

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

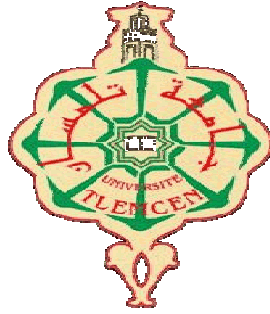
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Electronique

Spécialité : Instrumentation électronique

Par : ABDI Zohir

Sujet

Etude comparative par simulation numérique des cellules photovoltaïques à simple jonction à base de silicium

Soutenu publiquement, le 28 /09 /2017 , devant le jury composé de :

Mr GHAFFOUR Kheireddine	Professeur	Univ. Tlemcen	Président
Mme BERROUBA TANI N.	MCB	Univ. Tlemcen	Directeur de mémoire
Mme BOUAZZA Ahlem	Professeur	Univ. Tlemcen	Examineur 1

Table des matières

Introduction générale	1
------------------------------------	---

Chapitre I

Notion fondamentales sue le silicium

Introduction	4
I.1. Structure cristalline et structure amorphe	4
I.1.1. Etat amorphe	4
I.1.2 Etat cristallisé	5
<i>I.1.2.1 Des monocristaux :</i>	5
<i>I.1.2.2 Poly-cristaux :</i>	5
II.2. Production de silicium de qualité électronique	5
I.2.1 Extraction du silicium a partir de la silice :.....	6
I.2.2 Purification du silicium	7
I.3. Différents types de silicium	8
I.3.1 Le silicium cristallin.....	8
<i>I.3.1.1 Production du silicium cristallin :</i>	8
<i>I.3.1.2 Préparation des plaquettes de silicium cristallin</i>	11
I.3.2 Le silicium amorphe.....	15
<i>I.3.2.1 Définition du silicium amorphe hydrogéné :</i>	15
<i>I.3.2.2 Propriétés électroniques du silicium amorphe :</i>	15
<i>I.3.2.3 Particularités :</i>	17
<i>I.3.2.4 Applications</i>	18
I.4. Application de silicium en photovoltaïque	19
I.4.1 Pourquoi le Silicium.....	21
Conclusion	22

Chapitre II

Etude d'une cellule photovoltaïque en silicium

Introduction	24
II.1 le rayonnement solaire et effet photovoltaïque	24
II.1.1. Rayonnement et spectre solaire	24
<i>II.1.1.1 . Rayonnement solaire</i>	24
II.1 .2 Effet photovoltaïque.....	27
<i>II.1.2.1. L'énergie photovoltaïque</i>	27
<i>II.1.2.2. Principe de l'effet photovoltaïque</i>	27
<i>II.1.2.3. Avantages du photovoltaïque</i>	28

II.1.2.4. Inconvénient du photovoltaïque	29
II.2. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	29
II.2.1. L'interaction photon /semi-conducteur	29
II.2.2 Différentes formes de recombinaison des porteurs	31
II. 2.2.1 Recombinaisons volumiques	31
II.2.3 La jonction p/n:	35
II.3. Les caractéristiques et propriétés électriques des cellules photovoltaïques	37
II.3.1 Schéma électrique équivalent	37
II.3.2 Paramètres physiques d'une cellule photovoltaïque	39
II. 3.2.1 Tension en circuit ouvert (V_{co})	40
II. 3.2.2 Densité de courant en court-circuit (J_{cc})	41
II.3.2.3 Puissance débitée P	41
II.3.2.4 Facteur de forme (FF)	42
II.3.2.5 Rendement de conversion (η)	43
II.3.3. Rendement quantique et réponse spectrale	44
II.3.3.1 Rendement quantique	44
II.3.3.2 La réponse spectrale	45
II.4. Les Techniques pour diminuer des pertes de rayonnements	46
II.4.1 Texturation	46
II. 4.2 Couche antireflet (CAR)	47
II.5. La cellule photovoltaïque industrielle en silicium cristallin	48
II.5.1 la structure de cellules photovoltaïques industrielles :	48
II.5.2. Les types de cellules photovoltaïques à jonction P-N à base de silicium	49
II.5.2.1. Le procédé industriel de Fabrication d'une cellule solaire en silicium cristallin ..	50
II.5.2.2. Cellules en silicium	52
II.5.2.3 Cellules au silicium amorphe :	53
Conclusion	53

Chapitre III

Simulation des cellules photovoltaïques à homojonction en silicium

Introduction :	55
III.1. Simulation des cellules solaires à jonction PN avec différents types de silicium:	55
III.1.1. Présentation de logiciel utilisé :	55
III.1.2. Présentation des paramètres utilisés à la simulation des différentes structures à homojonction:	55
III.1.3. Présentation des structures à simuler :	56
III.1.4. Simulation de la cellule à homojonction (silicium cristallin(n)/silicium cristallin(p)) :	58
III.1.4.1. Résultats de la simulation à l'aide de PC1D	58

III.1.4.2. Réponse spectrale de la cellule solaire à homojonction (silicium cristallin (n) /silicium cristallin(p)) :	65
III.1.5. Simulation de la cellule à jonction PN (silicium polycristallin(n)/silicium polycristalli(p)) :	67
III.1.5.1. Résultats de la simulation à l'aide de PC1D (émetteur et base en silicium poly cristallin poly-Si) :	67
III.1.5.2. Réponse spectrale de la cellule solaire à jonction PN en silicium polycristallin) :	71
III. 2. Etude expérimentale de la cellule solaire à jonction pn en silicium amorphe	71
III.2.1. Analyse de la caractéristique I(V):	71
III.2.2. la Réponse spectrale :	72
III. 3. Résultats de simulation de la variation de l'épaisseur d'émetteur où de substrat de la cellule à jonction PN (Al/ITO/ silicium amorphe(n) / silicium amorphe(p)/BSF/Al)	73
III.3.1. Etude de l'influence de l'épaisseur de l'émetteur n+(silicium amorphe) :	73
III.3.1.1. Influence de l'épaisseur de l'émetteur amorphe sur la tension en circuit ouvert V_{co} :	74
III.3.1.2. Influence de l'épaisseur de l'émetteur sur la densité de courant J_{cc} :	74
III.3.1.3. Influence de l'épaisseur de l'émetteur sur le facteur de forme FF % :	75
III.3.1.4. Influence de l'épaisseur de l'émetteur sur le rendement η :	76
III.3.2. Etude de l'influence de l'épaisseur de substrat de type (p) (silicium amorphe(p)) :	76
III.3.2.1. Influence de l'épaisseur de substrat amorphe type (p) sur la tension en circuit ouvert V_{co} :	77
III.3.2.2. Influence de l'épaisseur de substrat amorphe type (p) sur la densité de courant J_{cc} :	77
III.3.2.3. Influence de l'épaisseur de substrat amorphe type p sur le facteur de forme FF %:	78
III.3.2.4. Influence de l'épaisseur de substrat amorphe type p sur le rendement η :	79
III.4. Résultats de simulation de la variation de dopage d'émetteur où de substrat de la cellule à jonction pn (silicium cristalin (n) / silicium cristalin (p)) :	79
III.4.1. Etude de l'influence de la variation de dopage de l'émetteur (n) et du substrat (p) (silicium cristalin).	80
III.4.1.2. Influence de dopage de l'émetteur et de substrat sur la densité de courant J_{cc} :	81
III.4.1.3. Influence de dopage de l'émetteur et de substrat sur le rendement η dans la cellule du silicium cristalin :	82
III.4.1.4 Influence de la variation de dopage de substrat et de l'émetteur de silicium cristalin Sur le facteur de forme FF(%) :	83
III.4.1.5. Influence du dopage de l'émetteur et de substrat de la cellule solaire poly cristalin sur la densité de courant J_{cc} :	84
III.4.1.6. Influence de dopage de l'émetteur(n) et substrat (p) , poly cristalin sur la tension V_{co} :	85
III.4.1.7. Influence de dopage de l'émetteur type n et de substrat poly cristalin type p sur le rendement η :	86

III.5. Résultats de simulation de la variation de dopage de l'émetteur et de substrat , de la cellule à jonction pn silicium amorphe	86
III.5.1. Influence de dopage p et n sur la tension en circuit ouvert V_{co} : (silicium amorphe) ..	87
III.5.2. Influence de dopage de l'émetteur type n et de substrat amorphe type p sur le courant de court circuit J_{cc} :	88
III.5. 3. Influence de dopage de l'émetteur type n et de substrat amorphe type p sur le rendement η :	89
Conclusion :	89
Conclusion générale	91
Bibliographie	94
Annexe	98

Liste des figures

Figure I. 1 : <i>Représentation schématique de la structure cristalline du silicium (a) et de la structure amorphe du silicium (b).</i>	4
Figure I. 2: <i>Production des plaquettes de silicium de qualité électronique</i>	6
Figure I. 3 : <i>Représentation schématique du four</i>	6
Figure I. 4 : <i>Méthode de Czochralski</i>	9
Figure I. 5 : <i>Des lingots de silicium monocristallin.</i>	9
Figure I. 6 : <i>Silicium monocristallin</i>	10
Figure I. 7 : <i>Fabrication de lingots de Si polycristallin</i>	10
Figure I. 8 : <i>Silicium multicristallin</i>	11
Figure I. 9 : <i>Utilisation d'une scie annulaire diamantée</i>	12
Figure I. 10 : <i>Principe d'une scie à fils pour le découpage des substrats de silicium</i>	13
Figure I. 11 : <i>Tirage d'un ruban de silicium en filière</i>	14
Figure I. 12 : <i>Représentation schématique de la structure cristalline du silicium (a) et (b) la structure amorphe du silicium. ○ hydrogène ● Silicium(b)</i>	15
Figure I. 13 : <i>Diagrammes de bande du silicium amorphe hydrogéné et du silicium cristallin</i> ...	17
Figure I. 14 : <i>Répartition de la production mondiale (en watt-crête) de modules photovoltaïques suivant les différentes filières, en 2015.</i>	19
Figure II. 1 : <i>Définition de la norme AM_m.</i>	26
Figure II. 2 : <i>Représentation graphique des spectres AM0 et AM1.5 Le domaine spectral utile aux cellules en silicium est mis en évidence.</i>	27
Figure II. 3 : <i>Transitions inter-bandes d'électrons dans un semi-conducteur. Le cas a) correspond à un semi-conducteur à gap direct, le cas b) à un gap indirect</i>	30
Figure II. 4 : <i>Schema de recombinaison en volume (SRH)</i>	32
Figure II. 5 : <i>Schema de recombinaison Auger</i>	33
Figure II. 6 : <i>schema de recombinaison radiative</i>	34
Figure II. 7 : <i>Structure (image gauche) et diagramme de bande (image droite) d'une cellule photovoltaïque. Les dimensions respectives des différentes zones ne sont pas respectées.</i>	36
Figure II. 8 : <i>Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle</i>	38
Figure II. 9 : <i>Caractéristiques I=f(V) sous obscurité et sous éclairément d'une cellule photovoltaïque.</i>	40
Figure II. 10 : <i>Caractéristique I(V) pour plusieurs valeurs de résistance série</i>	42
Figure II. 11 : <i>Rendement quantique externe d'une cellule photovoltaïque</i>	45
Figure II. 12 : <i>Schéma comparatif des phénomènes de réflexion sur surfaces plane et texturée</i> ..	46
Figure II. 13 : <i>L'introduction d'une couche mince entraîne la division d'amplitude de l'onde incidente, conduisant à des phénomènes d'interférences entre les rayons réfléchis.</i>	48

Figure II. 14 :Structure d'une cellule photovoltaïque industrielle en silicium	49
Figure II. 15 : Cellule photovoltaïque à base de silicium poly cristallin.....	52
Figure II. 16 :Cellule photovoltaïque à base de silicium monocristallin.	52
Figure III. 1: Structure des cellules solaires à homojonction des trois cas à simulé à l'aide de PCID.....	57
Figure III. 2: Structure des cellules solaires à homojonction des trois à cas simulé à l'aide de PCID.....	57
Figure III. 3: Effet de l'épaisseur de la couche émetteur cristallin (n) et de la couche intrinsèque dans une cellule a jonction PN sur la tension (V_{co}).....	58
Figure III. 4: Effet de l'épaisseur de la couche émetteur cristallin (n) et de la couche intrinsèque dans une cellule a jonction PN sur la densité de courant (J_{cc})	59
Figure III. 5: Effet de l'épaisseur de la couche émetteur cristallin(n) et de la couche intrinsèque dans une cellule a homojonction PN sur le facteur de forme (FF %).	60
Figure III. 6: Effet de l'épaisseur de la couche émetteur cristallin (n) et de la couche intrinsèque dans une cellule a homojonction PN sur le rendement (η)	61
Figure III. 7: Effet de l'épaisseur de la base (p) et de la couche intrinsèque dans une cellule a jonction PN sur la tension (V_{co}).....	62
Figure III. 8: Effet de l'épaisseur de base (p) cristallin et de la couche intrinsèque dans une cellule a jonction PN sur la densité de courant (J_{cc}).....	63
Figure III. 9: Effet de l'épaisseur de base cristallin (p) et de la couche intrinsèque dans une cellule a homojonction PN sur le rendement (η).....	64
Figure III. 10: Effet de l'épaisseur de la couche base cristallin(p) et de la couche intrinsèque dans une cellule a homojonction PN sur le facteur de forme (FF %).	65
Figure III. 11: EQE spectre solaire d'une cellule à jonction PN en fonction de l'épaisseur de la couche n (couche émetteur) d_{ni} (1,,5,10,15,20,25,30,40,50 et 60 nm).	66
Figure III. 12: EQE spectre d'une cellule a jonction PN en fonction de l'épaisseur de la couche i (couche intrinsèque) d_i (1,3,5,10 et 15 nm). Ces courbes sont calculées à partir de Pc1D.....	66
Figure III. 13: Effet de l'épaisseur de la couche émetteur poly cristallin (poly-Si)(n) et de la couche intrinsèque dans une cellule a jonction PN sur le (V_{co})	67
Figure III. 14: Effet de l'épaisseur de la couche émetteur poly cristallin (poly-Si)(n) et de la couche intrinsèque dans une cellule a jonction PN sur la densité de courant (J_{sc})	68
Figure III. 15: Effet de l'épaisseur de la couche émetteur poly cristallin (poly-Si)(n) et de la couche intrinsèque dans une cellule a jonction PN sur le facteur de forme (FF %)	69
Figure III. 16: Effet de l'épaisseur de la couche émetteur poly cristallin (poly-Si)(n) et de la couche intrinsèque dans une cellule a jonction PN sur le (η).....	70

