée déposée au préalable (SiN_x: H).

I.3 Les filières des cellules solaires

Les cellules solaires peuvent être classées en trois générations (Figure I.16).



*Figure.I. 16 : principales filières des cellules photovoltaïques
(Source : Hespul, 2014)*

La première génération est représentée par des cellules solaires au silicium cristallin. Sa technologie a été développée pendant de nombreuses années et domine toujours le marché. La technologie des couches minces est la technologie de deuxième génération. Elle dispose du faible coût en raison de la consommation réduite de matériel. La technologie de troisième génération est référée à toutes les technologies émergentes, visant à atteindre un faible coût sans dégrader le rendement de conversion. Elle est encore en développement. Les cellules solaires tantem, les cellules multi-jonctions, les cellules solaires multi-excitons et les cellules solaires intermédiaires sont des exemples d'une telle technologie émergente [21].

Conclusion

Ce chapitre a permis de donner au lecteur les notions de base permettant la compréhension des phénomènes liés au sujet de thèse. Nous avons mis en évidence le principe de fonctionnement, le schéma électrique, la caractéristique I(V) et les différents rendements (électrique et quantiques) ainsi que les pertes physiques et technologiques de la cellule photovoltaïque et leurs limitations. Nous avons aussi exposé les filières photovoltaïques. Dans le chapitre suivant nous expliquons la théorie de l'hétérojonction silicium cristallin et le silicium amorphe c-Si/a-Si en intégrant les procédés de cristallisation .

Bibliographie

- [1] Djicknoum Diouf « Cellules photovoltaïques silicium à hétérojonctions et à structure interdigitée en face arrière », thèse de doctorat , Paris de sud , juillet 2010.
- [2] Antonio Luque and Steven Hegedus « Handbook of Photovoltaic Science and Engineering », Livre ISBN 0-471-49196-9, England, Decembre 2002.
- [3] Fatima Abdo « Croissance de couches minces de Silicium par épitaxie en phase liquide à base température pour applications photovoltaïques », thèse de doctorat, INSA de Lyon, 2007.
- [4] Rémi de Bettignies « Cellules photovoltaïques organiques dérivées de nouveaux systèmes conjugués », Thèse de doctorat, Université d'Angers, 2003.
- [5] Benaïcha Mouna « Etude des matériaux Semi-conducteur III-V Application à la conversion photovoltaïque », Thèse de magister en physique, Université colonel Hadj Lakhdar Batna (Algérie), 2007.
- [6] Nichipork Oleksiy, « Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités », Thèse de doctorat, l'institut national des sciences appliquées de lyon, Année 2005.
- [7] Sébastien Thibert « Etude de la metallization de la face avant des cellules photovoltaïques en silicium », Thèse de doctorat , Université de Grenoble, 2015.
- [8] Bruno Thuillier « caractérisation structural des contacts ohmiques réalisées à partir d'encres métalliques sur cellules photovoltaïques en silicium multi-cristallin », Thèse de doctorat. INSA de Lyon, 2001.
- [9] Zohra Benmouhamed "Caractérisation et analyse des cellules solaires à base de silicium multicristallin", Thèse de doctorat, Université Mentouri de Constantine, 2009.

- [10] Bernard Boittiaux « Cours d'électronique .Les composants semi-conducteurs », Livre 2eme édition , ISBN :2-7430-0086-4, Lile 1995.
- [11] W.Shockley, WT.Read « Statistics of the recombination of holes and electron » physicalreview, volume87, numéro 5, pages 835.
- [12] R.N.Hall « electron-holerecombination in Germanium », physrev 87.387, 1952.
- [13] S.Dubois « Influence des interactions impureté-impureté sur le rendement de conversion des cellules photo voltaïques au silicium cristallin » thèse de doctorat, université Paul Cézanne Aix-Marseille III, 2007.
- [14] K.A.Munzer, K.H.Eisenrith, W.W.Krunhler, R.E.Schlosser.M.G.Winstel, F.H.Karg, proceedings of the 3th WCPEC,Osaka, japan, HP-C4-40, 2003.
- [15] p.Basore; proceedings of the 23rd IEEE photovoltaïque conference, NewYork, p147, 1993.
- [16] Barrouba tani nadéra « Optimisation des parametres géométriques et physiques de cellules photovoltaïques à contacts arrière interdigités » thèse de doctorat microélectronique, Université Abou Bakr Belkaid Tlemcen, 2015.
- [17] Pierre Papet “Nouveaux concepts pour la realization de cellules photovoltaïques à contacts interdigités sur substrats minces ensiliciumcristallin”, Thèse de doctorat, INSA 2007.
- [18] Jean-François Lelievre «Elaboration de SiNx :H par PECVD : optimisation des propriétés optiques, passivantes et structurale pour applications photovoltaïques », thèse de doctorat. INSA Lyon, 2001.
- [19] PN Vinod , Bc Chakravarty, Mohan Lal, Ravikumar “SN Shigh, A novel method for the determination of the front contact resistance in large area screen printed silicon solar cells “ Semi cond Sci. Technal. 15(2000) 286.290.

- [20] Thibaut Desrues “Développement de cellules photovoltaïques à hétérojonctions Silicium et contacts en faces arrière”, thèse de doctorat, Université de Lyon 2009.
- [21] JialiZhou , « Fabrication of Silicon Heterojunction Interdigitated Back-contacted (SHJ-IBC) solar cells », mémoire de master, Université de technologies Delft, 2017.

Chapitre II: Hétérojonction
silicium amorphe/ silicium cristallin
Etude théorique

Dans notre travail nous avons utilisé deux types de silicium, le silicium cristallin et le silicium amorphe. Cette technologie est un grand intérêt pour la recherche et le développement dans le domaine du photovoltaïque. La technologie liée à l'utilisation de l'hétérojonction a-Si/c-Si présente plusieurs avantages. Nous citons ci-dessous les plus importantes parmi eux :

- ✓ Un fort potentiel d'augmentation du rendement
- ✓ Une fabrication à faible budget thermique ($T < 250^{\circ}\text{C}$)
- ✓ Une meilleure tenue en température
- ✓ Une application adaptée au substrat mince [1]

La figure II.1 montre la comparaison du budget thermique et le temps de procédé entre les cellules conventionnels et les cellules à hétérojonction a-Si/c-Si.

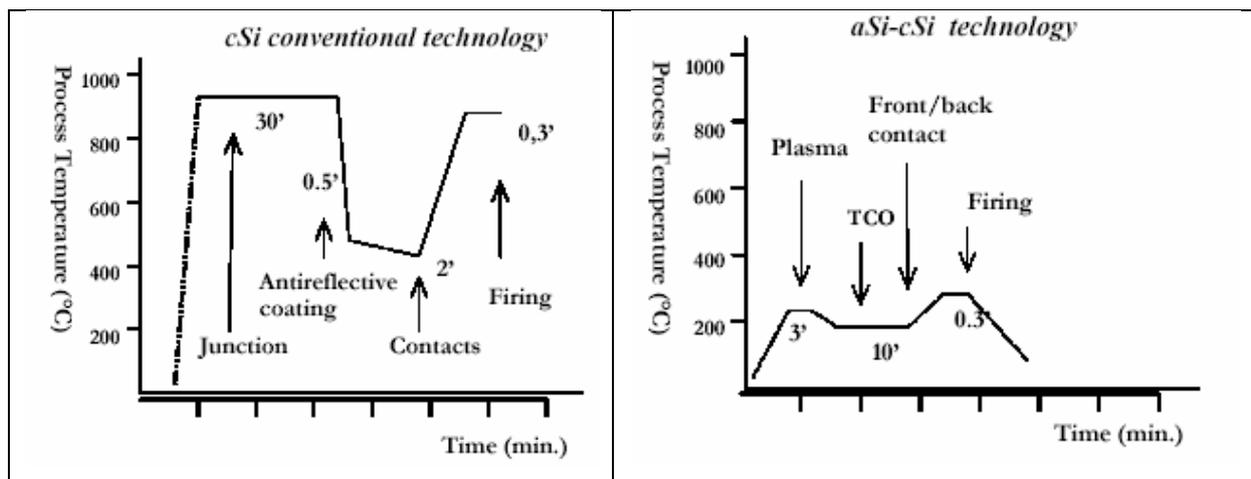


Figure II. 1 : Comparaison du budget thermique et du temps du procédé pour les technologies associées aux cellules classiques et aux hétérojonctions amorphe / cristalline [1]

II.1 Description du silicium

Le silicium est un semi-conducteur qui fait partie de la quatorzième colonne du tableau périodique de Mendeleïev comme il est présenté sur la figure II.2. Le silicium constitue environ 27.7 % de l'écorce terrestre ce qui en fait le deuxième élément naturel après l'oxygène. C'est un élément dit cristallogène, comme il existe une forme cristalline du silicium.

							VIIIA
							² He 4.003
		IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	
		⁵ B 10.811	⁶ C 12.011	⁷ N 14.007	⁸ O 15.999	⁹ F 18.998	¹⁰ Ne 20.183
		¹³ Al 26.982	¹⁴ Si 28.086	¹⁵ P 30.974	¹⁶ S 32.064	¹⁷ Cl 35.453	¹⁸ Ar 39.948
IB	IIB						
²⁹ Cu 63.54	³⁰ Zn 65.37	³¹ Ga 69.72	³² Ge 72.59	³³ As 74.922	³⁴ Se 78.96	³⁵ Br 79.909	³⁶ Kr 83.80
⁴⁷ Ag 107.870	⁴⁸ Cd 112.40	⁴⁹ In 114.82	⁵⁰ Sn 118.69	⁵¹ Sb 121.75	⁵² Te 127.60	⁵³ I 126.904	⁵⁴ Xe 131.30
⁷⁹ Au 196.967	⁸⁰ Hg 200.59	⁸¹ Tl 204.37	⁸² Pb 207.19	⁸³ Bi 208.980	⁸⁴ Po (210)	⁸⁵ At (210)	⁸⁶ Rn (222)

Figure II. 2 : Les semi-conducteurs dans le tableau périodique de Mendeleïev [2]

En effet, le silicium, de même que le germanium se cristallise en une structure : la maille élémentaire (représentée en des sites tétraédriques occupés). Le paramètre de maille du cristal de silicium est de 5.431Å, pour des conditions normales de pression. Le silicium (Si) ainsi que les autres éléments de la colonne IV du tableau périodique forment des cristaux covalents. Ces éléments génèrent des liaisons covalentes avec leurs quatre atomes voisins, en mettant en commun leurs quatre électrons dans le cas du silicium ont une énergie de liaison de 1.12 eV à température ambiante (intermédiaire entre celle du diamant (isolant) et celle de l'étain qui est un bon conducteur) faisant de lui un semi-conducteur. Grâce au procédé Czochralski permettant l'obtention de silicium ultra pur, et à la possibilité d'ajuster le comportement électronique du silicium via l'incorporation d'éléments comme le bore ou le phosphore dans le cristal.

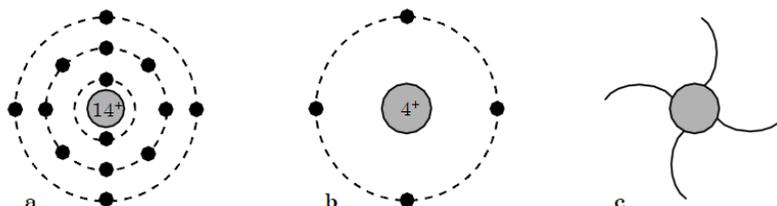


Figure II. 3 : Représentation de l'atome de silicium faisant apparaître :
 a) les niveaux d'énergie et les électrons les occupants.
 b) le dernier niveau d'énergie.
 c) les quatre liaisons covalentes possibles [3]

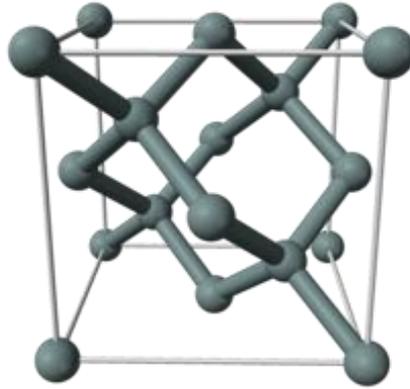


Figure II. 4 : Représentation de la maille élémentaire de type diamant du silicium [4]

II.2 Cristallinité du silicium

Il existe plusieurs types de silicium, le monocristallin, le multi-cristallin et l'amorphe.

II.2.1 Cas du silicium monocristallin

Ce type de matériau présente d'excellentes qualités électroniques, il est très coûteux car il faut noter qu'en partant de 1kg de silice, on n'obtient pas plus de 100g de silicium monocristallin pour une dépense énergétique de l'ordre de MWh et de plus la moitié de ce cristal est perdue au cours de la découpe en tranche de 300 μm d'épaisseur malgré les progrès technologiques reste le plus coûteux. Avec un tel matériau, les rendements de conversion en laboratoire atteignent plus de 22 % avec CZ et 24.7 % FZ (procédé PERL). Nous pouvons noter qu'un monocristal cubique contient trois plans atomiques : (100), (110) et (111) [5].



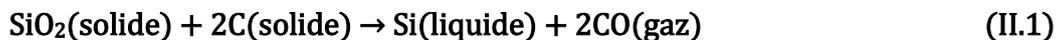
Figure II. 5 : Cellule solaire au silicium monocristallin [4]

II.2.1.1 Purification du silicium

Le silicium extrait des mines n'est pas assez pur pour une application photovoltaïque. Nous pouvons dire que la pureté est indispensable. De nombreuses techniques existent, pour cela, et permettent d'obtenir une qualité de silicium dite métallurgique (MG-Si) avec une pureté de 98-99%. Nous allons citer les procédés de purification permettant d'obtenir une bonne qualité de silicium.

II.2.1.1.1 De la silice au silicium métallurgique

Le silicium est le deuxième élément le plus abondant sur Terre. Il n'existe pas à l'état naturel en tant que corps pur mais en tant que silice (SiO₂) ; sous forme granuleuse (sable,...) ou solide (quartz,...). La carbo-réduction de la silice à des températures supérieures à 1900°C permet d'obtenir le MG-Si. L'opération est réalisée dans un four à arcs électriques où des composés fortement carbonés, utilisés comme réducteur, sont mélangés au SiO₂:



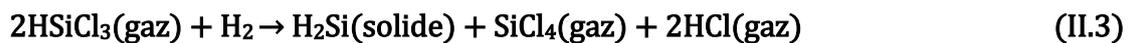
A ce stade, le MG-Si obtenu contient des impuretés en grande quantité dont des carbures de silicium (SiC), du SiO₂ ou encore des impuretés métalliques. Pour la fabrication de matériaux destinés aux cellules solaires, une étape de purification supplémentaire est nécessaire.

II.2.1.1.2 Du silicium métallurgique au silicium électronique

La méthode la plus fréquemment utilisée pour diminuer les impuretés dans le silicium, est le procédé Siemens. Cette voie de purification est dite chimique (opposée à la voie métallurgique). Elle consiste à la réduction de trichlorosilane (SiHCl₃=TCS). Le TCS est formé à partir d'une réaction d'hydrochloration entre le MG-Si et de l'acide Chlorhydrique(HCl) à des températures comprises entre 300-350°C :



Cette réaction est également en compétition avec la formation du tétrachlorure de silicium ($\text{SiCl}_4=\text{TET}$). Les produits de cette première étape doivent être séparés et le TCS purifié avant d'obtenir le silicium. Ce dernier est obtenu par un dépôt chimique en phase vapeur CVD (Chemical Vapor Deposition), à haute température ($\approx 1100^\circ\text{C}$) et en présence d'hydrogène (H_2), sur des barreaux de silicium :



Le silicium est alors obtenu sous une forme multistalline est prêt à être utilisé pour la cristallisation des lingots. Ce type de purification est lourd à appliquer et énergivore. Cependant, l'amélioration de la technique et l'augmentation des volumes de production ont permis de réduire des coûts de production ce qui rend l'EG-Si compatible avec l'industrie photovoltaïque aussi bien en termes de coût que de performance [6].

II.2.1.1.3 Propriétés physiques du Silicium

Tableau II. 1. Propriétés physiques du Si [5]

Propriétés	Silicium
Structure	Diamant
Densité (g/cm^3)	2,328
Constante diélectrique	11,9
N_c (cm^{-3})	$2,8 \cdot 10^{19}$
N_v (cm^{-3})	$1,04 \cdot 10^{19}$
Affinité d'électron	4,05
Energie de Gap à 300°K (eV)	1,12
Concentration intrinsèque des porteurs (cm^{-3})	$1,45 \cdot 10^{10}$
Durée de vie minoritaire (s)	$2,5 \cdot 10^{-3}$
Mobilité des électrons ($\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	1500
Mobilité des trous ($\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	450
Indice de réfraction	3,44

II.2.1.1.4 Cristallisation des lingots de silicium

La méthode d'élaboration des lingots de silicium est choisie en fonction de son coût et de la qualité du matériau voulu. Dans cette partie, trois principales techniques seront

présentées : la solidification dirigée, la méthode Czochralski (Cz) et la méthode de zone fondue (FZ float zone). Ce sont les techniques majoritairement utilisées dans l'industrie du photovoltaïque et de la micro-électronique.

a) Procédé de solidification dirigée

La méthode de solidification dirigée consiste à faire fondre une charge de silicium préalablement purifié dans un creuset en silice. Ce dernier est recouvert d'une couche anti adhérente de nitrure de silicium (Si_3N_4) séparant et limitant toute réaction entre le silicium liquide et la silice solide. La température du bain de silicium est homogénéisée, puis le creuset est progressivement refroidi du bas vers le haut. Un gradient de température se forme et un front de solidification se crée. Des grains de tailles et d'orientations différentes avec une croissance colonnaire se développent et forment le silicium multi-cristallin (Figure II-6).

De par sa forte productivité, ce type de cristallisation présente l'avantage d'être peu coûteuse. Les lingots issus de cette méthode ont des masses supérieures à 600Kg (G6).

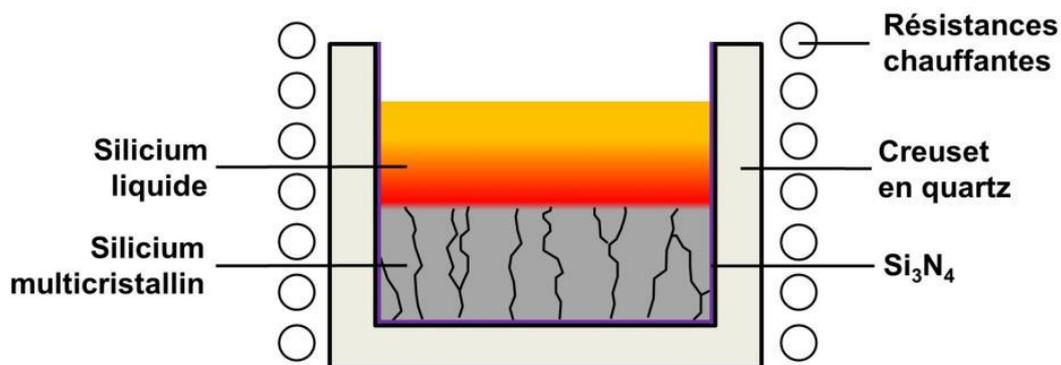
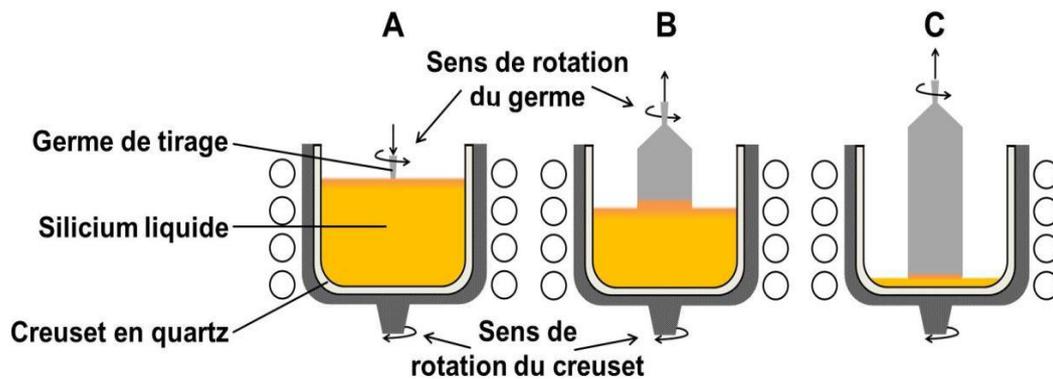


Figure II. 6 : Cristallisation d'un lingot multi-cristallin par solidification dirigée [6]

b) Procédé Czochralski

La méthode de cristallisation Czochralski a été inventée par le chimiste polonais du même nom au début du XX^{ème} siècle. Tout comme pour la solidification dirigée, une charge de silicium est fondue dans un bain en quartz mis en rotation. Lorsque la température du silicium est stabilisée, un monocristal de silicium, également en rotation et appelé germe est mis en contact avec le bain. Le germe permet de tirer un lingot ayant

la même orientation cristalline. Dans le cas d'un lingot destiné à la fabrication de cellules solaires, le germe est orienté $\langle 100 \rangle$ afin de faciliter la texturation de surface.



**Figure II. 7 : Cristallisation d'un lingot Cz ;
 A : mise en contact du germe ;
 B et C : tirage du corps du lingot [6]**

Plusieurs étapes sont alors nécessaires pour tirer le lingot. La première étape consiste à former la tête de lingot de manière à obtenir le diamètre souhaité. La formation maîtrisée de cette partie permet d'obtenir un matériau avec peu, de défauts cristallographiques. Le corps du lingot est, dans un second temps tiré, et peut atteindre deux mètres de longueur (environ 150-200 kg). La fin du tirage se produit lorsqu'il ne reste quasiment plus de silicium dans le creuset. Le matériau obtenu a des propriétés électriques performantes et est monocristallin[7]. Par ailleurs, la présence de quantités importantes d'oxygène provenant du creuset peut entraîner la formation de défauts lors de la cristallisation, et des procédés de fabrication de cellules solaires à haute température.

Afin d'augmenter et améliorer la qualité du silicium, des procédés dérivés de cette méthode existent. Le remplissage en continu du bain de silicium (continuous Cz ou cCz) permet d'augmenter la longueur des cristaux tirés avec un seul germe et ainsi accroître la productivité des fours de tirage de lingots. Cette technique permet d'ajuster également la résistivité par l'ajout de dopant lors du rechargement du creuset en poly-silicium.

La cristallisation des lingots assistée par un champ magnétique (Magnetic field applied Cz ou MCz) permet de contrôler la convection du silicium liquide dans le creuset et de réduire le mélange du silicium présent au milieu du bain avec celui du bord. Ceci permet de créer

une couche de protection liquide limitant l'injection d'oxygène provenant du creuset dans le bain.

c) Procédé Float-Zone

La méthode Float-Zone (FZ) est une alternative au procédé Cz pour obtenir du silicium monocristallin. Un germe est placé, en contact, d'un barreau poly-cristallin de silicium. Ce dernier est fondu localement entre le germe et le barreau. La zone fondue est ensuite déplacée le long du barreau. Lors du refroidissement, le matériau prend l'orientation cristalline du germe pour former du silicium monocristallin.

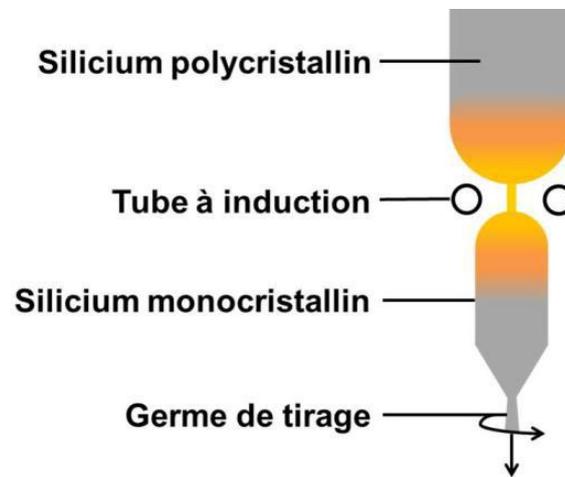


Figure II. 8 : Cristallisation d'un lingot F [6]

Avec cette méthode de cristallisation, l'absence de creuset en quartz permet de réduire considérablement la concentration en oxygène. De plus, la zone fondue se déplace le long du barreau et entraîne les impuretés métalliques, ce qui permet de diminuer la contamination du silicium. Elle permet donc d'obtenir un matériau de très haute qualité. Cependant, son coût de fabrication très élevé n'est pas compatible avec une utilisation à l'échelle industrielle pour le Photovoltaïque.

II.2.2 Cas du silicium multi-cristallin

Contrairement au silicium monocristallin, le silicium multi-cristallin est composé de plusieurs cristaux possédant diverses orientations. Cette différence influe sur la formation des cristallites. Les techniques de production du silicium multi-cristallin sont plus faciles et simples que celles du monocristallin, et donc plus économiques à mettre en œuvre.

Néanmoins, la qualité de ce matériau est moins bonne à cause de la présence d'un taux énorme des impuretés métalliques et de joints de grains. Ces joints sont composés par les surfaces voisines de grains d'orientations cristallographiques différentes (Figure II.9) et comprennent beaucoup de liaisons pendantes. Ils réduisent la durée de vie des porteurs. En plus, ces joints de grains ont un effet sur les porteurs en bloquant leurs flux, comme ils constituent une voie éventuelle d'un courant de fuite à travers la jonction.



Figure II. 9 : Photo d'un substrat de silicium multi-cristallin (échelle : $10 \times 10 \text{ cm}^2$)

Nous pouvons distinguer deux types de défauts dans le silicium multicristallin : les défauts intra-granulaires, et les défauts inter-granulaires.

➤ **Défauts intra-granulaires**

Elles sont généralement dues aux impuretés, nous citons à titre d'exemple le carbone et l'oxygène, qui sont introduites pendant la croissance du lingot. Mais ils n'influent pas beaucoup sur les propriétés électroniques du silicium, même s'ils existent avec une grande concentration. Elles peuvent cependant devenir actives électroniquement s'ils s'accompagnent avec d'autres défauts. Si ces impuretés sont des métaux de transition, des niveaux d'énergie profonds sont inclus dans la bande interdite du semi-conducteur, formant des centres recombinants.

➤ **Défaut inter-granulaires**

Ces défauts correspondent aux joints de grains qui représente une source essentielle et importante de recombinaisons dans le volume du matériau. Leur quantité dépend de la taille des grains, qui peut varier d'une méthode de production à une autre et qui est en fonction de

leur localisation au sein d'un même lingot, les grains périphériques sont en général plus petits que ceux situés au centre car ils sont soumis à plus de contraintes thermiques.

En se basant sur les expériences de Khadilkar et al, Schubert a montré que sur du silicium multi-cristallin, la forme des cristallites dépendait de l'orientation des cristaux. Un autre point différenciant le silicium multi-cristallin du monocristallin est la présence de joints de grains. Cheek et al ont expliqué qu'il était nécessaire d'avoir moins de fritte de verre dans une pâte optimisée pour les échantillons multi-cristallins pour limiter la gravure des joints de grains. Dans le cas contraire, les impuretés contenues dans ceux-ci sont libérées. Elles peuvent alors créer des centres recombinants ou encore endommager la jonction et causer un court circuit (shunt) de la cellule [8].

II.2.3 Cas de silicium amorphe

Le silicium amorphe a une structure atomique désordonnée, mais il est un bon absorbant de la lumière. Il absorbe environ 1000 fois mieux que le silicium cristallin. Une fine couche de 0,3 μm est donc suffisante pour absorber l'essentiel du spectre visible [2]. Lors de sa transformation, le silicium émet un gaz projeté sur une feuille de verre en présence d'hydrogène pour contrôler le dopage de types n et p. La technique utilisée est la vaporisation sous vide. Le silicium amorphe reste relativement stable et peut produire de l'énergie même sous ensoleillement diffus et sous faible éclairage (et artificiel), il est fabriqué à un prix raisonnable. A côté de ces points avantageux, les modules en silicium amorphe ont une durée de vie plus courte par rapport aux modules en silicium cristallin (>10 ans contre >20 ans). En effet, leur taux de dégradation est presque trois fois supérieur à celui des panneaux en silicium cristallin [4], et l'inconvénient majeur est son faible rendement en plein soleil.

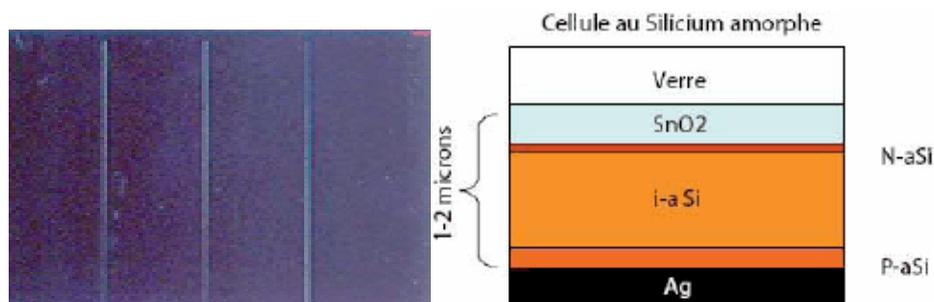


Figure II. 10 : Cellule photovoltaïque au silicium amorphe [4]

II.2.3.1 Le silicium amorphe hydrogéné

Les atomes de silicium, qui sont tétravalents, ne sont plus reliés entre eux formant ainsi des liaisons pendantes. Ces dernières peuvent créer des défauts recombinants qui sont passivés par des atomes d'hydrogène (H). Plusieurs types de configuration peuvent être alors observés ; un atome de silicium peut être lié qu'à des atomes silicium, à des atomes d'hydrogène (de 1 à 3) ou à des liaisons pendantes.

Le gap du matériau est de 1.7eV mais peut varier suivant le ratio des réactifs lors des dépôts. Il est assez simple de doper le silicium amorphe à l'aide de diborane (B_2H_6) pour un dopage type-p et de phosphine (PH_3) pour un dopage type-n, ce qui a pour effet d'augmenter la mobilité des porteurs de charge dans les couches. Ceci modifie également le niveau de Fermi du matériau et permet de former les jonctions p-n.

Cependant, le dopage introduit des défauts dans la couche pouvant se retrouver à l'interface entre le silicium cristallin et l'amorphe. L'insertion d'une fine couche intrinsèque entre le a-Si: H dopé et le c-Si permet alors de réduire la densité de défauts à l'interface (Dit).

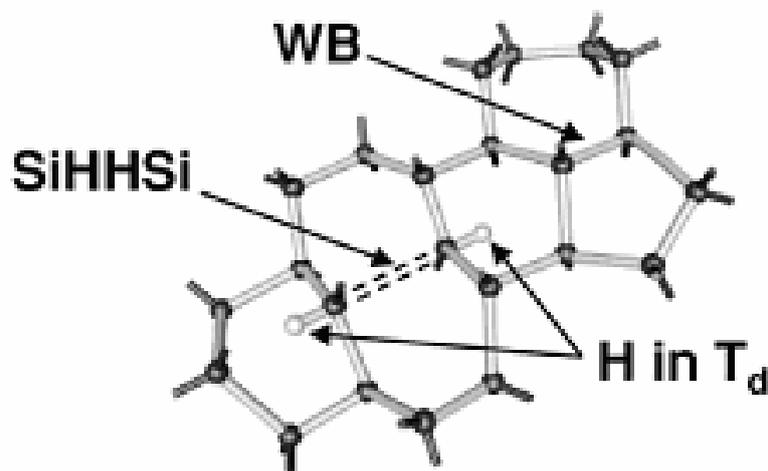


Figure II. 11 : Aspect cristallographique du silicium amorphe hydrogéné [1]

II.2.3.1.1 Densité d'états

Dans un cristal, la présence d'une bande de conduction et de valence nettement séparées par une bande interdite est conditionnée par la périodicité du réseau et résulte du couplage des orbitales atomiques s et p des atomes de Silicium formant des liaisons covalentes. Dans le cas du silicium amorphe, on considère que sa structure est suffisamment ordonnée localement, sur quelques nanomètres, et proche de celle du silicium cristallin pour lui attribuer une bande de valence (BV) et une bande de conduction (BC). Cependant, les bandes d'énergie ne peuvent plus être décrites par des relations de dispersion $E(k)$. Le désordre à longue distance qui caractérise sa structure est responsable de la localisation des fonctions d'ondes dans l'espace. D'après la théorie de la localisation, dont les fondements résident dans un article publié par Anderson en 1958, lorsque le désordre dépasse un certain seuil, les fonctions d'onde des électrons perdent leur cohérence de phase d'un atome à l'autre, si bien que la conduction via ces états est nulle à 0 K. Ces états, répartis dans la bande interdite du matériau, sont dits localisés en opposition aux états étendus des bandes de conduction ou de valence. Les états étendus sont séparés des états localisés par le bord de mobilité. La figure II.12 résume les principales différences distinguant la densité d'états du silicium cristallin et celle du silicium amorphe hydrogéné.