Figure III. 17: EQE spectre d'une cellule a jonction pn en polycristallin d_{ni} (0.3,0.4,0.5,0.6,0.7,0.8,0.9,1.5 et 2 μm). Ces courbes sont calculées à partir de Pc1D.....	71
Figure III. 18: La caractéristique $I(V)$ de la cellule solaire a jonction pn en silicium amorphe (silicium amorphe(n) / silicium amorphe(p)).	72
Figure III. 19: EQE spectre d'une cellule a jonction pn en fonction de l'épaisseur de la couche n (couche émetteur) de silicium amorphe d_{ni} (0.3,0.4,0.5,0.6,0.7,0.8,0.9,1,1.5,et 2 μm). Ces courbes sont calculées à partir de PC1D	73
Figure III. 20: Effet de l'épaisseur de la couche émetteur de silicium amorphe (a-Si)(n) sur la tension en circuit ouvert (V_{co}), dans une cellule a jonction pn	74
Figure III. 21: Effet de l'épaisseur de la couche émetteur de silicium amorphe (a-Si)(n) sur la densité de courant (J_{cc}), dans une cellule a jonction pn.....	74
Figure III. 22: Effet de l'épaisseur de la couche émetteur de silicium amorphe (a-Si)(n) sur le facteur de forme (FF %), dans une cellule a jonction pn	75
Figure III. 23: Effet de l'épaisseur de la couche émetteur de silicium amorphe (a-Si)(n) sur le rendement (η), dans une cellule a jonction pn	76
Figure III. 24: Effet de l'épaisseur de substrat type p sur la tension en circuit ouvert (V_{co}), dans une cellule a jonction pn	77
Figure III. 25: Effet de l'épaisseur de substrat type p sur La densité de courant (J_{sc}), dans une cellule a jonction pn	77
Figure III. 26 : Effet de l'épaisseur de substrat type p sur le facteur de forme (FF %), dans une cellule a jonction pn	78
Figure III. 27: Effet de l'épaisseur de substrat type p sur le rendement (η), dans une cellule amorphe a jonction pn.....	79
Figure III. 28: Effet de dopage de l'émetteur (a),et du dopage de substrat (b) (silicium cristalin) sur la tension (V_{co}), dans une cellule a jonction pn	80
Figure III. 29: Effet de dopage de l'émetteur (a),et l'effet de substrat (b) (silicium cristalin) sur la densité de courant (J_{cc}) dans une cellule a jonction pn.....	81
Figure III. 30: Effet de dopage de l'émetteur (a) ,et l'effet de dopage de substrat (b) (silicium cristalin) sur rendement η dans une cellule a jonction pn	82
Figure III. 31: Effet de dopage de l'émetteur (a),et l'effet de substrat (b) (silicium cristalin) sur la densité de courant (J_{cc}) dans une cellule a jonction pn.....	83
Figure III. 32: Effet de dopage de l'émetteur (a),et l'effet de substrat (b) (silicium cristalin) sur la densité de courant (J_{cc}) dans une cellule a jonction pn dans une cellule a jonction pn.....	84
Figure III. 33: Effet de dopage de l'émetteur type n (a),et dopage de substrat type p (b) , sur la tension de circuit ouvert (V_{co}), dans une cellule a jonction pn	85

Figure III. 34: Effet de dopage de l'émetteur (a) ,et de substrat sur le rendement η , dans une cellule jonction pn poly cristalin	86
Figure III. 35: Effet de dopage de l'émetteur (a),et du dopage de substrat (b) (silicium amorphe) sur la tension (V_{co}), dans une cellule a jonction pn	87
Figure III. 36: Effet de dopage de l'émetteur (a),et l'effet de substrat (b) (silicium amorphe) sur la densité de courant (J_c) dans une cellule a jonction pn dans une cellule a jonction pn.....	88
Figure III. 37: Effet de dopage de l'émetteur (a),et l'effet de substrat (b) (silicium amorphe) le rendement (η) dans une cellule a jonction pn	89

Liste des tableaux

Tableau III. 1 <i>Tableau III.1. : Les paramètres physiques, utilisés comme données pour la simulation [Obtenue a partir d'un livre]</i>	56
--	----

Remerciement

Nous remercions ALLAH le Tout-puissant de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail.

Ce travail a été effectué dans la faculté des sciences, sous la direction de Madame , **BERROUBA-TANI NADERA** Maîtres de conférences à l'Université Abou Bekr Belkaïd-Tlemcen.

Nous lui exprimons particulièrement toutes nos reconnaissances pour nous avoir fait bénéficier de ces compétences scientifiques, ses qualités humaines et sa constante disponibilité.

Nous exprimons nos sincères remerciements à Monsieur: **KHEIREDIMNE GHAF FOUR** Professeur à l'Université Abou Bekr Belkaïd- Tlemcen, d'avoir accepté de présider le Jury de ce mémoire.

Nous remercions sincèrement Madame **BOUAZZA Ahlem** Professeur à l'Université Abou Bekr Belkaïd- Tlemcen, d'avoir accepter d'être examinateur de ce travail.

A toutes celles et ceux qui ont contribué au bon déroulement de ce travail, et qui nous ont apporté leurs connaissances, qu'ils trouvent ici nos remerciements les-plus vifs.

Enfin, tous nos remerciements, nos reconnaissances et notre gratitude vont à nos très chers parents et à notre précieuse familles pour leurs soutient indéfectibles, sans oublier nos amis (es).

Dédicace

A mes parents

A mes frères et sœurs

A ma famille

A tous ceux et celles qui me sont chères.

Introduction générale

Introduction générale

Le développement des énergies renouvelables représente un défi majeur actuellement. En effet, la consommation mondiale d'électricité n'a cessé d'augmenter ces dernières décennies.

La production mondiale d'énergie actuelle est constituée à 80% d'énergie fossiles (pétrole, charbon, gaz) et fissiles (nucléaire).[1]

Dans le cas des énergies d'origines fossile se pose tout d'abord le problème de l'approvisionnement. S'ajoute à cela la question du rejet massif de CO₂ lié à la combustion de ces matières premières, qui devient de plus en plus inquiétante puisque ce gaz à effet de serre contribue au réchauffement climatique. [1]

D'où la nécessité de trouver de nouvelles sources d'énergie comme les énergies renouvelables qui sont des dérivées des sources naturelles : le soleil, le vent, et la force de l'eau. Par exemple l'énergie photovoltaïque qui est la conversion directe de l'éclairement solaire en électricité, possède un potentiel énorme. En effet, l'énergie du rayonnement solaire sur la terre est (de l'ordre de 1000 W. m⁻²).[2]

Alors le principe d'une cellule photovoltaïque repose sur la conversion d'une énergie lumineuse en énergie électrique utilisable est basé sur les trois mécanismes suivants :

- L'absorption des photons par le matériau constitue la cellule.
- La conversion en énergie électrique, c'est-à-dire la création de paires électron /trou dans le matériau.
- La collecte des porteurs générés dans un circuit électrique extérieur.[3]

Le matériau le plus utilisé et industrialisé depuis 50 ans dans la fabrication de cellules photovoltaïque est le silicium cristallin (80% de la production mondiale). Ce dernier présente en effet de nombreux avantages (abondance sur terre, bas prix, non toxicité, dopage facile ...) Les cellules produites industriellement atteignent des rendements de conversion de 15% en moyenne (modules à 11-12%). Au laboratoire les meilleurs rendements atteints sont de l'ordre de 25% avec du silicium monocristallin. [4]

Cependant, leurs performances restent inférieures aux cellules en silicium cristallin et la fiabilité des panneaux mérite encore d'être améliorée.[4]

L'objectif de ce travail est l'étude comparatif par simulation numérique de l'effet du dopage et des épaisseurs sur les caractéristiques électriques des trois types des cellules photovoltaïque (monocristallin, poly cristallin, et amorphe).[

Nous avons utilisé logiciel de simulation PC1d pour simuler les trois cellules (cristallin, poly cristallin et amorphe) et nous avons déterminer : courant de court circuit (J_{cc}) la tension en circuit ouvert (V_{co}) , le rendement de conversion (η) ,le facteur de forme (FF) ,et le rendement quantique (EQE).

Cette étude comporte trois chapitres en plus d'une introduction et d'une conclusion générale.

➤ Dans le premier chapitre, nous présentons les notions fondamentales sur le silicium pour l'exploitation photovoltaïque, ainsi que les différentes structures des types de silicium, les étapes et les méthodes de fabrication des cellules photovoltaïque.

➤ Dans le deuxième chapitre, nous présentons : les caractéristiques et les paramètres électriques d'une cellule photovoltaïque, ainsi que les principes de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque, les techniques pour diminuer les pertes de rayonnement, et la cellule photovoltaïque industrielle en silicium cristallin avec sa structures et ces procédé de fabrication.

➤ Dans le troisième chapitre nous présentons le logiciel de simulation **PC1d** et comment l'utiliser pour calculer par simulation numérique les caractéristiques électriques déjà mentionnée : le (J_{cc}), (V_{co}), (η), (FF) et le (EQE), pour les trois types de cellules du silicium (monocristallin, poly cristallin et amorphe).Les résultats de simulation obtenus seront également présentés sur des courbes dans le même chapitre.

Chapitre I
Notions fondamentales
sur le silicium

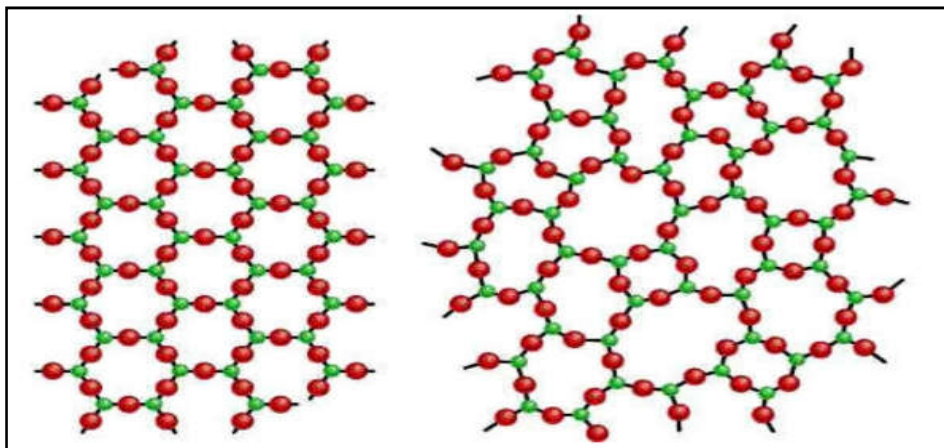
Introduction

Le silicium fut découvert en 1824 en Suède [5], c'est l'élément le plus abondant de la terre après le carbone, non toxique, on le trouve généralement sous forme de silicate dans de nombreuses roches, argiles et terres.

Il est possible de le produire avec un haut degré de pureté [6]. Comme matériau de base, ce dernier reste le mieux placé pour un développement des cellules photovoltaïques à large échelle, beaucoup d'efforts sont investis actuellement dans l'augmentation des capacités et de production de silicium de qualité électronique. Pour atteindre ce but nous devons en premier lieu faire une étude élargie sur ce matériau exploité

I.1. Structure cristalline et structure amorphe

Suivant les conditions dans lesquelles la matière condensée s'est formée, elle peut prendre deux états solides différents :



(a)  Atome de silicium (b)  Atome d'oxygène

Figure I.1 : Représentation schématique de la structure cristalline du silicium (a) et de la structure amorphe du silicium (b). [7]

I.1.1. Etat amorphe

Si les atomes sont disposés aléatoirement, les solides amorphes sont généralement appelés des verres et considérés comme des liquides de haute viscosité.

I.1.2 Etat cristallisé

Caractérisé par un arrangement régulier et périodique et bien défini des atomes. Les solides cristallisés peuvent former :

I.1.2.1 Des monocristaux :

Si la périodicité est invariable, continue et uniforme dans tout le volume.

I.1.2.2 Poly-cristaux :

S'il existe une périodicité locale et que le solide est composé d'un ensemble de grains cristallins de taille à peu près uniforme. Le résultat est un ensemble ordonné, ou localement ordonné, des noyaux d'atomes et d'électrons liés entre eux par des forces principalement coulombiennes.

II.2. Production de silicium de qualité électronique

Le silicium représente près de 28 % de la croûte terrestre. Cependant il n'existe pas à l'état massif, mais sous forme d'oxydes « la silice ou de silicates ». Grâce au développement de l'industrie microélectronique, les propriétés et les procédés de transformation du silicium sont assez bien connus : l'Oxyde naturel (SiO_2) présente d'excellentes propriétés isolantes et passivant. Son seul véritable inconvénient est son gap indirect à 1,1 eV qui entraîne une absorption du rayonnement plus faible [8], notons que la silice contenue dans le quartz est la plus utilisée dans l'industrie photovoltaïque.

La production de silicium par la réduction de la silice, sa purification et l'élaboration des lingots dans lesquels seront ensuite découpées en des plaquettes nécessitent des étapes attentives voir (Figure I.2)

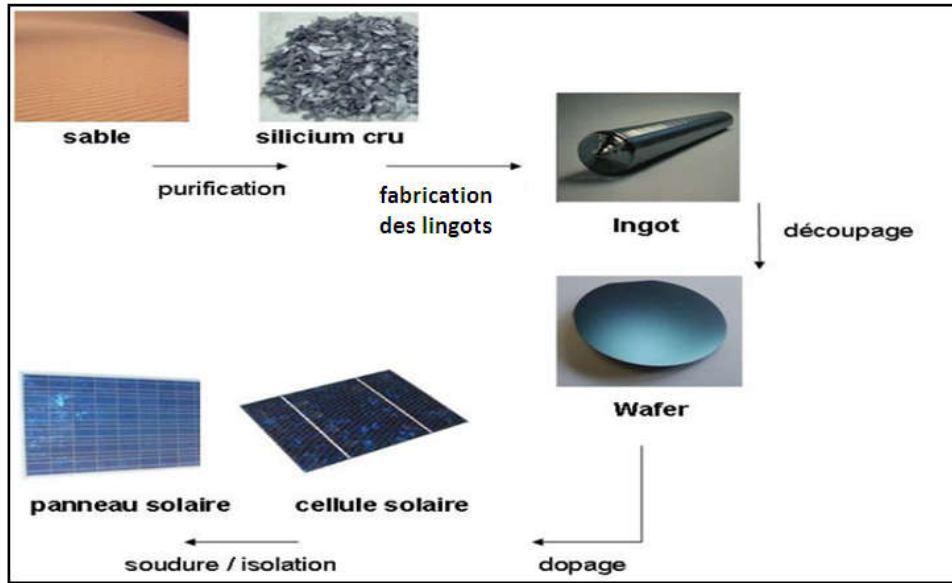


Figure I. 2: Production des plaquettes de silicium de qualité électronique [9]

I. 2.1 Extraction du silicium à partir de la silice :

Le silicium n'existe pas à l'état pur dans la nature. Le silicium (Si) est donc extrait de la silice (SiO_2) grâce à la réaction chimique simplifiée suivante :

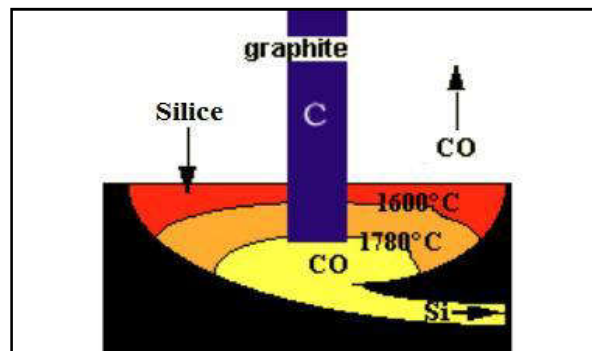
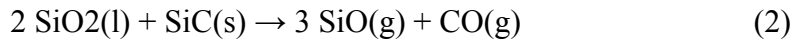


Figure I. 3 : Représentation schématique du four [10]

Cette réaction se réalise dans un four à arc car elle nécessite de faire fondre la silice. La température du four peut atteindre 3 000 °C. La puissance du four peut aller jusqu'à 30 MW, afin d'enclencher les réactions chimiques. En réalité, la réaction de réduction de la silice en silicium résulte d'un grand nombre de réactions chimiques intermédiaires.