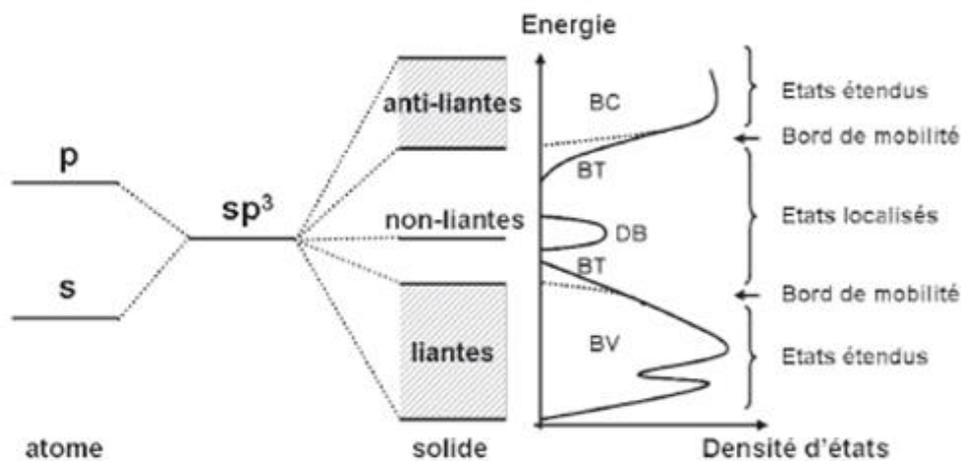


Figure II. 12 : Représentation schématique de l'orbitale moléculaire du Silicium et de la densité d'états résultante pour a-Si : H (traits pleins) en comparaison avec la densité d'états du c-Si (traits pointillés) [9]

Parmi les états localisés dans le gap, on distingue :

➤ **Les queues de bandes ou band tails (BT) :**

États faiblement localisés correspondant aux liaisons faibles Si_Si. Ces défauts sont liés aux fluctuations des longueurs et des angles des liaisons covalentes Si_Si par rapport à la configuration cristalline. Ces états sont présents à l'intérieur du gap dans le prolongement des bandes de conduction et de valence. On les appelle des queues de bandes exponentielles à cause de leur forme typique [9].

➤ **Les liaisons pendantes ou dangling bonds (DB) :**

États fortement localisés et situés au centre du gap liés à la rupture des liaisons faibles, ces dernières sont les défauts de coordination prépondérants dans a-Si:H, d'énergie de corrélation positive. Ces défauts sont amphotères c'est-à-dire qu'ils peuvent avoir trois états de charge. Ils sont généralement représentés par des gaussiennes dans la bande interdite [9].

II.2.3.1.2 Rôle de l'hydrogène

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



D est le symbole introduit pour désigner la liaison pendante portée par un atome de Silicium en coordination 3 (Si(3)).

Un a-Si:H non dopé possède en général moins de 10^{16}cm^{-3} . L'hydrogène contribue également à réduire le désordre et à diminuer la largeur des queues de bandes. Cependant, pour certaines conditions de dépôt, l'hydrogène peut aussi casser des liaisons. En réalité, il existe un équilibre de rupture des liaisons faibles Si_Si et de formation de liaisons pendantes assisté par l'Hydrogène : c'est la base du modèle de réservoir de défauts (DPM) [9].

II.2.3.1.3 Méthodes de dépôt du a-Si:H

Plusieurs procédés de fabrication de silicium en couches minces ont été développés durant les trente dernières années. Ses méthodes font appel à des principes physiques différents, mettant en jeu des processus qui déterminent les caractéristiques structurales des matériaux déposés. Ainsi suivant la qualité du matériau obtenu et l'adaptation à un environnement industriel, certaines méthodes se sont plus développées que d'autres. L'organigramme de la Figure II.13 les illustre.

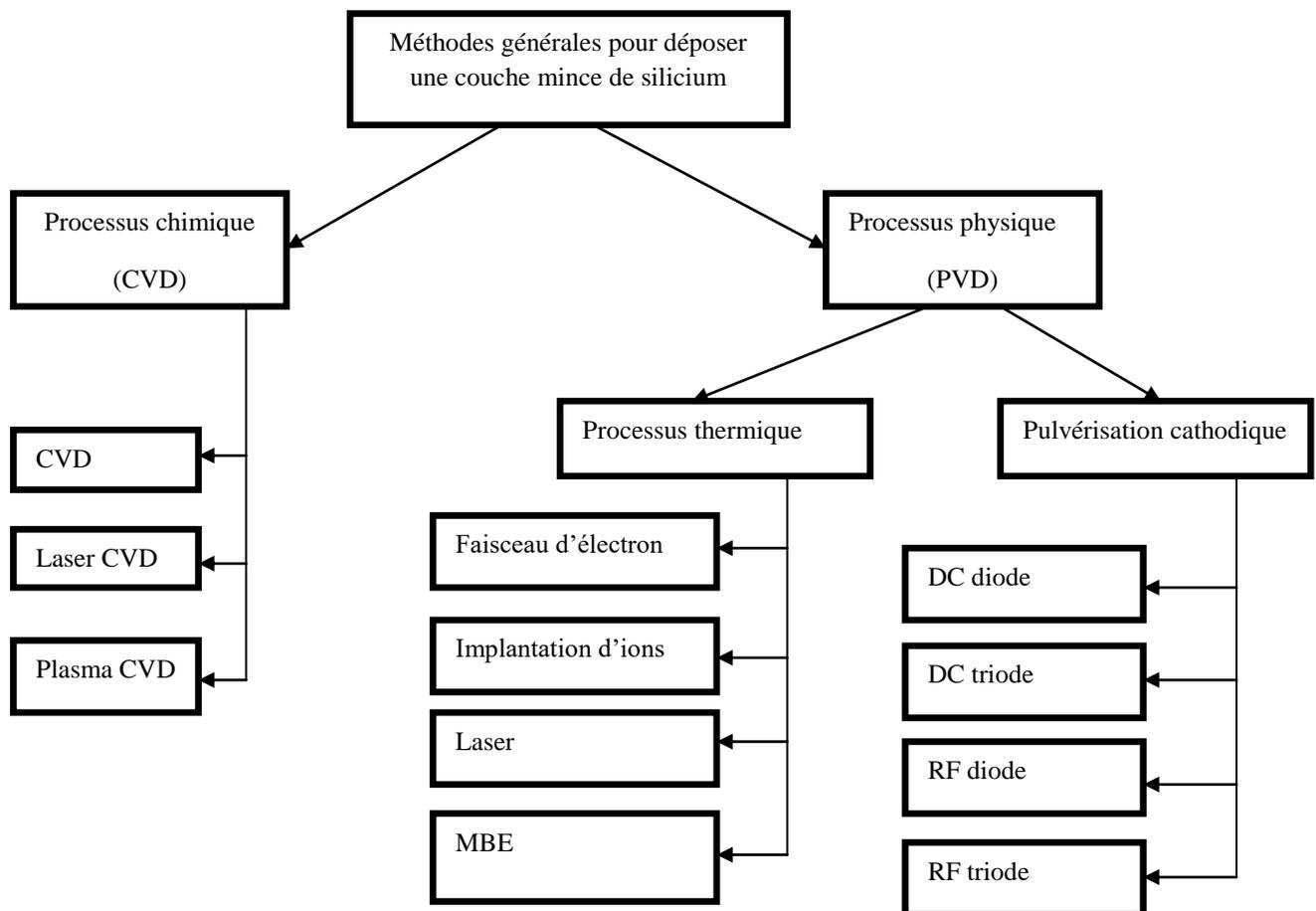


Figure II. 13 : Méthodes générales de dépôt de silicium en couches minces [10]

Lors d'un dépôt chimique, un fluide précurseur subit une réaction chimique sur une surface solide, laissant une couche solide. Puisque le fluide recouvre l'ensemble de la surface du solide, le dépôt s'effectue sur toute la surface. On peut citer comme exemples le revêtement, le procédé sol-gel, l'enduction centrifuge (spin-coating), le dépôt chimique en phase vapeur (ainsi que la variante assistée par plasma), ou encore le dépôt de couche atomique. En revanche, Un dépôt physique implique des procédés mécaniques, électromécaniques ou thermodynamiques pour produire une couche mince de solide.

Le matériau à déposer sur le substrat est placé dans un environnement tel que les particules qui le composent échappent de sa surface. En face de cette source de matériau se situe une surface plus froide (substrat), qui récupère de l'énergie de ces particules lorsqu'elles arrivent, ce qui permet la formation d'une couche solide. L'ensemble de ce système est maintenu dans une chambre de dépôt sous vide, pour plusieurs raisons. Premièrement, rend le mouvement des particules plus rapide, et deuxièmement, limite la présence intempestive dans la couche déposée d'atomes ou molécules présentes dans l'atmosphère environnante. On peut citer comme exemples l'évaporation sous vide, la pulvérisation cathodique, le dépôt laser pulsé, le dépôt électro-hydro-dynamique [11]. La technique actuellement la plus répandue est le dépôt chimique en phase vapeur assistée par plasma (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition : PECVD). Une autre technique, appelée « Hot Wire CVD » (dépôt chimique en phase vapeur par filament chaud) donne de meilleurs résultats mais son application à un niveau industriel n'a pas encore été démontrée.

II .3 Principe de base de l'hétérojonction a-Si:H/c-Si

Lorsque deux matériaux semi-conducteurs sont en contact, il se produit un échange de charges qui fait tendre le système vers l'équilibre thermodynamique. Le diagramme de bande dépend des paramètres suivants : le gap (E_{g1} et E_{g2}), l'affinité électronique (χ_1 et χ_2) et le niveau de dopage (δ_1 et δ_2) [12].

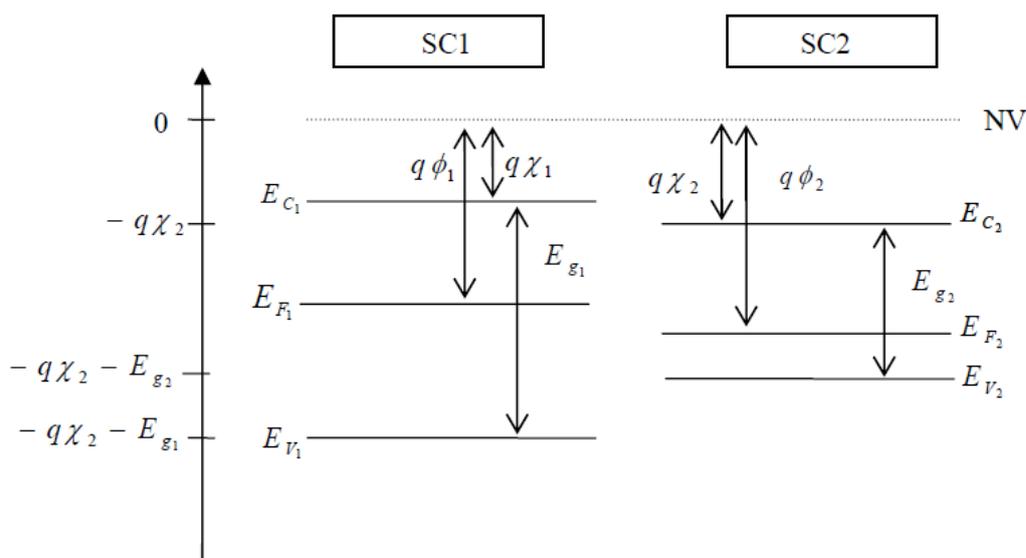


Figure II. 14 : Représentation des paramètres électroniques de deux matériaux isolés. Le niveau du vide est le niveau de référence

Pour les hétérojonctions, le modèle de base est le modèle d'Anderson qui est sans états d'interface [10]. Ce modèle ne prend pas en considération les états d'interface.

II.3.1 Le modèle d'Anderson

Le modèle d'Anderson existe depuis 1960, son principe repose sur la prise en compte des propriétés électroniques des matériaux utilisés : permittivité électrique, affinité électronique et largeur de la bande interdite [1]. Lors du raccordement des bandes de conduction et de valence, la différence entre les gaps et les affinités électroniques sont à l'origine des discontinuités. Les figures II.15 et II.16 représentent les diagrammes de bande d'une hétérojonction a-Si : H(n)/c-Si(p) et a-Si : H(p)/c-Si(n) respectivement. Dans ce modèle, nous considérons que le transport de charges se fait par injection dans les régions quasi-neutres et aussi par les phénomènes de génération/recombinaison dans la zone de charge d'espace ainsi que les quasi-niveaux de Fermi ne varient pas dans la zone de charge d'espace [12].

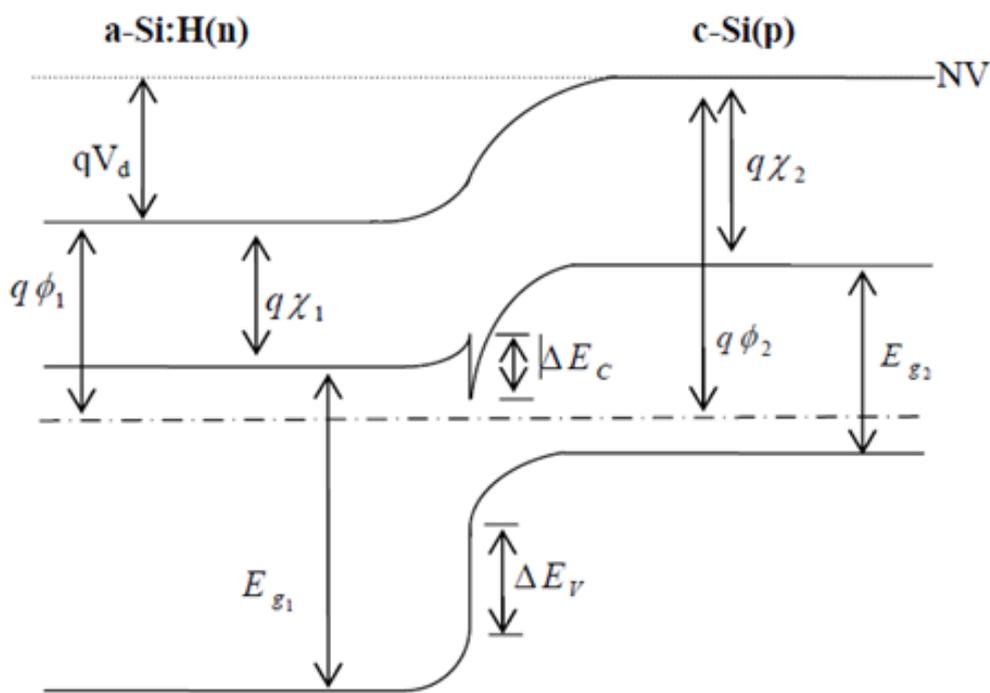


Figure II. 15 : Diagramme de bandes d'une hétérojonction a-Si : H(n)/c-Si(p) à l'équilibre thermodynamique

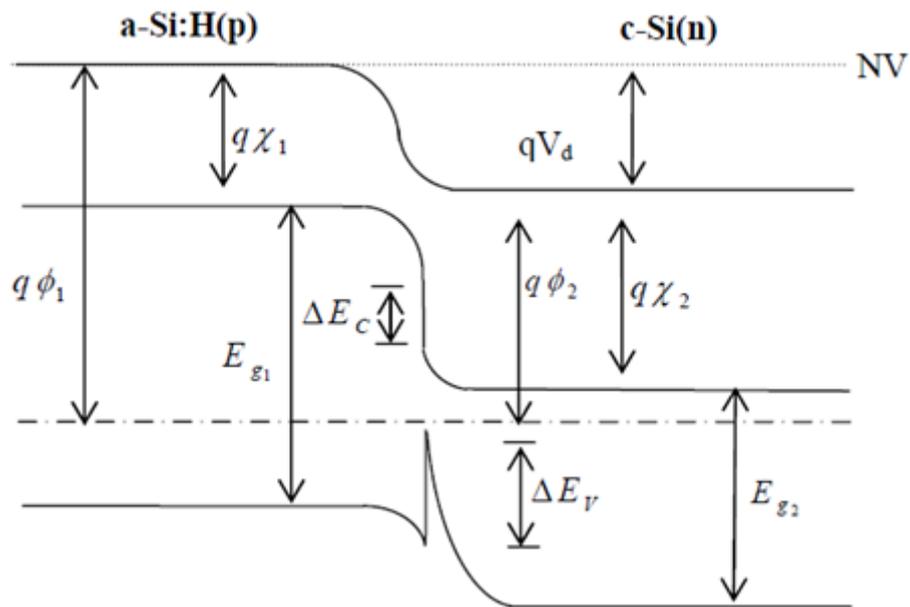


Figure II. 16 : Diagramme de bandes d'une hétérojonction a-Si :H(p)/c-Si(n) à l'équilibre thermodynamique

Les relations suivantes représentent le raccordement des bandes de conduction et de valence.

$$\Delta E_c = q(\Psi_2 - \Psi_1) \tag{II.5}$$

$$\Delta E_v = q(\Psi_2 - \Psi_1) + E_{g1} - E_{g2} \tag{II.6}$$

La tension de diffusion est donnée par :

$$qV_d = q(\phi_2 - \phi_1) \tag{II.7}$$

Ψ : est l'affinité électronique

$q\phi$: est le travail de sortie

II.3.2 Compléments au modèle d'Anderson

Réellement, les états d'interface ne sont pas négligeables. Nous citons deux phénomènes qui sont l'origine de leur introduction :

- ✓ les états chargés d'interface peuvent modifier la structure de bandes en diminuant ou en augmentant le niveau de la bande de conduction par rapport au niveau de Fermi.
- ✓ les états d'interface sont à l'origine d'un grand nombre de centres de recombinaison qui expliquent les valeurs élevées de courant de saturation.

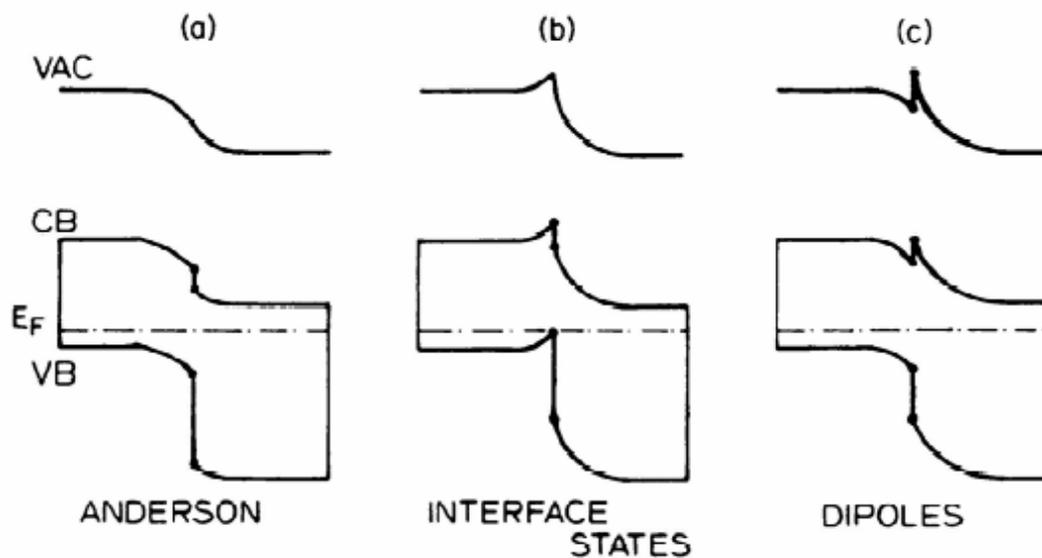


Figure II. 17 : Diagramme de bandes d'énergie selon trois modèles :
 (a) modèle d'Anderson (b) en incluant les états d'interface et
 (c) en incluant les dipôles [12].

L'influence des états d'interface dépend du niveau d'injection et de la polarisation. La figure II.17 représente l'influence que peuvent avoir les états d'interface chargés électriquement et les dipôles sur le profil de bande. La recombinaison directe à travers les états d'interface et le contrôle du transport de charges avec les vitesses de recombinaison de surface permettent de compléter le modèle d'Anderson [12].

Nous pouvons dire que la qualité de l'hétéro-interface silicium amorphe/silicium cristallin est un critère très important pour avoir des cellules à haut rendement [12].

II.3.3 Influence de l'affinité électronique et de la discontinuité des bandes

Le modèle d'Anderson considère que la discontinuité des bandes dépend de l'affinité électronique et du gap des deux matériaux. Par définition, l'affinité électronique représente la quantité d'énergie nécessaire pour qu'un électron passe de la bande de conduction au niveau du vide. La valeur de χ est souvent déduite des mesures du travail de sortie Φ tel que $\Phi = \chi + \delta$. Toutes les techniques destinées à mesurer le travail de sortie (sonde de Kelvin, photoémission, caractéristiques capacité-tension) dépendent de l'interface (vide/semi-conducteur, métal/semi-conducteur). Les interactions entre les différents matériaux sont uniques et les états de surface, d'interface, ainsi que la variation de E_g à la surface vont considérablement influencer sur la valeur de l'affinité électronique. Les valeurs d'affinités électroniques publiées servent donc seulement de références pour évaluer l'ordre de grandeur de ΔEC et ΔEV . D'autres modèles sont utilisés pour le traitement de l'hétérojonction tels que : les modèles introduisant des états d'interface chargés et des dipôles influant sur le profil des bandes en engendrant des recombinaisons ; des modèles prenant en compte l'influence des états d'interface ainsi que le transport par effet thermoionique et tunnel [10].

II.4 Différentes hétérojonctions pour le photovoltaïque

Différentes combinaisons de matériaux sont possibles pour former des hétérojonctions adaptées à l'application photovoltaïque. Le tableau II.2 donne un aperçu des hétérojonctions les plus connues et les plus étudiées. Les paramètres les plus importants basés sur le modèle d'Anderson y sont donnés et permettent d'évaluer le rendement maximal. Pour déduire sa valeur, on considère une valeur de $V_{oc} = 0.65$ V d'un rendement quantique de 100% dans le domaine d'absorption et un facteur de forme $FF = 75\%$.

Tableau II. 2: Performances de différentes hétérojonctions [10]

Hétérojonctions Matériau 1/Matériau 2	Eg1 (eV)	Eg2 (eV)	χ_1 (eV)	χ_2 (eV)	ΔEC (eV)	Vd (V)	η max (%)
n-ITO/p-InP	3.35	1.35	4.50	4.38	-0.12	1.43	24.0
n-ITO/p-CdTe	3.35	1.50	4.50	4.28	-0.22	1.48	21.3
n-ITO/p-Si	3.35	1.12	4.50	4.05	-0.45	0.87	17.6
n-ZnSe/p-Ge	2.67	0.66	4.09	4.13	+0.04	0.51	14.8
n-ZnSe/p-Si	2.67	1.12	4.09	4.05	-0.03	0.93	17.5
n-CdS/p-InP	2.42	1.35	4.50	4.38	-0.12	1.08	15.0
n-CdS/p-CdTe	2.42	1.50	4.50	4.28	-0.22	1.13	12.8
n-ZnO/p-CdTe	3.30	1.50	4.35	4.28	-0.07	1.33	18.9
n-ZnSe/p-GaAs	2.67	1.43	4.09	4.07	-0.02	1.26	17.5
n-CdS/p-CuInSe2	2.42	1.04	4.50	4.00	-0.50	1.88	19.0
AlxGai-xAs/GaAs	2.1-2.4	1.43	4.00	4.07	0.07	1.35	26.0

II.4.1 La structure HIT (Hétérojonction Intrinsic Thin film)

La possibilité d'utiliser le silicium amorphe avec un substrat cristallin pour former une hétérojonction fut pour la première fois envisagée par W.Fuhs en 1972 [12]. L'entreprise japonaise SANYO a mis en œuvre en octobre 1997 une production de masse de modules photovoltaïques à partir de structures HIT (Heterojunctions with Intrinsic Thin layers). Après plusieurs années de recherche, les divers verrous technologiques ont été levés pour optimiser cette structure innovante représentée sur la Figure II.18.

Les premières études ont porté sur l'optimisation de l'hétérojonction amorphe/cristallin en utilisant un substrat monocristallin de type Czochralski (CZ) dopé n sur lequel une fine couche (quelques nm) de silicium amorphe hydrogéné dopé [a-Si : H(p)] est déposée par PECVD. Une couche d'oxyde conducteur transparent (TCO) déposée par pulvérisation cathodique est nécessaire afin d'assurer un contact entre le silicium amorphe et le métal.

Elle sert aussi de couche antireflet. Les contacts sont ensuite déposés par sérigraphie à l'aide d'une pâte basse température adaptée.

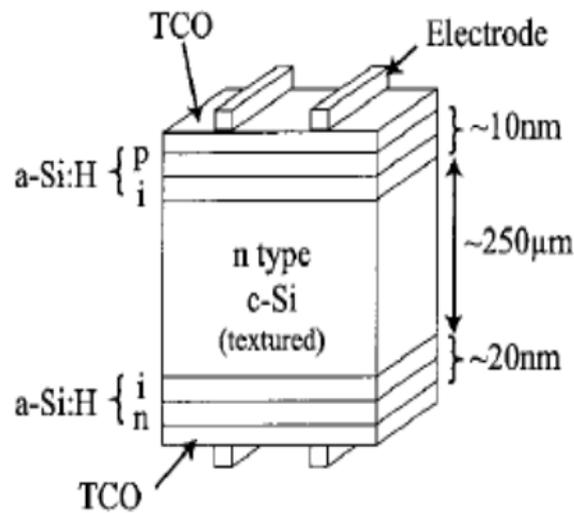


Figure II. 18 : structure de la cellule HIT produite par Sanyo

La société PANASONIC (SANYO) a annoncé aujourd'hui qu'elle a atteint un rendement de conversion de 25,6% pour une cellule de structure HIT de 143.7 cm² [3]. D'après la littérature, il est possible d'obtenir des rendements supérieurs à 17 % en utilisant du silicium cristallin de type p, et supérieurs à 17,5 % de type n, et cela sans couche intrinsèque.

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

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

Les oxydes transparents conducteurs sont des substances à grand gap. Il existe une grande diversité d'oxydes transparents conducteurs. Nous citons parmi eux les oxydes de zinc, les oxydes d'étain et les oxydes d'indium qui peuvent être dopés avec les éléments atomiques suivants: (Al, In, Ga, F, Sn). L'oxyde d'indium dopé à l'étain nommé ITO (Indium Tin Oxyde) est l'oxyde transparent conducteur le plus connu et aussi le plus utilisé. L'ITO possède en effet d'excellentes propriétés : transparence supérieure à 80 % voire 90 % sur le spectre visible, résistivité faible de $10^{-1}\Omega.cm$ à $5 \times 10^{-1}\Omega.cm$ pour les meilleurs ITO mais pouvant excéder $5 \times 10^{-4}\Omega.cm$ pour des ITO médiocres, et une très bonne adhérence sur une multitude de substrats [13]. Pour les cellules à contact arrière, les TCO en face avant sont remplacés par des matériaux qui joueront à la fois le rôle de couche antireflet et de couche de passivation de la surface du substrat c-Si. Le nitrure de silicium est généralement utilisé pour ce type de structure.

Conclusion

Ce chapitre décrit l'intérêt de l'utilisation de l'hétérojonction pour améliorer les performances électriques des cellules photovoltaïques. Dans un premier temps, nous avons exposé la structure de silicium, les types de silicium qui existent et les procédés de cristallisation. Comme nous avons expliqué le principe de l'hétérojonction, en intégrant le modèle d'Anderson et son complément. Nous avons présenté le modèle HIT en décrivant les avantages de ce concept. Nous pouvons noter que le but de ce chapitre est l'étude théorique qui permet la bonne compréhension de la technologie utilisée dans notre travail. Le chapitre qui suit décrit les trois technologies étudiées théoriquement, IBC, EWT et MWT dont le but d'extraire la différence entre eux en terme du coût.

Bibliographie

- [1] Yannick Veschetti « Modélisation, caractérisation et réalisation de nouvelles structures photovoltaïques sur substrat de silicium mince », Université Louis Pasteur Strasbourg I, Octobre 2005.
- [2] Christiana Honsberg and Stuart Bowden, PV education , PN Junction Semiconductor materials, <http://www.pveducation.org/pvcdrom/semiconductor-materials>.
- [3] Chapain D, M, Fuller C.S, Pearson G.L.A « News Silicon pn junction photocell for converting solar radiation into electrical power » .J.Appl.Phys, Vol.25, PP. 676-677, 1994
- [5] Benabdallah Nadia, « Propriétés physiques des semi-conducteurs (Si monocristallin et Ge) et Simulation des cellules solaires à base de Siet SiGe », Thèse de doctorat, Université Abou-Bekr-Belkaid Tlemcen, Faculté des sciences, 2006.
- [6] Frederic Jay, « Nouveaux substrats de silicium cristallin destinés aux cellules photovoltaïque à haut rendement: cas du silicium mono-like et du dopage aux donneurs thermiques liés à l'oxygène pour les cellules à hétérojonction de silicium », Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes, 2016.
- [7] Xiaodong Wang & Zhiming M.Wang, « High efficiency solar cells », Livre Springer series in materials science, ISBN 978-3-319-01988-8, 1988.
- [8] Sebastien Thibert , « Etude de la metallisation de la face avant des cellules photovoltaïques en silicium » , Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes ,2014.
- [9] Raphaël Lachaume, « Contribution à la caractérisation électrique et à la simulation numérique des cellules photovoltaïques silicium à hétérojonction », Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes, 2014.

- [10] Bensmaine asma, « Investigation de l'ingénierie de bandes des cellules solaires à hétérojonction a_Si :H/cSi : Modélisation et simulation numérique », Thèse de doctorat, Université Djilali liabes sisi-Belabès Algérie, 2018.
- [12] Djicknoum Diouf « Cellules photovoltaïques silicium à hétérojonctions et à structure interdigitée en face arrière », Thèse de doctorat , UniversitéParis de sud, juillet 2010.
- [13] P.W. Anderson, Phys. Rev. 109, 1492 (1958).

Webographie

- [4] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Silicium>
- [11] https://fr.wikipedia.org/wiki/Dépôt_de_couche_mince

Chapitre III : Les structures des cellules solaires à contact arrières interdigités

III. Introduction

Les cellules solaires à contact arrières interdigités sont des cellules à haut rendement. Elles peuvent atteindre des rendements de conversion au-dessus de 20%.

A titre d'exemple, nous rappelons que la cellule (PERL) a fourni un rendement de 24,7%, sous éclairage AM1.5, obtenu dans le laboratoire. La cellule HIT à hétérojonction avec une couche intrinsèque a permis d'obtenir un rendement de 22%. Les recherches sont toujours poursuivies à ce jour. Le sujet que nous abordons est donc d'actualité.

Dans ce chapitre nous allons exposer les trois structures à contact arrière interdigités : la cellule IBC, EWT et MWT. Nous commencerons par expliquer leur principe de fonctionnement et procédés de fabrication, nous citerons les avantages et inconvénients de chacune d'elles. Nous décriront aussi la méthode de sérigraphie utilisée, car elle est importante dans la réalisation des contacts.

III.1 Les cellules solaires à contacts arrière interdigités

III.1.1 Structure et principe de fonctionnement d'une cellule solaire IBC

L'architecture IBC ou RCC (Rear Contact Cell) a été présentée pour la première fois en 1975 par Schwartz pour une utilisation sous concentration sur les structures IBC (Interdigitated Back Contact) la jonction p-n et le BSF, ainsi que leurs métallisations, sont localisés sur la face arrière sous forme de peignes interdigités. On évite ainsi le compromis inévitable sur les cellules standard entre le taux d'ombrage (métallisations fines) et les pertes résistives des contacts (contacts larges) [1].

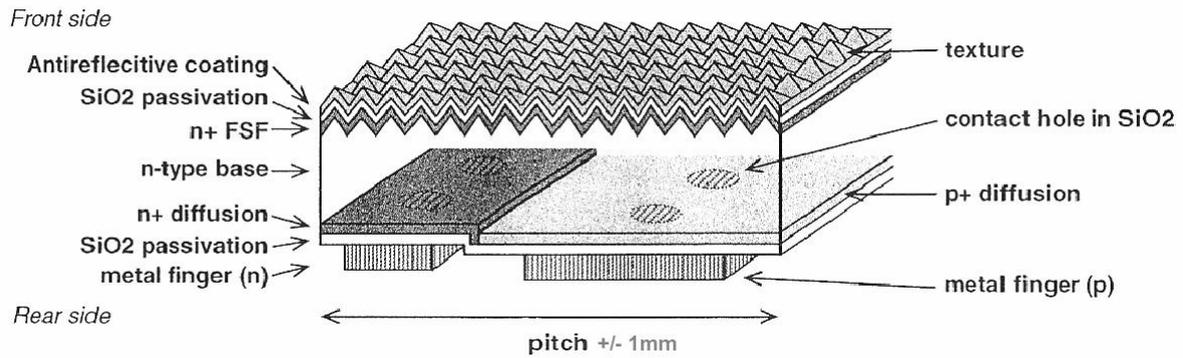
Cette structure à plusieurs avantages nous citons parmi eux :

- ✓ Absence du taux d'ombre des contacts.
- ✓ Les contacts étant réalisés sur la face arrière, ils peuvent être larges ce qui réduit la résistance série de la cellule et améliore le confinement optique car les contacts métalliques servent de réflecteur arrière.
- ✓ Le courant d'obscurité de la cellule (courant de diode) est réduit car la surface de la jonction p-n est plus petite.

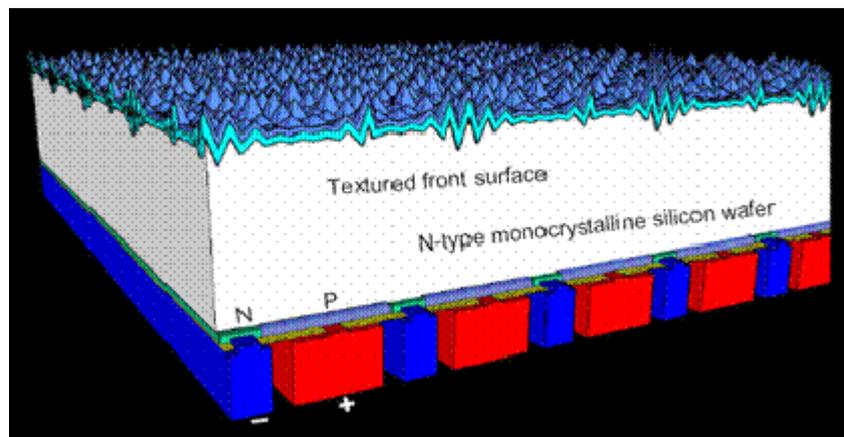
- ✓ La recombinaison dans l'émetteur est diminuée puisqu'il est situé sur la face non illuminée.
- ✓ Grâce à la faible recombinaison dans l'émetteur, celui-ci peut être fortement dopé. L'avantage d'un émetteur fortement dopé est l'augmentation de la barrière de potentiel de la jonction p - n. Par conséquent, la tension de circuit ouvert augmente et la recombinaison sur le contact à l'émetteur est réduite.
- ✓ L'assemblage des cellules PV interdigitées est simplifié car tous les contacts sont situés sur une face de la cellule.
- ✓ Pour réaliser la cellule interdigitée, l'accès à une seule face du substrat suffit, sauf pour le dépôt de la couche anti-reflet, mais ce dépôt est une opération «moins critique» puisqu'elle se passe à basse température (200-400°C) [2].

Maintenant nous citons les inconvénients :

- ✓ La complexité de la structure (pour réaliser des cellules interdigitées, la lithographie ou la sérigraphie alignée est nécessaire).
- ✓ La longueur de diffusion des porteurs minoritaires doit être nettement plus grande que l'épaisseur de la cellule. Donc, la qualité du substrat doit être bonne.
- ✓ Les cellules PV interdigitées sont très sensibles à la recombinaison en surface. Donc, la passivation de la face avant doit être très bonne [3].



FigureIII. 1 : Structure RCC A300 développée par sun power corp [4]



FigureIII. 2 : Structure IBC type n développée par sunpower [5]

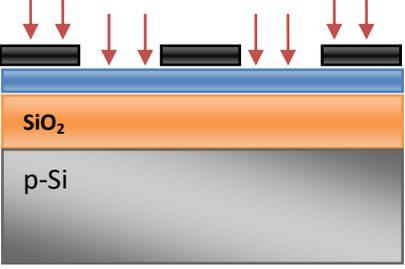
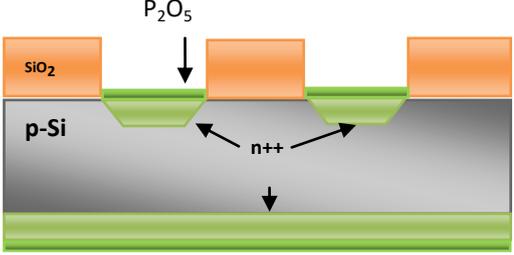
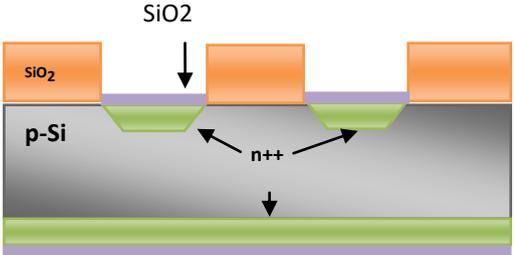
III.1.2 Procédé de fabrication des cellules solaires à contacts arrière interdigités IBC classique

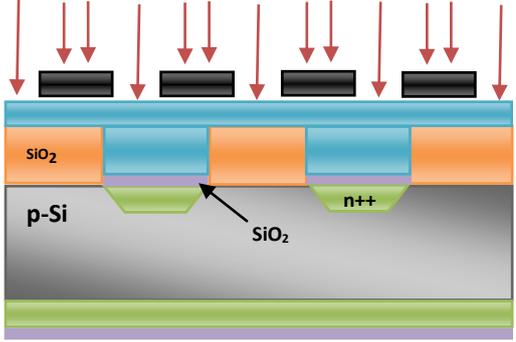
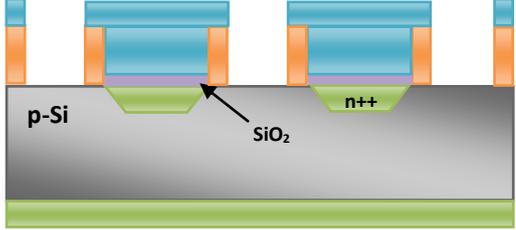
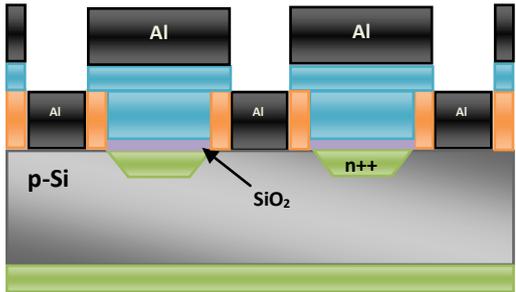
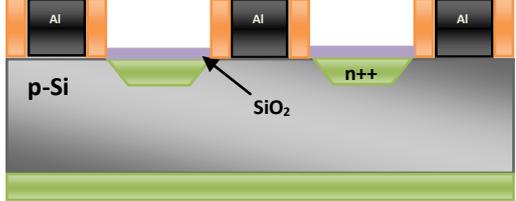
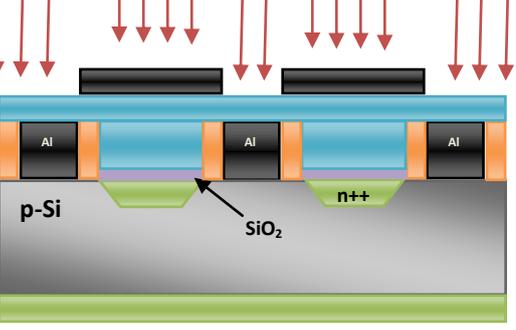
Il existe trois procédés de fabrication pour ce genre de cellule qui ont été validés dans l'industrie [6].

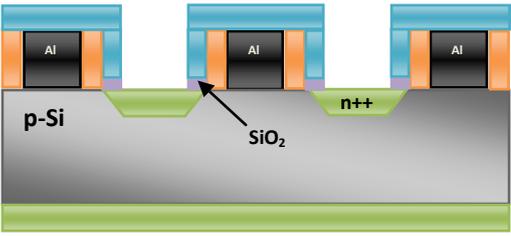
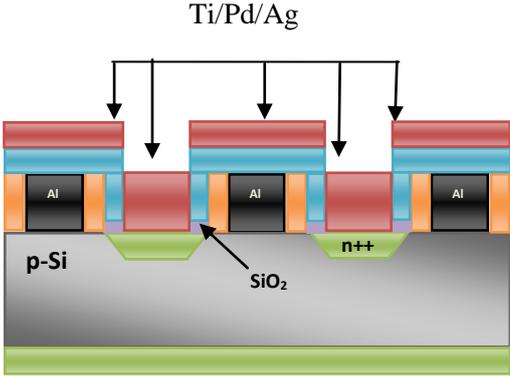
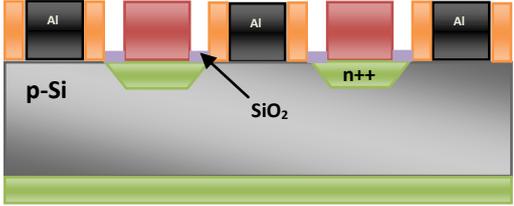
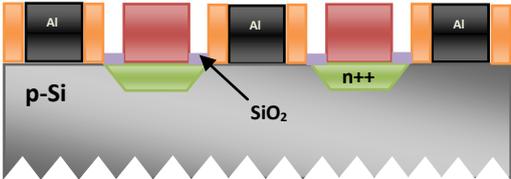
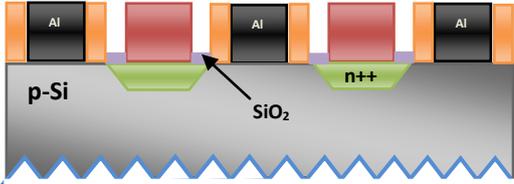
- Le premier procédé : Nous utilisons un seul type de métal qui a été appliqué sur des substrats massifs en silicium de type p.
- Le deuxième procédé : Nous utilisons deux matériaux différents pour les contacts n et p, et qui ont été testés sur des substrats de type p avec différentes épaisseurs (réalisation des cellules interdigités sur des couches épitaxiales).
- Le troisième procédé : Appelé (auto-aligné) qui permet de diminuer le nombre de lithographies utilisées.

Nous décrivons d'abord le premier procédé qui a été établi lors de la thèse de Oleksiy Nichiporuk [3] et développé par Pierre Papet [7] :

TableauIII. 1: Etapes technologiques de réalisation des cellules à jonction arrière standard [7]
(l'échelle n'est pas respectée)

<p>1. Nettoyage chimique (HF 5 %), H₂O₂+H₂SO₄ (HF 5%)</p>	 <p>A rectangular block representing a p-Si substrate.</p>
<p>2. Dépôt CVD de SiO₂</p>	 <p>A layer of SiO₂ (orange) is deposited on top of the p-Si substrate (grey).</p>
<p>3. Dépôt de résine positive Insolation via le masque « Diffusion » Délimitation de l'émetteur</p>	 <p>The SiO₂ layer is coated with photoresist (blue). Red arrows indicate the exposure process through a mask.</p>
<p>4. Développement de la résine Ouverture du SiO₂ à l'aide du BOE (Buffered oxide Etch Solution)</p>	 <p>The photoresist has been removed, leaving three rectangular openings in the SiO₂ layer.</p>
<p>5. Décapage de la résine Nettoyage Chimique Diffusion POCl₃</p>	 <p>Phosphorus (P₂O₅) is diffused into the p-Si substrate through the SiO₂ openings, creating an n++ emitter layer (green).</p>
<p>6. Gravure du verre de phosphore dans une solution de HF 5% Redistribution sous O₂</p>	 <p>The phosphorus glass (green) is etched away with HF 5%, and the SiO₂ is redistributed under an O₂ atmosphere, forming a thin, uniform layer (purple) over the n++ emitter.</p>

<p>7. Dépôt de résine négative Insolation via le masque « Contact P »</p>	
<p>8. Développement de la résine Ouverture du SiO₂ à l'aide du BOE</p>	
<p>9. Dépôt de l'aluminium par évaporation sous vide</p>	
<p>10. Dissolution de la résine et lift-off de l'aluminium Recuit RTA (Rapid Thermal Anneal) 500°C, 30s (adhérence Si /metal)</p>	
<p>11. Dépôt de résine négative Insolation via le masque « Contact N »</p>	

<p>12. Développement de la résine Ouverture du SiO₂ à l'aide du BOE</p>	
<p>13. Dépôt du Ti/Pd/Ag par évaporation sous vide</p>	
<p>14. Dissolution de la résine et lift-off du Ti/Pd/Ag Recuit RTA (Rapid Thermal Anneal) 500°C, 30s (adhérence Si /metal)</p>	
<p>15. Texturation de la face avant à l'aide d'une solution de TMAH</p>	
<p>16. Nettoyage chimique Dépôt de la couche anti reflet par PECVD</p>	

<p>17. Recuit RTA 650°C, 30s Formation du BSF Hydrogénation par SiN_x</p>	
---	--

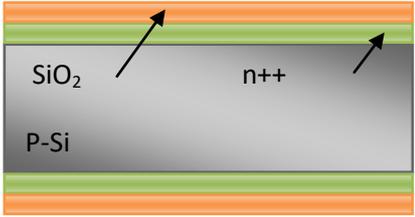
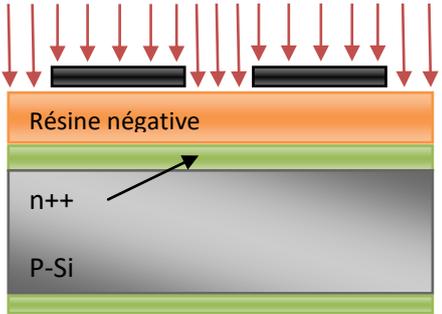
TableauIII. 2 : Procédé d’élaboration d’une cellule photovoltaïque à contacts arrières interdigités par technologie de transfert de couche épitaxiée [3]

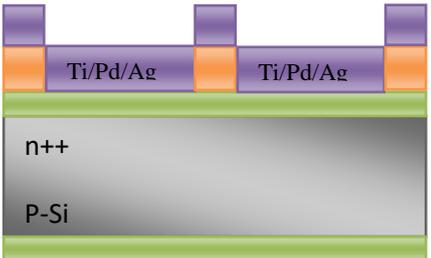
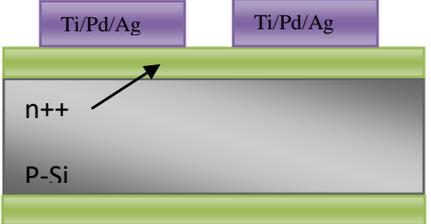
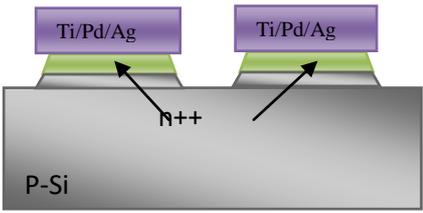
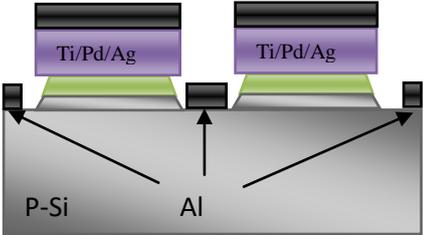
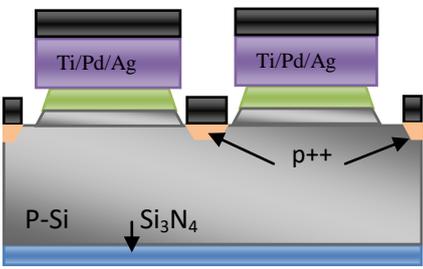
<p>1. Substrat Si monocristallin</p>	
<p>2. Formation d’une couche fragilisée silicium poreux ou implantation H₂</p>	
<p>3. Croissance d’une couche de Si par épitaxie en phase vapeur (VPE) 4.</p>	
<p>5. Réalisation de la cellule solaire : Technologie à contacts interdigités</p>	
<p>6. Report sur substrat économique</p>	
<p>7. Séparation cellule/substrat</p>	

<p>8. Suppression de la couche poreuse pour réutilisation du substrat</p>	
---	--

Nous allons présenter le 3ème procédé (auto-aligné). Celui-ci est avantageux à cause de la suppression d'une étape d'oxydation humide, qui nécessite une haute température.

TableauIII. 3: Procédé d'élaboration d'une cellule photovoltaïque à contacts arrières interdigités par technologie auto-aligné [6].

<p>1. Nettoyage de la plaque initiale pendant 20 secondes dans le BE7 (HF dilué à 5%), puis passé dans le $H_2O_2+H_2SO_4$ pendant 15 minutes, puis retourné dans BE7 pendant 20 secondes.</p>	
<p>2. Diffusion plein plaque de phosphore de $POCl_3$ à $950^\circ C$ pendant 20 minutes, redistribution à $1050^\circ C$ pendant 60 minutes sous oxygène (Formation d'oxyde sec).</p>	
<p>3. Gravure de l'oxyde dans BE7 pour une durée de 1-2 minute (fin de gravure contrôlée par mouillage de la surface). On dépose la résine négative, puis on attend le séchage de la résine, pour terminer avec une insolation.</p>	

<p>4. Développement puis durcissement de la résine enfin le dépôt de Ti/Pd/Ag plein plaque pour évaporation sous vide.</p>	
<p>5. Gravure de la résine et de Ti/Pd/Ag par lift-off</p>	
<p>6. Gravure du silicium dans KOH ou FN(HF+HNO₃). Les contacts Ti/Pd/Ag servent de masque protégeant l'émetteur.</p>	
<p>7. Dépôt d'aluminium plein plaque par évaporation sous vide. L'épaisseur d'aluminium doit être de 1 µm ou plus pour assurer une résistance série faible.</p>	
<p>8. Recuit des contacts à 650°C pendant 30 secondes (RTA) afin de former une zone P+ sous aluminium ; dépôt d'une couche antireflet (Si₃N₄)</p>	

III.1.3 La cellule photovoltaïque à contacts arrière interdigités à hétérojonction IBC-SiHJ

La structure IBC-SiHJ (Interdigitated Back Contact Silicon Hetero-Jonction) a été évoquée par Lu et al en 1997. La première structure de ce type a été mise en œuvre en 2007 [6]. Nous représentons sur la figure suivante une découpe détaillée de cette structure.

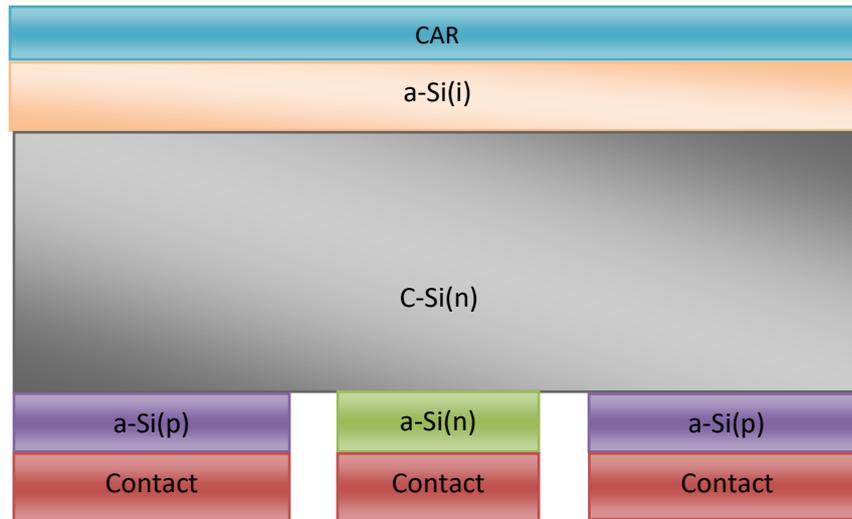


Figure III. 3 : Représentation schématique de la structure IBC-SiHJ développée à l'université du Delaware [6]

La conception de ce genre de cellule repose sur le même principe que celui des cellules IBC classiques sauf que l'émetteur et le BSF sont réalisés avec le silicium amorphe ainsi qu'une couche intrinsèque est introduite entre le substrat et la couche anti reflet pour assurer la passivation de la face avant.

La figure III.3 illustre un schéma en coupe de la structure IBC-SiHJ avec un substrat type n.

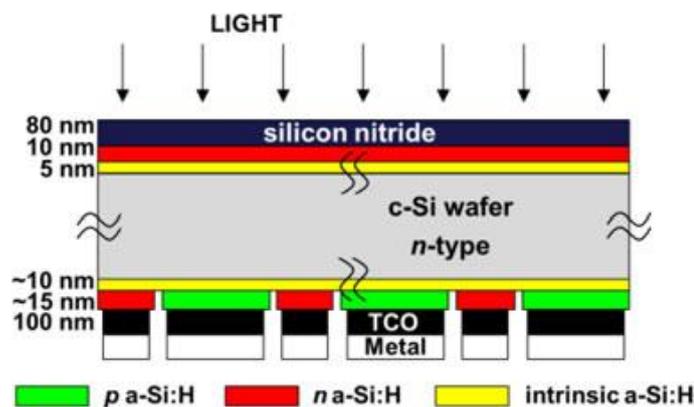


Figure III. 4 : Structure de la cellule solaire IBC-SiHJ type n [8]

L'émetteur et le BSF sont formés avec du a-Si dont le but de passiver la face arrière. Une couche conductrice peut être intercalée entre la couche de silicium amorphe a-Si et les contacts métalliques pour protéger le a-Si des effets dégradants du métal et améliorer la conductivité des propriétés de réflexion à l'arrière de la cellule IBC-SiHJ.

Nous pouvons noter que la couche FSF permet de passiver le substrat cristallin, car la passivation des hétéro-interfaces (C-Si/a-Si:H) constitue aussi un paramètre crucial. La détermination de la géométrie optimale de la face arrière de la cellule et les propriétés optimales du substrat, de l'émetteur et du BSF influent sur l'augmentation du rendement de conversion. L'optimisation des performances de ce type de cellule se fera sur plusieurs niveaux, ce qui sera détaillé dans le chapitre suivant.

Le Tableau III.4 contient les performances les plus marquantes atteintes par les cellules IBC pour des applications sous un éclairement AM1.5.

Tableau III. 4: Principales performances des cellules IBC [7].

Structure/c-Si	Surface (cm ²)	V _{co} (mV)	J _{cc} (mA/cm ²)	FF (%)	EFF (%)
A300/ type n	149	678	39.5	80.3	21.5
IBC/ type n	21.15	681	40.0	83.3	22.7
IBC/ type n	90.25	651	39.5	79.6	20.5
IBBC/ type n	8	664	37.9	76.5	19.2
IBC/ type p	1	698	39.8	79.4	22.1
RISE/ type p	4	662	41.7	79.9	22.0

Le Tableau III.5 présente un état de l'art des performances des cellules Si-HJ à contacts en face arrière. C'est des dispositifs réalisés expérimentalement sur des surfaces réduites ($\leq 10 \text{ cm}^2$).

Tableau III. 5: Résultats expérimentaux des cellules Si-HJ à contacts en face arrière [7]

Substrat c-Si	Face avant	Face arrière (émetteur)	Face arrière (BSF)	V _{co} (V)	J _{cc} (mA/cm ²)	FF (%)	EFF (%)
FZ type n (1 cm ²)	a-Si:H(i) + OTC	a-Si:H (p) / Al	a-Si:H (n) / Al	602	26.7	73	11.8
		a-Si:H (i/p) / Al	a-Si:H (i/n) / Al	691	35.0	36	8.5
FZ type p (1 cm ²) Texturé	a-SiNx:H Haute T°	a-Si:H(n) + Al	Al-BSF	580	37.0	65	13.9
CZ type p 6.25 cm ² Texturé	a-Si:H(i) + a-SiNx:H Basse T°	a-Si:H (i/n) / CrSi / Al	a-Si:H (i/p) / CrSi / Al	695	35.3	61	15.0

III.1.4 Structure et principe de fonctionnement d'une cellule solaire EWT

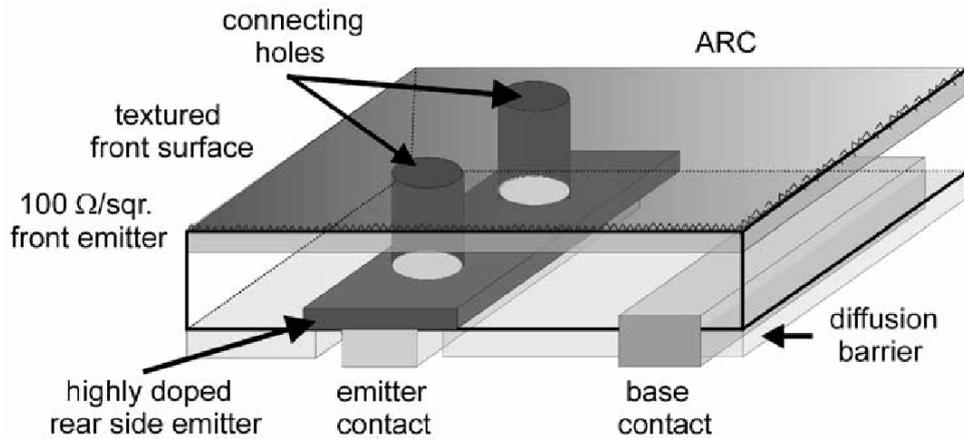
Le concept de la cellule EWT fut développé pour la première fois par J.Gee et al en 1993 [9]. De grands efforts ont été faites par Sandia National Laboratories pendant de nombreuses années, le record de rendement par lithographie. L'université de Konstanz (Allemagne) et ECN (Pays -Bas) ont développé la technologie EWT en utilisant différents procédés. Le rendement obtenu par le Fraunhofer ISE est de 21.4% sur une surface de 4 cm² par photolithographie sur substrat FZ [7].

Nous pouvons noter que la structure RISE-EWT réalisée sur substrat FZ, a permis d'obtenir 20% sur 93cm² [10, 11]. Cette structure, à été réalisée avec plusieurs gravures au laser, une seule étape de diffusion et de métallisation.

Au niveau industriel, une entreprise récente, Advent Solar Inc., produit ce type de cellule sur silicium multicristallin. Sa technologie basée sur la sérigraphie permet d'obtenir des rendements de 15.6% [7] et elle possède depuis le début de l'année 2007 une ligne de production de 25MWc.

La cellule EWT, Figure III.5, présente, comme la cellule standard, un émetteur en face avant mais dans cette structure tous les contacts métalliques sont en face arrière. Des trous perforés avec un laser sur le substrat sont dopés, assurent la connexion des porteurs de la face

avant à la face arrière, ainsi que la connexion entre la partie de l'émetteur qui se trouve sur la face avant et celle qui se trouve sur la face arrière. Les contacts n et p sont situés en face arrière sous forme de peignes interdigités sans aucun ombrage sur la face avant.



FigureIII. 5 : Structure EWT [4]

La structure EWT présente de nombreux avantages que nous allons détailler dans les points suivants :

- ✓ Un rendement supérieur à la technologie classique. Cette différence est bien marquée sur le silicium de faible longueur de diffusion. Une grande partie de la cellule est constituée d'une structure n/p/n qui engendre une diminution de la distance de collecte des porteurs minoritaires et une meilleure passivation de surface. De plus, l'absence de grille et de connectique entre les cellules en face avant augmente la surface d'absorption de la lumière et permet d'obtenir une plus forte densité de courant.
- ✓ Un rendement qui s'améliore par diminution de l'épaisseur du substrat. Dans le cas de substrat de faible longueur de diffusion, de meilleurs rendements sont obtenus pour un substrat d'épaisseur égale à la moitié de la longueur de diffusion. Ce phénomène est dû à la présence de l'émetteur sur les deux faces et à une meilleure réflectivité de la face arrière.
- ✓ Aucun contact en face avant. Il n'y a pas de compromis à trouver entre la résistance série et l'ombrage dû aux contacts en face avant.

- ✓ Facilité d'assemblage des cellules en modules. Les cellules EWT sont disposées en module de façon très épaisse car leurs connexions sont seulement sur la face arrière. Un espacement est nécessaire entre les cellules pour permettre la connexion en série, ce qui n'est pas le cas pour les cellules EWT. De plus, la connexion arrière limite la casse du bord des cellules lors de la mise en module et permet l'utilisation de cellules plus fines.
- ✓ L'intégration, l'architecture est très demandeuse de modules de couleur uniforme pour une meilleure mise en valeur dans les bâtiments. Les modules de ce genre de cellule sont très esthétiques dû à la non présence des contacts sur la face avant.
La face arrière est optimisée pour les contacts électriques, la réflectivité et les interconnexions entre les cellules.

Les inconvénients de la structure EWT sont les suivants :

- ✓ Une difficulté de fabrication car elle nécessite l'utilisation de technique d'alignement (sérigraphie, lithographie, masque métallique).
- ✓ La nécessité de passivation de la face avant.
- ✓ La qualité du substrat de silicium doit être supérieure : l'épaisseur du substrat doit être inférieur aux longueurs de diffusion des porteurs.

III.1.4.1 Les points spécifiques à la réalisation des cellules EWT

La présence des trous dans le substrat et d'un émetteur en face arrière nécessitent la modification des outils et techniques de réalisation. Nous aborderons, dans cette partie, les points spécifiques à la fabrication des cellules EWT et certaines des techniques utilisées.

III.1.4.1.1 La formation des trous

Pour former les trous entre la face avant et la face arrière nous pouvons faire recours à différentes techniques dont on cite:

- ✓ la gravure chimique et plasma,

- ✓ l'abrasion mécanique,
- ✓ gravure par ultrasons,
- ✓ gravure par laser: actuellement la technique la plus utilisée vu l'avantage de ne pas dépendre de l'orientation du matériau (gravure uniforme sur Si (multi-cristallin) ainsi que sa vitesse d'exécution qui industrialise la production des cellules EWT [7].

III.1.4.1.2 La distribution des trous

La distribution des trous doit réaliser un arrangement entre la diminution de la résistance série et la précision d'alignement lors des différentes étapes de réalisation. La résistance série de la cellule est engendrée par plusieurs facteurs :

- ✓ la conductivité des porteurs majoritaires dans le substrat.
- ✓ la qualité des contacts métal/semi-conducteur,
- ✓ la conductivité de l'émetteur en face avant,
- ✓ la conductivité des lignes de métallisation,
- ✓ la résistance des trous,

La formule III.1 représente l'influence des trous sur la résistance série.

$$R_{s, \text{trou}} = R_{\text{émetteur}} * \frac{e}{2\pi r} * \frac{A}{N} \quad (\text{III.1})$$

$R_{\text{émetteur}}$ correspond à la résistance de l'émetteur, e à l'épaisseur du substrat, A à la surface de la cellule et N au nombre de trous.

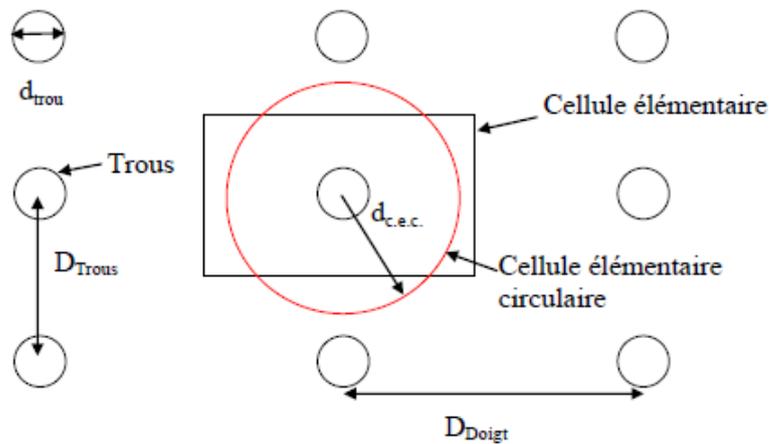
Une simulation numérique de cette formule aux cellules d'Advent Solar, 20% des pertes résistives sont générés par les trous. La résistance de l'émetteur est proportionnelle à la résistance produite par les trous, l'augmentation du dopage de l'émetteur permettra d'abaisser la résistance série.

Une cellule élémentaire doit être déterminée pour calculer la résistance série, qui est représentée sur la Figure III.6. Cette dernière a une longueur correspondante à la distance entre deux doigts adjacents et sa largeur est égale à la distance entre deux trous d'un même contact [7].

Lorsque les doigts sont très rapprochés et la distance entre les trous est faible nous obtenons une faible $R_{s, \text{émetteur}}$. Une faible résistivité d'émetteur permet aussi de réduire l'effet de la résistance série mais affecte négativement le IQE pour les faibles longueurs d'onde.

Pratiquement, les doigts composant les peignes interdigités p et n doivent être espacés pour éviter les courts circuits.

Dans le but d'avoir un espacement suffisant, un compromis est réalisé en choisissant une distance de 2 mm entre les doigts de même polarité et une distance entre 0,5 et 0,8 mm. pour les trous d'un même doigt.



FigureIII. 6 : Cellule élémentaire (EWT) engendrée par l'émetteur en face avant pour le calcul de la résistance série [7]

L'expression des pertes résistives est exprimée par la relation III.2 :

$$R_{s, \text{émetteur}} = \frac{R_{\text{émetteur}} * A_{\text{ce}}}{2\pi} [0,25(1 - rc^4) - (1 - rc^2) - \ln rc] \quad (\text{III.2})$$

Où :

$R_{\text{émetteur}}$ représente la résistance de l'émetteur,

A_{ce} représente la surface de la cellule élémentaire,

rc représente le diamètre du trou divisé par le diamètre de la cellule élémentaire.

Le laser utilisé pour perforer le silicium est le « laser impulsif nanoseconde ».

Il est important d'optimiser le temps d'exposition de la face avant au laser pour d'éviter les déformations causées par la chaleur. L'institut allemand ISE Fraunhofer utilise un laser dont les propriétés suivantes :

- ✓ Une énergie de plus de 65W
- ✓ Durée d'impulsion entre 30 et 2000 ns
- ✓ Fréquence des impulsions est de plus de 2 KHz
- ✓ Energie de pulsation est de plus de 7mJ

Ce laser peut percer une plaque de silicium à raison de 2000 trous/seconde avec un diamètre du trou entre 20 et 100 μ m.

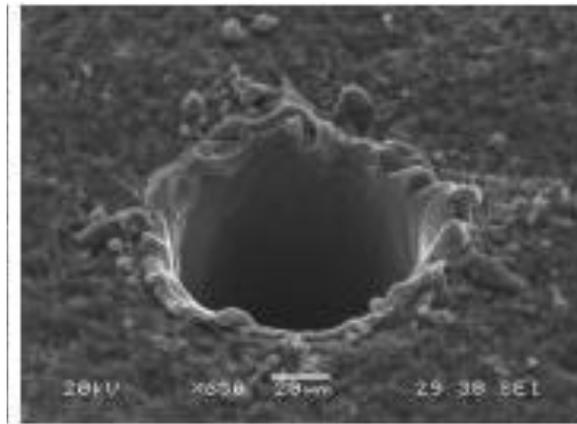
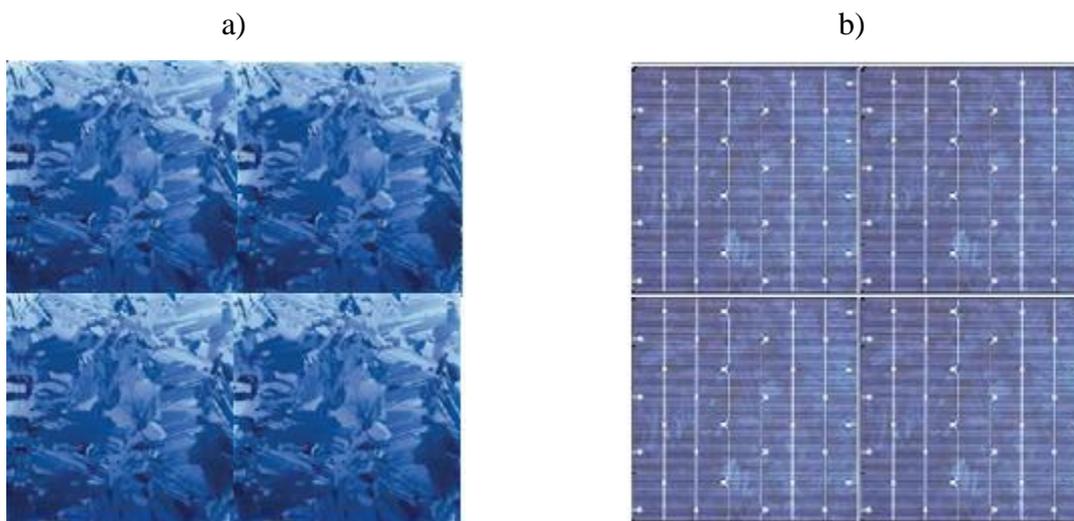


Figure.III. 7 : Perforation des cellules EWT au laser (images SEM)



**Figure.III. 8 : Cellule photovoltaïque EWT : a) face avant ; b) face arrière
(Source : Applied Materials ; 2014)**

III.1.4.1.3 Explication de la jonction sur la face arrière

Pour séparer les zones p et n à l'arrière de la cellule EWT plusieurs techniques ont été développées où nous pouvons les partager en trois groupes :

- ✓ Délimitation de la zone n+ par un dépôt d'une couche de diélectrique en utilisant un masque de protection avant la diffusion.
- ✓ Séparation des zones p et n par des méthodes abrasives en utilisant la gravure par laser ou par plasma chimique.
- ✓ Formation directe de la jonction en utilisant la P-Alco-diffusion ou bien un dépôt localisé de couche dopante.