On peut schématiquement décomposer le four électrique en deux zones : une zone inférieure chaude où la température dépasse 1800 °C et une zone supérieure plus froide.

Dans la zone chaude, on a les réactions suivantes :



Et dans la zone froide :



Après cette opération, le silicium est obtenu sous forme liquide. Sa pureté est de 98 %. Il faut le purifier encore de plusieurs ordres de grandeur afin d'obtenir un matériau adéquate pour les applications photovoltaïques.

I.2.2 Purification du silicium

Le silicium de qualité électronique exige une grande pureté. Il s'agit, en partant du silicium métallurgique, de faire une purification chimique. De nombreux procédés ont été développés par les différents producteurs mondiaux de silicium. Il existe de nombreuses techniques de purification.

On va effectuer une purification chimique, une des méthodes qui consiste à faire une distillation à partir de SiHCl_3 (trichlorosilane) liquide à température ambiante



Le rendement de la réaction est égal à 90%, on a effectué une première purification car des précipités chlorures ne se mélangent pas au trichlorosilane. Puis SiHCl_3 (qui a une température d'ébullition faible (31.8°C) est purifié par distillation fractionnée, il est plus volatil que les chlorures des principales impuretés. Ce trichlorosilane purifié est ensuite réduit pour redonner du silicium.



Après la distillation, les impuretés actives sont réduites, le silicium est alors de bonne qualité électronique, donc le silicium obtenu est pur (intrinsèque) et doit maintenant subir un double traitement à la fois d'enrichissement en matériau dopant afin d'en faire du silicium extrinsèque de type p ou n comportant une proportion d'une impureté connue, et d'obtenir de

plus un monocristal convenablement orienté. En effet, le silicium précédemment obtenu était polycristallin ; il y a nécessité de le transformer en monocristallin pour améliorer sa conductivité. Cette opération est réalisée dans un four à tirage selon la procédure de Czochralski.

I.3. Différents types de silicium

Le silicium utilisé pour les cellules photovoltaïques doit être d'une grande pureté, quel que soit sa forme. Le silicium existe sous différentes structures, dont les deux extrêmes sont respectivement l'état amorphe et l'état cristallin (monocristallin ou multicristallin). La filière du silicium massif (matériau cristallin) et la filière du silicium en couches minces (matériau désordonné).

I.3.1 Le silicium cristallin

I.3.1.1 Production du silicium cristallin :

On obtient le silicium cristallin par un refroidissement lent de silicium fondu [11]. Cette opération se fait dans une atmosphère gazeuse contrôlée pour éviter de réintroduire des impuretés. Avant la solidification, on dope le silicium en incorporant une quantité précise de phosphore (pour le dopage n) ou de bore (pour le dopage p). La solidification doit se faire progressivement. Le processus contribue aussi à la purification du silicium : les impuretés ont tendance à se rassembler dans la zone qui reste liquide. On peut donc déclasser le liquide résiduel ou la partie solidifiée en dernier lieu. En fait, lorsque la cristallisation est faite dans le cadre de l'industrie de l'électronique, la partie déclassée peut servir de matériau de départ pour l'industrie des cellules solaires. Dans ce cas, le matériau de départ est déjà dopé.

Il existe deux types de technique de cristallisation, selon que l'on veut produire du silicium mono ou poly-cristallin.

I.3.1.1.1 Procédé de Czochralski pour la fabrication de silicium monocristallin :

Pour produire du silicium monocristallin, on utilise la même technique que dans l'industrie des composants électroniques. Le silicium est placé dans un creuset de quartz et maintenu liquide à l'aide d'éléments chauffants. Lorsque la surface est à la température limite de solidification, on y plonge un germe monocristallin. Le silicium se solidifie sur ce germe selon la même orientation cristallographique. [12][13] On tire lentement le germe vers le haut,

avec un mouvement de rotation, tout en contrôlant minutieusement la température et la vitesse. (La vitesse de tirage est de l'ordre de 4 cm/heure)

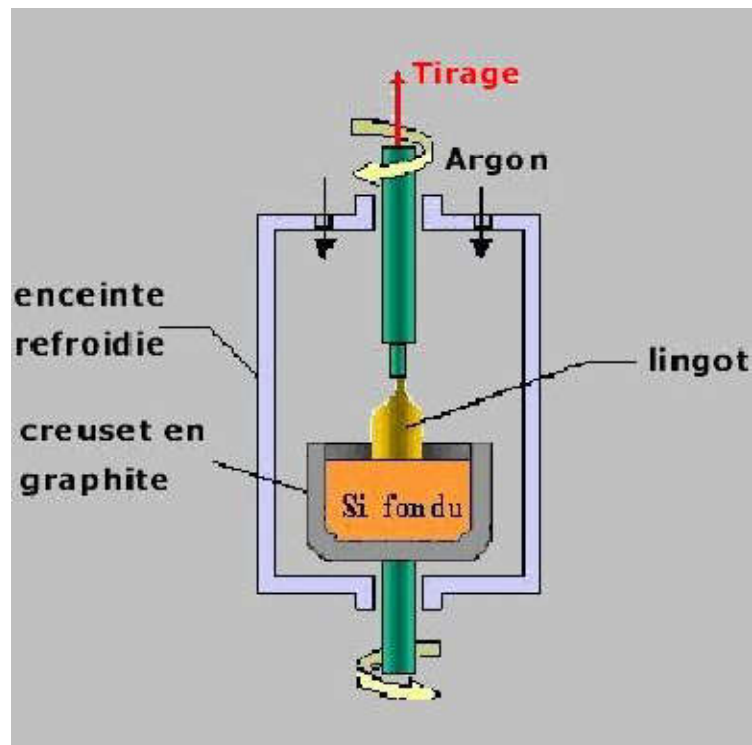


Figure I. 4 : Méthode de Czochralski [10]

La figure 5 présente des lingots de Si monocristallin obtenus par la méthode Czochralski [9]



Figure I. 5 : Des lingots de silicium monocristallin. [9]

Le silicium monocristallin a l'avantage des meilleures performances en termes de rendement sous un éclairage direct, de l'ordre de 15 à 16 %. En revanche, le silicium

monocristallin a un coût de production élevé aussi, ces performances se réduisent dès lors que les conditions d'ensoleillement se dégradent [14].



Figure I. 6 : *Silicium monocristallin* [7]

Donc la réalisation de nombreux dispositifs comme les cellules solaires commence par la production d'une matière monocristalline de grande pureté.

I.3.1.1.2 Procédés de fabrication du silicium polycristallin (multicristallin)

Si on se contente de silicium polycristallin, une méthode possible consiste à utiliser un four semblable à celui, ci-dessus, mais avec un creuset de forme parallélépipédique (souvent à base carrée). On refroidit le creuset par le bas, par exemple en le faisant descendre progressivement hors de l'élément chauffant, comme indiqué à la figure ci-dessous.

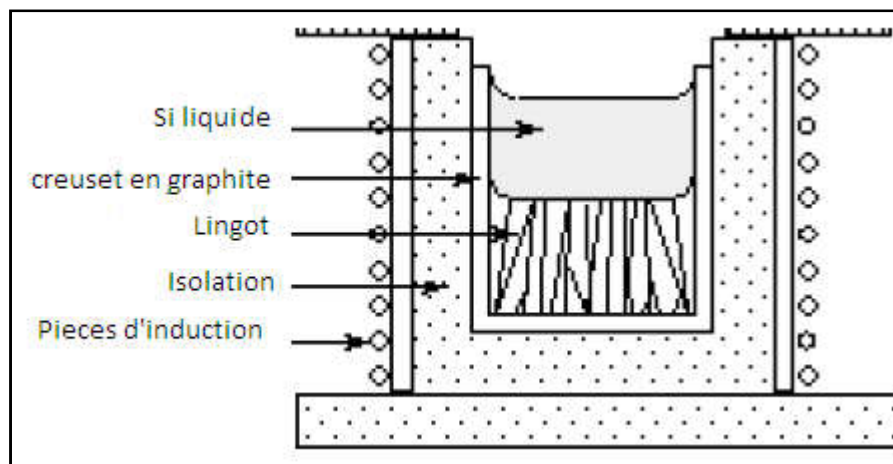


Figure I. 7 : *Fabrication de lingots de Si polycristallin* [10]

Une méthode moins coûteuse consiste à couler le silicium liquide dans des conteneurs en graphite réutilisables [8]. Le refroidissement se fait par toute la surface interne du conteneur. La régularité de la colonne des grains est moins bonne que dans le cas précédent. Donc, contrairement au précédent, le procédé technologique provoqué pendant le refroidissement consécutif à la fusion, c'est la formation de plusieurs cristaux de silicium. La cellule photovoltaïque produite par cette filière se singularise par un aspect bleu électrique non uniforme, laissant apercevoir les motifs créés par les divers cristaux.



Figure I. 8 :*Silicium multicristallin* [7]

Donc le refroidissement directionnel d'une masse de silicium en fusion peut réaliser d'un seul coup un lingot de grandes dimensions. Le lingot obtenu est composé de plusieurs gros cristaux, séparés par des joints de grain. Ce matériau, moins homogène que le silicium monocristallin, a de ce fait un rendement énergétique légèrement moins bon (13%) et moins coûteux dans le commerce ; mais sa fabrication est plus facile. Ces lingots de silicium multicristallin doivent être eux aussi coupés en tranches de 200 à 500 mm, grâce cette fois-ci à une scie à fil.

1.3.1.2 Préparation des plaquettes de silicium cristallin

I.3.1.2.1 Orientation et découpage

Les blocs de silicium mono ou poly-cristallin doivent être découpés en tranches de 200 à 500 microns d'épaisseur [15]. Si le bloc a été réalisé par la méthode de Czochralski, on obtient ainsi des disques. Ceux qui sont destinés à la fabrication de cellules solaires sont souvent découpés pour obtenir une forme plus carrée (mais avec des angles arrondis, résultat

d'un compromis entre le désir de ne pas avoir trop de chutes et celui de pouvoir disposer les cellules côte à côte sans perdre de place). On peut aussi fabriquer des cellules rondes.

Au contraire, les lingots polycristallins sont d'abord découpés en bloc parallélépipédiques puis en substrats parfaitement rectangulaires.

De plus, le nombre de cellules produites n'est pas inversement proportionnel à l'épaisseur des tranches parce qu'il faut tenir compte de l'épaisseur du trait de scie.

Alors on enlève les deux bouts du lingot du four de croissance ou le bout supérieur qui sert à constituer le germe monocristallin pour une autre croissance et le bout inférieur qui possède une concentration d'impureté plus importante. Le lingot doit être parfaitement rond ; c'est la cause pour laquelle on le rectifie au bon diamètre sur un tour. L'orientation cristalline du lingot est déterminée grâce à un appareil aux rayons X. A savoir que cette orientation est nécessaire pour les étapes de fabrication. Un monocristal se coupe le long d'un de ses plans réticulaires. L'orientation utilise les indices de Miller.

I.3.1.2.2 Découpage et polissage

La technique de découpe traditionnelle utilisait une scie annulaire diamantée (voir **Figure I.9**)

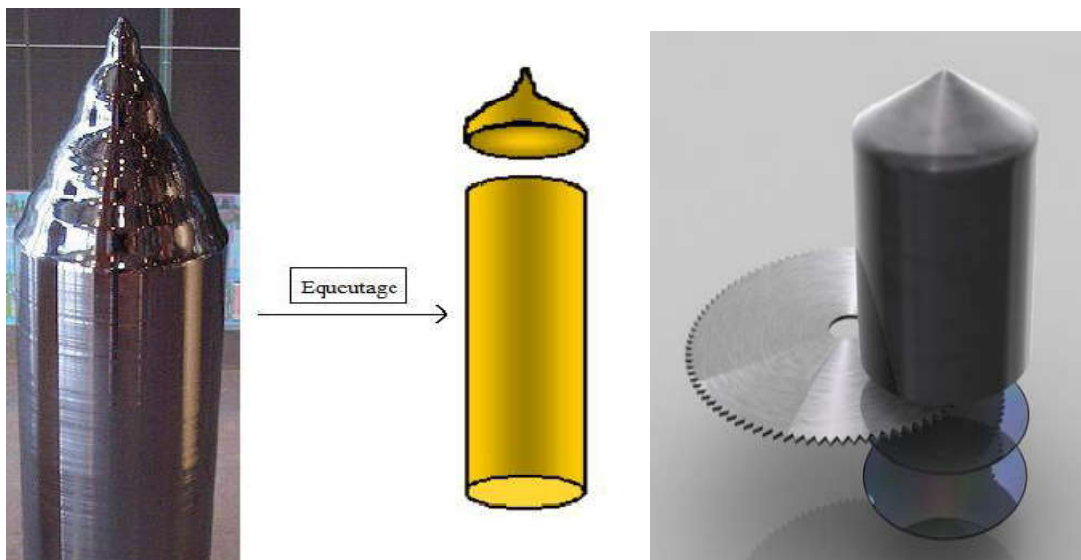


Figure I. 9 :Utilisation d'une scie annulaire diamantée [10]

Actuellement, on utilise une "scie à fils". C'est un fil d'acier d'environ 180 microns de diamètre et 150 km de longueur. Il progresse à une vitesse de 10 cm/s et est enroulé de façon à pouvoir découper jusqu'à 400 substrats en même temps (voir **Figure I.10**).

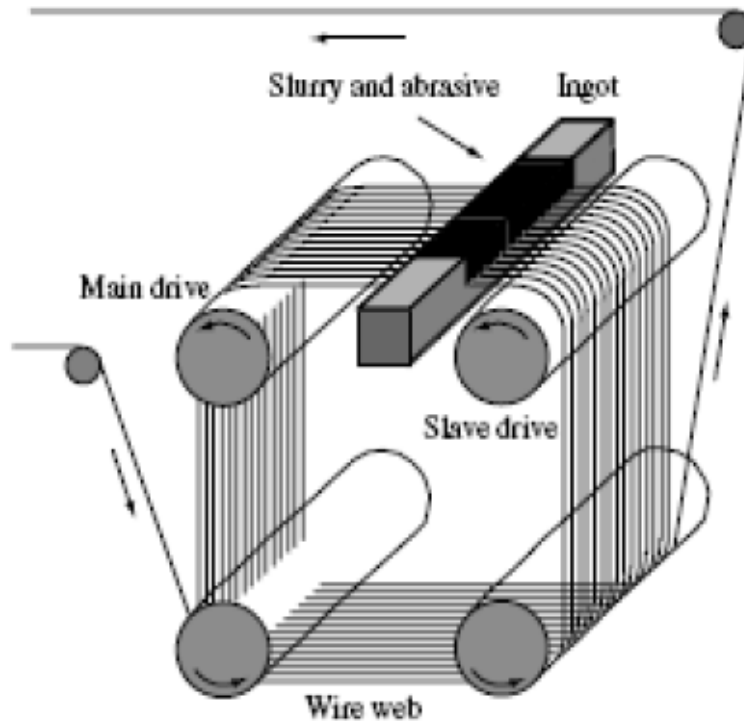


Figure I. 10 :Principe d'une scie à fils pour le découpage des substrats de silicium [16]

La découpe se fait grâce à la pulvérisation d'un lubrifiant chargé de grains durs de SiC de 10 à 20 microns. La perte de matière est importante, car le "trait de scie" a une largeur d'environ 200 microns. Le gain obtenu réduisant l'épaisseur des substrats est donc limité.