La différence majeure entre ces trois technologies est l'état de la Zone de Charge Espace (ZCE) sur la face arrière. La ZCE dans cette région est localisée en surface, ce qui engendre des recombinaisons additionnelles. Par contre, dans une cellule standard la ZCE se trouve dans le substrat et a donc une longueur égale au périmètre de la cellule. Dans le cas des structures EWT, sa longueur est de 40 à 50 fois plus grande que sur une cellule standard de même dimensions. L'influence de la jonction p/n "ouverte" sera donc plus grande que pour les cellules EWT.

Les simulations de Kuhn montrent l'influence de la jonction p/n "ouverte" sur les recombinaisons au sein de la cellule. Cette étude caractérise la forte dégradation de J_{cc} lorsqu'on augmente la recombinaison en surface au niveau de la jonction p/n "ouverte". Pour les cellules à contacts en face avant, cette technique simple sera utilisée du fait de la faible influence de jonction p/n "ouverte" sur le rendement. En revanche, sur les cellules à contacts arrière interdigités cette méthode ne sera pas utilisée à moins de former une couche de passivation sur la jonction p/n "ouverte". Cette méthode est appliquée dans le cas de la cellule RISE –EWT par croissance d'un oxyde de silicium. La séparation des peignes p et n a été développée au niveau de l'université de Konstanz par Al-Pco-diffusion. Cette technique consiste à évaporer une couche d'aluminium de $3\mu\text{m}$ à travers un masque en suite réaliser une diffusion POCl_3 en partant d'un substrat de type p. Donc l'émetteur et le BSF sont formés. Cette méthode permet d'obtenir des cellules EWT avec un courant de court-circuit et une tension de circuit ouvert faibles. W. JOOSS a développé ce procédé en ajoutant une couche de SiN_x par LPCVD et il a obtenu des rendements au tour de 16.6% sur le même type de cellules. La délimitation de la zone n+ par dépôt d'une couche diélectrique reste la

méthode la plus utilisée. Elle peut se faire avec une couche de SiO₂ ou avec une couche de SiN_x ou bien en utilisant double couche. Ces diélectriques doivent résister aux attaques chimiques et doivent permettre une bonne passivation [7]. Nous pouvons réaliser ce procédé en utilisant lithographie ou une gravure laser suivie d'une gravure chimique. Néanmoins, le dépôt se fait par sérigraphie dans l'industrie pour minimiser le coût.

III.1.5 Structure et principe de fonctionnement d'une cellule solaire MWT

La structure MWT est très proche de la structure EWT, la seule différence c'est l'existence d'une fine métallisation entre les trous en face avant. C'est une cellule solaire qui donne un haut rendement de conversion avec moins d'étapes de fabrication. La figure III.9 illustre les détails de la structure.

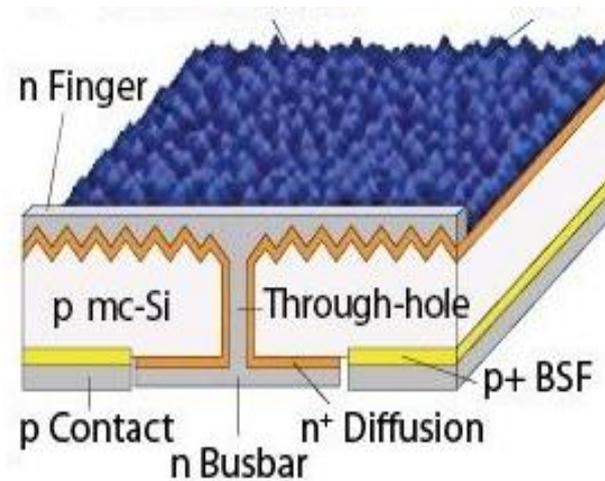


Figure.III. 9 : Structure MWT [12]

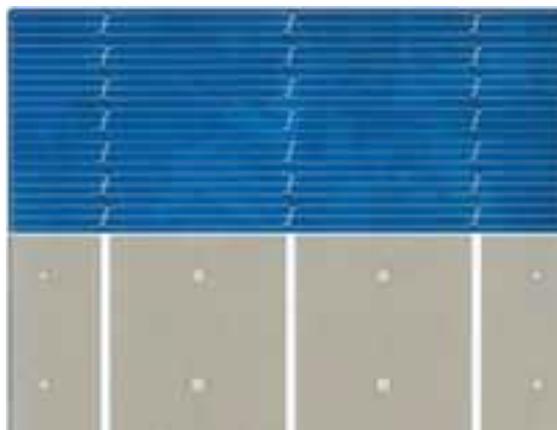


Figure.III. 10 : Cellule solaire MWT (156x156 mm) traités à Fraunhofer ISE [13]

Les cellules MWT n'ont besoin que d'un nombre relativement restreint de trous pour diriger les électrons photogénérés vers la surface arrière à travers les électrodes métalliques et les émetteurs à dopage n, et produire des photocourants de collection plus élevés [12].

Une densité de courant J_{cc} de 37,3 mA /cm² et un rendement de conversion de 18,3% ont été obtenues par Kyocera [14] et un rendement de 16,4% par ECN [12].

Tableau III. 6 : Séquence de traitement pour la fabrication de Cz-Si dispositifs MWT - PERC [8].

Silicium type p
Oxydation thermique
structuration de l'oxyde
Perçage avec le laser
Texture alcaline
Diffusion par POCL ₃ et gravure par PSG
dépôt de la couche de recouvrement à l'arrière
La couche anti reflet SiNx
sérigraphie des contacts
Cuisson rapide
Contact local recuit (LFC) à l'arrière
recuit

La structure MWT présente plusieurs avantages dont on cite :

- ✓ Moins d'ombrage, des lignes de connexion des doigts plus courtes et une résistance en série plus faible
- ✓ Ce type de structure permet d'avantage l'utilisation de substrat de type mc-Si car les porteurs ne doivent pas diffuser à travers l'épaisseur du substrat jusqu'à la face arrière
- ✓ Moins d'étapes de processus dans l'assemblage de modules
- ✓ Moins de dommages à la cellule
- ✓ Assemblage de module plus facile
- ✓ Permet l'utilisation de cellules plus minces
- ✓ Permet l'accumulation de modules intelligents
- ✓ Permet l'accumulation de dispositions personnalisées

La structure MWT présente aussi quelques inconvénients :

- ✓ La réflectivité à l'avant n'est pas autant réduite que pour la structure IBC car les doigts restent.
- ✓ La présence de l'émetteur à l'avant limite le V_{co}

III.2 : La Sérigraphie

L'élaboration des contacts dans le domaine du photovoltaïque est un processus primordial et comme il est utilisé dans la fabrication des cellules interdigités, nous allons l'expliquer afin d'enrichir les compréhensions du sujet de notre thèse.

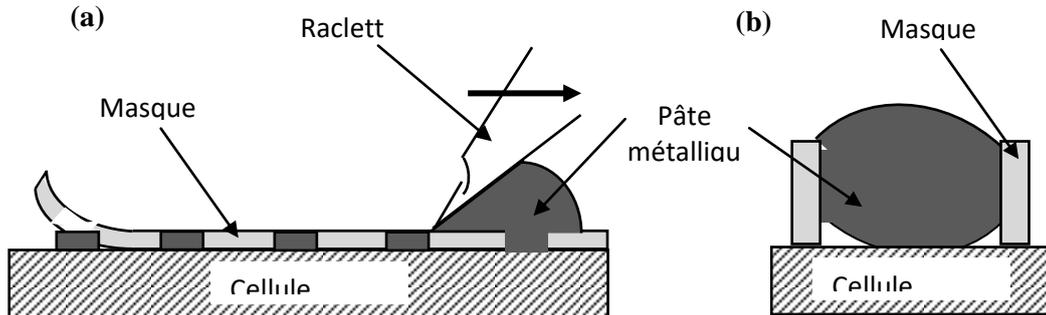
Le terme « sérigraphie » vient du latin « sericum » qui veut dire « soie ». La sérigraphie est une méthode d'impression dérivée du pochoir et qui consiste à faire passer les encres sur un support à travers un tissu qui est verni à certains endroits et perméable à d'autres. A l'origine connue sous le nom de trame de soie en raison de ses formes imprimantes fabriquées à base de soie.

La sérigraphie est devenue un procédé très important dans la production dans plusieurs domaines, tels que les vêtements à motifs, les panneaux décoratifs, les circuits imprimés, et les conteneurs en plastique.

Les pochoirs utilisés pour la sérigraphie commerciale sont généralement fabriqués à l'aide des techniques photomécaniques. Une fine trame de tissu synthétique ou de métal est tendue sur un cadre rectangulaire, puis une couche photopolymère est appliquée sur la totalité de la surface. L'exposition du photopolymère à travers un film positif provoque alors son intensification dans les zones qui ne sont pas attribuées à l'impression. La partie non exposée est ensuite nettoyée pour créer les zones ouvertes du pochoir. Le cadre est alors pressé dans l'imprimante contre la surface à imprimer, et l'encre passe en force à travers les zones ouvertes du pochoir à l'aide d'une raclette en caoutchouc.

La procédure de sérigraphie consiste à l'application d'une pâte sur le substrat de la cellule, à travers d'un masque. Cet écran sérigraphique, ou pochoir est le négatif du motif à reproduire (Figure III.11 a). Pour solidifier la pâte, nous devons faire un traitement thermique. C'est lors de cette étape que le contact est réalisé par la diffusion des éléments métalliques de la pâte dans le

semiconducteur. Ces éléments métalliques sont généralement à base de l'argent pour type n et à l'aluminium de type p [15].



**Figure.III. 11 : (a) Opération de sérigraphie des contacts,
(b) Occupation du masque par la pâte [16]**

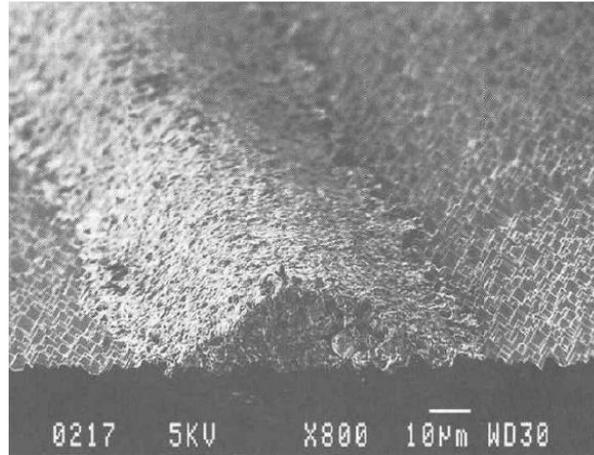
Pour avoir une importante productivité, les contacts métalliques avant et arrière déposés subissent un traitement thermique commun. En conséquence, l'enchaînement de la production doit suivre les étapes suivantes :

- Sérigraphie du schéma de la grille avant sur la couche antireflet.
- Séchage par étuve à air : 150°C pendant 1/4 d'heure environ.
- Sérigraphie du schéma de grille arrière.
- Séchage par étuve à air- selon la même température et la même durée.
- Co-firing des pâtes dans un four à passage doté de lampes IR

Ce dernier traitement thermique a pour but la formation du contact ohmique. Lors de cette opération, le contact va subir un frittage dont la conséquence est la diminution de sa résistance de couche. En même temps, les particules métalliques devront diffuser en direction du silicium : en face avant pour le surdosage, en face arrière pour percer la jonction n+ p résultante de la diffusion du phosphore.

Les avantages essentiels de la sérigraphie sont :

- La simplicité de la procédure.
- La miniaturisation des systèmes qui permet la réalisation de plusieurs éléments sur le même substrat.
- L'universalité de la technique, c'est-à-dire que l'on peut déposer sur plusieurs natures de supports métal, isolant, semi-conducteur.
- Le cout de production est raisonnable.



*Figure.III. 12 : Doigt de contact par sérigraphie ; illustration des pyramides de texture [17]
 Dans cette technologie, Les écrans et les pâtes sont les éléments primordiales .*

III.2.1 Écrans

Les écrans sont les tissus serrés des fils d'acier inoxydable synthétique où étirés sur une armature en aluminium, comme est illustré sur la figure III.10 L'écran est couvert d'émulsion photosensible, qui est traitée avec des techniques photographiques de telle manière qu'elle soit enlevée des régions où l'impression est désirée.

III.2.2 Pâte de sérigraphie

Les pâtes sont les transporteurs qui portent le métal actif sur la surface du substrat. Leur composition est formulée pour optimiser le comportement pendant l'impression. Une pâte pour les contacts métalliques de la cellule solaire se compose en général de ce qui suit :

- Une fritte de verre
- Le métal actif
- Les liants [14].

✓ *La fritte de verre*, 5 à 10% du poids. Les oxydes comme le SiO_2 sont les éléments principaux de la fritte au verre. A ceux viennent s'ajouter Al_2O_3 (face arrière).

✓ *La matière de remplissage* est constituée de grains très fin de métaux dont les dimensions peuvent aller jusqu'à $0.5\mu\text{m}$. Les métaux ici utilisés sont l'argent et l'aluminium.

C'est une poudre d'argent composée de cristallites d'une taille de quelques dixièmes

de microns. Pour le contact p, l'aluminium est également présent. Ceci s'élève de 60 à 80% du poids de la pâte.

- ✓ **Les liants** sont des composés hydrocarbonés permettant la cohésion des éléments pulvérulents et d'assurer une viscosité adéquate de la pâte. La composition de la pâte est extrêmement importante pour la réussite de la séquence technologique de la métallisation et elle est fortement liée au traitement thermique [15].

Une telle pâte doit présenter les propriétés suivantes afin de minimiser les pertes électriques et optiques :

- Faibles résistances de contact avec le silicium et interne de la pâte.
- Adhérence adéquate à la surface du silicium.
- Possibilité de pouvoir percer une couche antireflet et/ou de passivation pour obtenir un contact métal/semi-conducteur.
- Qualité d'impression optimale avec un rapport hauteur /largeur élevé (faible changement de viscosité de la pâte à la traversée du maillage)
- Bonne soudabilité pour monter les cellules en module.

III.2.3 Impression

La Figure III.13 illustre le processus d'imprimer une pâte par l'émulsion modelée sur un écran. L'écran et le substrat ne sont pas en contact, mais une distance les sépare appelé « snap-off ». Après avoir déposé la pâte, une pression est appliquée à la racle, qui peut être faite de métal ou de caoutchouc: ceci met l'écran en contact avec la plaquette. La racle est alors déplacée d'un côté de l'écran à l'opposé, traînant et serrant la pâte devant elle. Quand une ouverture est atteinte, la pâte la remplit et colle à la plaquette, et elle reste là après que la racle ait passé et l'écran s'est élastiquement retiré [17].

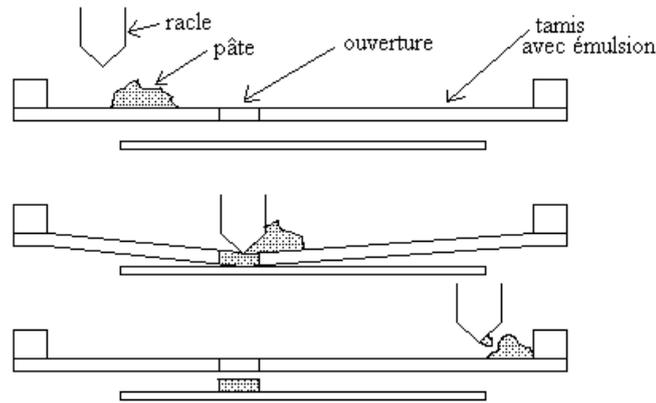


Figure.III. 13 : Illustrations des étapes d'impression (mouvement de la racle)[16]

La quantité de pâte imprimée dépend de l'épaisseur de la matière d'écran et de l'émulsion ainsi que du terrain découvert du tissu. Elle dépend également de la largeur imprimée de ligne.

Les propriétés visqueuses sont de plus grande importance : en imprimant, la pâte doit être assez liquide pour remplir tout le volume laissé par le tissu et l'émulsion. Toutefois après son impression, elle ne doit pas s'étaler « baver » sur la surface. Les paramètres critiques de ce processus sont la pression appliquée sur l'écran, la distance écran cellule et la vitesse de la racle en outre de l'hygrométrie et la température ambiante.

III.2.4 Etuvage de la pâte

Cette opération consiste à évaporer les solvants présents dans la pâte grâce à un chauffage modéré à une température de 200°C pendant une durée de (20-30 min). Elle doit être effectuée très rapidement pour éviter l'étalement de la pâte de sorte que la plaquette puisse être manœuvrée sans que le modèle imprimé soit endommagé. Malheureusement, ceci ne peut pas être évité car le chauffage brusque formerait une croûte sur la surface de celle-ci [17].

III.2.5 Déliantage de la pâte

Dans cette étape, les composés organiques sont consommés à une température moyenne de 550°C, sous une atmosphère d'oxygène afin d'évacuer les différents éléments carbonés en formant des composés volatils COx.

III.2.6 Cuisson des contacts

La cuisson est une opération de frittage. La pâte se densifie, diffuse au travers de la couche antireflet en face avant (méthode du « fire-through », et se solidarise à la cellule (effet de soldering). Cette phase est accomplie à une température élevée dépassant le seuil de 800°C et pendant une durée de 10-15 minutes, sous une atmosphère d'azote pour éviter un oxyde thermique.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons décrit les différentes technologies des cellules photovoltaïques à contacts interdigités (IBC classique et IBC-SiHj), EWT et MWT rapportées dans la littérature afin de montrer leurs intérêts. Nous avons présenté les trois principaux procédés utilisés dans l'industrie. Nous avons aussi détaillé le processus de sérigraphie puisque c'est un moyen de dépôt des contacts. Ce chapitre permet au lecteur d'enrichir ses connaissances sur l'état de l'art de ces structures pour mieux appréhender et assimiler le sujet de notre thèse. Dans le chapitre suivant, nous exposerons nos résultats en se basant sur la simulation faite par logiciel Silvaco. Cette simulation intervient pour nous aider à déterminer les meilleures performances pour les cellules à hétérojonctions à contact arrière interdigités et à fixer les conditions indispensables pour atteindre des hauts rendements.

Bibliographie

- [1] Thibaut Desrues, « Développement de cellules photovoltaïques hétérojonctions silicium et contacts en face arrière », Ecole Doctorale Matériaux de Lyon, Année 2009.
- [2] Emmanuel Van Kerschaver et Guy Beaucanne « Back-contact solar cells », IMEC vzw, Kapeldreef 75, B-3001 Heverlee, Belgium, Decembre 2005.
- [3] Nichipork Oleksiy, « Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités », l'institut national des sciences appliquées de lyon, Année 2005.
- [4] Yannick Veschetti « Modélisation, caractérisation et réalisation de nouvelles structures photovoltaïques sur substrat de silicium mince », Université Louis PasteurStrasbourg I, Octobre 2005.
- [4] Djicknoum Diouf « Cellules photovoltaïques silicium à hétérojonctions et à structure interdigitée en face arrière », Paris de sud, juillet 2010.
- [6] Barrouba tani nadéra « Optimisation des parametres geometriques et physiques de cellules photovoltaïques à contacts arrière interdigités » thèse de doctorat microélectronique, université Abou Bakr Belkaid Tlemcen, 2015.
- [7] Pierre Papet “Nouveaux concepts pour la realisation de cellules photovoltaïques à contacts interdigités sur substrats minces en silicium cristallin”, Thèse de doctorat , INSA 2007.
- [8] Andrea Tomasi, et al, « Back-ContactedSiliconHeterojunction Solar Cells With Efficiency > 21% »,IEEE Journal of photovoltaics, vol. 4, no. 4, July 2014.
- [9] Xiaodong Wang & Zhiming M.Wang, « High efficiency solar cells », Livre Springer series in materials science, ISBN 978-3-319-01988-8, 1988.
- [10] N.-P. Harder, S. Hermann, A. Merkle, T. Neubert, T. Brendemühl, P. Engelhart, R.

- Meyer et R. Brendel, Laser-processed high-efficiency silicon RISE-EWT solar cells and characterisation, *Physica Status Solidi*, 2009.
- [11] Z. M. W. Xiaodong Wang, *High-Efficiency Solar Cells: Physics, Materials, and Devices*, Springer.
- [12] Tatsuo Saga, « Advances in crystalline silicon solar cell technology for industrial mass production », review *NPG Asia Materials* 2,96-102(2010).
- [13] F. Clement, et al, « Processing of highly-efficient MWT silicon solar cells », *Photovoltaics International* Volume 11, 2011.
- [14] Inoue et al., Proc.23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference, 988 (2008).
- [15] Bruno Thuillier « Caractérisation, structurale des contacts ohmiques réalisés partir d'encre métalliques sur cellules photovoltaïques en silicium multi-cristallin ». Thèse de doctorat INSA de Lyon, 2001.
- [16] BEATRICE RIVIERE " Optimisation du procédé de sérigraphie pour la réalisation de capteurs de gaz en couche épaisse. Etude de la compatibilité avec la technologie microélectronique" these de doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2004.
- [17] Antonio Luque, Steven Hegedus « Handbook of photovoltaic science and engineering », Wiley, 2003.

**Chapitre IV : Simulation des cellules solaires à contacts
arrières interdigités avec logiciel SILVACO**

IV. Introduction

La simulation numérique est un moyen performant pour analyser, prédire, interpréter et comprendre les phénomènes physiques.

L'objectif de ce chapitre, en premier lieu, est la description du logiciel de simulation SILVACO et sa mise en œuvre dans le cadre de notre travail en se basant principalement sur l'effet du changement des différents paramètres physiques et géométriques sur les performances d'une cellule solaire à hétérojonction à contacts arrières interdigités, afin de les optimiser. Notons que l'optimisation du rendement des cellules solaires à hétérojonction à contacts arrières interdigités qui possèdent des contacts sur la face opposée à l'incidence du rayonnement dépend de plusieurs paramètres physiques et géométriques.

Dans la deuxième partie, nous décrivons les structures des cellules solaires ciblées à simuler. Cette simulation sera effectuée à deux dimensions sous ATLAS/ SILVACO.

IV.1 Présentation du package des programmes SILVACO

SILVACO est une société internationale Américaine, ayant son siège à Santa Clara en Californie. Elle est un des principaux fournisseurs de chaînes professionnelles de logiciels de simulation par éléments finis et de conception assistée par ordinateur pour les technologies de l'électronique TCAD (Technology Computer Aided Design). Ces outils sont employés par les compagnies de microélectronique dans le domaine de la recherche, du développement et de la conception de dispositifs.

SILVACO présente un ensemble d'outils de simulation interactifs permettant la conception et l'analyse de la plus part des dispositifs à semi-conducteur VWF (Virtual Wafer Fabrication) [1].

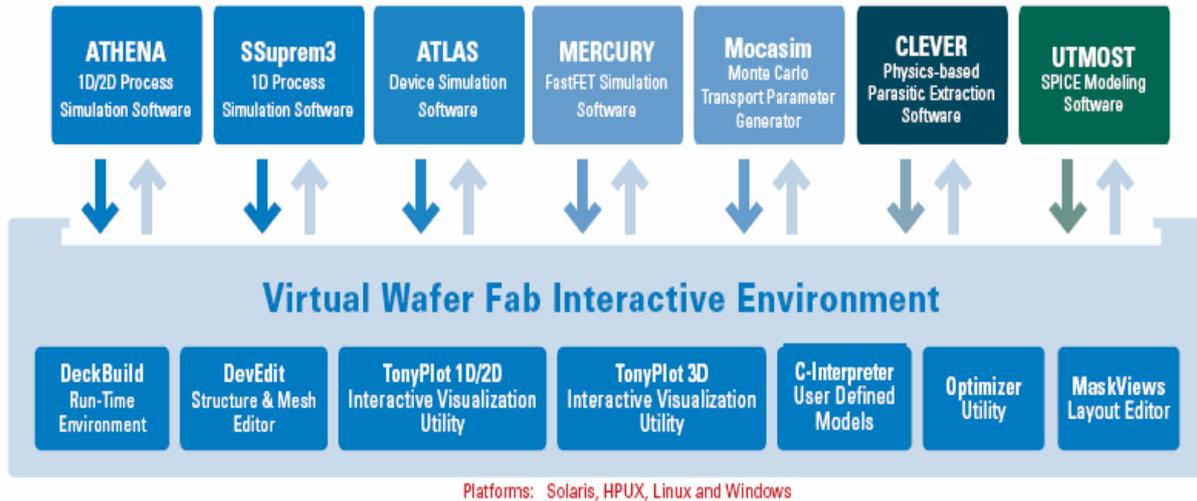


Figure.IV. 1: Environnement de VWF [1]

Les composants de base de VWF sont :

- 1) **Les outils de simulation** (VWF CORE TOOLS). Ces outils simulent soit leurs processus de fabrication ou soit leurs comportements électriques. Les outils de simulation sont ATHENA, ATLAS et DSUPREM3.
- 2) **Les outils interactifs** (VWF INTERACTIVE TOOLS). Ces outils sont désignés pour être utilisés en mode interactif dans la construction d'un seul fichier d'entrée en étant basé sur une interface utilisateur qui est graphique (Graphical User Interface, GUI). Ainsi le travail de construction du fichier d'entrée devient plus efficace. Les outils interactifs peuvent être utilisés soit en relation avec un ensemble de fichiers, ou comme des composants intégrés dans l'environnement des outils d'automatisation.
- 3) **Les outils d'automatisation** (VWF AUTOMATION TOOLS). Ces outils permettent à l'utilisateur d'exécuter sur une grande échelle des études expérimentales afin de créer des résultats pour l'analyse statique suivante. Les outils automatiques se servent de la technologie de base de données réparties et des méthodes de logiciels de développement d'interprocessus.

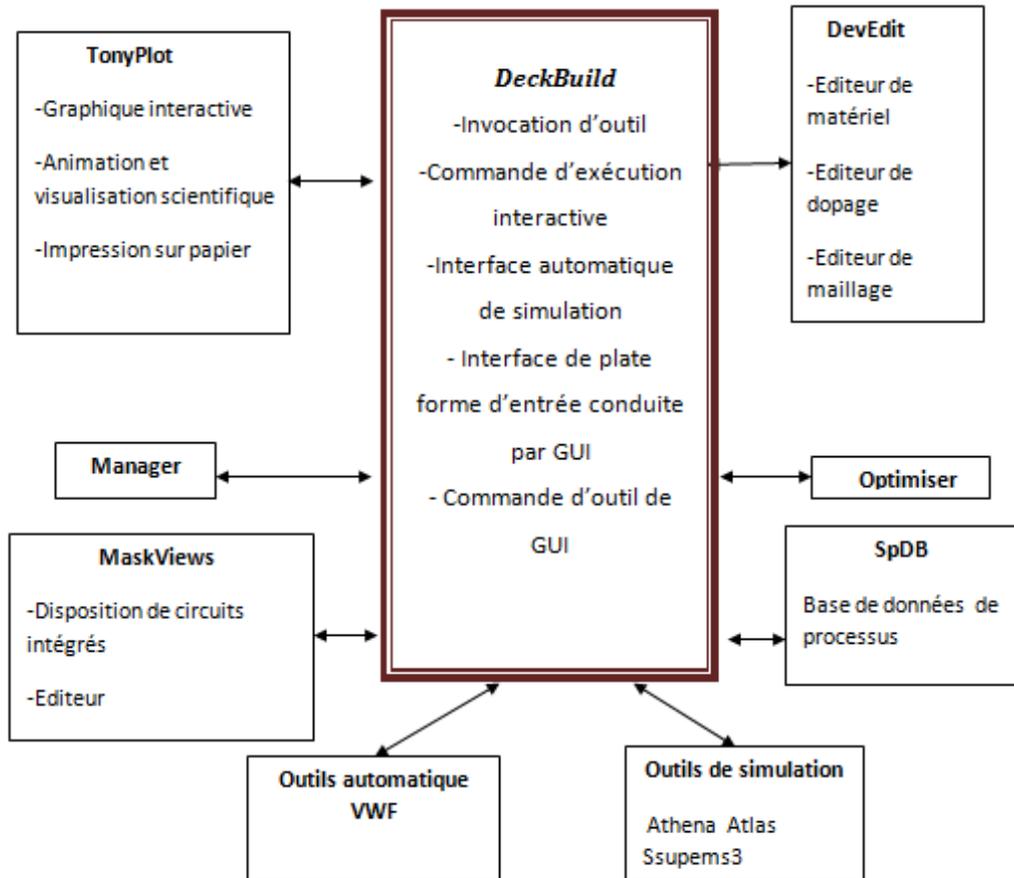


Figure.IV. 2: Organigramme de la structure VWF [2]

IV.2 Les outils de simulation

- **ATHENA** : simulateur 2D de procédés technologiques qui permet de développer et optimiser des processus de fabrication de semi-conducteur (les différentes étapes effectuées en salle blanche). Il fournit une plate-forme pour simuler l'implantation ionique, la diffusion, la gravure, le dépôt, la lithographie, l'oxydation, et la silicidation des matériaux semi-conducteurs.
- **ATLAS** : simulateur physique de dispositifs à semi-conducteur 2D ou 3D qui permet de simuler le comportement électrique de structures précisées des dispositifs à semi-conducteur.
- **SSUPEMS3** : simulateur de procédé 1D avec prolongement simple de simulation des dispositifs.

IV.2.1 Les outils interactifs

- **DECKBUILD** : environnement où est défini le programme de simulation. Il offre une aide qui permet d'éviter l'apprentissage d'une syntaxe de commande généralement très complexe. Il permet aussi une exécution automatique et très pratique des programmes et des sauvegardes systématiques des intermédiaires d'exécution.
- **TONYPLOT** : environnement où sont visualisés les résultats des simulations (structure du composant, caractéristiques électriques...).
- **DEVEDIT** : environnement où est destinée la structure. On peut créer des nouvelles structures ou même modifier des structures existantes. On peut aussi définir des maillages ou raffiner le maillage existant.
- **MASKVIEWS** : outil de dessin des masques (éditeur de Layout).
- **OPTIMISER** : optimiser les paramètres de la structure de façon à obtenir en final la valeur du paramètre que nous lui avons définie au paravent.
- **MANAGER** : outil de gestion des fichiers utilisés et créés par VWF.
- **SPDB** : (Semi-conductor Process Data Base), c'est un produit séparé. Il n'est pas un outil interactif, mais il peut être utilisé avec DeckBuild. Il a été conçu pour stocker un grand nombre de profils de dopage mesurés expérimentalement ainsi que les données qui décrivent les conditions des expériences [2].

Le projet réalisé dans le cadre de ce travail de thèse, a été basé principalement sur l'outil de simulation « ATLAS » et sur l'environnement où est défini le programme de simulation « DeckBuild ».

IV.3 Présentation d'ATLAS

« Atlas » est un simulateur 2D et 3D conçu pour étudier les dispositifs à semi-conducteurs. Il prédit le comportement électrique des structures semi-conductrices spécifiées et donne des aperçus de mécanismes physiques internes liés au fonctionnement des dispositifs. Atlas peut être utilisé comme un outil noyau dans le milieu de simulation VWF de SILVACO et autonome. Dans le but de prévoir l'impact des variables du processus sur le comportement du circuit, la simulation du dispositif joint la simulation du processus et l'extraction du modèle SPICE.

IV.3.1 Fichiers d'entrées et de sorties d'Atlas

Dans le schéma de la figure IV.3 nous voyons les types d'informations associés aux entrées et aux sorties du module d'Atlas.