Donc on peut dire que le sciage des plaquettes à partir d'un lingot nécessite une scie diamantée à diamètre intérieur, afin de provoquer le minimum de casse. Le lingot à scier est collé par son méplat primaire sur une barre pour bien maintenir les plaquettes lors du sciage. Il existe aussi d'autres types de scies à fil diamanté. Pour finir, on enlève des échantillons du lot pour les tester et les mesurer à savoir le diamètre, la planéité et l'épaisseur. On vérifie aussi l'homogénéité de la résistance. Après le sciage, les plaquettes sont nettoyées à l'eau dèsonisée ; ensuite, elles subissent un rodage mécanique à la poudre d'alumine. On les charge dans une machine à action orbitale où elles tournent entre deux surfaces lubrifiées avec de la poudre d'alumine. Ce qui diminue les irrégularités à la surface (inférieures à 3 microns).

Il existe aussi plusieurs autres solutions alternatives qui évitent le sciage de blocs, mais on se contente de citer seulement ces deux solutions intéressantes.

- *Solution alternative par tirage de rubans :*

On peut aussi tirer des rubans de silicium de la dimension voulue directement au départ de la phase liquide. On économise ainsi de la matière de l'opération de découpe. Par contre, la purification est moins poussée et la cristallisation moins bonne. Ce procédé est donc peu utilisé. Il existe plusieurs méthodes et (La Figure I.11) illustre l'une d'elles.

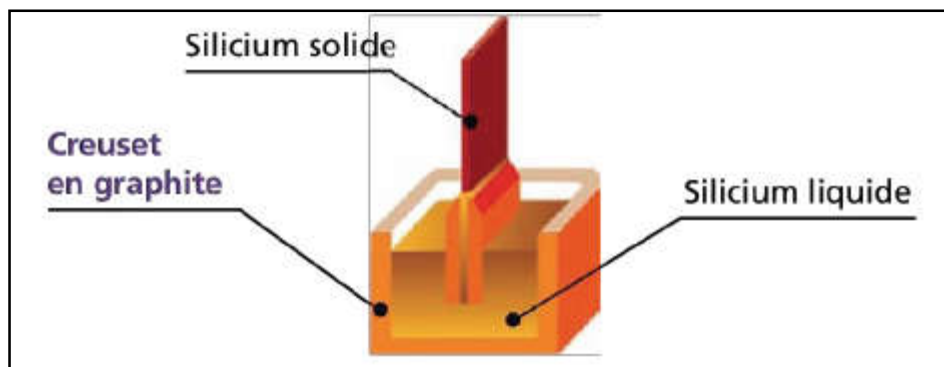


Figure I. 11 : Tirage d'un ruban de silicium en filière [7]

- *Solutions alternatives par dépôt de couche mince :*

On peut encore réduire le nombre d'étapes de la fabrication en cristallisant directement une mince couche de silicium sur un support. Pour obtenir du silicium cristallin, il faut que ce support soit porté à température élevée ($> 800^{\circ}\text{C}$) : ce qui conduit à utiliser comme support des céramiques, des substrats de silicium bon marché, des alliages de silicium. Ce support peut être couvert d'une couche destinée à réduire la diffusion des impuretés du support et à réfléchir la partie de la lumière qui traversera la cellule sans être absorbée ; ce qui lui donnera une seconde chance. On doit obtenir une couche de silicium polycristallin d'au moins 20 microns d'épaisseur parce que le silicium cristallin est relativement transparent et que des cellules plus minces n'absorberaient pas suffisamment la lumière malgré la couche réfléchissante citée ci-dessus.

I.3.1.2.3 Défauts cristallins dans le Silicium

Souvent un lingot monocristallin présente plusieurs défauts ; ces défauts peuvent avoir une influence sur le rendement. Les défauts les plus importants sont les dislocations. Ce sont aussi les imperfections dans la structure locale du cristal qui sont généralement dues à la

présence de certaines impuretés. Les défauts intrinsèques et les dopants induisent l'existence de niveaux localisés dans la bande interdite. Ce qui implique la naissance de la photoconductivité à cause des transitions électroniques.

I.3.2 Le silicium amorphe

I.3.2.1 Définition du silicium amorphe hydrogéné :

Le silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H) est un matériau issu de la famille des semi-conducteurs; cette forme de semi-conducteurs a été découverte vers le début des années soixante; dans un premier temps elle n'était pas utilisable car elle avait beaucoup trop de défauts, mais vers la fin des années soixante, Chittick observa qu'en déposant le silicium amorphe par un plasma de (SiH_4) plus de 99.9 % des défauts étaient saturés par l'hydrogène ce qui rendait ce matériau utilisable comme semi-conducteur. Dès cette découverte, il fit l'objet de recherches.

La combinaison du silicium et d'hydrogène permet de former le silicium amorphe, matériau semi-conducteur qui a une structure atomique désordonnée, non cristallisée, vitreuse. Un dépôt d'épaisseur inférieure à un micron permet d'absorber le spectre solaire car il possède un coefficient d'absorption de la lumière environ 1000 fois supérieur au silicium cristallin [8] donc, le silicium amorphe hydrogéné (a-Si :H) se caractérise par sa structure désordonnée comparée à celle du silicium cristallin comme illustré sur la **Figure I.12**.

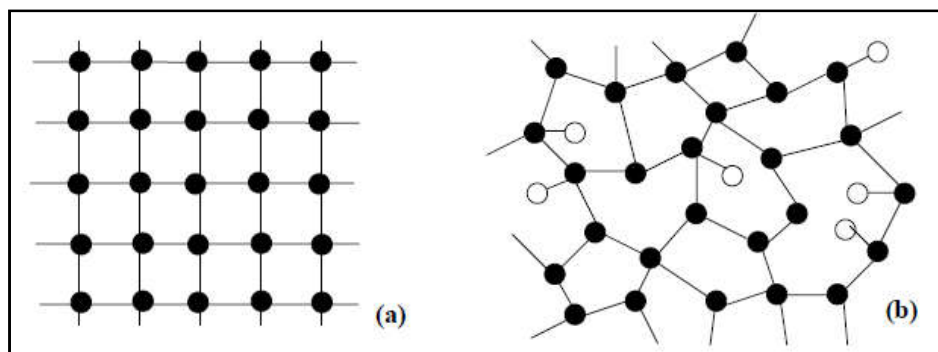


Figure I. 12 :Représentation schématique de la structure cristalline du silicium (a) et (b) la structure amorphe du silicium. ○ hydrogène ● Silicium(b) [7]

I.3.2.2 Propriétés électroniques du silicium amorphe :

Malgré cette structure de réseau aléatoire, la physique des semi-conducteurs considérant les bandes de valence et les bandes de conduction s'applique. Cependant, certaines liaisons

entre les atomes de silicium sont rompues et forment des liaisons pendantes. La notion de défauts est alors différente de celle du silicium cristallin.

Dans le silicium amorphe hydrogéné (a-Si :H), un atome de silicium peut avoir une coordination « membres de liaisons avec ses plus proches voisins de 3 ou 5 ». Il apparaît donc des liaisons pendantes ou flottantes. Une grande partie de ses défauts, près de 99,99%, sont passivés par l'hydrogène qui permet de diminuer la densité de défauts de 10^{21} cm^{-3} à $10^{15} - 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ [17].

La structure de silicium amorphe a une incidence directe sur ses propriétés électroniques et optiques. La structure de bande du silicium amorphe est décrite par la densité d'états d'énergie disponible. L'hydrogène est nécessaire pour améliorer la qualité du matériau (il limite le nombre de défauts en saturant les liaisons pendantes de silicium présentes à cause de la structure désordonnée).

Le diagramme de bande du silicium amorphe est représenté sur la **Figure I.13**. Les principales différences par rapport au silicium cristallin sont l'asymétrie des bandes de valences, des bandes conduction et les états dans la bande interdite. Ces états proviennent des défauts non saturés par l'Hydrogène. Ils peuvent avoir trois états différents:

- Aucun électron (D+) donc, une charge positive.
- Un électron (D0) donc, neutre.
- Deux électrons (D-) donc, une charge négative.

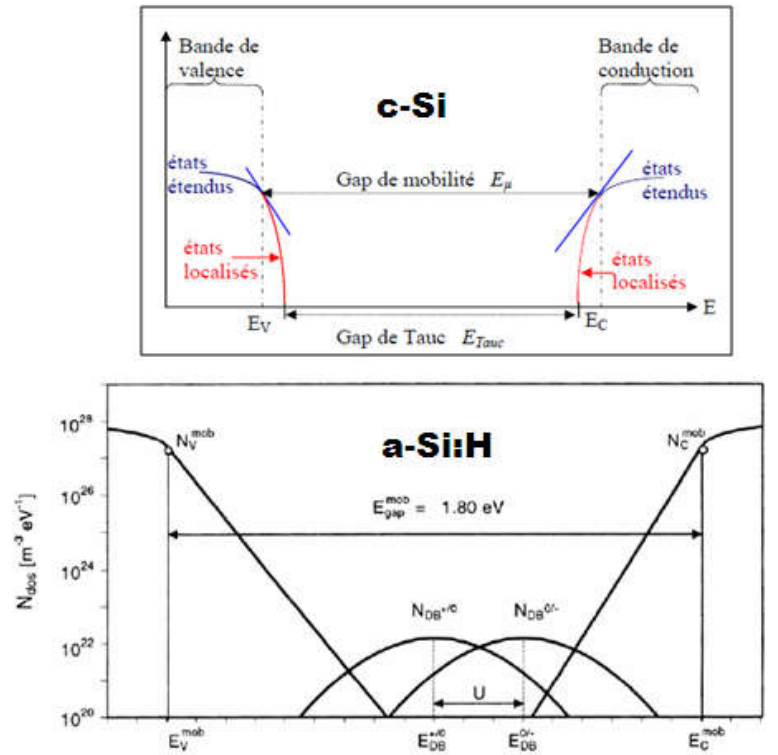


Figure I. 13 : Diagrammes de bande du silicium amorphe hydrogéné et du silicium cristallin [18]

Il faut remarquer que ces défauts peuvent être neutres, chargés positivement ou négativement. Dans le cas où ils ne sont pas neutres, ils influenceront directement sur la répartition du champ électrique interne conformément à la loi de Poisson.

I.3.2.3 Particularités :

Le silicium amorphe est un matériau souvent comparé au silicium cristallin car il est formé du même matériau (le silicium) et fait partie de la famille des semi-conducteurs. Par contre, il se distingue de son “homologue” cristallin par des avantages et inconvénients.

I.3.2.3.1 Avantages de silicium amorphe

- Possibilité de le déposer sur des grandes surfaces il n’y a plus de limitation de taille du wafer (macro-électronique).
- Possibilité de le déposer sur des surfaces non planes ou souples: intéressant pour la déposition sur cylindres ou sphères (axes de symétrie).
- Facilité de fabrication et technologie basse température (<300°C). Au point de vue de sa fabrication, le silicium amorphe est avantageux, il est précipité à une température de

250°C. On peut donc utiliser des supports bon marché et en particulier le verre qui peut constituer la face avant du module ; à condition d'avoir été préalablement couvert d'un conducteur transparent. Le fait que la température de fabrication soit plus basse diminue aussi la consommation d'énergie lors de la fabrication.

- Forte absorption de la lumière visible.
- Bande interdite plus élevée (1,8 eV contre 1,1 eV pour le silicium cristallin) permettant d'obtenir des courants inverses dans l'obscurité plus faibles.
- Un autre avantage tient au fait que le silicium amorphe est plus opaque à la lumière que le silicium cristallin. Ceci permet de réaliser les cellules avec des couches plus minces. Par conséquent on peut économiser de la matière.

I.3.2.3.2 Inconvénients de silicium amorphe

- Beaucoup de défauts dans la structure.
- Faible mobilité des porteurs libres.

I.3.2.4 Applications

Après comparaison des avantages multiples du silicium amorphe et des inconvénients cités ci-dessus, il ne faut pas conclure que ce matériau va remplacer le silicium cristallin dans un proche avenir. Par contre, il est possible de tirer parti de certains avantages du silicium amorphe afin de développer de nouvelles applications pour lesquelles le silicium cristallin ne peut être ou est difficilement utilisable ; principalement les technologies qui nécessitent des grandes surfaces. La plus connue de ces applications est la cellule photovoltaïque; utilisée le plus souvent dans des alimentations qui nécessitent de petites puissances. Ce type de cellule solaire est assez répandu dans les calculatrices, les montres ou les chargeurs de batteries. De tels dispositifs sont réalisés par une structure de diode. La mise en contact de deux couches dopées provoque la création d'un champ électrique. En comparaison avec les cellules cristallines, la seule différence essentielle d'une cellule amorphe réside dans le fait que les deux zones dopées ne sont pas directement mises en contact: une couche intrinsèque est déposée entre ces deux couches. Les couches dopées amorphes sont de mauvaise qualité (beaucoup de défauts), les charges créées dans ces couches ne pourront pas être collectées (car

la recombinaison domine). La couche intrinsèque est donc nécessaire afin que les paires électron-trou responsables de l'effet photovoltaïque puissent être collectées.

Pour former des hétérojonctions avec le silicium cristallin (c-Si) dont les recherches ont abouti à de très hauts rendements photovoltaïques avec ce type de cellules. Donc l'empilement monolithique des deux couches (couche mince de silicium amorphe sur silicium cristallin par exemple) absorbant dans des domaines spectraux se chevauchant, en améliore le rendement théorique par rapport à des cellules simples distinctes qu'elles soient amorphes, cristallines ou microcristallines.

I.3.2.4.1 Avantage :

- Sensibilité élevée sur une large plage de longueur d'onde. Excellent rendement.

I.3.2.4.2 Inconvénient :

- Coût élevé dû à la superposition de deux cellules

I.4. Application de silicium en photovoltaïque

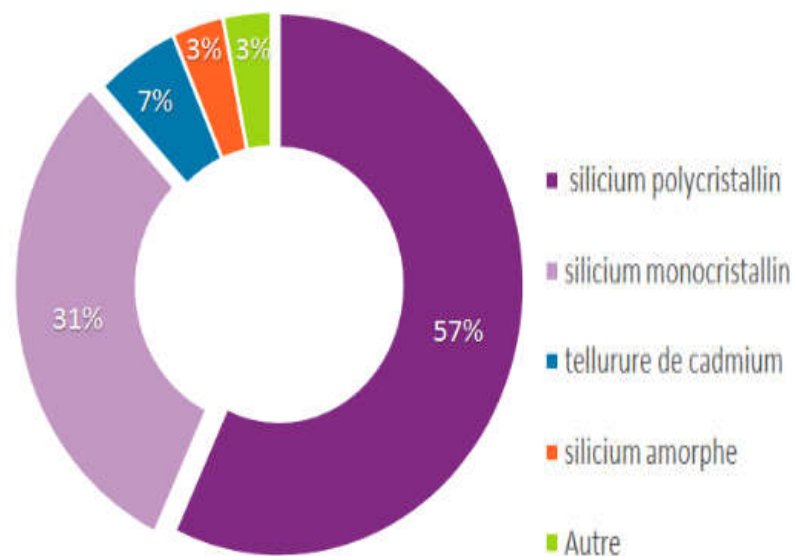


Figure I. 14 : Répartition de la production mondiale (en watt-crête) de modules photovoltaïques suivant les différentes filières, en 2015. [9]

- c-Si : silicium monocristallin.
- mc-Si : silicium multicristallin.

- $\mu\text{c-Si}$: silicium microcristallin.
- a-Si : silicium amorphe.
- CIS : diséléniure de cuivre et d'indium.

Ces chiffres, basés sur les informations données par de nombreux fournisseurs et experts, et les agences qui collectent les données

Le silicium comme matériau de base dans l'industrie photovoltaïque est prédominant plus de 90% [19] (**Figure I.14.**) Ce semi-conducteur présente, différents avantages : facilement extrait à partir du sable, ce qui le rend très abondant sur la terre ; il n'est pas toxique comme certains semi-conducteurs III-V ; il possède un oxyde naturel (SiO_2) présentant d'excellentes propriétés électroniques et il peut se doper facilement (avec le phosphore ou le bore). Son seul véritable inconvénient est son gap indirect à 1,1 eV. Ceci entraîne une absorption du rayonnement plus faible qu'avec un matériau à gap direct : pour absorber 90% du spectre solaire, il faudra utiliser une épaisseur de 100 μm pour le silicium, alors que seulement 1 μm de GaAs suffit. De plus, la largeur de bande interdite du silicium fait qu'il n'est pas le mieux adapté pour capter la part optimale du spectre solaire (entre 1 et 1,7 eV) : le GaAs, avec une largeur de bande interdite de 1,38 eV, permet d'accéder à des rendements théoriques plus élevés[20].

Le silicium reste cependant le matériau le plus utilisé dans le photovoltaïque (**Figure I.14**) Outre les avantages précités, il bénéficie d'une implantation importante et durable dans l'industrie de la microélectronique. Celle-ci utilise du silicium monocristallin de très haute pureté, obtenu par des méthodes telles que le tirage CZ (Czochralski) [21]. Ce type de matériau, qui présente d'excellentes qualités électroniques, est très coûteux. La part de silicium monocristallin y est plus importante, puisque les modules produits selon cette technologie ont un rendement plus élevé que ceux en silicium multicristallin.

Le silicium multicristallin est quant à lui fabriqué à partir de sources de matériau moins raffinées, mais convient aux processus de l'industrie photovoltaïque : il constitue 56,4% des modules fabriqués en 2003 [19].

I.4.1 Pourquoi le Silicium

L'utilisation du silicium pour la fabrication de modules photovoltaïques se justifie par l'excellente connaissance physique de ce matériau, son abondance sur la croûte terrestre, sa non toxicité et sa stabilité dans le temps, la maîtrise de sa technologie, par l'industrie micro-électronique assurant au final un bon rendement de conversion électrique.

Une largeur de bande interdite plus importante entraîne d'un côté une augmentation du V_{oc} (courant de saturation plus faible) et d'autre une diminution du courant de court circuit I_{cc} due à la réduction de l'absorption. Compte tenu de ces évolutions, la largeur de bande interdite optimale se situe à 1,4 eV. Les matériaux les mieux adaptés pour les applications photovoltaïques sont dans l'ordre le GaAs (1,42 eV à 300 K), l'InP (1,27 eV à 300 K) et le silicium cristallin (1,12 eV à 300 K). Le silicium n'est pas donc à priori le choix idéal d'autant plus que c'est un semi-conducteur à bande interdite indirecte ce qui limite l'absorption du rayonnement lumineux comparé à un matériau à bande interdite directe comme le GaAs. En effet, 1 μm de GaAs permet d'absorber 90 % du rayonnement lumineux alors qu'il faut 100 μm de silicium cristallin.

Le silicium bénéficie aussi de son implantation dans l'industrie de la microélectronique. Cette industrie utilise du silicium cristallin de très bonne qualité (grande pureté) et chimiquement stable dans le temps. Ainsi, des techniques de croissance ont été développées pour obtenir cette pureté notamment en réduisant les défauts (dislocations) dans le matériau. La qualité du silicium cristallin est fonction de la technique utilisée pour son élaboration [7]. Nous avons principalement :

- Le silicium monocristallin (c-Si) élaboré avec la technique Float zone (Fz) qui permet d'obtenir des matériaux avec une durée de vie des porteurs allant de 500 μs à 5 ms [23][7].

- Le silicium monocristallin élaboré avec la technique Czochralski (Cz) qui permet d'obtenir des matériaux avec une durée de vie des porteurs allant de 50 μs à 500 μs [24].

- Le silicium multi-cristallin (mc-Si) élaboré à partir de sources de matériaux moins raffinées. Il se caractérise par la présence de joints de grains qui limitent la durée de vie des porteurs (de 1 μs à 100 μs).

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

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté en premier lieu les différents types du silicium sur ces deux états amorphe et cristallin, et les étapes à suivre pour obtenir un silicium de bonne qualité électronique.

Chapitre II

Etude d'une cellule photovoltaïque en silicium

Introduction

La consommation d'énergie est nécessaire au développement social et économique. Entre savoir créer de l'énergie et savoir l'économiser, il y a un compromis entre la production et la consommation et par suite il faut entrer dans une logique forte d'économies d'énergie et augmenter nettement la part des énergies renouvelables.

Les cellules photovoltaïques (PV) ouvrent la possibilité de produire de l'électricité directement à partir du rayonnement solaire, sans nécessiter ni pièces mobiles, ni production de chaleur et sans entraîner de pollution atmosphérique, locale ou globale.

La conversion photovoltaïque est la transformation directe d'une énergie électromagnétique en énergie électrique continue. Cette énergie électromagnétique est le plus souvent le rayonnement solaire.

Ce deuxième chapitre nous étudierons le dispositif fondamental de la conversion photovoltaïque. Nous aborderons ainsi dans une première partie quelques notions sur la source d'énergie durable : le soleil et son application dans le domaine photovoltaïque. Elle est suivie d'une deuxième partie où le principe de fonctionnement de la cellule solaire et leur caractéristique principale sera présentée. Pour cela nous commencerons par la description de l'outil fondamental de la conversion photovoltaïque constituée par la jonction P-N

II.1 le rayonnement solaire et effet photovoltaïque

II.1.1. Rayonnement et spectre solaire

II.1.1.1. Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est un facteur important dans la conversion photovoltaïque. Ce rayonnement est celui d'un corps noir à la température 5800 K, ceci conduit à un pic d'émission situé à une longueur d'onde de $0.5\mu\text{m}$ pour une puissance d'environ $60\text{MW}/\text{m}^2$ soit un total de $9.5 \cdot 10^{25}\text{W}$. En tenant compte de la surface apparente du soleil et de la distance entre celui-ci et la terre, cela conduit à un éclairage moyen dans l'année de $1.36\text{KW}/\text{m}^2$. Pour les cellules destinées à fonctionner au sol[24][25].

Le rayonnement solaire est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet ($0,2\mu\text{m}$) à l'infrarouge lointain ($2,5\mu\text{m}$). Lorsque ce rayonnement solaire traverse

l'atmosphère, et à la suite de phénomènes d'absorption par les molécules des différentes couches de l'atmosphère (le taux de poussière, d'aérosol, de vapeur d'eau) et par les conditions climatiques, l'altitude du lieu d'observation aussi des gaz comme l'ozone (O₃), le rayonnement solaire subit une atténuation et une modification de son spectre, et donne un spectre solaire non continu mais qui présente des bandes d'absorption et par conséquent crée une baisse globale de la puissance incidente [25]. Pour pouvoir comparer les performances des cellules solaires et qualifier les différents spectres solaires utilisés, la notion d'Air-masse (AM_m) a été créée. Elle quantifie la quantité de puissance absorbée par l'atmosphère en fonction de l'angle θ du soleil par rapport au Zénith. Sa valeur dépend de l'altitude et de l'angle d'incidence des rayons lumineux en plus de la pression. L'intégration de l'irradiance sur la totalité du spectre permet d'obtenir la puissance P (en $W.m^{-2}$) fournie par le rayonnement. Pour simplifier on utilise les notations suivantes :

AM_0 : Hors atmosphère (pour applications spatiales). $P \approx 1.36 \text{ kW.m}^{-2}$

AM_1 : Le soleil est au zénith du lieu d'observation (distance minimum à parcourir par les photons à travers l'atmosphère).

$AM_{1.5G}$: Spectre standard, le soleil est à 48° . $P \approx 1 \text{ kW.m}^{-2}$ [3]. Le «G» représente le rayonnement "Global" incluant rayonnement direct et rayonnement diffusé.

Avec

$$AM = \frac{1}{\cos(\theta)} \quad (\text{II-1})$$

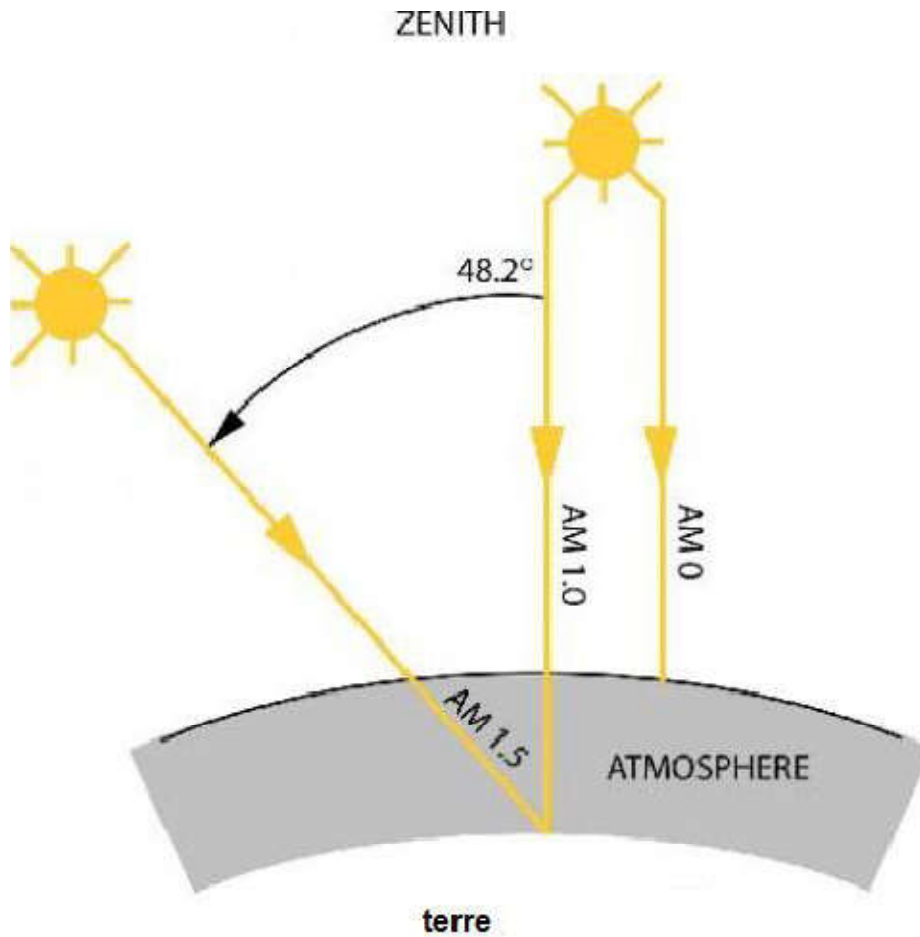


Figure II. 1 :Définition de la norme AM_m . [47]

II.1.1.2. Spectre solaire

On représente le rayonnement par un spectre donnant l'irradiance en fonction de la longueur d'onde (**Figure II-2**).

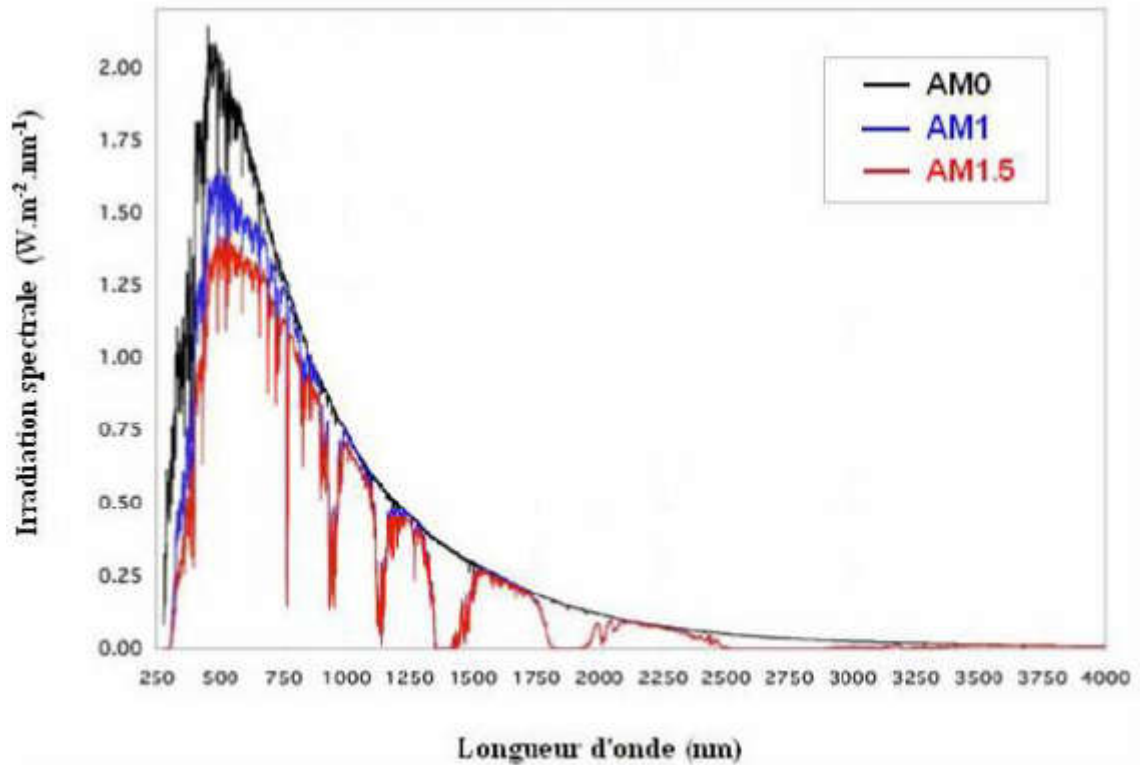


Figure II. 2 : Représentation graphique des spectres AM0 et AM1.5 d'après [47]. Le domaine spectral utile aux cellules en silicium est mis en évidence.

II.1 .2 Effet photovoltaïque

II.1.2.1. L'énergie photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque : c'est l'électricité produite à partir du rayonnement solaire, c'est une énergie de source renouvelable, comme les énergies hydraulique, géothermique et éolienne. Le développement de ces énergies renouvelables est indispensable dans le but d'offrir une alternative aux énergies fossiles (très polluantes) mais également, d'assurer une indépendance et une sécurité énergétiques.