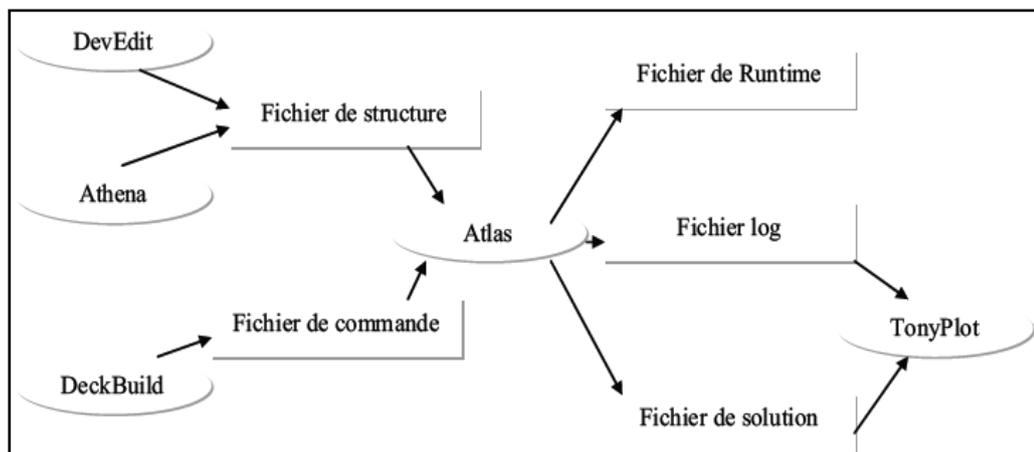


Figure.IV. 3 : Fichiers d'entrées et de sorties d'Atlas [3]

La plupart des simulations réalisées par Atlas utilisent deux fichiers d'entrée :

- ✓ Le premier fichier est un fichier script contenant les commandes pour qu'ATLAS s'exécute (représenté par Fichier de commande).
- ✓ Le second fichier est un fichier de structure qui définit la structure qui sera simulée.

A la sortie d'Atlas, nous avons trois types de fichiers.

- Le premier de ces fichiers est la sortie 'Runtime' qui donne la progression, les erreurs et les messages d'avertissements pendant la simulation.

- Le deuxième type de fichier est le fichier 'log' qui stocke toutes les valeurs de tensions et des courants provenant de l'analyse du dispositif simulé (c'est le fichier du comportement électrique).
- Le troisième fichier de sortie est le fichier de solution. Ce fichier stocke les données 2D ou 3D concernant les valeurs des variables solutions dans le dispositif en un point donné (c'est le fichier physique, il contient la structure dans un état particulier).

Les deux derniers fichiers sont traités par l'outil de visualisation TonyPlot.

IV.3.2 Les composants d'Atlas

Dans la figure IV.4, nous allons représenter les composants qui constituent le simulateur Atlas. Comme nous remarquons le cœur est la Physique qui contient le modèle mathématique qui fonctionne dans les dispositifs à base de semi-conducteurs.

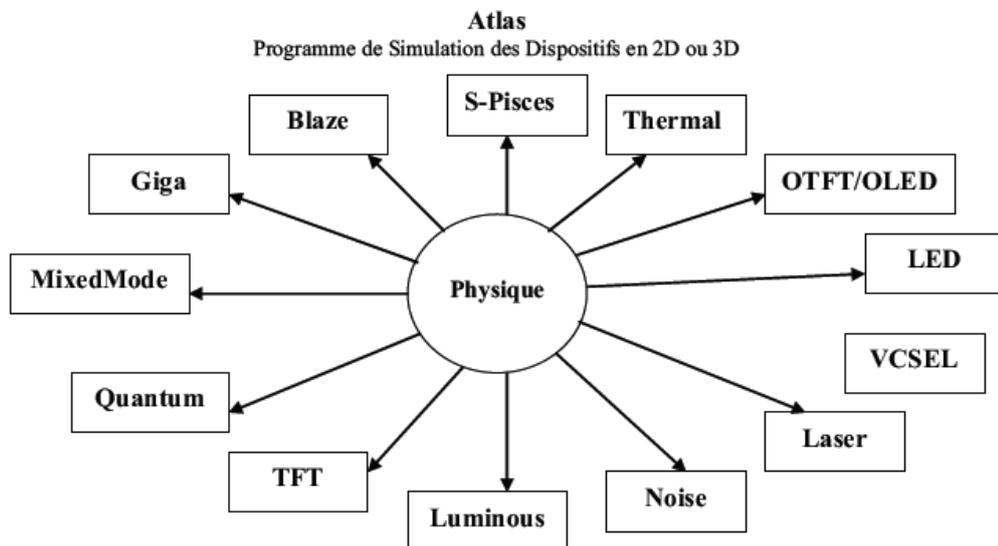


Figure.IV. 4: Les composants (ou les modules) d'Atlas [3]

Ainsi les composants développés autour sont :

- **S-Pisces** : programme de simulation des dispositifs 2D ou 3D. Il permet de modéliser les caractéristiques électriques des dispositifs à base de silicium en injectant les technologies bipolaire, MOS (Metal Oxide Semiconductor), SOI (Silicon On Insulator),

EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read Only Memory) et dispositifs de puissance. S-Pisces calcule les distributions internes des paramètres physiques et étudie le comportement électrique des dispositifs dans tout les états, soit à l'équilibre soit à l'état transitoire ou dans le cas de courant alternatif de petit signal.

- **Blaze** : simulateur 2D ou 3D conçu pour les dispositifs des matériaux III-V, II-VI et des dispositifs avec la structure à hétérojonction. Blaze explique les effets de cette structure par modification des équations de transport de charge. IL est applicable à une large gamme des dispositifs comprenant : HBT (Heterojonction Bipolar Transistor), HEMT (High Electron Mobility Transistor), LED (Light Emitting Diode), détecteurs photoélectriques hétérojonction (photovoltaïque) et diodes d'hétérojonction.
- **Giga** : prolonge Atlas pour expliquer l'écoulement de la chaleur de treillis et les environnements thermiques généraux. Giga met en application le modèle rigoureux thermodynamique de Wachutka du chauffage de treillis, qui explique le chauffage de Joule, le chauffage, et le refroidissement dû à la génération de porteur et à la recombinaison, et des effets Peltier et Thomson. Giga explique la dépendance des paramètres du matériau et de transport en fonction de la température de treillis.
- **MixedMode** : simulateur des circuits (2D ou 3D) en utilisant des modèles compacts. MixedMode suit des algorithmes numériques développés qui sont efficaces pour des simulations en courant continu (c.c.), régime transitoire, de petit signal de courant alternatif (c.a.) et de l'analyse de réseau de petits signaux. Il est employé pour simuler des circuits modélisés exactement. La logique de programmation pour indiquer les circuits est de type SPICE.
- **Quantum** : Conçu pour simuler différents effets d'emboîtement en mécanique quantique.
- **TFT** : Spécial pour simuler les systèmes des matériaux désordonnés. Il ne contient pas de modèles de matériaux donc il faut toujours une combinaison avec S-Pisces ou Blaze avec TFT pour simuler ces systèmes de matériaux. TFT nous permet de définir une distribution d'énergie des états de défauts dans le gap du matériau semi-conducteur.

- **Luminous** : trace l'absorption des rayons de la lumière. Luminous calcule les profils d'intensité optique dans les dispositifs semi-conducteurs et il convertit ces profils dans des taux de photo-génération. Ceci nous permet de simuler des réponses électroniques à des signaux optiques pour une large gamme de détecteurs optiques.
- **Noise** : simuler le bruit des petits signaux produit par les dispositifs. Le bruit électronique a un effet néfaste sur les performances d'un circuit car il peut changer complètement son fonctionnement. Il est très important de comprendre les propriétés du bruit afin de réduire son effet.
- **Laser** : exécute une simulation électrique et optique des lasers à base des semi-conducteurs.
- **VCSEL** : (Vertical Cavity Surface Emitting Lasers) effectue la simulation électrique, thermique et optique des lasers d'émission surfacique de cavité verticale en utilisant des mailles non uniformes avec des méthodes numériques précises, robustes et fiables.
- **LED** : simule des dispositifs de diode électroluminescente.
- **OTFT/OLED** : OTFT simule les caractéristiques des dispositifs réalisés avec des matériaux organiques (en courant continu ou transitoire). OLED simule des densités d'excitation singulière et triplet.
- **Thermal** : spécifié pour résoudre l'équation de la chaleur à l'équilibre thermodynamique en 3D. Le fonctionnement d'un dispositif à semi-conducteur est modélisé dans Atlas par un ensemble couplé de six équations différentielles partielles.
- **Atlas** produit des solutions numériques en calculant les valeurs des inconnues pour un maillage des points dans le dispositif. Une procédure interne de discrétisation convertit le modèle original continu en un système algébrique non linéaire discret qui a un comportement approximativement identique. L'ensemble des équations, le maillage et la procédure de discrétisation déterminent le problème algébrique discret à résoudre.

IV.3.3 Logique de programmation

Après la présentation de la chaîne progicielle TCAD de SILVACO, sa composition interne et le fonctionnement d'Atlas, nous allons maintenant présenter l'ordre des commandes propres à la logique de programmation d'Atlas. Ainsi, il existe cinq groupes de commandes, ces groupes doivent être organisés correctement (voir figure IV.5). Si l'ordre n'est pas respecté, un message d'erreur apparait et le programme ne s'exécute pas d'une façon correcte [4].

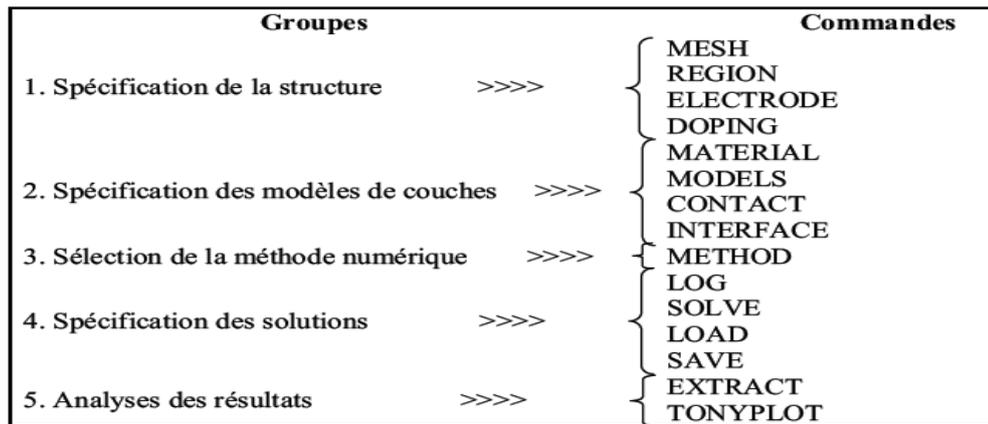


Figure.IV. 5: Ordre des groupes des commandes dans un programme Atlas (Les commandes fondamentales afférentes) [4]

Les commandes fondamentales sont :

- **MESH**: cette commande produit un maillage ou lit un maillage qui a été défini auparavant. L'élément de maille utilisé est le triangle.
- **REGION** : indique l'endroit des matériaux dans une maille précédemment définie. Chaque triangle doit être défini comme matériel.
- **ELECTRODE** : indique l'endroit et les noms des électrodes dans une maille précédemment définie.
- **DOPING** : indique analytiquement des profils de dopage ou prend de tels profils déjà prédéfinis dans les fichiers dédiés.
- **MATERIAL** : associe des paramètres physiques aux matériaux dans la maille. Il faut faire attention parce que le logiciel a des paramètres de matériaux définis par défaut pour les semi-conducteurs standards.
- **MODELS** : indique les carreaux constitutifs du modèle. Ils indiquent les inclusions de différents mécanismes physiques, de modèles ou des autres paramètres comme par exemple la température globale pour la simulation.
- **CONTACT** : indique les attributs physiques d'une électrode.
- **INTERFACE** : indique les paramètres d'interface aux frontières de semi-conducteur/ isolant. Tous les paramètres s'appliquent seulement aux nœuds de frontière exceptés là où ils sont déjà indiqués.
- **METHOD** : sélectionne les méthodes numériques à employer pour résoudre les équations et les paramètres liés à ces algorithmes.
- **LOG** : permet la sauvegarde dans un fichier de toutes les caractéristiques finales de simulation (ouvre un fichier de type log (log en minuscule veut dire le type

de fichier, LOG en majuscule veut dire la commande dans le programme)). N'importe quel type de donnée qu'elle soit C.C., transitoire ou C.A., générée par la commande SOLVE est sauvée après la commande LOG (donc les informations sauvées sont de type électrique et elles sont, par exemple, en fonction de la tension de polarisation ou de la source de lumière). N'importe quel paramètre spécifié par la commande PROBE est stocké dans le fichier de type log. Si dans le programme il y a plusieurs commandes LOG, chaque fois le fichier log (qui a été ouvert avant) est fermé et un nouveau fichier log est ouvert.

- **SOLVE** : ordonne à l'Atlas d'exécuter une solution pour un ou plusieurs points de polarisation.
- **LOAD** : charge des solutions précédentes à partir de fichiers en tant que conjectures initiales à d'autres points de polarisation.
- **SAVE** : sauve toutes les informations d'un point nœud du maillage dans un fichier de sortie (les fichiers de sortie sont de type structure). Les informations sauvées correspondent à un état électrique bien précis.
- **EXTRACT** : les commandes de ce type sont utilisées pour extraire les valeurs bien précises des paramètres des deux types des fichiers log ou structure.
- **TONYPLOT** : démarre le programme TonyPlot de post processus graphique des données.

Une autre commande importante est BEAM. Sa position est au niveau 4 des groupes de commande. BEAM montre un signal d'entrée optique sous forme d'un faisceau lumineux (mono ou multi-spectrale) collimatée. Le faisceau ainsi déclaré est allumé et utilisé par la commande SOLVE, dans ce cas le module Luminous est activé. Donc BEAM est utilisé pour simuler des courants générés de la lumière ou des réponses spectrales.

IV.3.4 Equation fondamentales et modèles physiques utilisés dans la simulation sous logiciel Silvaco

Le choix des modèles physiques est important pour améliorer la précision des résultats de simulation numérique. Pour cela, le logiciel SILVACO met à notre disposition une grande variété de modèles physiques. Les équations importantes dans le semi-conducteur sont dérivées des équations de Maxwell qui sont : L'équation de Poisson, les équations de continuité ou les équations de transport. La première équation lie les variations dans le potentiel électrostatique aux densités locales de charge. Les équations de continuité ou de transport représentent le comportement des densités d'électrons et des trous en fonction de leurs mouvements de transport, de génération et de recombinaison.

IV.3.5 Mécanisme de recombinaison

La génération dans les semi-conducteurs est un processus où des paires électron-trou sont créées. Néanmoins, la recombinaison est à l'opposé de la génération. Elle représente les mécanismes qui mènent à la perte de paires électron-trou, avec l'énergie superflue émise sous forme de phonons ou de photons. Expérimentalement, elle correspond à une durée de vie des porteurs minoritaires capable d'être mesurée [2]. Nous rappelons qu'il existe trois mécanismes fondamentaux de recombinaison que nous avons déjà en parlé dans le chapitre 1 :

- ✓ recombinaison radiative
- ✓ recombinaison Auger
- ✓ recombinaison par piège SRH
- ✓ recombinaison en surface

IV.3.5.1 Recombinaison et durée de vie des porteurs de charge minoritaires

La longueur de diffusion (L_p) des porteurs de charge minoritaires (les trous) dans le cas d'un silicium type-n, correspond à la distance moyenne parcourue par un porteur de charge entre la position où il est généré et celle où il se recombine. La longueur de diffusion dépend de la durée de vie volumique (τ_p) qui est principalement influencée par les impuretés présentes dans le silicium ainsi que par son dopage. La longueur de diffusion suit l'expression suivante :

$$L_p = \sqrt{D_p} * \tau_p \tag{IV.1}$$

Où D est le coefficient de diffusion, qui suit la relation d'Einstein et qui dépend de la mobilité des porteurs de charge, de la température (T), et de constantes physiques :

$$D_p = K * T * q * \mu_p \quad (IV.2)$$

A : température constante, D : ne sera influencé que par le dopage du silicium.

La durée de vie des porteurs minoritaire est liée à leur taux de recombinaison et à leur densité ($\Delta p = p_0 + p$) par la formule suivante :

$$\tau = \Delta p * U \quad (IV.3)$$

Le taux de recombinaisons dans le volume (U_b) est la somme de trois phénomènes de recombinaison dits : radiatifs (rad), Auger (Aug) et Shockley-Read-Hall (SRH).

IV.3.5.2 Recombinaisons radiatives

Les recombinaisons radiatives correspondent à l'émission d'un photon lors du passage d'un électron de la bande de conduction à la bande de valence (Figure IV.6.A). Ce phénomène nécessite l'apport d'un photon afin d'équilibrer les charges. Il se produit favorablement lorsque le gap du matériau est direct. C'est le principe de fonctionnement d'une diode électroluminescente. Dans le cas du silicium, le gap est indirect et les recombinaisons radiatives ont peu de chance de se produire. Le taux de recombinaisons radiatives est proportionnel à la concentration d'électrons ($n=n_0+\Delta n$) dans la bande de conduction et de trous ($p=p_0+\Delta p$) dans la bande valence :

$$U_{rad} = B * np \quad (IV.4)$$

Avec B , le coefficient de recombinaisons radiatives.

Considérant, que n_0 est égale au dopage du silicium N_d , que $p_0 (=n_i^2/n_0) \ll \Delta p$ et que le niveau d'injection des trous et des électrons est équivalent sous éclairage ($\Delta n=\Delta p$), la durée de vie radiative (τ_{rad}) s'exprime sous la forme suivante :

$$\tau_{rad} = 1/(Nd + \Delta p) \quad (IV.5)$$

τ_{rad} reste donc quasi-constant pour des niveaux d'injection de porteurs faibles ($>Nd$) puis chute à fort niveau d'injection.

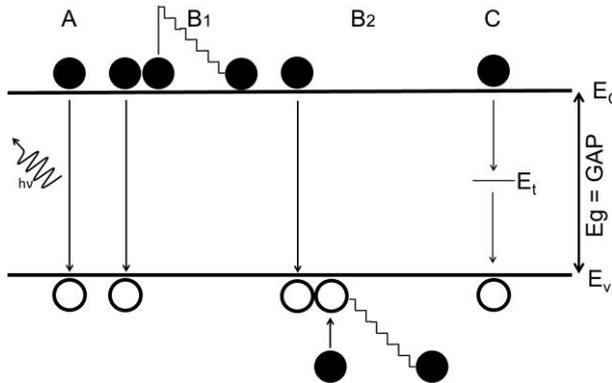


Figure.IV. 6: Représentation des recombinaisons radiatives (A), Auger (B) et SRH (C) [5].

IV.3.5.3 Recombinaisons Auger

Les recombinaisons Auger font également intervenir un électron passant de la bande de conduction à la bande de valence. Cette fois, l'énergie n'est pas transférée sous forme de photon mais à un trou ou un électron. Ce dernier électron émet un excès d'énergie sous forme de photon. Le taux de recombinaison Auger sera la somme des transferts d'énergie à un électron (eeh) (Figure IV.6.B1) ou à un trou (ehh) (Figure IV.6.B2) :

$$U_{Aug} = C_n * n^2 * p + C_p * p^2 * n \quad (IV.6)$$

Où C_n et C_p sont les coefficients Auger pour les électrons et les trous. La durée de vie Auger (τ_{Aug}) est alors définie dans le silicium de type-n comme :

$$\tau_{Aug} = \frac{\Delta p}{C_n * n^2 * p} + C_p * p^2 * n \quad (IV.7)$$

Et pour les mêmes conditions que l'expression (IV.7) :

$$\tau_{Aug} = \frac{\Delta p}{C_n * (Nd + \Delta p)} + C_p * (Nd + \Delta p) * \Delta p \quad (IV.8)$$

Il est alors possible de déterminer une τ_{Aug} dans les conditions « limites » d'injection de porteurs de charge, c'est-à-dire à faible illumination (li) et forte illumination (hi) :

$$\tau_{Aug, li} = \frac{1}{C_n * N_d^2} \quad (IV.9)$$

$$\tau_{Aug, hi} = \frac{1}{C_a * \Delta p^2} \quad (IV.10)$$

Où $C_a = C_n + C_p$ est le coefficient ambipolaire.

On trouvera donc une limitation de τ_{Aug} par le dopage du silicium à faible niveau d'injection et une limitation par la quantité de porteurs à fort niveau d'injection. Les recombinaisons radiatives et Auger sont uniquement liés au silicium par son gap et son dopage. Elles sont qualifiées de recombinaisons intrinsèques. Ce modèle est activé en utilisant l'instruction « AUGER » dans « MODELS ».

Le tableau suivant comprend les valeurs par défaut des paramètres AUGN et AUGP dans le Silicium.

Tableau IV. 1: Paramètres de recombinaison AUGER définis dans Atlas [2]

	Paramètres	Valeurs par défaut	Unités
silicium	AUG-N	8.3×10^{-32}	cm^6/s
silicium	AUG-P	1.8×10^{-31}	cm^6/s

IV.3.5.4 Recombinaisons SRH

Les impuretés présentes dans le volume, qu'elles soient dopantes ou métalliques, peuvent être des centres recombinants pour les charges (Figure IV.6.C). La position dans la bande interdite du silicium (ET), ainsi que leur concentration (NT) influencent l'effet recombinant de ces défauts. Il faut également tenir compte de la section efficace de capture des électrons et trous (σ_n) et (σ_p) qui jouent un rôle important sur le type de charge qui va être préférentiellement capté.

Ce phénomène a été décrit en 1952 par W. Shockley et W.T.Read puis par R.N. Hall en 1955, avec le développement de la statistique de recombinaison SRH (Shockley-Read-Hall). Le taux de recombinaison s'exprime alors sous la forme :

$$USRH = \frac{v_{th} N_t}{(n p - n_i^2) n + n_1 \tau_p + p + p_1 / \sigma_n} \quad (IV.11)$$

Où v_{th} est la vitesse thermique des électrons. p_1 et n_1 sont, respectivement, la densité de trous et d'électrons lorsque le niveau de fermi correspond au niveau d'énergie ET de l'impureté et s'exprime selon :

$$n_1 = N_c (-E_C - E_T / K T) \quad (IV.12)$$

$$p_1 = N_v (-E_T - E_V / K T) \quad (IV.13)$$

Dou :

$$\tau_{SRH} = \Delta p v_{th} (n p - n_i^2) (n + n_1 \sigma_p + p + P_1 \sigma_n) \quad (IV.14)$$

Et en incluant $n = n_0 + \Delta n$, $p = p_0 + \Delta p$ et $n_0 = N_d$, $\Delta n = \Delta p$, on trouve :

$$\tau_{SRH} = v_{th} N_T (N_d + p_0 + \Delta p) (N_d + \Delta p + n_1 \sigma_p + p_0 + \Delta p + p_1 \sigma_n) \quad (IV.15)$$

Et finalement avec :

$$\tau_{p1} = N_d + \Delta p + n_1 N_d + p_0 + \Delta p \quad \text{et} \quad \tau_{n1} = p_0 + \Delta p + p_1 N_d + p_0 + \Delta p \quad (\text{IV.16})$$

On obtient :

$$\tau_{SRH} = \tau_{p1} N_d + n_1 + \Delta p N_d + p_0 + \Delta p + \tau_{n1} p_0 + p_1 + \Delta p N_d + p_0 + \Delta p \quad (\text{IV.17})$$

A l'opposé, des recombinaisons radiatives et Auger, les recombinaisons SRH sont dites extrinsèques car elles proviennent d'éléments autres que le silicium.

Le tableau IV.2 représente les paramètres par défaut du modèle de recombinaison Schokley-Read-Hall utilisé dans le logiciel Silvaco.

Tableau IV. 2: Paramètres de recombinaison SRH définis dans Atlas [2]

$(E_t - E_i)$ (eV)	τ_{n0} (s)	τ_{p0} (s)
0.0	$1.0 * 10^{-7}$	$1.0 * 10^{-7}$

IV.3.5.5 Recombinaison en surface

Les trous et les électrons peuvent se recombiner ou se régénérer aux interfaces. Le taux de recombinaison en surface est donné par :

$$R_{surf} = \frac{pn - n_i e^2}{\tau_{p,eff} \left[n + n_i \exp\left(\frac{E_t - R_{AP}}{KT}\right) \right] + \tau_{n,eff} \left[p + n_i \exp\left(\frac{E_t - R_{AP}}{KT}\right) \right]} \quad (\text{IV.18})$$

Ou :

$$\frac{1}{\tau_{n,eff}} = \frac{1}{\tau_{ni}} + \frac{di}{Ai} S * N \quad (\text{IV.19})$$

Et :

$$\frac{1}{\tau_{p,eff}} = \frac{1}{\tau_{pi}} + \frac{di}{Ai} S * P \quad (\text{IV.20})$$

τ_{ni} et τ_{pi} sont les durées de vie calculées au nœud i ; d_i et A_i représentent la largeur et la surface de l'interface au niveau du nœud i ; $S.N$ est la vitesses de recombinaison des électrons et $S.P$ est la vitesses de recombinaison des trous. Ce type est activé en incluant les vitesses de recombinaison « $s.n$ » et « $s.p$ » dans « INTERFACES »

La somme des durées de vie définit une durée de vie effective qui est exprimée par l'équation (IV.21) :

$$\frac{1}{\tau_{eff}} = \frac{1}{\tau_{rad}} + \frac{1}{\tau_{Auger}} + \frac{1}{\tau_{SRH}} \quad (IV.21)$$

La durée de vie effective des porteurs de charges exprime la qualité et l'efficacité d'une cellule solaire, plus cette durée de vie est importante plus la probabilité de récolter un porteur photon créé par les électrodes de contacts sera importante et donc le rendement de conversion de la cellule sera meilleur [6].

Tableau IV. 3: Paramètres de recombinaison en surface définis dans Atlas [2]

	paramètres	Valeurs par défaut	unités
interface	S.N	0	cm/s
interface	S.P	0	cm/s

IV.4 Les modèles optiques

Sous l'effet de la lumière, des porteurs de charge peuvent être générés dans le semi-conducteur par des transitions d'une bande à l'autre dans le cas d'un semi-conducteur intrinsèque ou par des transitions qui impliquent des états dans le gap dans le cas d'un semi-conducteur extrinsèque.

Dans le cas d'un semi-conducteur intrinsèque et sous l'effet de la lumière, les porteurs de charge peuvent être générés par des transitions d'une bande à l'autre. En revanche, quant on parle d'un semi-conducteur extrinsèque les porteurs de charge sont générés par des transitions qui impliquent des états dans le gap. Un paquet de lumière incident uniforme et constant de puissance P fournit un nombre de photons n_0 .

$$n_0 = p/h\nu \quad (IV.22)$$

L'indice de réfraction d'un matériau est exprimé par le rapport de la vitesse de la lumière dans le vide C sur la vitesse de la lumière dans le matériau V suivant la relation IV.23.

$$n = \frac{c}{v} \quad (IV.23)$$

La vitesse de la lumière dans un matériau est variable, elle varie avec la longueur d'onde. L'indice de réfraction intervient également dans la détermination des coefficients de réflexion et de transmission à travers la relation de Snell-Descartes IV.24.

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (IV.24)$$

ou :

n_1, n_2 sont les indices de réfraction de deux milieux différents.

θ_1 et θ_2 sont les angles que font les rayons lumineux incident et réfracté avec la normale.

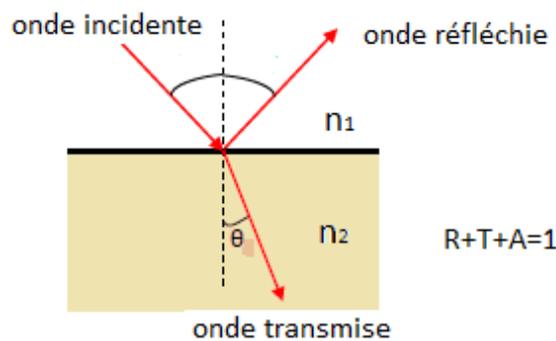


Figure.IV. 7: transmission et réfraction de la lumière [7]

Le rayon réfléchi est symétrique au rayon incident par rapport à la normale à la surface réfléchissante [8], [9], [10].

Le coefficient de réflexion R représente le rapport de l'intensité réfléchie I_r sur l'intensité incidente I_i tel que :

$$R = \frac{I_r}{I_i} \quad (IV.25)$$

$$R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad (IV.26)$$

Le coefficient de transmission T est défini comme le rapport de l'intensité transmise I_t sur l'intensité incidente I_i tel que :

$$T = \frac{I_t}{I_i} \quad (IV.27)$$

Où

$$T = \frac{1-R}{1+R} \quad (IV.28)$$

Ces coefficients sont exprimés en fonction des composantes de polarisation parallèle et perpendiculaire du faisceau incident par les équations suivantes :

$$E_r = \frac{n_2 \cos \theta_i - n_1 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_t + n_2 \cos \theta_i} E_i (\text{Polarisation parallèle}) \quad (IV.29)$$

$$E_t = \frac{2n_1 \cos \theta_i}{n_1 \cos \theta_t + n_2 \cos \theta_i} E_i (\text{Polarisation parallèle}) \quad (IV.30)$$

$$E_r = \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} E_i (\text{Polarisation perpendiculaire}) \quad (IV.31)$$

$$E_t = \frac{2n_1 \cos \theta_i}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} E_i (\text{Polarisation perpendiculaire}) \quad (IV.32)$$

E_r , E_i , E_t sont les amplitudes liées aux champs électriques incident, réfléchi et transmis (réfracté) [11].

Nous obtenons :

$$R = \left(\frac{E_r}{E_i} \right)^2 \quad (IV.33)$$

$$T = \left(\frac{E_t}{E_i} \right)^2 \frac{n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i} \quad (IV.34)$$

Un faisceau optique est modélisé avec l'instruction « BEAM ». Les paramètres X.ORIGIN et Y.ORIGIN définissent l'origine.

Le paramètre ANGLE indique la direction de propagation du faisceau par rapport à l'axe des x. Si ANGLE = 90 donc le faisceau lumineux est vertical (arrivant du haut). Les paramètres MIN.WINDOW et MAX.WINDOW précisent la fenêtre d'illumination. Le faisceau est partagé en plusieurs rayons de sorte que l'ensemble de ces derniers couvre toute la largeur de la fenêtre d'illumination. Le module ATLAS fait la résolution automatiquement des discontinuités le long des limites de la région du dispositif.

Beam num = 1 x.origin=1000 y.origin= -30 angle = 90.0 power.file = nom du fichier
reflects = 1 quantum.eff = 1.0

En expliquant la syntaxe du langage d'Atlas nous montrons que:

x.origin = 1000 y.origin = -30 veut dire que le faisceau est pointé au milieu de la cellule élémentaire à 30 μ m au-dessus de la face avant de la structure avec un angle entre les deux axes de 90°.

power.file charge le fichier .TXT qui contient les données du spectre solaires suivant l'axe des x et l'axe des y.

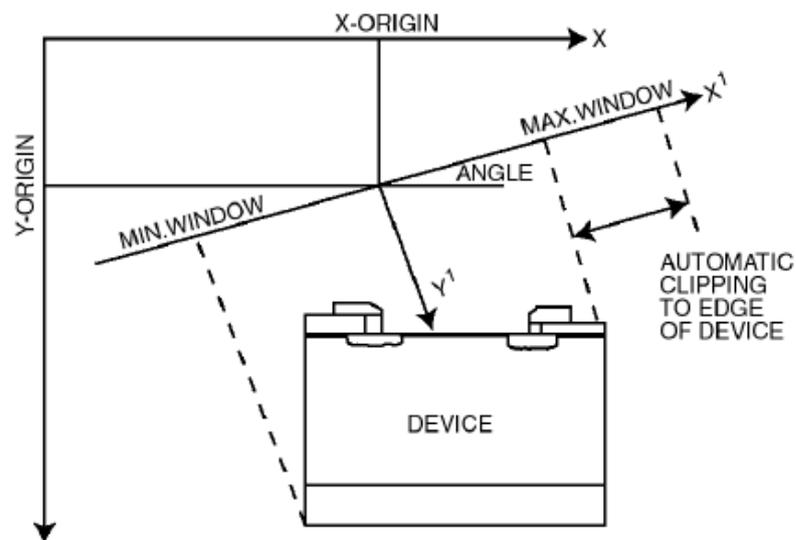


Figure.IV. 8: Fenêtre d'illumination définie dans le logiciel Atlas [12]

IV.5 Simulation de la structure IBC (Interdigitated Back Contact) à hétérojonction sous ATLAS/SILVACO

Les paramètres sont choisis de façon proche des cellules réelles. Nous avons simulé qu'une partie élémentaire ce qu'on appelle pitch (Figure IV.11). La figure IV.9 représente le schéma en coupe de la cellule IBC.

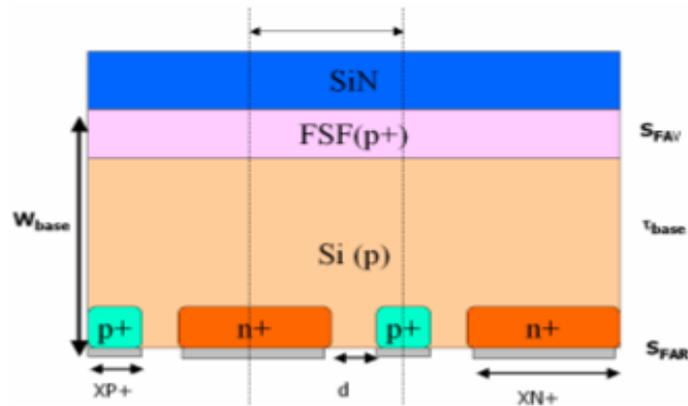


Figure.IV. 9: schéma en coupe de la structure IBC [13]

Pour connaître l' influence des paramètres physiques (dopage) et géométriques (l'épaisseur) sur le rendement de conversion nous avons pris la cellule de la figure IV.9 comme référence. Cette dernière est constituée d'un substrat de type p, un émetteur type n+, un BSF et un FSF de type P+, une couche anti reflet à base de SiN et des contacts ohmiques (Aluminium pour l'anode et Argent pour la cathode)

En pratique, le programme que nous avons conçu suit l'organigramme suivant :

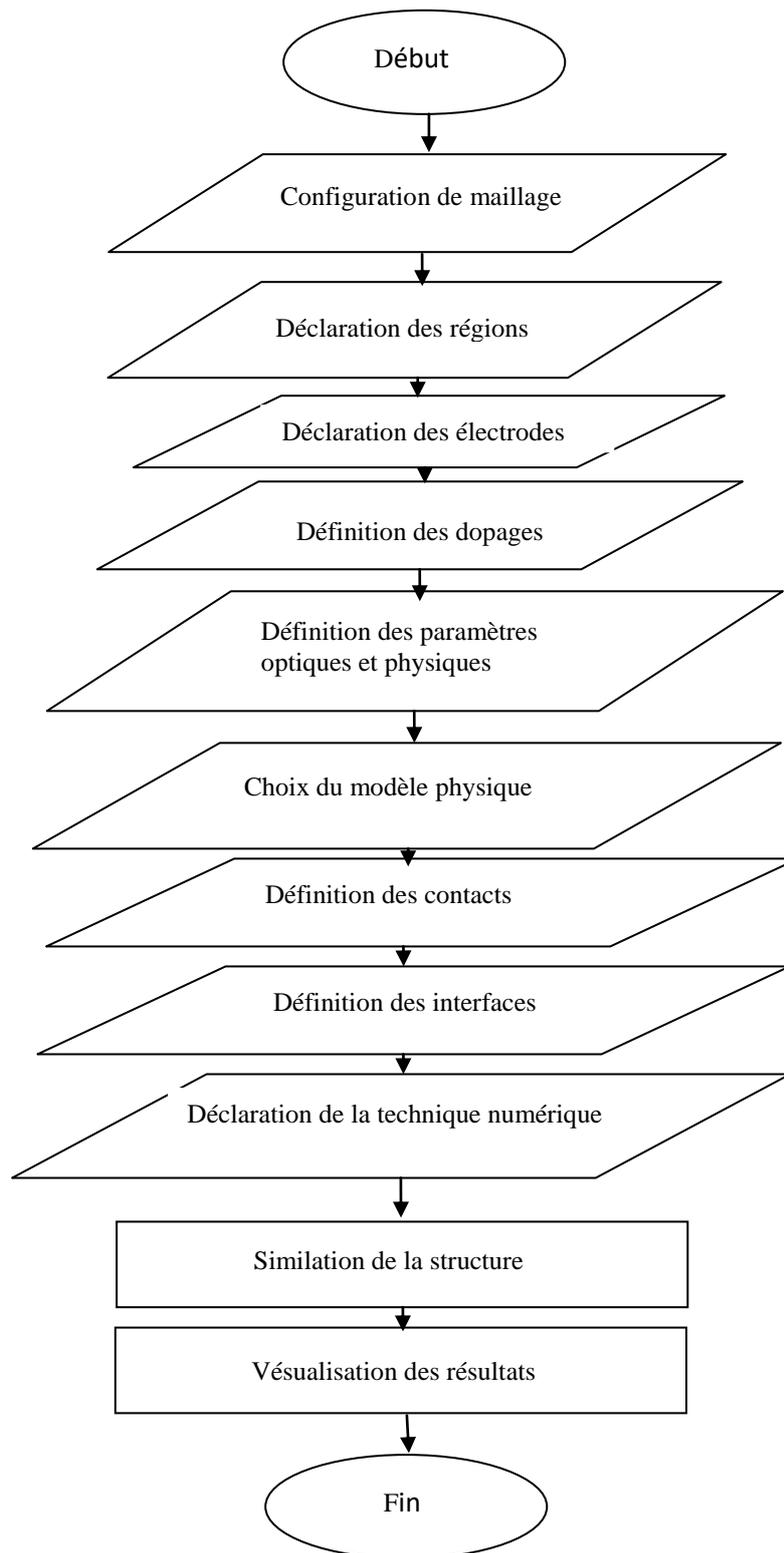


Figure.IV. 10: *Organigramme du programme de simulation Atlas*

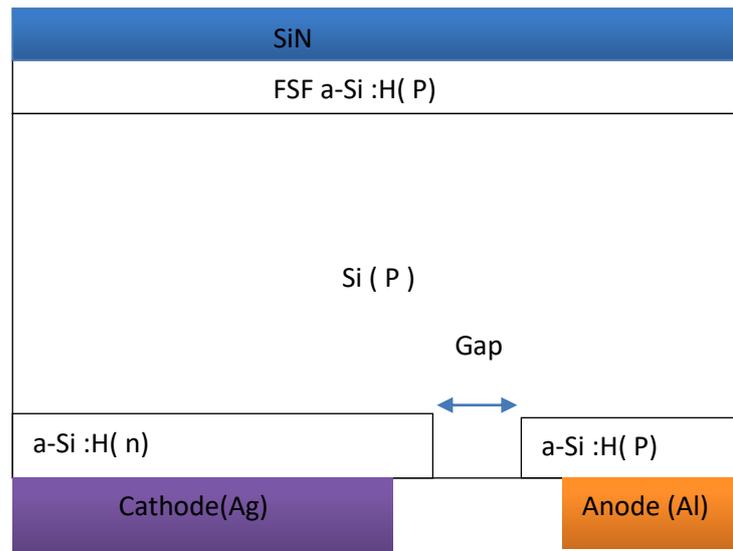


Figure.IV. 11: *Partie élémentaire (pitch) simulée (IBC-SiHJ)(l'échelle n'est pas respectée)*

Le tableau ci-dessous représente les paramètres choisis de la structure élémentaire :

Tableau IV. 4: Paramètres de la cellule IBC-SiHJ (Interdigitated Back Contact)

Substrat c-Si	P
Longueur L(μm)	2000
Epaisseur W(μm)	200
Dopage	10^{16}
Profil du dopage	uniforme
Recombinaison. Face AV	10^3
FSF	P
Epaisseur (nm)	10
Dopage	10^{19}
Profil du dopage	uniforme
CAR	SiN
Epaisseur (nm)	75
Indice de réfraction	2.05
Emetteur a-Si :H	n
Epaisseur (nm)	500
Longueur L_E (μm)	1750
Dopage	10^{19}
Profil du dopage	Fonction d'erreur complémentaire (erfc)

Energie d'activation	0.2
BSF a-Si :H	p
Epaisseur (nm)	500
longueur $L_{BSF}(\mu m)$	170
Dopage	10^{19}
Profil du dopage	Fonction d'erreur complémentaire (erfc)
Energie d'activation	0.3
Distance entre l'émetteur&BSF[Gap](μm)	80
Type de contact	ohmique
Cathode	Argent
longueur (μm)	120
Epaisseur(μm)	10
Anode	Aluminium
longueur (μm)	1700
Epaisseur(μm)	10

La structure IBC de la figure IV.12 réalisée par voie de simulation, montre les régions qui sont définis dans le fichiers d'entrée sous Atlas (programme).

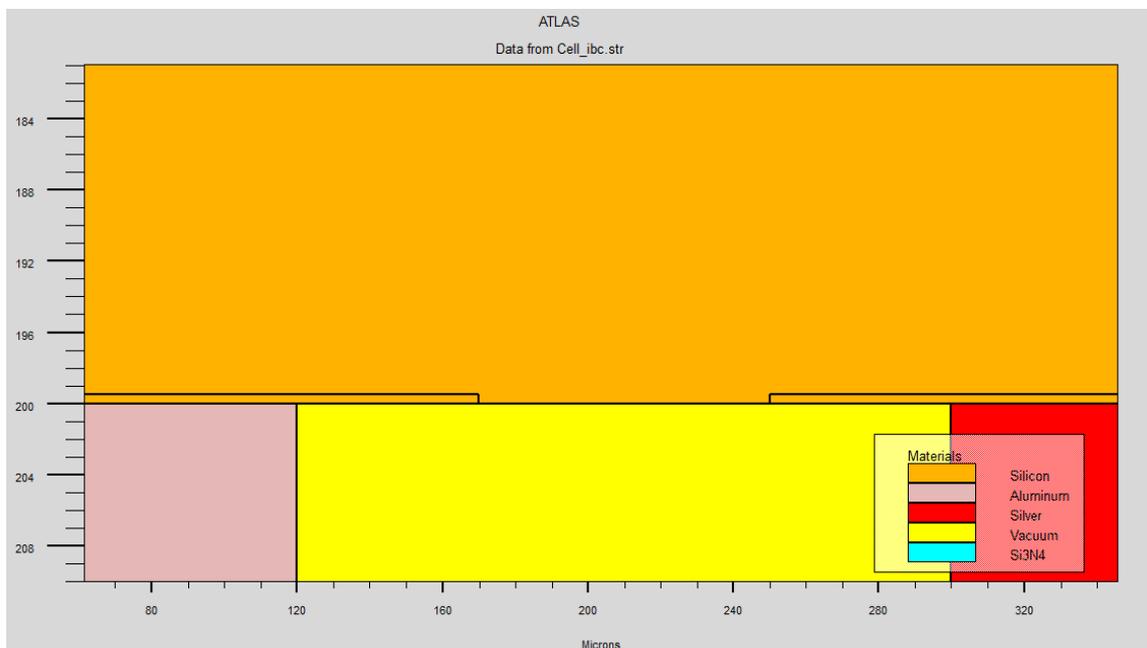


Figure.IV. 12: *La partie élémentaire simulée (zoomée)*

La figure suivante illustre les différents dopages pour chaque région (l'émetteur à gauche et le BSF à droite).

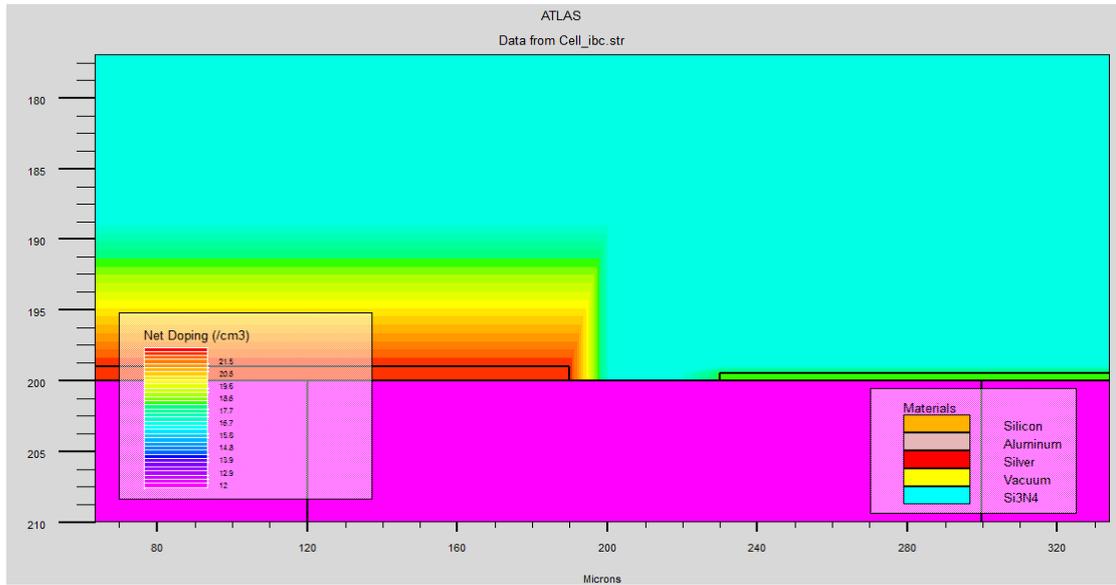


Figure.IV. 13 : *Illustration du dopage (zoomée)*

Pour réaliser une bonne simulation, un maillage adapté à la structure est indispensable.

Le maillage divise la structure simulée en petites cellules afin assurer une meilleure précision dans les calculs et c'est la base de la méthode des éléments finis. Nous avons appliqué un maillage serré seulement dans zones actives où le changement des quantités physiques est important. Sachant que, plus le maillage est serré plus le temps de calcul est long

La figure IV.14 montre le maillage de la structure simulée.

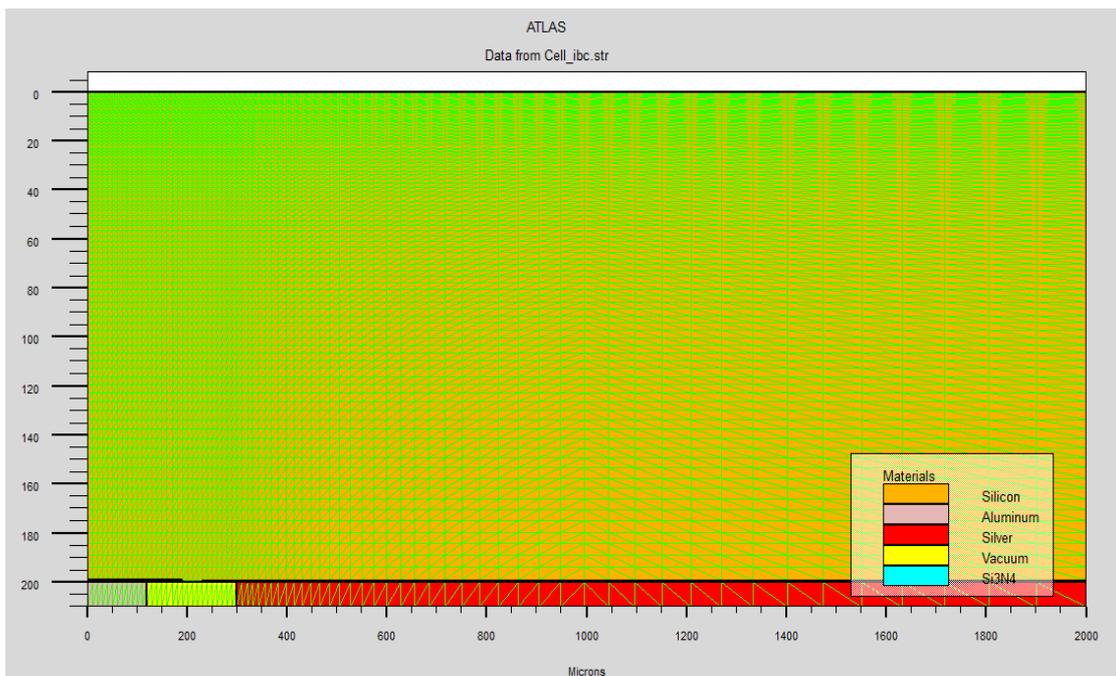


Figure.IV. 14 : *Illustration du maillage de la cellule IBC-SiHJ*

Nous avons fait la simulation sous illumination AM1.5 afin d'extraire la tension de circuit ouvert V_{co} , le courant de court-circuit I_{cc} , le facteur de forme FF et le rendement de conversion R. Le tableau IV.5 montre les résultats obtenu.

Tableau IV. 5: Résultats

$I_{cc}(mA/cm^2)$	$V_{co}(v)$	FF	R(%)
31.46	0.746	0.82	19.42

La figure suivante représente la caractéristique I(V) obtenue.

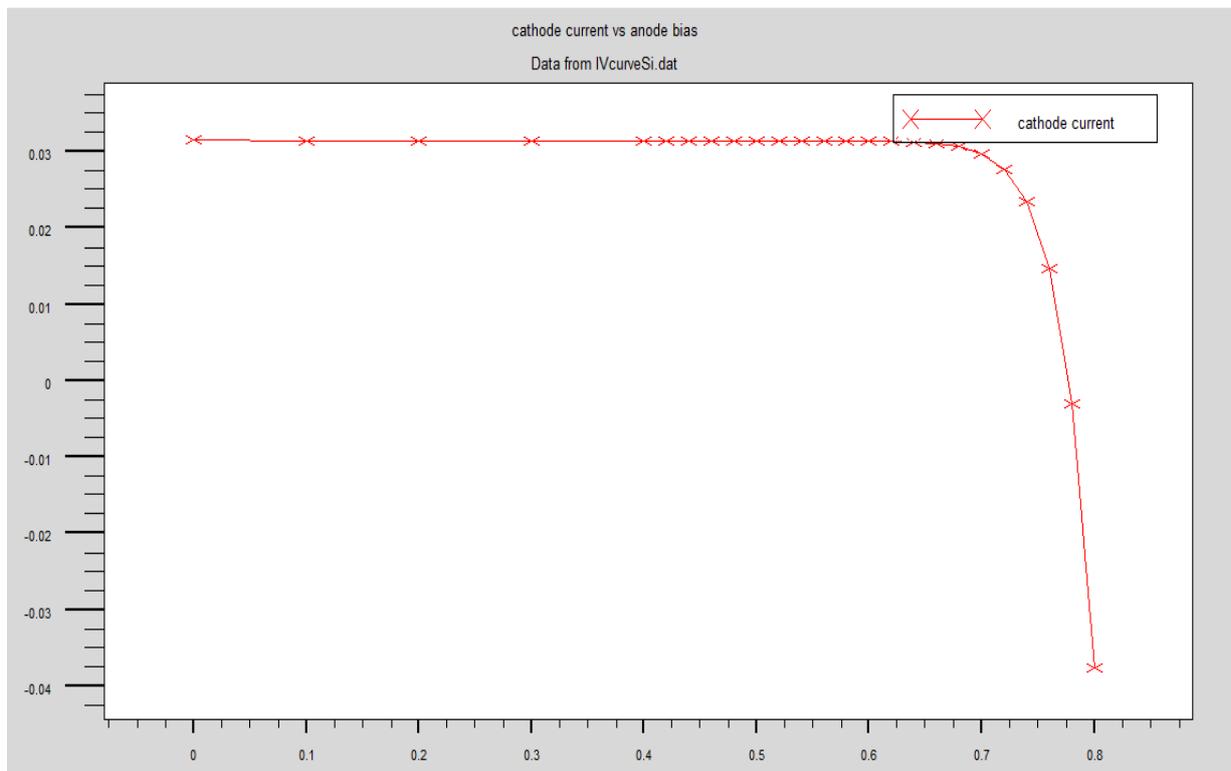


Figure.IV. 15 : caractéristique I(V) de la cellule IBC-SiHJ

IV.6 Optimisation physiques et géométriques de la cellule solaire IBC-SiHJ

Pour étudier l'influence des différents paramètres, on fait varier un paramètre en maintenant les autres paramètres fixes. Nous avons fait une étude géométrique et physique.

IV.6.1 Optimisation géométrique

La figure IV.16 montre l'influence de l'épaisseur du BSF sur le rendement de conversion dont nous avons fixé l'épaisseur de l'émetteur à $0.5\mu\text{m}$, nous avons obtenu une courbe croissante avec un maximum de 20.11% de rendement qui correspond à une épaisseur de BSF de $1\mu\text{m}$. Nous avons remarqué que plus l'épaisseur du BSF augmente plus le rendement diminue.

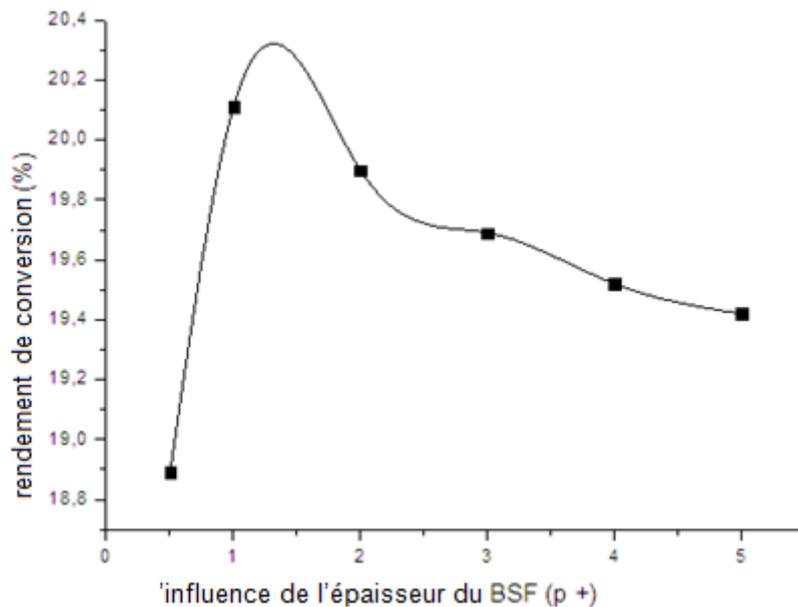


Figure.IV. 16 : l'influence de l'épaisseur du BSF sur le rendement de conversion

IV.6.2 Optimisation des paramètres physiques

La figure IV.17 montre l'influence du dopage de l'émetteur sur le rendement, où nous avons fixé les autres dopages. Nous avons obtenu un rendement de 20,19% au point correspondant à un dopage de l'émetteur de $5.10^{18}\text{atome}/\text{cm}^3$.

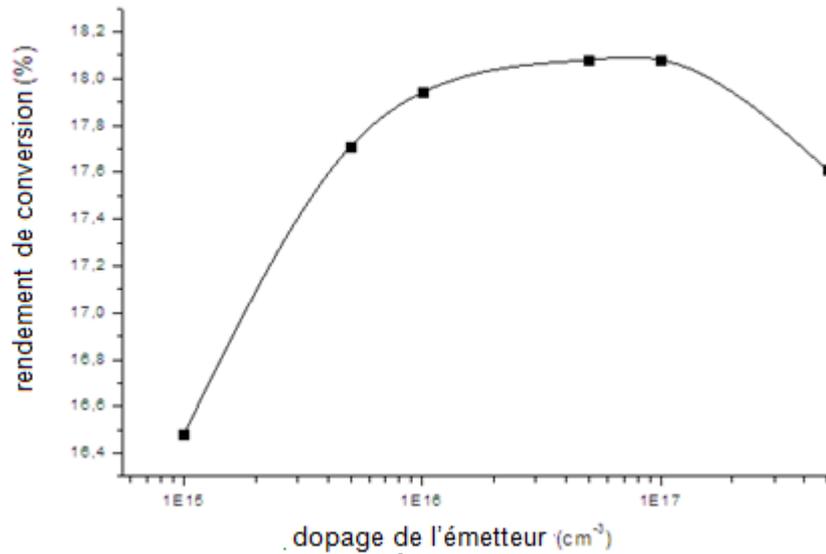


Figure.IV. 17 : *l'influence du dopage de l'émetteur sur le rendement de conversion*

Au cours de cette étude, la courbe de la figure IV.18 illustre l'amélioration du rendement donnant 20.59% à un dopage du BSF de $10^{21}/\text{cm}^3$ au-delà, le rendement se dégrade à cause des recombinaisons Auger. L'orsque le dopage du BSF augmente la durée de vie des porteurs diminue et les taux de recombinaison (Auger et SRH) augmentent, se qui influe négativement sur le rendement de conversion et sur le courant de court-circuit. Par contre, si on réduit le dopage du substrat ($<10^{15} \text{ cm}^{-3}$), la hauteur de la barrière de potentiel de la jonction p-n est réduite et donc la collecte des porteurs est aberrante.

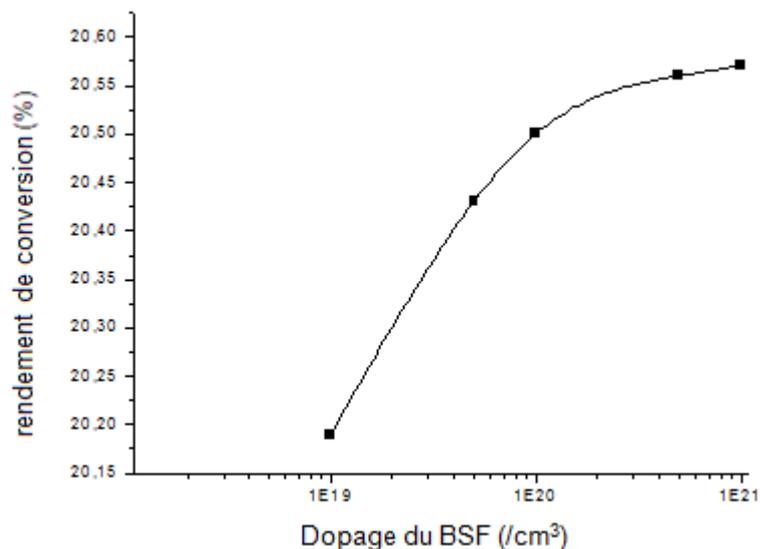


Figure.IV. 18 : *l'influence du dopage du BSF sur le rendement de conversion*

En fixant les dopages de l'émetteur et BSF aux points optimaux, nous avons obtenu un rendement optimal de 20.83% à un dopage de substrat de $5.10^{16}/\text{cm}^3$. Notons que l'augmentation du dopage du substrat entraîne une diminution de la densité de courant I_{cc} , de la mobilité et de la durée de vie des porteurs de charge.

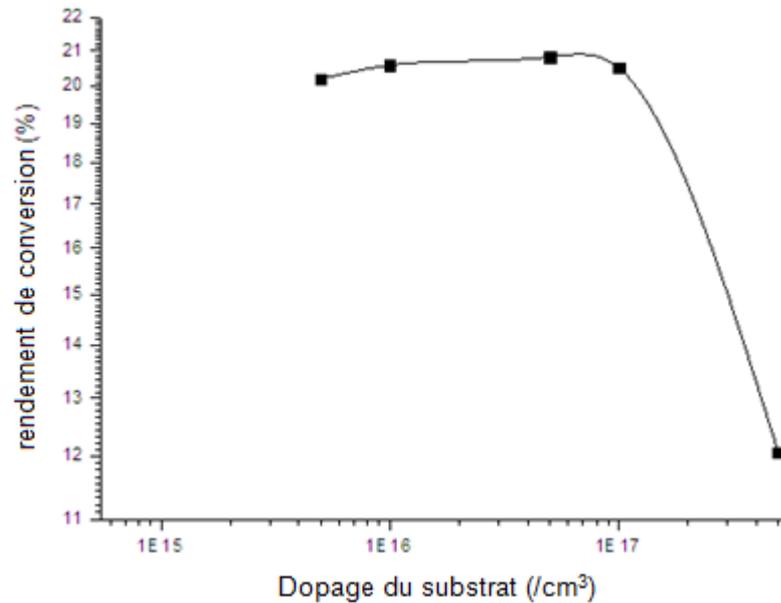


Figure.IV. 19: l'influence du dopage du substrat(c-Si :p) sur le rendement de conversion

Nous rapportons une étude expérimentale qui a été faite par l'équipe constitué de Jan Haschkea, Yi-Yang Chena, Ralf Gogolinb, Mathias Mewsa, Nicola Mingirullic, Lars Korte et Bernd Rechain en 2013. Cette équipe est de l'Institute Silicon-Photovoltaics, Berlin. Ils étudient la fabrication de matériaux à zone flottante de type n à cellules n de type IBC-SHJ avec une orientation de 100. Ils ont développé une cellule de fabrication IBC de fabrication avec la face avant, une tranche de $280 \mu\text{m}$ d'épaisseur a été passivée par un empilement $\text{SiNx} / \text{SiO}_2$. L'émetteur a-Si: H recouvrait 60% de la face arrière des cellules solaires et le BSF 40%. L'émetteur et le BSF ont été déposés en utilisant un dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma (PECVD). La métallisation des couches est réalisée par $1,5 \mu\text{m}$ d'aluminium évaporé thermiquement. Cette technologie atteint des tensions en circuit ouvert de 635 mV, 39,2 mA de courant I_{cc} et 19,4 % de rendement de conversion. Ils ont relevé la caractéristique $I(V)$ représentée sur la figure IV.20.

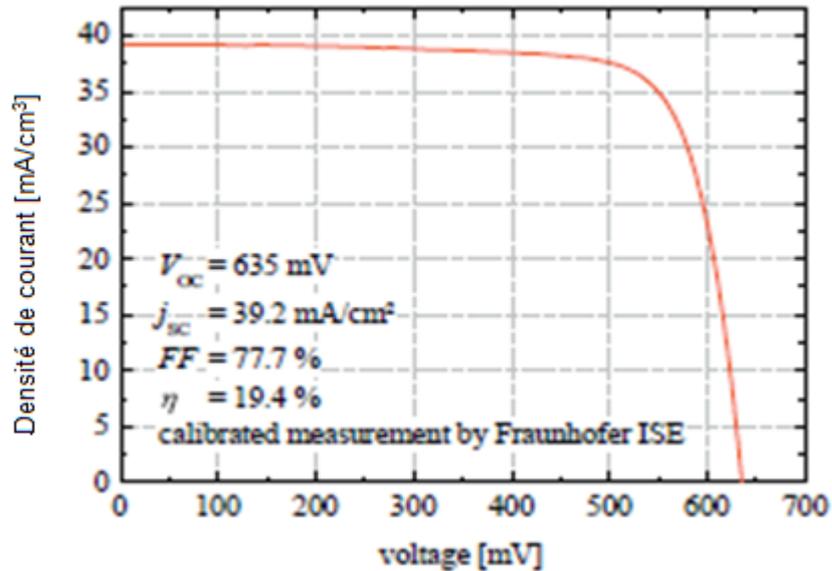


Figure.IV. 20 : *Caractéristique I (V) de la cellule IBC obtenue dans la mesure expérimentale de Fraunhofer ISE à STC [14]*

Pour comparer avec nos recherches, nous avons constaté que les tensions en circuit ouvert étaient de 746 mV et que le rendement était de 20,83%. Cette différence est due au type de substrat ainsi qu'à l'amélioration des performances.

Avec un émetteur situé à l'arrière, il y a moins de recombinaisons de porteurs de charge que lorsqu'il est situé à l'avant. Avec cette configuration, nous obtenons des valeurs plus élevées à la fois de la densité de courant de court-circuit I_{cc} et de la tension de circuit ouvert V_{co} .

L'étude des effets des paramètres géométriques et physiques sur les caractéristiques de la cellule solaire IBC-SiHJ conduit à des valeurs optimales des dimensions et du dopage de la zone arrière (BSF).

Le meilleur rendement électrique obtenu dans notre simulation numérique est de 20,83% pour des concentrations de $5.10^{16} / \text{cm}^3$, $10^{21} / \text{cm}^3$ et $5.10^{18} / \text{cm}^3$ du substrat, du BSF et de l'émetteur, respectivement. Les épaisseurs sont respectivement de 1 μm et 0,5 μm pour le BSF et l'émetteur.

Nos résultats montrent qu'avec la structure d'étude IBC-SiHJ que nous avons conçue, nous obtenons des performances électriques très prometteuses.

IV.7 Simulation de la structure EWT (Emitter Wrap Through) à hétérojonction sous ATLAS/SILVACO

En s’inspirant de l’étude faite précédemment avec la cellule IBC. Nous avons fait une étude de la cellule EWT ou nous avons concentré sur le dopage de substrat, l’émetteur et le champ de surface arrière (BSF) ainsi sur le diamètre des trous et les longueurs des contacts métalliques. La figure IV.21 représente le schéma en coupe de la structure EWT. Nous rappelons que dans cette structure, l’émetteur se trouve sur la face avant avec l’absence des contacts où la collecte des porteurs ce fait de l’avant vers l’arrière à travers les trous.

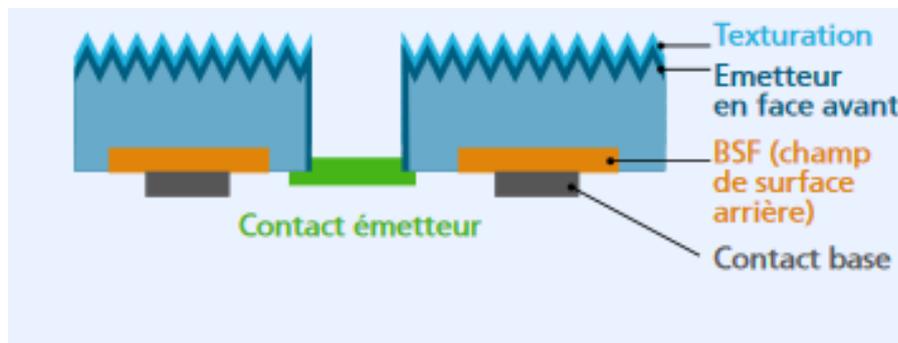


Figure.IV. 21: Schéma en coupe de la structure EWT [15]

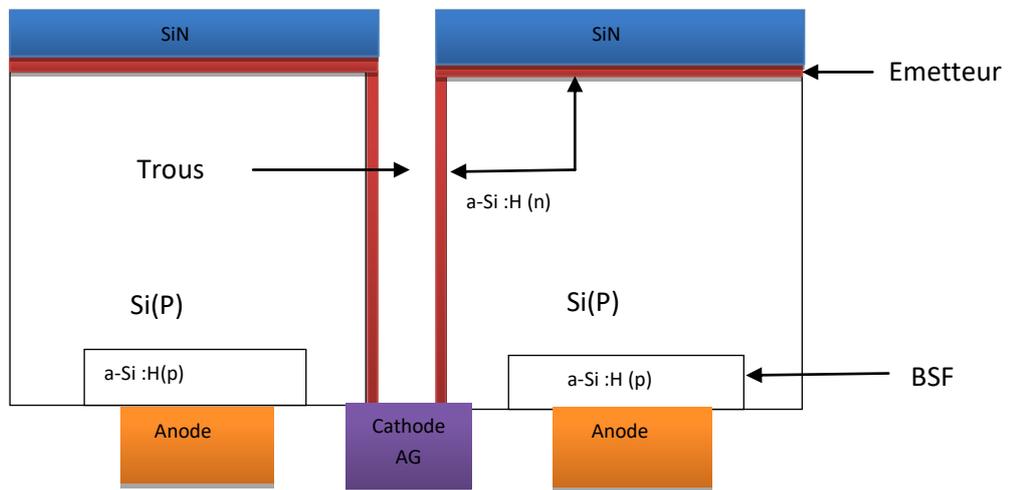


Figure.IV. 22: Partie élémentaire (pitch) simulée (EWT)(l'échelle n'est pas respectée)

Le tableau IV.6 expose les différents paramètres pris pour cette structure. Parmi ces paramètres, ce qui sont été optimisés dans la simulation de la cellule précédente.