II.1.2.2. Principe de l'effet photovoltaïque

Découvert par Becquerel en 1839, les bases théoriques du photovoltaïque furent posées par Albert Einstein, en 1912 pratiquement un siècle plus tard. Ceci a expliqué que l'effet photovoltaïque provoque, sur certains matériaux, l'émission d'une petite quantité d'électricité lorsqu'ils sont exposés à la lumière. Il sollicita que la lumière entrant dans ce type de matériaux (conducteur ou semi-conducteur) était à l'origine d'interaction photons- atomes, provoquant ainsi l'expulsion des électrons de leur orbite et créant un courant électrique. Ce

mécanisme de photo génération peut être représenté à l'aide des états énergétiques des bandes de valence et de conduction, séparées par un gap d'énergies interdites (E_g).

Dans les matériaux conducteurs, les charges libérées se recombinaient quasi-instantanément et peuvent difficilement être collectées. L'usage de certains matériaux semi-conducteurs permet la réduction de ces recombinaisons et l'application de l'effet photovoltaïque à la production d'électricité. Mais ce n'est qu'en 1954 que la première cellule photovoltaïque en semi-conducteur a été mise au point par des chercheurs du laboratoire Bell aux USA permettant d'obtenir un rendement de 4,5% [27].

L'effet Photovoltaïque est la transformation directe d'une énergie électromagnétique (rayonnement) en énergie électrique. Les cellules photovoltaïques sont donc capables à la fois de permettre le transfert d'énergie du photon absorbé à un électron et la collecte de cet électron de plus haute énergie par un circuit extérieur.

II.1.2.3. Avantages du photovoltaïque

- ✓ L'impact sur le paysage des panneaux solaires est bien moindre que celui généré par les éoliennes par exemple.
- ✓ L'installation de panneaux solaires sur les toits de hauts bâtiments permettrait de réduire à néant la pollution visuelle.
- ✓ L'installation de parcs solaires sur des terres polluées ou sur d'anciens sites miniers couplée à la disposition au pied des installations de plantes permettant d'exfiltrer les composés toxiques aurait un impact positif, celui de dépolluer un terrain inexploitable pour le rendre disponible après la désinstallation du parc solaire.
- ✓ Les rendements des panneaux photovoltaïques relativement faibles pour le moment ne cessent d'augmenter ce qui traduit une grande capacité de développement.
- ✓ Les systèmes photovoltaïques les plus répandus ont une durée de vie supérieure à vingt ans ce qui leur permet d'afficher un bilan énergétique positif. Il faut en effet entre un an et demi et trois ans pour qu'un panneau solaire fournisse autant d'énergie que celle nécessaire lors de sa fabrication.

II.1.2.4. Inconvénient du photovoltaïque

✓ L'énergie photovoltaïque reste pour le moment, l'énergie renouvelable la plus coûteuse. Néanmoins, les avancées scientifiques permettent de diminuer le coût.

II.2. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

II.2.1. L'interaction photon /semi-conducteur

A chaque photon, on associe une longueur d'onde λ telle que ($E_{ph} = h\nu$) où ν est la fréquence associée à la longueur d'onde. Pour passer de l'énergie du photon E_{ph} (eV) à la longueur d'onde λ (μm), on utilise la relation suivante d'où:

$$E_{ph} = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (\text{II-2})$$

$$E_{ph} = \frac{1.24}{\lambda} \quad (\text{II-3})$$

Avec

h : Constante de Planck (J.s)

c : Vitesse de la lumière dans le vide (m.s^{-1})

ν : Fréquence (s^{-1})

λ : Longueur d'onde (μm)

La notion de dualité onde/corpuscule est importante pour comprendre les phénomènes d'interaction entre un rayonnement et un matériau. L'absorption d'un rayonnement dans un matériau s'explique par un échange d'énergie entre les atomes du matériau et les corpuscules de la lumière (rayonnement solaire).

Une cellule solaire est sensible seulement dans un domaine de longueurs d'onde particulier et seul un matériau semi-conducteur dispose de la structure de bande nécessaire à la génération de paires électrons -trous utilisables, à partir du rayonnement solaire. Cette génération de paires électrons-trous est engendrée par absorption d'un photon qui permet à un électron de la bande de valence de passer dans la bande de conduction (voir la **Figure II-3**).

Celui-ci laisse une pseudo-charge positive dans la bande de valence (le trou) et négative dans la bande de conduction (l'électron).

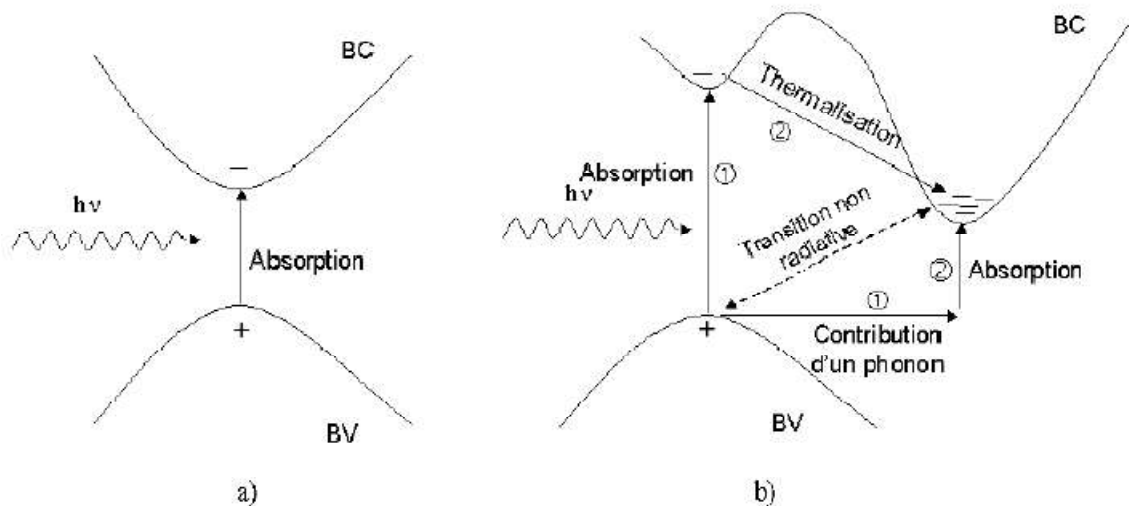


Figure II. 3 : Transitions inter-bandes d'électrons dans un semi-conducteur. Le cas a) correspond à un semi-conducteur à gap direct, le cas b) à un gap indirect (d'après [28])

Deux différentes transitions possibles selon la nature du gap sont présentées sur la **Figure II-3**. Quand le minimum de la bande de conduction correspond au maximum de la bande de valence l'espace des vecteurs d'onde K , il s'agit d'un gap direct. Les transitions inter-bandes s'effectuent verticalement, et sont donc radiatives (**Figure II-3** (a)). Dans le cas du silicium, le gap est indirect : les transitions électroniques entre les extrema des bandes sont obliques, donc non radiatives puisqu'elles impliquent un changement du vecteur d'onde de l'électron. Les électrons du sommet de la bande de valence peuvent toutefois être directement excités vers le minimum relatif central de la bande de conduction grâce à un photon de plus grande énergie. Pour que la transition s'effectue dans le gap indirect, il faut qu'un phonon soit au préalable absorbé (ou émis) par l'électron, afin que le vecteur d'onde de ce dernier corresponde au maximum de la bande de valence, pour absorber un photon (**Figure II-3** (b)). Notons que la valeur du gap indirect du silicium est de 1,12 eV à 300 K (ce qui correspond à une longueur d'onde de 1107 nm) contrairement à celle du premier gap direct qui vaut 3,4 eV (soit 365 nm). L'interaction photon/électron dans un semi-conducteur se traduit par la génération d'une paire électron-trou, qui modifie localement la conductivité du matériau. Il faut donc, pour créer un courant électrique, dissocier les paires électrons-trous photo générées et les collecter dans un circuit électrique extérieur avant qu'elles ne se recombinent.

La loi de Lambert décrit le phénomène des photons incidents absorbés par le silicium en fonction de leurs longueurs d'onde [28]:

$$I = I_0 \exp(-\alpha z) \quad (\text{II-4})$$

$$\alpha = \alpha(\lambda) = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad (\text{II-5})$$

Avec

I_0 : Intensité lumineuse incidente

I : Intensité lumineuse transmise

z : profondeur (cm)

α : coefficient d'absorption dépendant de la longueur d'onde et de k coefficient d'extinction du matériau (cm^{-2})

II.2.2 Différentes formes de recombinaison des porteurs

II. 2.2.1 Recombinaisons volumiques

La longueur de diffusion L_d correspond à la distance moyenne que les porteurs peuvent parcourir avant d'être recombinés dans le substrat, L_d et celui dépend de la qualité du matériau et de la mobilité μ (des électrons notamment des trous). En plus, elle décrit le phénomène de transport de charges qui donne naissance au photocourant.

$$l_d = \sqrt{\tau \cdot D_{n,p}} = \sqrt{\tau \cdot \mu_{n,p} \left(\frac{kT}{q}\right)} \quad (\text{II-6})$$

L_d : longueur de diffusion

$D_{n,p}$: Coefficient de diffusion des électron ou des trous ($\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)

k : constante de Boltzmann ($k=1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$)

T : température en kelvin

Q : charge électronique ($1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$)

τ : durée de vie des porteurs dans le matériau (s)

$\mu_{n,p}$: mobilité des porteurs (électrons ou trous) ($\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

Il existe trois mécanismes principaux de recombinaison volumique dans un semi-conducteur (radiative, Auger et multi-phonons [29])

II.2.2.1.1 Recombinaison en volume Shockley-Read-Hall (SRH)

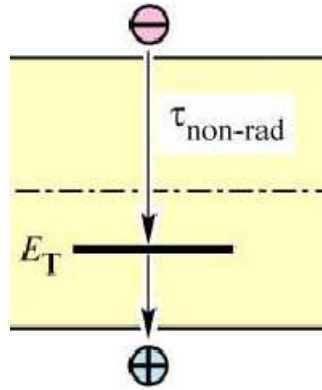


Figure II. 4 : Schema de recombinaison en volume (SRH) [46]

Les deux mécanismes précédents ne dépendent que du dopage et pas des défauts et des centres de recombinaison associés. Ils sont souvent masqués par des processus de recombinaison plus efficaces faisant intervenir les niveaux profonds.

Pour le silicium, il y a des niveaux profonds proches du milieu de la bande interdite associés à quelques impuretés courantes. L'électron a tendance à revenir à son état initial dans la bande de valence, en passant par ces niveaux (s'ils existent).

Le modèle physique décrivant les recombinaisons à travers les défauts est basé sur le modèle de Shockley-Read-Hall à un seul niveau piège. Le taux de recombinaison par piège est donné par la relation :

$$RRSH = \frac{pn - n_i^2}{\tau_n \left(p + n_{ie} e^{\frac{E_i - E_T}{KT}} \right) + \tau_p \left(n + n_{ie} e^{\frac{E_i - E_T}{KT}} \right)} \quad (\text{II-7})$$

Ou :

E_T : Représente l'énergie du niveau piège dans le gap d'énergie

τ_n et τ_p dépendent de la concentration et les sections efficaces de capture des porteurs libres par les pièges.

n_{ie} : est la concentration intrinsèque effective [31],[32]

II.2.2.1.2 Recombinaison volumique Auger

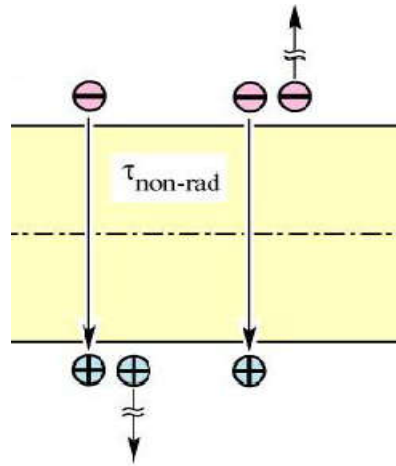


Figure II. 5 :Schema de recombinaison Auger [46]

Le processus de recombinaison non radiatif, se manifeste lorsque la densité de porteurs de charges libres (électrons et trous) dépasse 10^{17} (cm^{-3})[33].Le porteur recombinant transmet son énergie bande à bande, à un porteur excité d'un niveau énergétique plus élevé. Notons que la participation de phonons (Mode vibration du réseau cristallin) entraîne un effet de « thermalisation » de la cellule , ce mécanisme de recombinaison, plus compliqué en réalité est dominant à fort taux d'injection et pour de fortes densités de dopants [34].

Dans une cellule solaire,la valeur de la tension en circuit ouvert V_{co} est limitée par les mécanismes de recombinaison déjà évoqués. dans un cas idéal ou nous considérons que les surfaces de la cellule ne provoquent aucun phénomène de recombinaison, la limitation de la tension en circuit ouvert V_{co} provient du volume. Et c'est l'épaisseur de la cellule qui influe sur la valeur V_{co} . Exemple si on a une cellule d'épaisseur $100 \mu\text{m}$ [35], V_{co} et de l'ordre de 770 mV et en réduisant l'épaisseur du substrat de $20 \mu\text{m}$, V_{co} elle pourrait atteindre 800 mV [32].

II.2.2.1.3 Recombinaison radiative

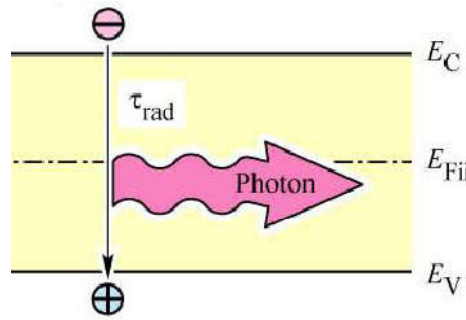


Figure II. 6 :schema de recombinaison radiative [46]

Elle correspond à la recombinaison d'un électron de la bande de conduction avec un trou de la bande de valence avec émission d'un photon d'énergie E (eV). C'est l'inverse de la création d'une paire (électron/trou) par un photon. Le mécanisme de recombinaison radiative domine les autres phénomènes dans un semi-conducteur à gap direct, car elles se font sans la participation de phonons. [36]

Donc la durée de vie totale est :

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_{SRH}} + \frac{1}{\tau_{Auger}} + \frac{1}{\tau_{Rad}} \quad (\text{II-7})$$

II. 2.2.2 Recombinaisons surfaciques

La surface d'un substrat de silicium cristallin (c-Si) représente une discontinuité du réseau cristallographique. Ceci entraîne la présence de liaisons non saturées ou liaisons pendantes. Ces défauts structuraux introduisent des niveaux énergétiques dans le gap du silicium qui vont assister les phénomènes de recombinaison. Les liaisons pendantes peuvent être saturées par le dépôt d'une couche de matériau à la surface. On parle alors de passivation des défauts de surface en réduisant son influence sur les recombinaisons. 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 [38].

Donc la qualité d'une surface est généralement donnée par la valeur de la vitesse de recombinaison de surface (contrairement à la durée de vie pour le cas de la recombinaison volumique [38]. Dans un simple cas où l'échantillon d'épaisseur (W) possède une durée de vie constante (τ_b) et une faible vitesse de recombinaison (S) sur chaque surface, la durée de vie effective (τ_{eff}) est donnée par :

$$\frac{1}{\tau_{eff}} = \frac{1}{\tau_b} + \frac{2S}{W} \quad (\text{II-8})$$

Les techniques de passivation reposent en premier sur la réduction de la densité d'état d'interface Dit(E) et en second sur la diminution, par effet de champ, de la densité de porteurs susceptible d'être recombiné à la surface. La croissance d'un oxyde thermique à haute température (1000°C) permet de réduire la densité d'état de surface à des valeurs très basses ($1 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$), à comparer avec les $6.8 \cdot 10^{14} \text{ at.cm}^{-2}$ d'une surface orientée (100) [39]. Certains matériaux hydrogénés réalisés par CVD (a-SiNx:H, a-Si:H, a-SiC:H) contiennent une certaine quantité d'hydrogène qui peut passiver les liaisons pendantes [40]. Dans la plupart des cas, la passivation de surface est effectuée par un matériau non conducteur. Les recombinaisons se produisent alors principalement à l'interface entre les deux matériaux.

Il est difficile d'obtenir directement une mesure de vitesse de recombinaison de surface. Le paramètre le plus accessible reste la durée de vie effective (τ_{eff}) du substrat c-Si, qui prend en compte à la fois les recombinaisons volumiques et surfaciques[41].

II.2.3 La jonction p/n:

Le principe de base d'une cellule solaire est la formation d'une jonction réalisée par un sur-dopage du silicium. La création d'une barrière de potentiel dans le semi-conducteur permet de séparer les électrons et les trous qui sont générés par l'absorption de la lumière dans le matériau. La séparation des paires (électron/trou) et la collecte des charges libres sont facilitées par la présence d'un champ électrique au sein du matériau qui s'oppose à tout déplacement de charges. Donc la cellule photovoltaïque procède une simple structure, constituée d'une base en silicium cristallin (c-Si) de type p dopée localement (n^+) pour former l'émetteur. La différence de concentration d'électrons entre la zone dopée n^+ et celle de type p entraîne une tension de diffusion V_D à la jonction des deux zones de conductivité opposée. La tension de diffusion provoque un champ électrique intrinsèque à la jonction, dans une zone appelée ZCE (Zone de Charge d'espace). Sa largeur varie en moyenne entre 0.1 et 1 micron en fonction du profil et du niveau de dopage [42]. Autrement dit les photons incidents du rayonnement sur une jonction créent des porteurs dans chacune des régions P, ZCE et N. On distingue alors, au niveau de la jonction, deux zones : Dans les régions électriquement neutres P et N, les photoporteurs minoritaires diffusent ; ceux qui atteignent la zone de charge d'espace sont propulsés par le champ électrique vers la région où ils deviennent majoritaires

et ils peuvent ainsi être collectés par les contacts ohmiques d'où la création d'un photocourant de diffusion.

Dans la zone de charge d'espace (ZCE) les paires électrons-trous photogénérées par les photons sont dissociées par le champ électrique ce qui permet de séparer spatialement l'électron et le trou photo généré où l'électron va être propulsé vers la région de type N et le trou vers la région de type P, on aura ainsi un photocourant de génération. (Voir **Figure II-7**). Ces différentes contributions s'ajoutent pour créer un photocourant résultant I_{ph} qui contribue au courant inverse de la diode.

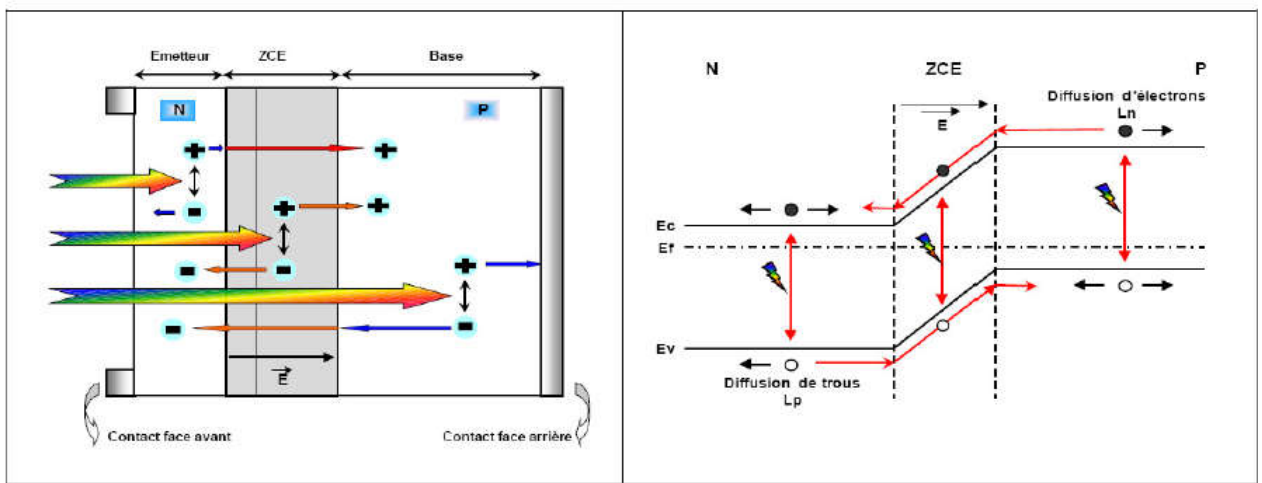


Figure II. 7 :Structure (image gauche) et diagramme de bande (image droite) d'une cellule photovoltaïque. Les dimensions respectives des différentes zones ne sont pas respectées.[43]

[La longueur de diffusion des électrons photogénérés est plus grande que celle des trous. La base présente une épaisseur relativement grande ($\approx 250-300 \mu m$). Elle est donc le plus souvent de type (p) et c'est elle qui va fournir le maximum 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 quelque nm et fortement dopé (environ $10^{19} cm^{-3}$) afin d'obtenir un champ électrique suffisant dans la ZCE.

L'épaisseur de la cellule doit être choisie de manière à ce qu'un maximum de photons soit absorbé par le silicium [43].

La valeur de la tension de diffusion V_D peut s'exprimer en fonction des densités de dopants dans l'émetteur et la base du matériau semi-conducteur par la relation (II-10).

$$qV_d = kT \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right) = \frac{E_g}{q} + \ln \left(\frac{N_A N_D}{N_C N_V} \right) \quad (II-10)$$

Avec

E_g : Énergie de gap du matériau semi-conducteur (eV)

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

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

N_C : Densité d'états dans la bande de conduction (cm^{-3})

N_V : Densité d'états dans la bande de valence (cm^{-3})

n_i^2 : Concentration de porteurs intrinsèques (cm^{-6})

Remarque

Lorsque la base et l'émetteur sont réalisés dans un seul matériau (même E_g), on parle d'une homojonction, cette notion sera plus détaillée dans le chapitre III

II.3. Les caractéristiques et propriétés électriques des cellules photovoltaïques

II.3.1 Schéma électrique équivalent

L'équation (II-11), correspond à un cas idéal du fonctionnement de la cellule photovoltaïque.

Pour tenir compte des limitations de la cellule et calculer le courant réellement délivré sur la charge du circuit extérieur, on introduit un modèle comportant une résistance série et une résistance parallèle. Ce modèle est représenté par le schéma électrique suivant (Figure II-8) :

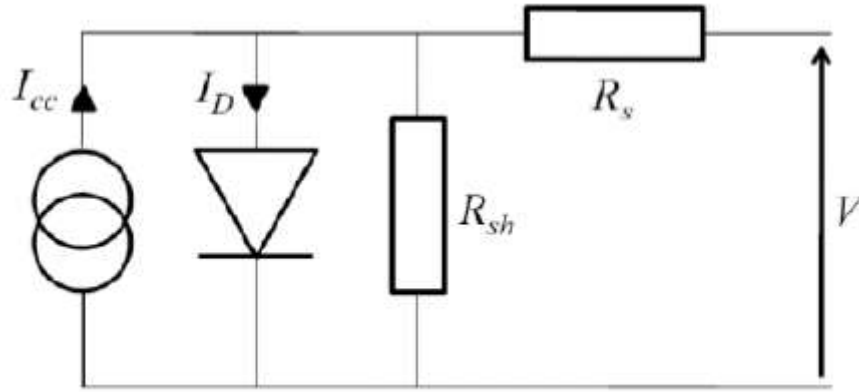


Figure II. 8 :Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle [44].

L'équation du courant devient :

$$I = I_1 + I_2 + \frac{V - IR_s}{R_p} - I_{ph} \quad (\text{II-11})$$

$$I = I_{01} \left(\exp \left(\frac{q(V - IR_s)}{n_1 kT} \right) - 1 \right) + I_{02} \left(\exp \left(\frac{q(V - IR_s)}{n_2 kT} \right) - 1 \right) + \frac{V - IR_s}{R_p} - I_{ph} \quad (\text{II-12})$$

Le schéma électrique équivalent d'une cellule solaire est ainsi composé d'une source de courant et de deux diodes en parallèle. La source de courant modélise le courant photogénéralé I_{ph} . La première diode (facteur d'idéalité $n_1 \approx 1$) correspond au courant de diffusion dans la base. L'émetteur. I_{01} , I_{02} sont les courants de saturation. I_2 est le courant de génération/recombinaison ou d'effet tunnel dans la zone de charge d'espace et n_2 le facteur d'idéalité de la seconde diode ($n_2 \approx 2$).

Afin de modéliser les courants de fuite existant dans la structure, la résistance parallèle R_p est ajoutée. Ces courants de fuite peuvent avoir lieu par exemple sur les bords de la cellule ou à travers l'émetteur. La résistance parallèle doit être la plus élevée possible. La résistance série R_s modélise les pertes résistives dans la structure (base et émetteur), les résistances de contact aux interfaces métal/semiconducteur et celles du métal à proprement parler. Afin de limiter son influence sur le courant de la cellule, la résistance série R_s doit être minimisée en optimisant les contacts métal/semiconducteur et en diminuant la résistivité du matériau. Un compromis est à trouver entre cette dernière et la recombinaison des porteurs : un dopage trop élevé entraîne des recombinaisons trop importantes. Les valeurs de résistivité retenues sont comprises en général entre 0.5 et 5 $\Omega.cm$ pour le substrat initial [45].

II.3.2 Paramètres physiques d'une cellule photovoltaïque

La cellule solaire n'est autre qu'une photodiode qui fonctionne sans polarisation extérieure et débite son photocourant dans une charge. La caractéristique $I(V)$ d'une cellule solaire est la superposition de celle de la diode sous obscurité et du courant photogénéré (voir Figure II-9(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 II-9(b)). Notons que la cellule photovoltaïque n'impose ni le courant ni 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.

Donc sous éclaircissement la caractéristique $I(V)$ de la diode ne passe plus par l'origine des coordonnées ; il existe une région dans laquelle le produit $V \cdot I$ est négatif (figure II-9(b)) la diode fournit de l'énergie. Si on se limite à cette région active et compte positivement le courant inverse la figure (II-9(a)) se ramène à la figure (II-9(b)).

L'équation (I-10 ($I = I_{obs} - I_{ph}$)) s'écrit alors :

$$I = I_{ph} - I_s (e^{qV/kT} - 1) \quad (\text{II-13})$$

Le premier terme de l'expression (II-13) est le photocourant, le second terme est un courant direct qui résulte de polarisation de la diode dans le sens passant par la tension V qui apparaît aux bornes de la résistance de charge.

Le courant électromoteur de la cellule est le courant de court-circuit, sa force électromotrice est la tension de circuit ouvert, l'expression (II-14) donne

$$I_{cc} = I_{ph} \quad (\text{II-14})$$

$$V_{co} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1\right) \quad (\text{II-15})$$

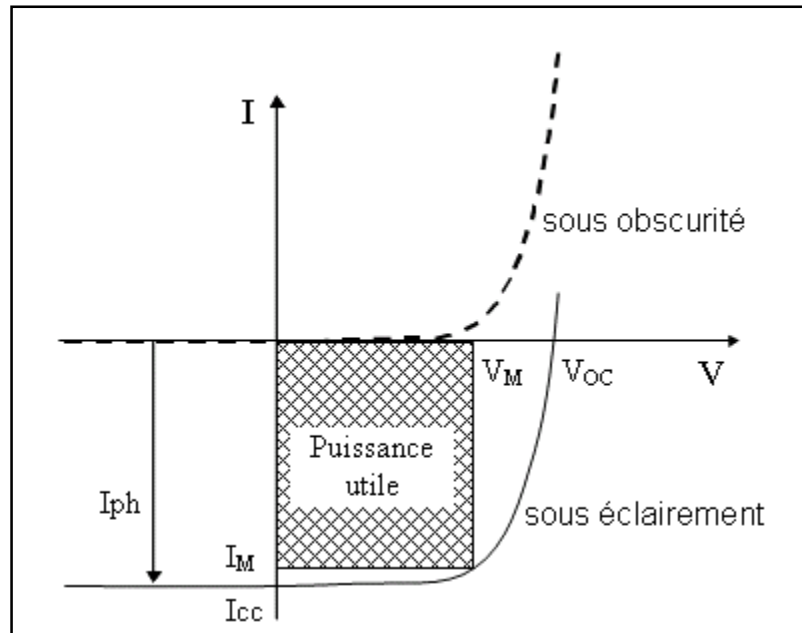


Figure II. 9 : Caractéristiques $I=f(V)$ sous obscurité et sous éclairement d'une cellule photovoltaïque. [44]

Le point de fonctionnement de la cellule sur la courbe $I(V)$ est déterminé par l'impédance de la charge qui, mal adaptée n'utilisera pas toute la puissance disponible. Il est donc important de pouvoir travailler avec les valeurs V_m et I_m afin d'utiliser la puissance maximale. En plus, 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 pour peak Watt). Elle correspond à la puissance nominale d'une cellule ou d'un module photovoltaïque dans des conditions d'ensoleillement standard (AM1.5).

II. 3.2.1 Tension en circuit ouvert (V_{co})

La tension en circuit ouvert correspond à la tension mesurée lorsqu'aucun courant ne circule dans la couche active. Dans le cas des cellules solaires la V_{co} est linéairement dépendante du niveau de la bande de conduction du matériau semi-conducteur donneur d'électrons et du niveau d'énergie de la bande de valence du matériau semi-conducteur accepteur d'électrons.

La valeur de la V_{co} est donc liée aux niveaux d'énergie de chacun des matériaux et également à leurs interfaces.