Tableau IV. 6: Paramètres de la cellule EWT (Emitter Wrap Through)

Substrat c-Si	P
Longueur L(μm)	2000
Epaisseur W(μm)	200
Dopage	$5e10^{16}$
Profil du dopage	uniforme
Recombinaison. Face AV	10^{-3}
CAR	SiN
Epaisseur (nm)	75
Indice de réfraction	2.05
Emetteur a-Si :H	N
Epaisseur (nm)	500
Longueur L_E (μm)	1750
Dopage	$5e10^{18}$
Profil du dopage	Fonction d'erreur complémentaire (erfc)
Energie d'activation	0.2
BSF a-Si :H	P
Epaisseur (μm)	1
Longueur L_{BSF} (μm)	170
Dopage	10^{21}
Profil du dopage	Fonction d'erreur complémentaire (erfc)
Energie d'activation	0.3
Distance entre l'émetteur&BSF [Gap](μm)	40
Type de contact	ohmique
Cathode	Argent
longueur (μm)	120
Epaisseur(μm)	10
Anode	Aluminium
longueur (μm)	1700
Epaisseur(μm)	10
Diamètre de trous (μm)	30

La figure ci-après représente la structure EWT simulé sous ATLAS.

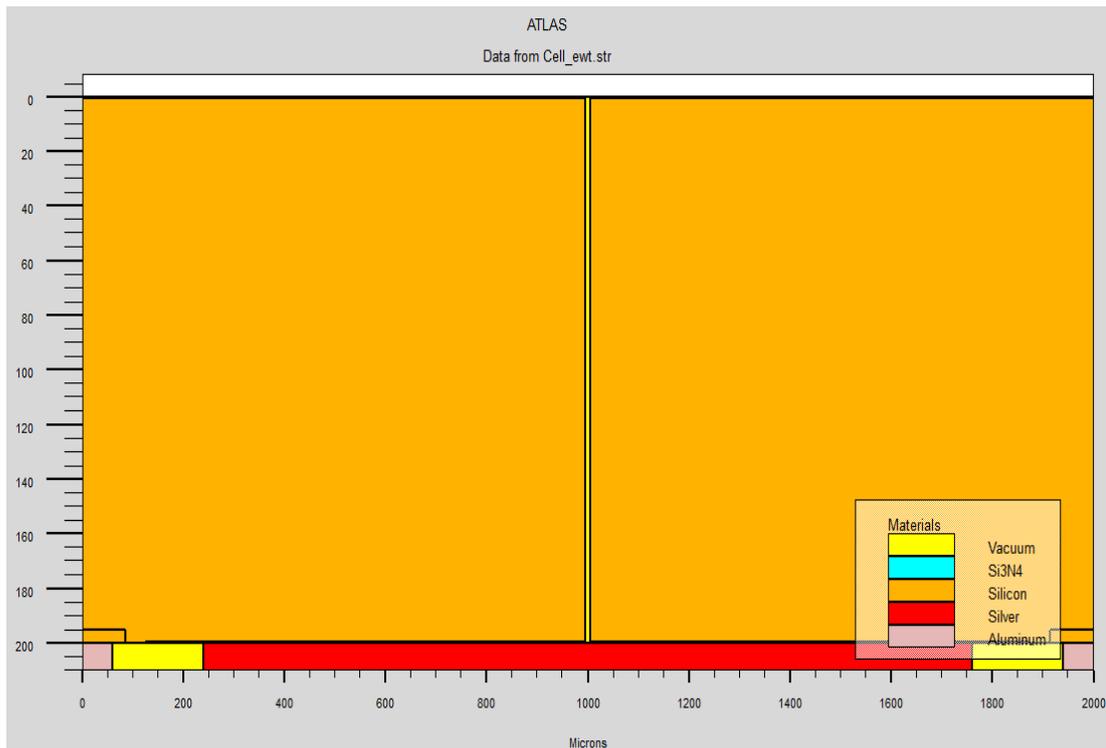


Figure.IV. 23: *La partie élémentaire de la cellule EWT simulée*

La figure suivante montre les détails de la cellule EWT au milieu (ce qui est en jaune représente l'ouverture réalisée via le laser).

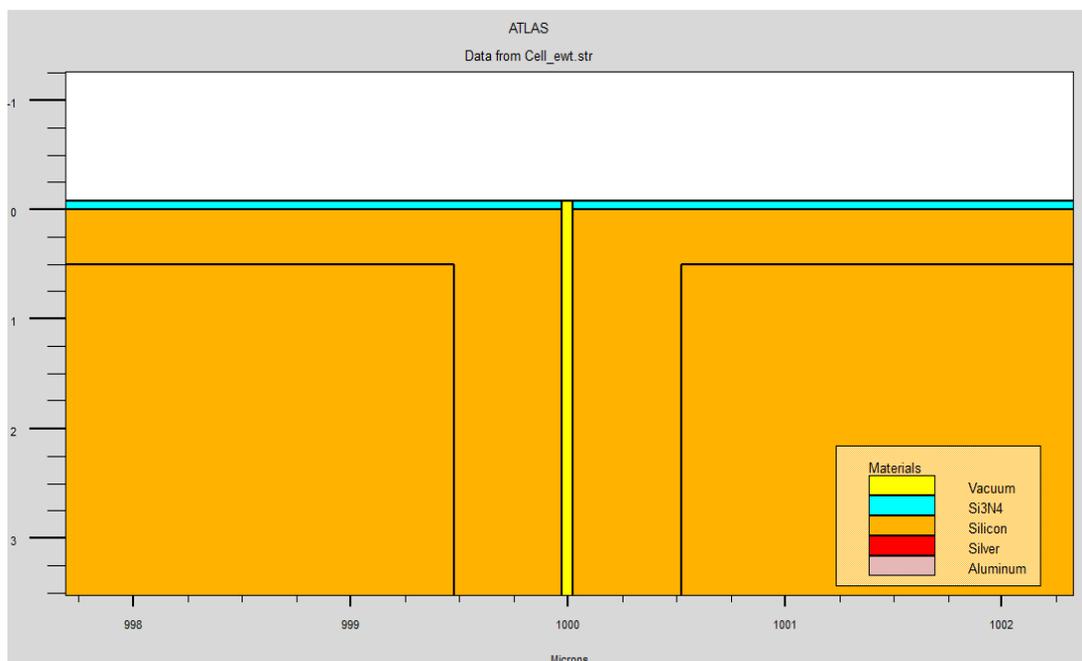


Figure.IV. 24: *La partie élémentaire de la cellule EWT agrandie au milieu*

Le tableau IV.7 montre les résultats obtenus pour cette structure.

Tableau IV. 7:Résultats :

I_{cc} (mA/cm²)	V_{CO}(v)	FF	R(%)
31.46	0.58	0.83	15.94

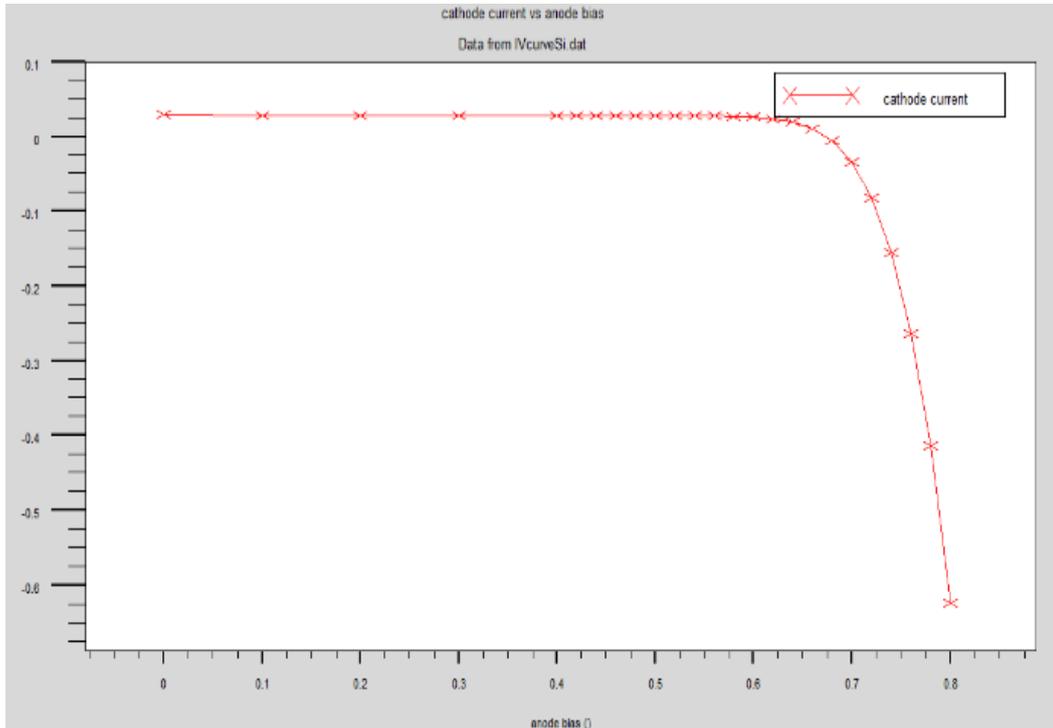


Figure.IV. 25: caractéristique I(V) de la cellule EWT

IV.8 Optimisation physique et géométrique de la cellule solaire EWT

IV.8.1 Optimisation physique

En premier lieu nous avons commencé notre étude par la variation du dopage de l'émetteur, de substrat et du BSF respectivement pour noter l'influence sur le rendement de conversion.

La valeur optimale du rendement obtenu est de 18,08% qui correspondent à un dopage de l'émetteur de 10^{19} cm^{-3} dont la figure IV.26 montre l'effet de la variation. Le rendement de conversion se dégrade lorsque le dopage dépasse les 10^{19} cm^{-3} . Ceci est dû à la recombinaison Auger.

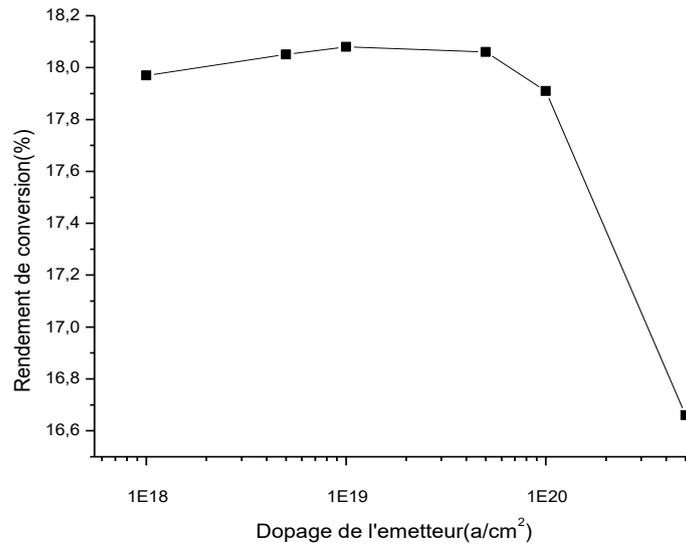


Figure.IV. 26 : *Effet du dopage de l'émetteur sur le rendement de conversion*

Nous avons fixé le dopage de l'émetteur à la valeur optimale et nous avons fait varier le dopage du substrat. Nous avons marqué un optimal rendement de 18,08% à un dopage de 5.10^{16} atome/cm³. Nous pouvons constater que l'augmentation de la concentration de dopage du substrat engendre une diminution de la densité de courant court-circuit ainsi de la mobilité des porteurs de charge et par conséquent la durée de vie des porteurs.

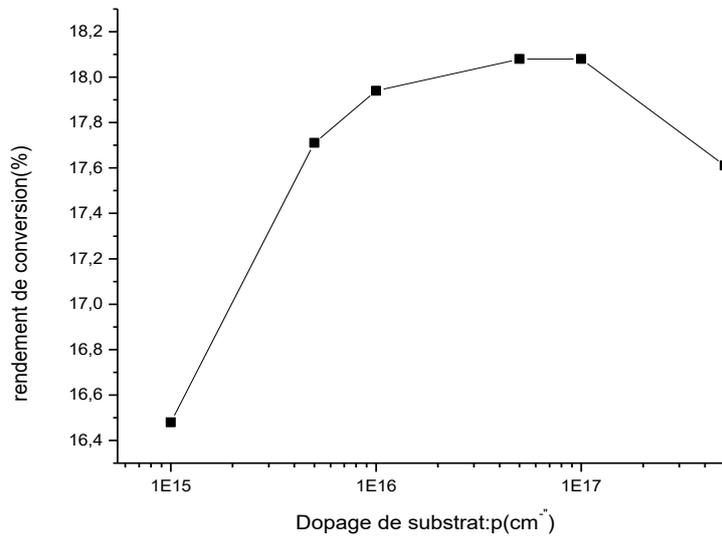


Figure.IV. 27 : *Effet du dopage de substrat(p) sur le rendement de conversion*

Pour cette étude nous avons obtenu un rendement maximal à un dopage de BSF de 5.10^{20} atome/cm³. Nous pouvons dire que la recombinaison au contact métal semi-conducteur est réduite à cause du fort dopage du BSF ce qui entraine un balayage des électrons des contacts au substrat.

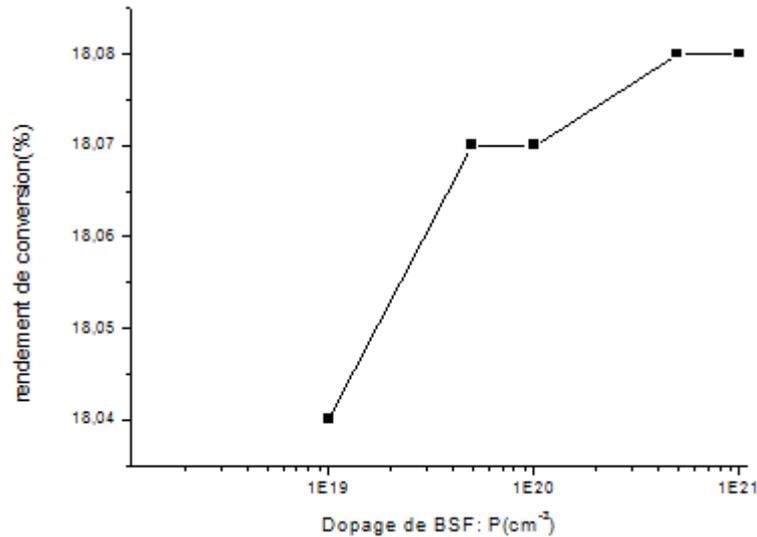


Figure.IV. 28: Effet du dopage du BSF sur le rendement de conversion

IV.8.2 Optimisation géométrique

En variant le diamètre de l'ouverture réalisée à travers un laser, nous avons observé que plus le diamètre de trous augmente plus le rendement diminue. Nous avons obtenu un rendement de 18,16% pour un diamètre de 50 nm. L'amélioration est observée sur le courant de court-circuit (I_{cc}) qui est dû à la diminution des pertes résistives.

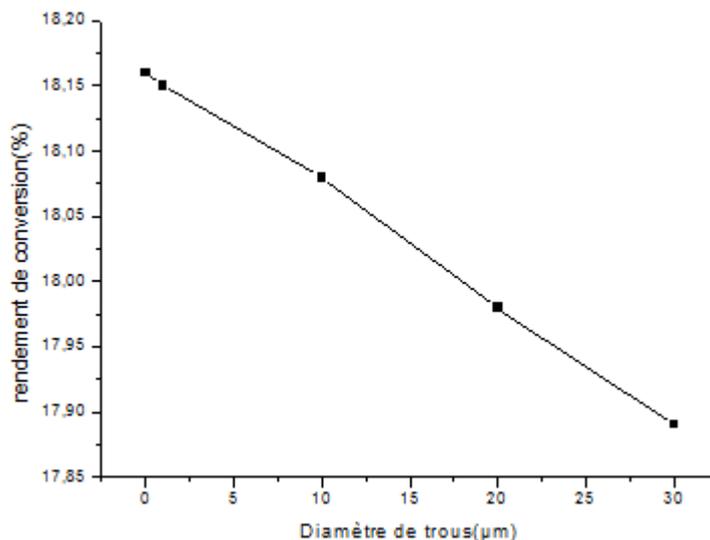


Figure.IV. 29: Effet du diamètre de l'ouverture sur le rendement de conversion

Plus la longueur du contact Argent est importante plus le rendement est dégradé. Le rendement optimal obtenu est de 19,2% à une longueur de 120 μm ce qui est utilisée dans la technologie.

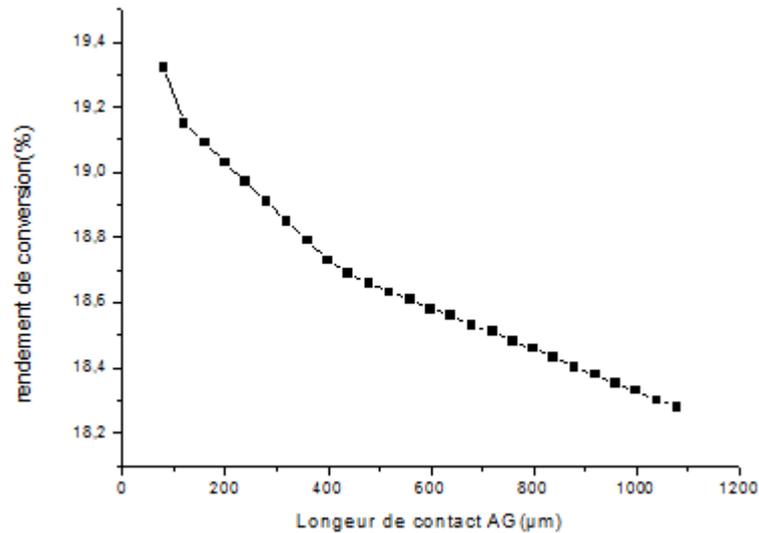


Figure.IV. 30 : Effet de la longueur de contact argent sur le rendement de conversion

Nous avons fait une comparaison entre notre étude et une étude expérimentale [16], dont la figure IV.31 montre les résultats obtenus en 2016 par M. Nicolai et al. Ils ont comparé une simulation avec l'expérimental. Le dispositif étudié est fabriqué sur une tranche de silicium monocristallin de type p de 280 μm d'épaisseur sous 1e soleil. La simulation numérique a été réalisée à l'aide de la technologie de conception assistée par ordinateur (TCAD). En revanche, les données expérimentales mesurées ont été calculées à l'aide des valeurs (FOMS). L'approche proposée consiste en un réseau de trous à rainures profondes composé de trous de deux types de dopage alternés [16].

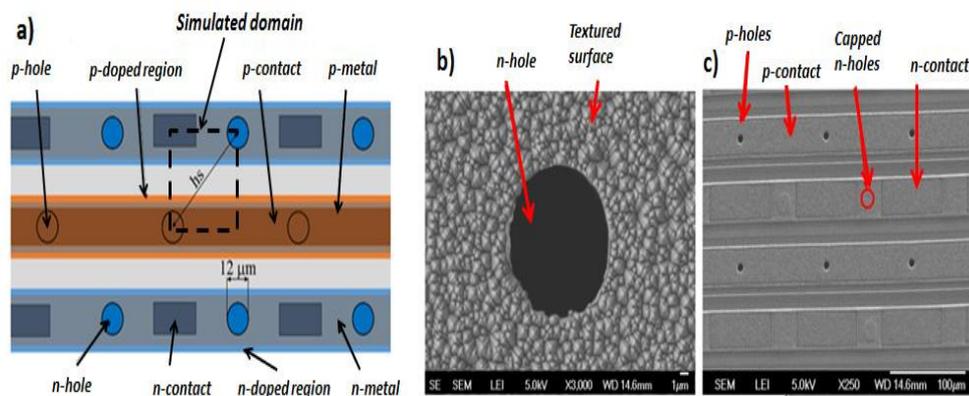


Figure.IV. 31 : (a) Schéma (l'échelle n'est pas respecté) de la surface de la cellule arrière de la cellule solaire EWT-DGB (avec contact à base rainurée profonde) ; (b) Image SEM d'un bord de trou sur la surface avant texturée et c) Image SEM de la surface arrière de la cellule [16]

Les résultats obtenus sont exposés sur la table IV.8 :

Tableau IV. 8: Les résultats de simulation et expérimentaux relevés des cellules solaires EWT-DGB pour les trois différents espacements de trou considérés dans leur étude. Les incertitudes relatives aux valeurs expérimentales sont indiquées.

	hS(µm)	Voc (mv)	Jcc (mA/cm2)	FF (%)	R (%)
Mesuré	43	575 (1%)	38.9 (2%)	81.1 (5%)	18.1 (5%)
Simulé		575	39.9	80.5	18.5
Mesuré	50	582 (1%)	40.1 (2%)	79.6 (5%)	18.6 (5%)
Simulé		578	40.2	79.7	18.6
Mesuré	78	597 (1%)	80.4 (5%)	80.4 (5%)	18.5 (5%)
Simulé		595	81.3	81.3	19.5

En comparant les résultats cités ci-dessus aux résultats de notre recherche, nous remarquons que notre efficacité après optimisation est de 19,3%. Nous pouvons dire que notre résultat est très proche de leurs résultats. Dans notre étude, nous avons utilisé un matériau moins coûteux que le silicium monocristallin. Nous avons fixé un diamètre optimal de 50 nm, en revanche eux ont optimisé l'espacement entre les trous qui est de 78 µm donnant un rendement de conversion de 19, 5 %.

L'étude des effets des paramètres géométriques et physiques sur les caractéristiques de la cellule solaire EWT permet de déterminer la géométrie optimale pour la face arrière ainsi que le dopage. Le meilleur rendement de conversion obtenu dans notre étude numérique est de 19,3%, lorsque les concentrations sont respectivement de $5.10^{16} / \text{cm}^3$, $5.10^{20} / \text{cm}^3$ et $10^{19} / \text{cm}^3$ pour le substrat, le BSF et l'émetteur. De plus, une amélioration remarquable à la fois: la longueur du contact en argent de 80 µm et le diamètre des trous de 50 nm. Le résultat obtenu est plus efficace que les résultats des autres études en termes de coût.

IV.9 Simulation de la structure MWT (Metalization Wrap Through) à hétérojonction sous ATLAS/SILVACO

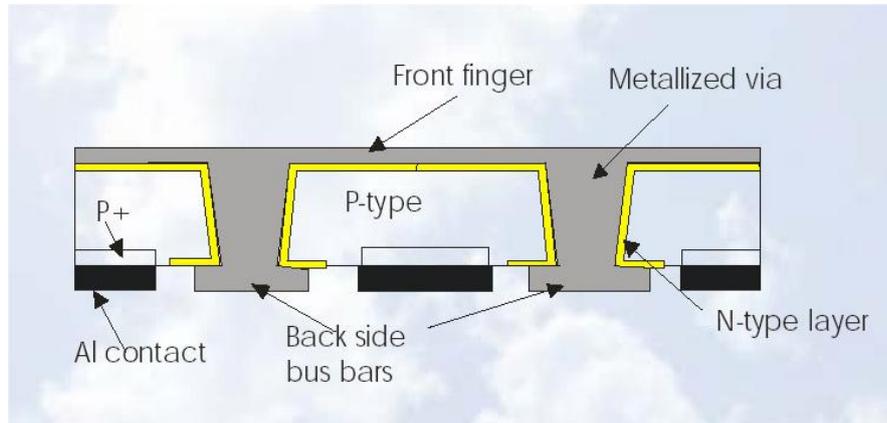


Figure.IV. 32: Schéma en coupe de la structure MWT [17]

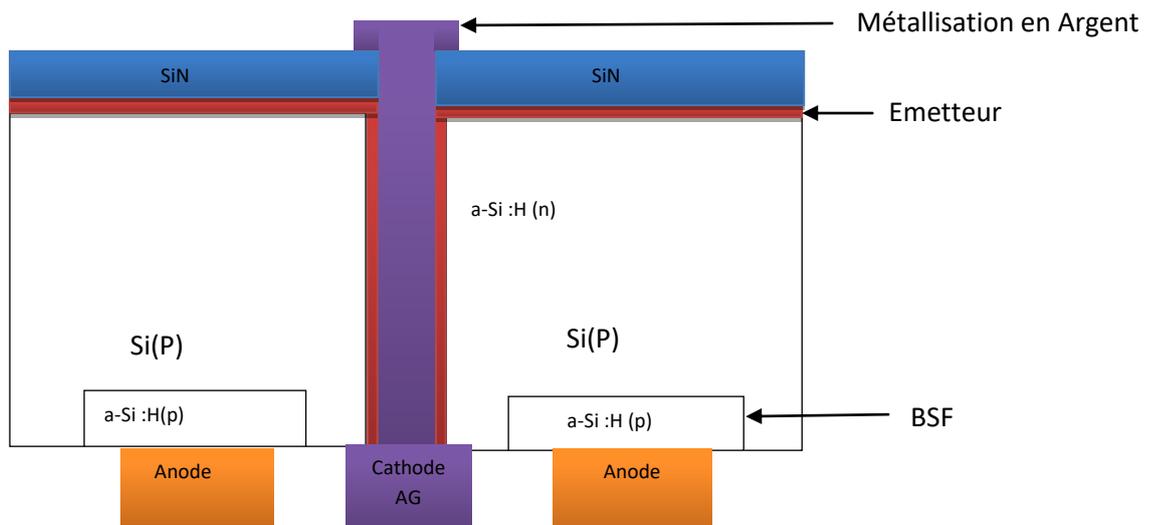


Figure.IV. 33: Partie élémentaire (pitch) simulée (MWT)(l'échelle n'est pas respectée)

Le tableau IV.9 expose les différents paramètres pris pour cette structure. Nous signalons que nous avons pris les paramètres optimisés dans la cellule précédente (EWT) en gardant les dopage $5e10^{16}$, $5e10^{18}$ et $5e10^{20}$ pour le substrat, l'émetteur et le BSF respectivement. Donc il nous reste que l'étude géométrique de la longueur de la métallisation AG en face avant.

Tableau IV. 9: Paramètres de la cellule MWT (Metalization Wrap Through)

Substrat c-Si	P
Longueur L (μm)	2000
Epaisseur W (μm)	200
Dopage	$5e10^{16}$
Profile du dopage	uniforme
Recombinaison. Face AV	10^{-3}
CAR	SiN
Epaisseur (nm)	75
Indice	2.05
Emetteur a-Si :H	N
(nm)	500
longueur L_E (μm)	1750
Dopage	$5e10^{18}$
Profile du dopage	Fonction d'erreur complémentaire (erfc)
Energie d'activation	0.2
BSF a-Si :H	P
Epaisseur (μm)	1
Longueur L_{BSF} (μm)	170
Dopage	$5e10^{20}$
Profile du dopage	Fonction d'erreur complémentaire (erfc)
Energie d'activation	0.3
Distance entre l'émetteur & BSF [Gap](μm)	40
Type de contact	ohmique
Cathode	Argent
longueur (μm)	80
Epaisseur (μm)	10
Anode	Aluminium
longueur (μm)	1700
Epaisseur (μm)	10
Diamètre de trous (nm)	50

La figure suivante représente la cellule MWT simulée sous ATLAS et la figure qui vient après, montre le maillage.

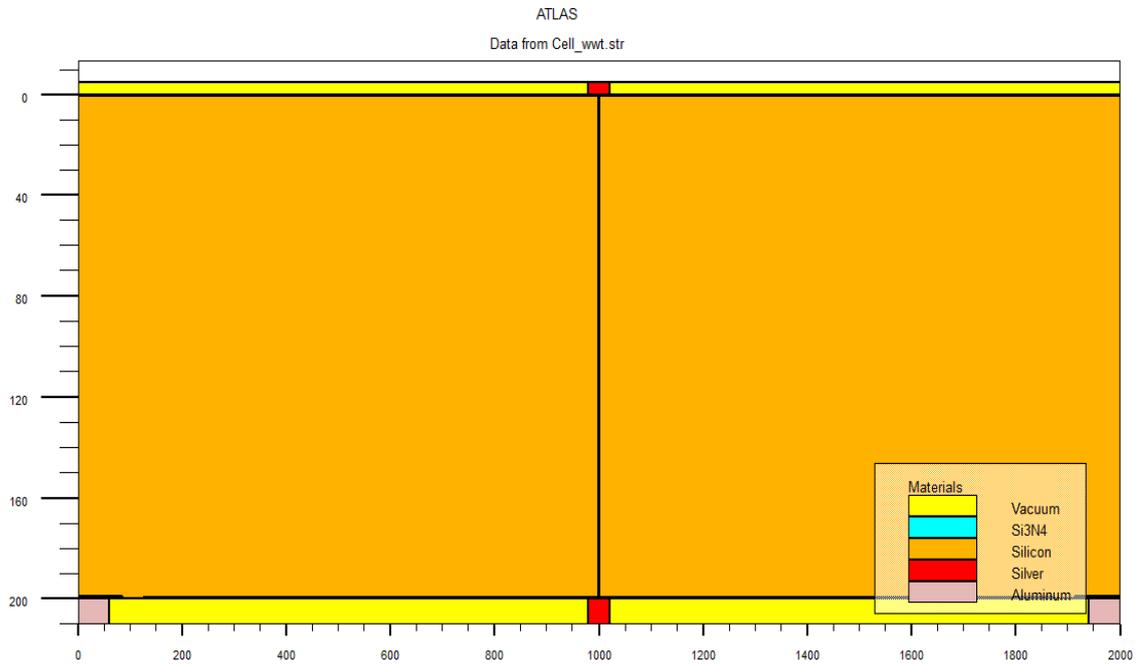


Figure.IV. 34: *La partie élémentaire de la cellule MWT simulée*

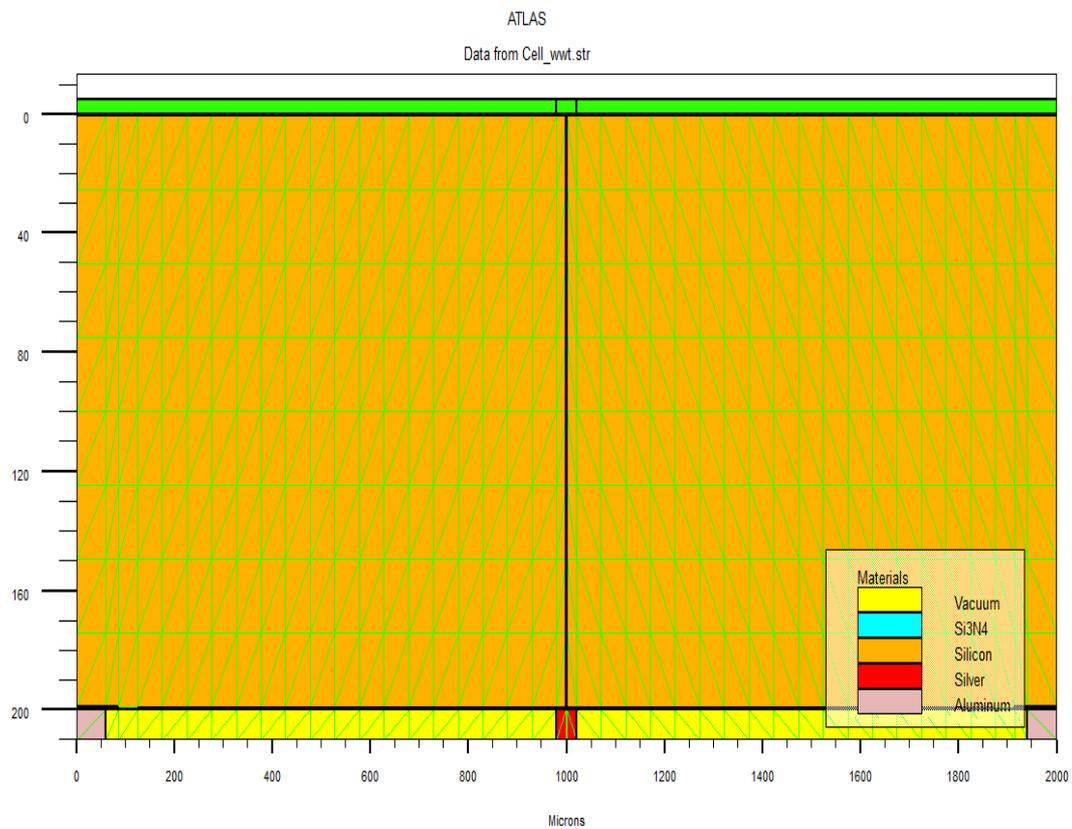


Figure.IV. 35: *Illustration du maillage de la cellule MWT*

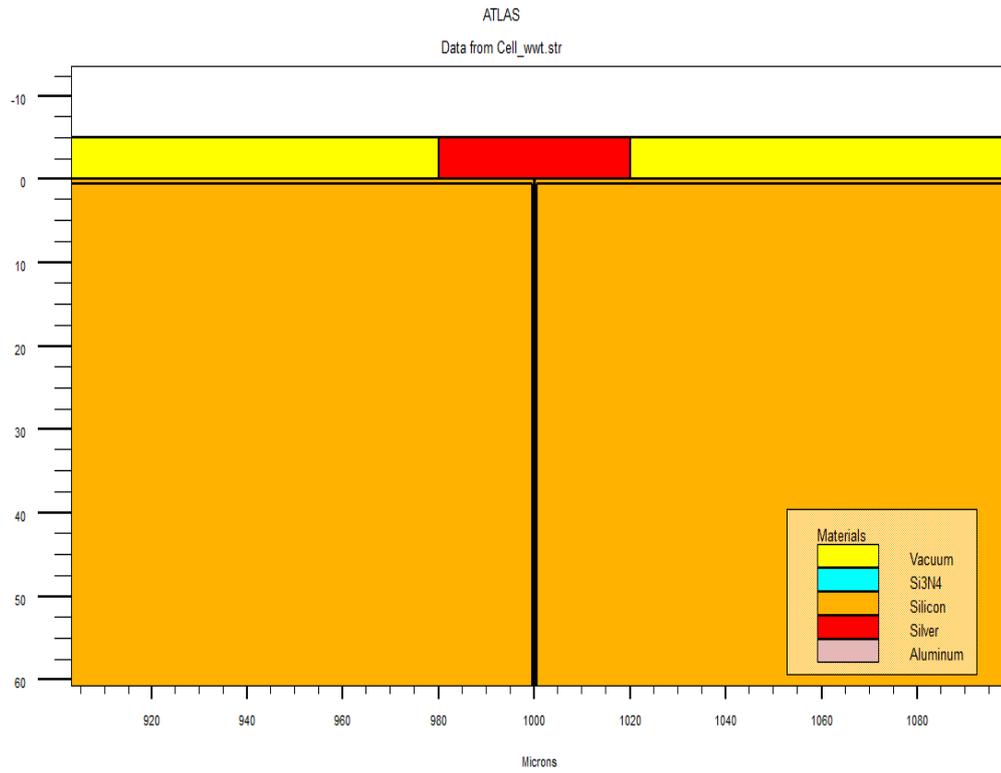


Figure.IV. 36: *Agrandissement en face avant de la cellule MWT*

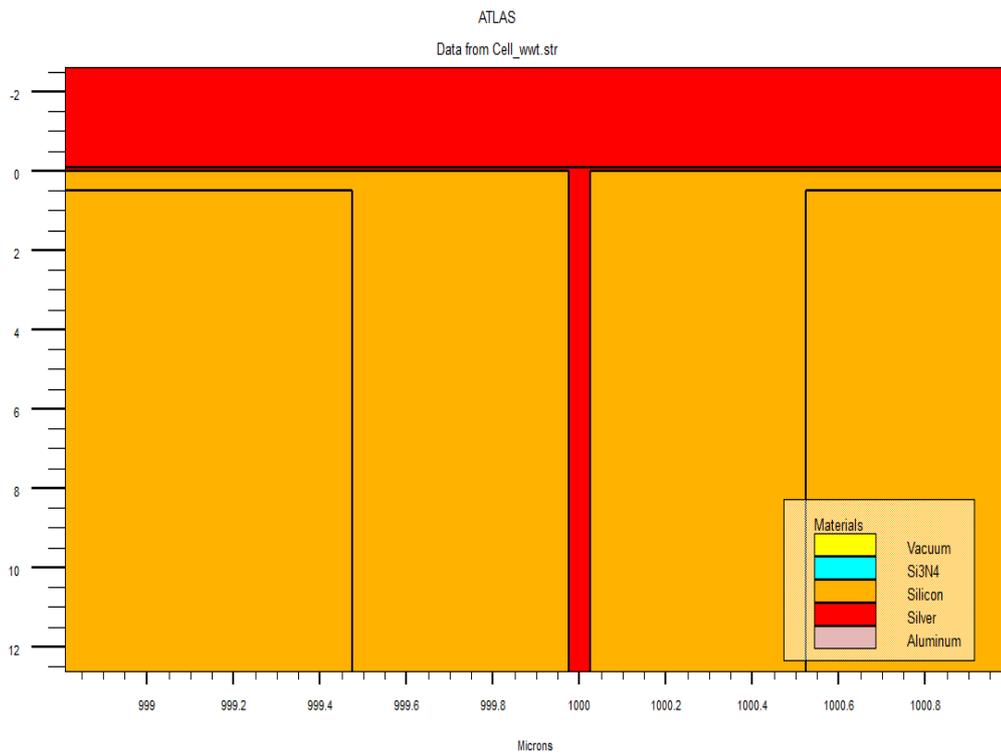


Figure.IV. 37: *Agrandissement au milieu de la cellule MWT*

Le tableau IV.10 montre les résultats obtenus pour cette structure.

Tableau IV. 10: Résultats :

I_{cc} (mA/cm²)	V_{CO}(v)	FF	R(%)
30.19	0.749	0.83	18.71

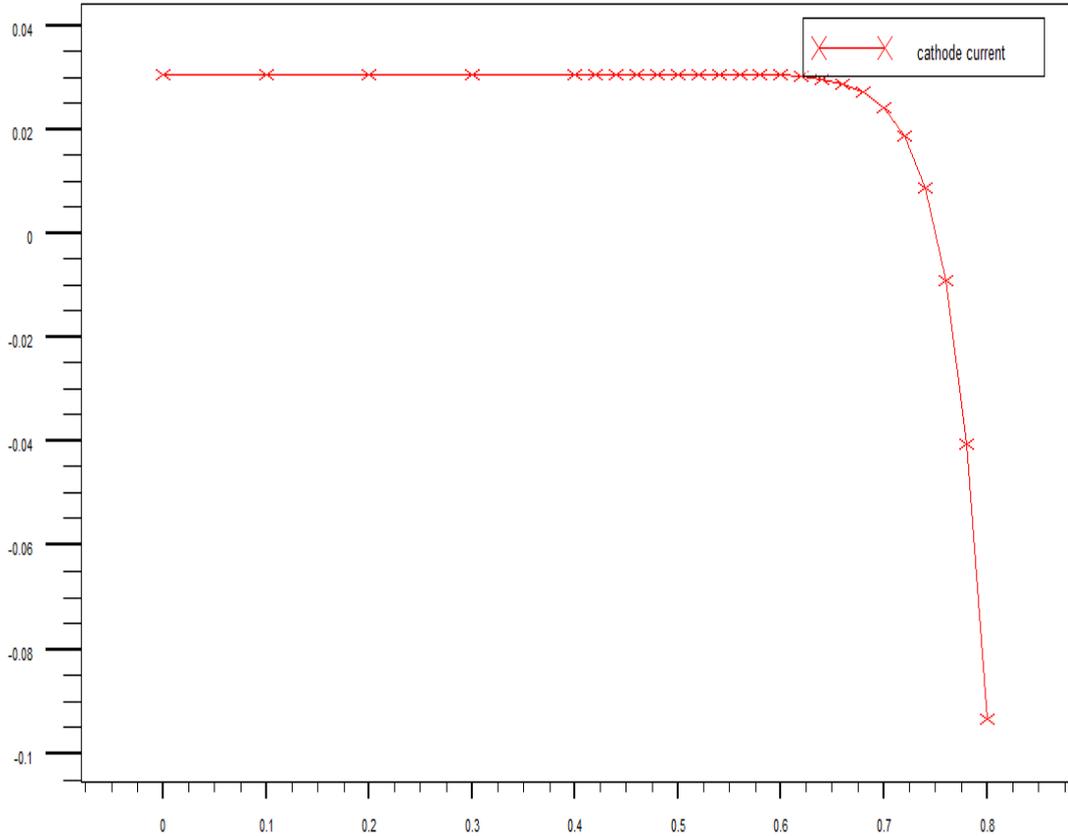


Figure.IV. 38 : caractéristique I(V) de la cellule MWT

IV.9.1 Optimisation géométrique

Nous avons entamé l'étude géométrique en négligeant l'étude physique car elle a été déjà faite dans la structure de la cellule EWT qui est une structure très proche de la structure MWT.

Dans cette partie, nous avons étudié l'effet de la longueur de la métallisation de l'argent en face avant sur la densité de courant et sur le rendement de conversion.

Nous avons obtenu un rendement optimal de 19,02 % et un courant de court-circuit de 30,68 mA/cm² avec une longueur de l'argent en face avant de 10 μm. Nous remarquons que la variation est linéaire, plus la longueur de la métallisation augmente plus le rendement se dégrade bien sûr c'est dû à l'augmentation du taux d'ombrage.

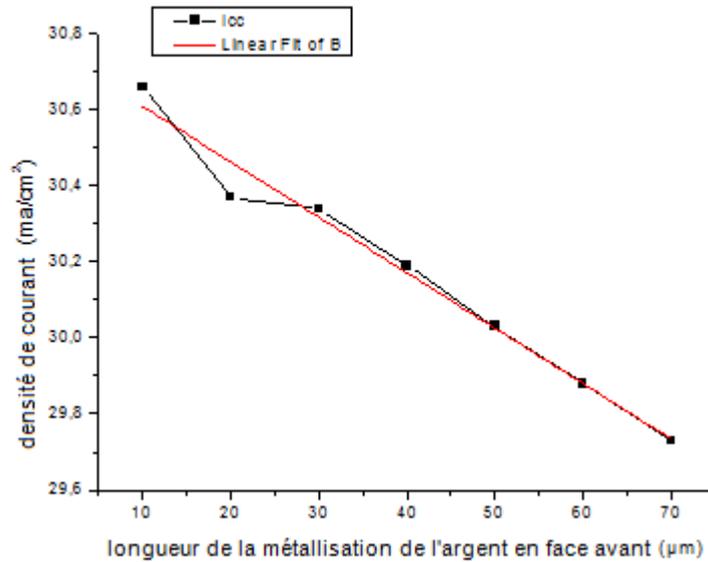


Figure.IV. 39: *Effet de la longueur de la métallisation de l'argent en face avant sur la densité de courant*

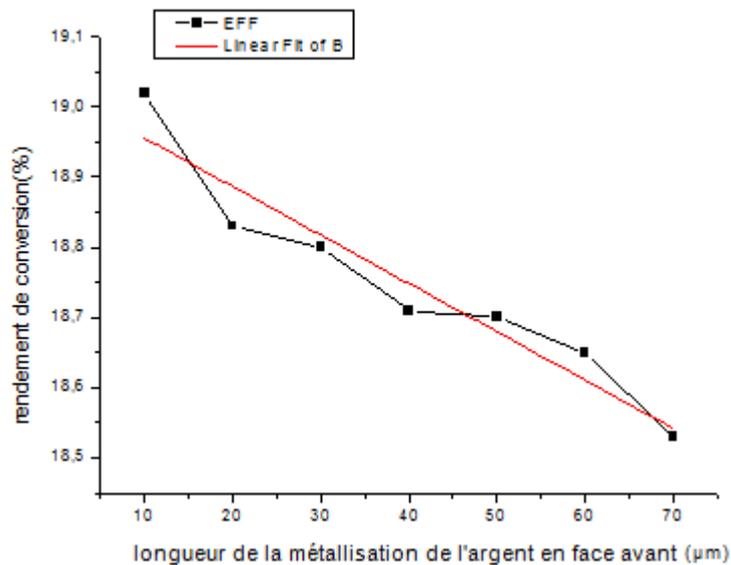


Figure.IV. 40: *Effet de la longueur de la métallisation de l'argent en face avant sur le rendement de conversion*

Comme les autres structures, Nous comparons notre travail à un autre réalisé par les auteurs N. Guillevin, B.J.B. Heurtault, L.J. Geerligs et A.W. Weeber d'Allemagne. Ils ont développé une cellule photovoltaïque MWT de type N, avec un rendement de conversion de 19,7% [18]. Cette cellule était à base de silicium monocristallin, réalisée selon la méthode Czochralski (Cz) et d'une surface de 239 cm³. Nous pouvons ajouter que cette équipe a fabriqué cette structure en utilisant un processus de métallisation appelé

sérigraphie et qu'elle a obtenu une densité de courant proche de 40 mA / cm² et une tension de court-circuit de 644mV.

En comparant nos résultats à ceux obtenus par les travaux cités ci-dessus, nous pouvons noter que les résultats étaient similaires malgré la différence de type de silicium. Un avantage à marquer en faveur de notre étude réside dans le fait que le type de silicium multi-cristallin est moins coûteux que le type N monocristallin utilisé dans le substrat, ce qui rend notre étude plus efficace en termes de coût.

IV.10 Comparaison entre les trois structures simulées

Tableau IV. 11: Un récapitulatif des résultats obtenus pour les trois structures après optimisation :

Cellules simulées	I _{cc} (mA/cm ²)	V _{CO} (v)	FF	R(%)
IBC	31.46	0.746	0.82	20.83
EWT	31.46	0.58	0.83	19.3
MWT	30.66	0.749	0.83	19.02

D'après les résultats obtenus, nous constatons que le meilleur rendement obtenu est celui de la cellule IBC. Nous pouvons dire que ce résultat est dû à l'absence du contact en face avant qui diminue le taux d'ombrage et de l'absence de l'émetteur en face avant. Néanmoins, la réalisation pratique demande plus de procédés de fabrication qui influent sur le budget thermique.

En comparant la cellule EWT et MWT, Nous remarquons que le rendement de conversion est presque similaire avec une petite différence. La cellule EWT est meilleure que l'autre car la métallisation en face avant augmente le taux d'ombrage mais l'industrialisation de la cellule MWT est plus facile et n'exige pas un substrat de bonne qualité. Ce qui veut dire nous pouvons réaliser un compromis entre un haut rendement avec un bas coût. Cet objectif est très important dans le domaine du photovoltaïque.

Nous avons tracé le rendement quantique interne pour les trois structures ce qui est illustré sur la figure IV.41, et nous avons remarqué que la meilleure absorption du spectre solaire dans le domaine du visible et infra-rouge est celui de la cellule IBC. Sachant

que le domaine du visible est plus intéressant pour le silicium. Cette amélioration est causé par la passivation du surface par la couche SiN:H où l'hydrogène pénètre facilement dans le silicium sans être piégé par les atomes du phosphore. Par contre la cellule EWT absorbe mieux dans le domaine des UV parce que les photons sont bien collectés à travers les ouvertures (trous) ce qui diminue les pertes optiques par réflexion.

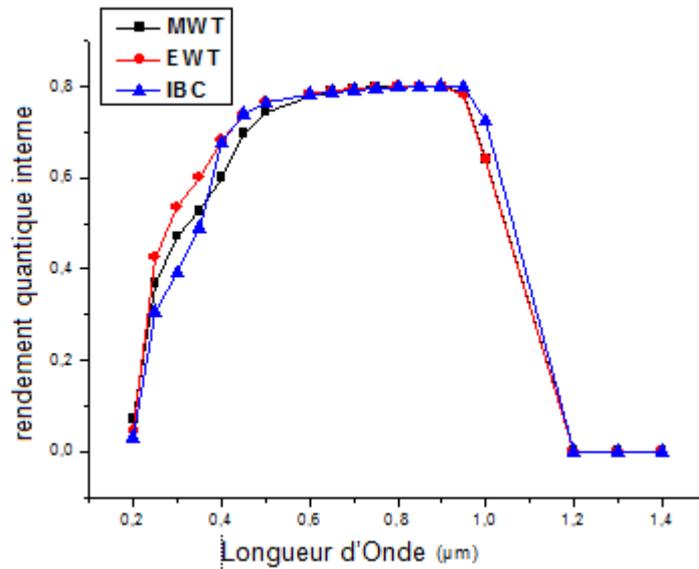


Figure.IV. 41: Tracé du rendement quantique interne des trois structures simulées

Conclusion

Le simulateur ATLAS / Silvaco a été utilisé afin d'optimiser les performances des cellules solaires de type IBC, EWT, et MWT à base de silicium multi-cristallin type p (substrat) et silicium amorphe en émetteur et en BSF.

Ce simulateur, basé sur la méthode des éléments finis, nous a permis de simuler des dispositifs à semi-conducteurs afin d'étudier leurs caractéristiques électriques et optiques.

Il permet aussi d'étudier leur comportement thermique.

Les simulations qui ont été effectuées dans ce travail, nous ont permis de mieux maîtriser les importants mécanismes physiques des trois cellules solaires.

Elles nous permettent d'élaborer des décisions impératives de conception lors de la production industrielle.

Le programme conçu permet d'optimiser les paramètres physiques et géométriques des cellules dans le but de minimiser les pertes et donc obtenir un rendement optimum. Nous citons, entre autres :

- ✓ Les niveaux de dopage (substrat, émetteur et BSF).
- ✓ Les paramètres géométriques du BSF pour la cellule IBC.
- ✓ Les paramètres géométriques des contacts arrière.
- ✓ Les paramètres géométriques des ouvertures (trous) en face avant pour la cellule EWT.
- ✓ Les paramètres géométriques de métallisation en face avant de l'argent pour la cellule MWT.

Un module solaire en silicium multi cristallin est disponible sur le marché sous forme de plaquettes carrées de 5 pouces avec une épaisseur d'environ 200 μm . En revanche, ces dimensions sont importantes pour avoir une bonne précision numérique lors de la simulation du dispositif par la méthode des éléments finis. Ce qui nous a conduit à considérer une cellule élémentaire qui permet refléter le comportement de la zone active de la cellule solaire. Un maillage « serré » dans cette zone a été choisi afin de garantir une meilleure précision dans les calculs et ainsi obtenir des résultats satisfaisants. Nous avons ensuite présenté une comparaison exhaustive et détaillée, relative aux différents paramètres physiques, géométriques et technologiques de fabrication, entre les trois structures.

Bibliographie

- [1] Baldamero Garcia jr. « Indium gallium nitride multijonction solar celle simulation using SILVACO/ATLAS » thèse de doctorat, Naval Postgraduation School, Monterey, California, 2007.
- [2] Atlas User's Manual, Silvaco International, 2011.
- [3] Razvannegru « Conception et modélisation de pixels de photo détection », thèse de doctorat, 2008.
- [4] ATLAS/SILVACO « user's manual » Avril 2008.
- [5] Pierre Papet “Nouveaux concepts pour la réalisation de cellules photovoltaïques à contacts interdigités sur substrats minces en silicium cristallin”, Thèse de doctorat , INSA, 2007.
- [6] Raphaël LACHAUME, "Contribution à la caractérisation électrique et à la simulation numérique des cellules photovoltaïques silicium à hétérojonction", Thèse de Doctorat, Université de Grenoble, 2006.
- [7] G. Nouet, P.Lay et JL Chermant «Le silicium polycristallin Polix : élaboration, propriétés et performances» , Revue de Physique Appliquée, 22 (7),1987, pp. pp.535-547
- [8] Dragica Vasileska, Stephen M. Goodnick, Computational Electronics, Morgan Claypool Publishers, 1 déc. 2006.
- [9] D. Vasileska, SILVACO Simulation of Solar Cells: capabilities of silvaco atlas for optoelectronic applications, 2011.
- [10] Dragica Vasileska, Computational Electronics Introduction to Silvaco ATLAS, NanoHUB.org
- [11] H.A. Macleod, "Thin-Film Optical Filters", 2nd ed. Hilger, Bristol (UK), p. 59 ,1986.
- [12] S. International, ATLAS User's Manual Device Simulation Software, December 7, 2006.

- [13] E.V. Kerschaver G. beaucarne “Back contact solar cells: E.V” Prog. Photovolt: Res. Appl ; 14:107–123, 2006.
- [14] Jan Haschke, et al, « Approach for a simplified fabrication process for IBC-SHJsolar cells withhigh fill factors » Elsevier, 38 732 – 736, 2013.
- [15] Jean pierre Joly « Les modules photovoltaïques dans le domaine de la construction » Focus, Mars 2011.
- [16] M. Nicolai, M. Zanuccoli, G. Paternoster, G. Ceglia, L. Ferrario, P. Bellutti, E. Sangiorgi, C. Fiegna,, Numerical simulation and experimental characterization of Emitter Wrap Through solar cells with Deep Grooved Base contact (EWT-DGB) , Energy Procedia , 92 160 – 169, 2016.
- [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 poly technique France, 2007.
- [18] N. Guillevin, B.J.B. Heurtault, L.J. Geerligts, A.W. Weeber, « Development towards 20% efficient Si MWT solar cells for low-cost industrial production », A review Energy Procedia 8 (2011) 9–16.

Conclusion générale & perspectives

La production mondiale du photovoltaïque augmente d'une année à autre, et les sources des énergies renouvelables tendent à remplacer les énergies traditionnelles dans l'avenir. L'objectif majeur dans le domaine du photovoltaïque est la réalisation d'un compromis entre l'obtention d'un haut rendement et la réduction des coûts de fabrication. Dans ce contexte, nous avons fait une étude comparative de trois structures de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigitées IBC (Interdigitated Back Contact), EWT (Emitter Wrap Through) et MWT (Metalization Wrap Through) à hétérojonction a-Si : H / c-Si. Nous avons utilisé un substrat de type P à base de silicium multicristallin, un émetteur et un BSF de type N à base de silicium amorphe pour les trois structures. Nous avons déposé une seule couche antireflet de SiN:H afin de passiver la surface avant. Nous n'avons pas pris en considération la texturation, malgré que l'ajout de cette dernière améliore le J_{cc} .

Ce travail de thèse est structuré en quatre parties. Dans la première nous avons présenté le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque standard, ainsi que ses caractéristiques électriques et optiques. Les différentes pertes limitant le rendement de conversion ont été abordées en citant tous les types de recombinaisons, surfaciques et volumiques.

La seconde partie a été destinée à l'étude théorique de l'hétérojonction a-Si:H /c-Si en intégrant le modèle d'Anderson et son complément. Nous avons présenté le modèle HIT (Heterojunction Intrinsic Thin film) en décrivant les avantages de ce concept. Cette structure nécessite un dépôt d'une fine couche de silicium amorphe (quelques nanomètres) sur un substrat de silicium cristallin.

Après quoi, nous avons décrit les détails des structures étudiées et leurs procédés de fabrication validée dans l'industrie. Nous avons cité trois procédés d'élaboration des cellules à contacts arrières interdigités, standard, par technologie de transfert de couche épitaxie et par technologie auto-aligné. Cette dernière est plus efficace à cause de la suppression d'une étape d'oxydation humide ce qui minimise le budget thermique. Ensuite la méthode de sérigraphie a été abordée, car c'est la méthode la plus répandue actuellement en industrie. Elle a l'avantage d'être économique et simple à mettre en oeuvre.

La dernière partie a été consacrée aux résultats de simulation et à la comparaison entre les différentes structures.

Le travail présenté dans cette thèse concerne les cellules photovoltaïques IBC, EWT et MWT. Ce genre de cellules présente un avantage principal, qui est l'absence des contacts sur la face avant. Ce qui réduit le taux d'ombrage, entraîne une réduction de la réflectivité moyenne et influe positivement sur le rendement de conversion. Afin d'optimiser les paramètres physiques et géométriques de ces structures, nous avons utilisé le simulateur à deux dimensions Silvaco en se basant sur le module Atlas qui est un logiciel basé sur la méthode des éléments finis, très puissant et précis pour simuler les cellules photovoltaïques.

Dans notre étude nous avons étudié l'influence des paramètres physiques et géométriques sur le rendement de conversion pour les trois structures. Parmi ces paramètres nous citons:

- ✓ Les niveaux de dopage (substrat, émetteur et BSF).
- ✓ Les paramètres géométriques du BSF pour la cellule IBC.
- ✓ Les paramètres géométriques des contacts arrière.
- ✓ Les paramètres géométriques des ouvertures (trous) en face avant pour la cellule EWT.
- ✓ Les paramètres géométriques de métallisation en face avant de l'argent pour la cellule MWT.

Nous avons choisi les valeurs en nous inspirant des données provenant de la littérature et de l'industrie [1,2,3]. L'influence des différents paramètres sur les performances des trois cellules a été examinée. Ces paramètres sont : la tension en circuit ouvert V_{co} , la densité de courant en court-circuit J_{cc} , le facteur de forme FF et le rendement de conversion EFF. Nous avons tracé les caractéristiques $I(V)$ pour les trois structures ainsi que le rendement quantique interne. En comparant entre les résultats trouvés, il est clair que la meilleure absorption est celle de la cellule IBC.

Afin de démontrer l'importance du choix de la longueur de la structure élémentaire (pitch) nous avons pris une surface de 10 cm^2 sous illumination de AM1.5G. Cette étude mène au développement industriel dans le but d'atteindre les hauts rendements. Nous avons créé un modèle précis pour les trois structures, pour lequel les règles de conception, qui peuvent servir à la production industrielle, ont été bien fixées. Nous avons aussi fait une comparaison avec d'autres travaux expérimentaux pour chaque structure [4,5,6]. Nous avons ensuite confronté notre modèle de chaque structure à des travaux expérimentaux. Les résultats obtenus sont satisfaisants avec des rendements optimaux de 20,83 % 19,3 % 19,02 % pour les cellules IBC, EWT et MWT respectivement.

Conclusion générale & perspectives

Le meilleur rendement est celui de la cellule IBC car sa face avant est bien passivée et l'absence de l'émetteur sur la face avant diminue les recombinaisons Auger. Nous pouvons signaler que la présence de grilles interdigitées sur la face arrière destinées à récolter les porteurs photogénérés permet également de limiter la courbure du substrat ainsi que la résistance série totale de la cellule. Et ceci tout en facilitant la connexion co-planaire des cellules lors de leur mise en module. Nous pouvons dire que ce genre de cellule caractérise la forme esthétique qui est utile pour la fabrication des toits de maisons.

Les perspectives consistent dans un premier temps à valider la réalisation de ces structures sur un substrat de type n. La seconde étape sera l'étude de l'effet de la passivation de surface avec d'autres oxydes binaires tels que le HfO_2 , ZrO_2 ou La_2O_3 , et ternaires comme le silicate $\text{Hf}_x\text{Si}_{1-x}\text{O}_y$ ou encore l'aluminate de lanthane LaAlO_3 ce qui est visé dans la littérature. Comme nous pouvons développer la cellule MWT en changeant le matériau de métallisation en face avant utilisé (Ag) avec un autre matériau moins coûteux.

Bibliographie

- [1] Thibaut Desrues, « Développement de cellules photovoltaïques hétérojonctions silicium et contacts en face arrière », Ecole Doctorale Matériaux de Lyon, Année 2009.
- [2] Barrouba tani nadéra « Optimisation des paramètres géométriques et physiques de cellules photovoltaïques à contacts arrière interdigités » thèse de doctorat microélectronique, université Abou Bakr Belkaid Tlemcen, 2015.
- [3] Tatsuo Saga, « Advances in crystalline silicon solar cell technology for industrial mass production », review NPG Asia Materials 2,96-102(2010).
- [4] Jan Haschke, et al, « Approach for a simplified fabrication process for IBC-SHJ solar cells with high fill factors » Elsevier, 38 732 – 736, 2013.
- [5] M. Nicolai, M. Zanucoli, G. Paternoster, G. Ceglia, L. Ferrario, P. Bellutti, E. Sangiorgi, C. Fiegna., Numerical simulation and experimental characterization of Emitter Wrap Through solar cells with Deep Grooved Base contact (EWT-DGB) , Energy Procedia , 92 160 – 169(2016).
- [6] N. Guillevin, B.J.B. Heurtault, L.J. Geerligs, A.W. Weeber, « Development towards 20% efficient Si MWT solar cells for low-cost industrial production », A review Energy Procedia 8 (2011) 9–16.

Publications:

Nadjat Benadla, Kheireddine Ghaffour, " Optimizing the performance of photovoltaic cells IBC (interdigitated back contact) by numerical simulation", **IJECE**, Vol.9, No.6, December 2019, pp. 4566~4572 ISSN: 2088-8708, DOI: 10.11591/ijece.v9i6.pp4566-4572.

Communications:

- Nadjat Benadla, Kheireddine Ghaffour,"Optimization of the geometrical and physical parameters of the photovoltaic cell EWT (Emitter Wrap Through) to heterojunction by numerical simulation", Congrès International sur les Energies Renouvelables et le Développement Durable (ERDD-2017) 25 - 26 Février 2017– Tabarka, Tunisie.
- Nadjat Benadla, Kheireddine Ghaffour," Optimizing the performance of photovoltaic cells IBC (contact beak interdigitated) by numerical simulation", 4TH EURO-MEDITERRANEAN CONFERENCE ON MATERIALS AND RENEWABLE ENERGIES,EMCMRE-4,MARRAKECH-MOROCCO,MAY 8-11,2017.

الملخص

تتنبأ استبدال المصادر التقليدية بمصادر الطاقة المتجددة . إذ هناك حاجة إليها لمنع تلوث الهواء والاحتباس الحراري ، حيث أن الطاقة الشمسية هي واحد من هذه المصادر. يتزايد الإنتاج العالمي من الخلايا الكهروضوئية من سنة إلى أخرى ، والهدف الرئيسي في هذا المجال هو تحقيق حل وسط بين تحقيق كفاءة عالية وخفض تكاليف التصنيع. من بين أكثر الخلايا كفاءة التي تهدف إلى تحسين المردود، هناك خلايا التلامس الخلفية المتميزة حيث الميزة الأساسية لهذا النوع من الخلايا هي عدم وجود ملامسات على الوجه الأمامي مما يقلل من معدل التظليل. نحن ندرس ثلاثة هياكل من خلال محاكاة رقمية من خطوتين تنفذ تحت وحدة ATLAS / SILVACO لتحسين المعلمات الهندسية والتكنولوجية الهامة. هذه الخلايا هي IBC (Interdigited Back Contact) و EWT (Emitter Wrap Through) و MWT (Metalization Wrap Through). يتكون هيكل IBC من الركيزة ، و FSF المغلفة بطبقة مقاومة الانعكاس SiN والباعث المتاخمة ل BSF على الوجه الخلفي مغطاة بلامسات أوم. يختلف مفهوم الخلية MWT عن بنية IBC من خلال وجود تقاطع مخدر بشدة في المقدمة ، ويضمن استخدام الليزر المثقب جمع الناقلات من الأمام إلى الخلف ووجود معدنة رقيقة على الوجه الأمامي بين الفتحات. في المقابل ، فإن مفهوم EWT هو حل وسط بين التقنيات السابقة. في هذه الدراسة ، تم استخدام تقنية التغاير المزدوج حيث يعتمد الباعث و BSF على السيليكون غير المتبلور ، في حين أن الركيزة تعتمد على السيليكون متعدد البلورات من النوع p مع عمر ناقلات الأقلية من أجل 6-10 ثانية. سمحت لنا المحاكاة بالحصول على كفاءة تحويل مثالية تبلغ 20.83 % 19.3 % 19.02 % لخلايا IBC و EWT و MWT على التوالي .

الكلمات المفتاحية: الخلية كهروضوئية ، السلكون ، الدمج بين مادة السلكون البلوري و الغير بلوري ، الخلايا الشمسية ذات الاقطاب المعاكسة لا شعة الشمس

IBC(Interdigited Back Contact), MWT(Metalisation Wrap Through), EWP(Emitter Wrap Through).

Résumé

Les sources d'énergie renouvelables tendent à remplacer les sources traditionnelles, car elles sont nécessaires pour prévenir la pollution de l'air et le réchauffement climatique. A ce titre, la production mondiale du photovoltaïque est en voie de développement. En effet, l'objectif majeur dans ce domaine est la réalisation d'un bon compromis entre un rendement optimal et des coûts de fabrication réduits. Parmi les cellules les plus efficaces destinées à améliorer le rendement, sont les cellules à contacts arrière interdigités où l'avantage primordial de ce genre de cellule est l'absence des contacts sur la face avant ce qui réduit le taux d'ombrage. Ce travail consiste à étudier trois structures par simulation numérique à deux dimensions effectuées sous le module ATLAS/SILVACO afin d'optimiser les paramètres géométriques et technologiques importantes. Ces cellules sont : IBC (Interdigited Back Contact), EWT(Emitter Wrap Through) et MWT(Metalization Wrap Through). La structure IBC est constituée d'un substrat, un FSF recouvert d'une couche anti reflet de SiN et un émetteur adjacent à un BSF sur la face arrière recouverte avec des contacts ohmiques. Le concept de la cellule MWT diffère de la structure IBC par la présence d'une jonction fortement dopée à l'avant et l'utilisation d'un laser pour perçage. Ce qui permet d'assurer la collecte des porteurs de la face avant jusqu'à la face arrière. Aussi l'existence d'une fine métallisation sur la face avant entre les ouvertures . En revanche, le concept EWT constitue un compromis entre les deux technologies précédentes. Dans cette étude, la technologie à hétérojonction à été utilisée où l'émetteur et le BSF sont à base du silicium amorphe par contre le substrat est à base de silicium multicristalin de type p avec une durée de vie des porteurs minoritaires de l'ordre de 10^{-6} s. La simulation nous a permis d'obtenir des rendements de conversion optimaux de 20,83% 19,3 % 19,02 % pour les cellules IBC, EWT et MWT respectivement.

Mots clés: Cellule photovoltaïque, Silicium, Hétérojonction, structure interdigitée, IBC(Interdigited Back Contact), MWT(Metalisation Wrap Through), EWP(Emitter Wrap Through).

Abstract

Renewable energy sources are to replace traditional sources. It is needed to prevent air pollution and global warming; such as solar energy. The global production of photovoltaics is increasing from year to year, and the major objective in this area is to achieve a compromise between achieving high efficiency and reducing manufacturing costs. Among the most efficient cells intended to improve the efficiency, are the interdigitated rear contact cells where the primary advantage of this kind of cell is the absence of the contacts on the front face which reduces the shading rate. We study three structures by two-step: numerical simulation carried out under the ATLAS / SILVACO module to optimize important geometric and technological parameters. These cells are IBC (Interdigited Back Contact), EWT (Emitter Wrap Through) and MWT (Metalization Wrap Through). the IBC structure consists of a substrate, an FSF coated with a SiN anti-reflection layer and an emitter adjacent to a BSF on the back face covered with ohmic contacts. The concept of the MWT cell differs from the IBC structure by the presence of a heavily doped junction at the front, and the use of a piercing laser ensures the collection of carriers from the front to the back and the existence of a thin metallization on the front face between the openings. In contrast, the EWT concept is a compromise between the two previous technologies. In this study, the heterojunction technology has been used where the emitter and the BSF are based on amorphous silicon, whereas the substrate is based on p-type multicrystalline silicon with a lifetime of the minority carriers of the order of 10^{-6} s. The simulation allowed us to obtain optimal conversion efficiencies of 20.83% 19.3% 19.02% for the IBC, EWT and MWT cells respectively.

Keyword: Photovoltaic cell, Silicon, heterojunction, interdigitated structure, IBC (Interdigited Back Contact), MWT (Metalisation Wrap Through), EWP (Emitter Wrap Through).