II. 3.2.2 Densité de courant en court-circuit (J_{cc})

Le J_{sc} est la densité de courant fournie par la cellule en condition de court-circuit (tension aux bornes de la cellule égale à 0). La densité de courant est déterminée par le produit de la densité de charges photogénérées par la mobilité du matériau où :

- n est la densité de porteurs de charges (positives et négatives).
- e est la charge élémentaire.
- μ est la mobilité ambipolaire.
- E est le champ électrique interne.
- S est la surface de la cellule.

$$J_{cc} = \frac{\eta \times e \times \mu \times E}{S} \quad (\text{II-16})$$

II.3.2.3 Puissance débitée P

La puissance fournie par la cellule est donnée par le produit $V \cdot I$:

$$P = VI = V(I_{ph} - I_s(e^{qV/kT} - 1)) \quad (\text{II-17})$$

Cette puissance est maximum au point P_m sont donnés par :

$$\left(1 + \frac{qV_m}{kT}\right)e^{qV_m/kT} = 1 + \frac{I_{ph}}{I_s} \quad (\text{II-18})$$

$$I_m = I_s \frac{qV_m}{kT} e^{qV_m/kT} \quad (\text{II-19})$$

La puissance débitée est alors donnée par le produit $V_m \cdot I_m$ qui s'écrit :

$$P_m = V_m \cdot I_m = FF \cdot V_{co} \cdot I_{cc} \quad (\text{II-20})$$

Le paramètre FF est le facteur de remplissage ou facteur de forme, il mesure le caractère rectangulaire de la courbe $I(V)$. Il varie de 0.25 pour une cellule à faible rendement à 0.9 pour une cellule idéale.

II.3.2.4 Facteur de forme (FF)

Si V_j est la tension aux bornes de la jonction et R_s la résistance de la diode, le courant et la tension de sortie sont donnés par

$$I = I_{ph} - I_s (e^{qV_j/kT} - 1) \quad (\text{II-21})$$

$$V = V_j - R_s I \quad (\text{II-22})$$

La caractéristique I(V) de la cellule solaire est alors donnée par

$$I = I_{ph} - I_s (e^{q(V+R_s I)/kT} - 1) \quad (\text{II-23})$$

Les allures de la caractéristique I(V) pour plusieurs valeurs de R_s sont représentées sur la (figure II-8). Ces caractéristiques montrent les effets de R_s sur le facteur de forme (FF>0.8 pour $R_s=0$ et FF=0.25 pour $R_s>1\Omega$). Le facteur de forme augmente avec V_{co} c'est-à-dire avec le gap du semi-conducteur, pour $R_s=0$, il passe de 0.83 dans Si où $V_{co}\approx 0.6$ V (voir la figure I-8).

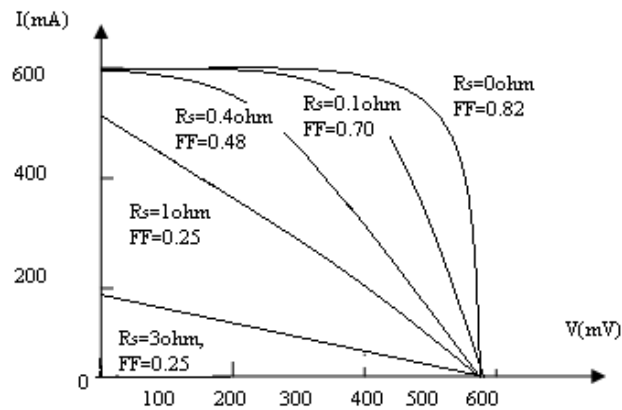


Figure II. 10 :Caractéristique I(V) pour plusieurs valeurs de résistance série [30]

Donc le facteur de forme est défini par la formule (II-23) suivante :

$$FF = \frac{P_{\max}}{V_{oc} \times I_{cc}} = \frac{V_{\max} \times I_{\max}}{V_{co} \times I_{cc}} \quad (\text{II-24})$$

Où

- P_{\max} est défini comme le produit de J_{\max} par V_{\max} .
- la V_{co} correspond à la tension en circuit ouvert.
- le J_{cc} à la densité de courant en court- circuit.
- J_{\max} et V_{\max} correspondent aux valeurs du point de fonctionnement maximal de la cellule.

Le facteur de forme est lié aussi au nombre de porteurs de charges collectés aux électrodes à différentes tensions de fonctionnement. En effet dans la couche active, il y a compétition entre transport des charges et recombinaison des charges.

$$d = \mu \times t_r \times E \quad (\text{II-24})$$

D'où

$$t_r = \frac{d}{\mu \times E} \quad (\text{II-25})$$

II.3.2.5 Rendement de conversion (η)

Le rendement de conversion d'énergie est le rapport de la puissance générée et de la puissance du rayonnement solaire incident P_o . On appelle rendement rapport de la puissance maximale fournie (P_m) sur la puissance du rayonnement solaire incident P_{in} .

Alors, il est obtenu par la formule (II-27)

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{V_m * I_m}{P_{in}} = \frac{FF * V_{CO} * J_{CC}}{P_{in}} \quad (\text{II-27})$$

Où

- FF : correspond au facteur de forme.
- V_{co} : est la tension en circuit ouvert.
- J_{cc} : est la densité de courant en court-circuit.

- P_{in} : est la puissance incidente.

Si on considère un exemple où : ($P_{in} \approx 1 \text{KW/m}^2$; $I_{cc} \approx 30 \text{mA/cm}^2$; $V_{co} \approx 0.7 \text{V}$; $FF \approx 0.8$)
On obtient alors un rendement de $\eta \approx 20\%$)

L'expression (II-27) montre que les performances d'une cellule solaire résultent directement des valeurs des trois paramètres I_{cc} , V_{co} , et FF . Ces paramètres sont fonction d'une part de propriétés spécifiques du matériau tels que le gap, les coefficients d'absorption, de réflexion, la longueur de diffusion des porteurs ou la vitesse de recombinaison en surface, et d'autre part de paramètres technologiques tels que la profondeur de la jonction, la largeur de la zone de charge d'espace ou la présence de résistances parasites ; exemple : la nature et la valeur du gap jouent un rôle majeur. Un matériau à gap direct a un coefficient d'absorption bien supérieur à un matériau à gap indirect comme le Si. Il résulte que dans le premier, la vitesse de recombinaison en surface et la profondeur de jonction jouent un rôle plus important que dans la seconde. En contrepartie, les recombinaisons sur le contact arrière jouent un rôle plus important dans le second que dans le premier.

La valeur du gap conditionne la tension de circuit ouvert V_{co} à travers la hauteur de barrière de la jonction et le courant de court-circuit I_{cc} à travers le taux de recouvrement du spectre solaire et de la réponse spectrale de la diode. V_{co} il est d'autant plus grand et I_{cc} d'autant plus petit que le gap est grand. Enfin le facteur de forme FF est fonction de la tension en circuit ouvert V_{co} et des résistances série R_s de la diode.

II.3.3. Rendement quantique et réponse spectrale

II.3.3.1 Rendement quantique

Le facteur de forme et le rendement renseignent sur les performances globales de la structure. Pour détailler ces caractéristiques en fonction de la longueur d'onde utilisée, le rendement quantique est introduit. Le rendement quantique externe est le rapport du nombre de porteurs collectés sur le nombre de photons incidents d'une énergie donnée. Si chaque photon d'une longueur d'onde précise génère un porteur de charge effectivement collecté, le rendement quantique vaut l'unité. Vu que le coefficient d'absorption du silicium varie avec la longueur d'onde du rayonnement.

Les photons de faible longueur d'onde sont absorbés près de la surface (vers la zone d'émetteur) alors que ceux de forte longueur d'onde sont plus en profondeur du dispositif (au niveau de la base). On peut donc accéder au comportement et à l'efficacité de chaque région constitutive de la cellule. Ainsi, ce paramètre est diminué par plusieurs facteurs : les phénomènes de recombinaison en surface et en volume y jouent une part importante. La réflexion sur la face avant et la faible longueur de diffusion des porteurs ont pour conséquence de diminuer le rendement quantique sur toute la gamme de longueurs d'onde (Figure II-12).

Le paramètre présenté ici tient compte des pertes optiques comme la réflexion ou la transmission à travers la cellule : c'est le rendement quantique externe (EQE pour external quantum efficiency). Il peut être corrigé des pertes optiques pour donner le rendement quantique interne (IQE) qui tient compte des caractéristiques propres de la cellule (longueur de diffusion, recombinaisons en surface et en volume) :

$$IQE = \frac{EQE}{(1-R)} \quad (II-28)$$

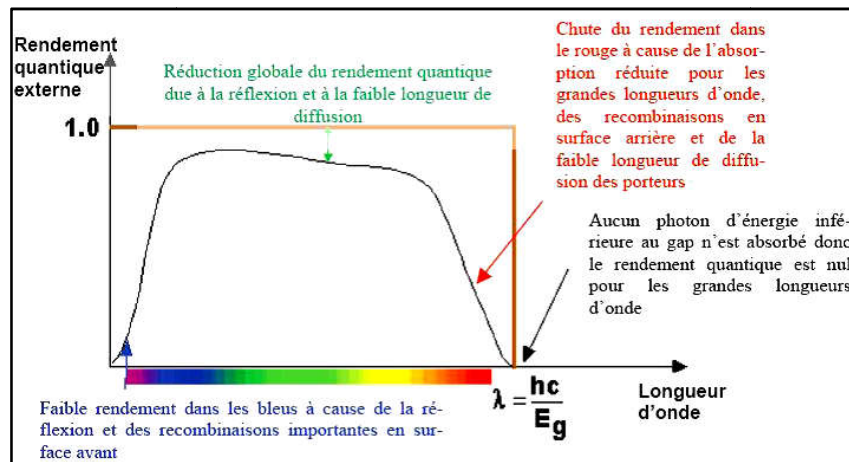


Figure II. 11 :Rendement quantique externe d'une cellule photovoltaïque [45].

II.3.3.2 La réponse spectrale

La réponse spectrale (SR pour spectral response) est de manière analogue le rapport de l'intensité $I(\lambda)$ générée par la cellule sur la puissance incidente $P_{inc}(\lambda)$ pour chaque longueur d'onde:

$$SR = \frac{I(\lambda)}{P_{inc}(\lambda)} = \frac{I(\lambda)}{\phi(\lambda).s} \quad (II-29)$$

Où $\Phi(\lambda)$ est le flux lumineux incident ($W.m^{-2}$). O et S est la surface de la cellule (m^2). SR c'est en général cette grandeur qui est mesurée et qui permet de calculer le rendement quantique en prenant en compte l'énergie des photons :

$$SR = \frac{q\lambda}{hc} EQE \quad (II-30)$$

II.4. Les Techniques pour diminuer des pertes de rayonnements

Les pertes de rayonnements ou pertes optiques correspondent aux photons réfléchis sur la face avant et à ceux transmis à travers la cellule sans être absorbés, sans pouvoir générer des paires électron/trou. Ce qui affecte fortement le courant de court-circuit I_{cc} , notamment le rendement de la cellule photovoltaïque. En plus de la minimisation du recouvrement de la surface avant par les contacts métalliques qui doit être un compromis avec l'obtention d'une bonne résistance série. La réflectivité de la face avant peut être réduite grâce à la texturation et à l'utilisation d'une couche antireflet (CAR). Enfin, le chemin du rayonnement dans la cellule peut être optimisé par la combinaison de la texturation et de l'utilisation d'un réflecteur sur la face arrière ce qui augmente la probabilité d'absorption des photons.

II.4.1 Texturation

L'opération de texturation développe en surface un relief micrométrique (typiquement 5-10 μm), permettant des réflexions multiples (Figure II-13). La longueur d'onde de la lumière incidente étant inférieure aux dimensions des structures ainsi réalisées, les rayons incidents suivent les lois de l'optique géométrique.

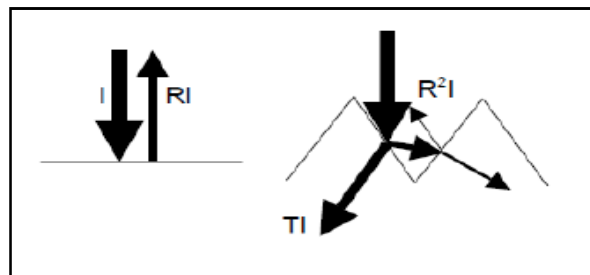


Figure II. 12 :Schéma comparatif des phénomènes de réflexion sur surfaces plane et texturée [47].

- I : Intensité lumineuse incidente.
- R : Le coefficient de réflexion.

- T : Le coefficient de transmission.

On peut citer différentes méthodes de texturisation, par exemple les attaques chimiques. Elles sont très utilisées dans l'industrie photovoltaïque basée sur le silicium. La texturisation basique par des solutions telles que la soude (NaOH) va entraîner la formation de pyramides à la surface du silicium. Son coût relativement faible fait que cette solution est encore utilisée par bon nombre d'industriels. Une technique plus adaptée est la texturisation acide qui présente l'avantage d'attaquer la surface de façon isotopique.

D'autres techniques, comme la texturation mécanique (laminage à froid sous un peigne dentelé) ou la gravure plasma (RIE pour Reactive Ion Etching), la gravure par laser, peuvent également être utilisées.

Intérêt de la texturisation :

- ✓ provoque des réflexions multiples à la surface de la cellule
- ✓ augmente le trajet parcouru par le faisceau optique avant de ressortir de la cellule

II. 4.2 Couche antireflet (CAR)

L'utilisation d'une couche antireflet (CAR) s'impose afin de diminuer davantage la réflectivité. Il s'agit ici d'exploiter les phénomènes d'interférences par division d'amplitude résultant de l'introduction d'une couche mince de matériau diélectrique entre le milieu extérieur (d'indice n_0) et le substrat (silicium d'indice n_{Si}) (1). Comme illustré par (la figure II-14) le choix de l'indice de réfraction n_C et de l'épaisseur d_C de la couche mince peut conduire aux cas limites des interférences destructives ou constructives à la réflexion.

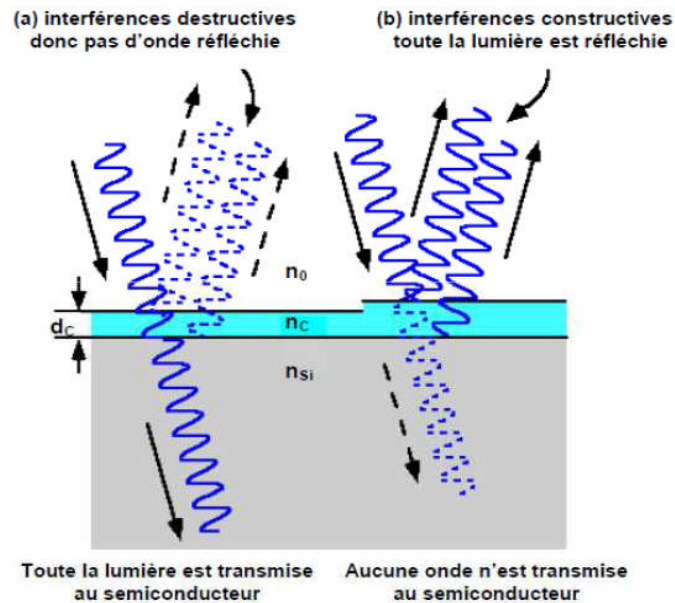


Figure II. 13 : L'introduction d'une couche mince entraîne la division d'amplitude de l'onde incidente, conduisant à des phénomènes d'interférences entre les rayons réfléchis [46].

II.5. La cellule photovoltaïque industrielle en silicium cristallin

II.5.1 la structure de cellules photovoltaïques industrielles :

Le rendement des cellules PV industrielles est compris entre 15 et 17% pour les cellules conventionnelles en silicium monocristallin et 14% environ pour les cellules en silicium multicristallin. La différence de rendement entre les cellules PV industrielles et la cellule élaborée au laboratoire, peut être expliquée par l'existence de deux facteurs : le rendement et le prix. En effet, certains matériaux et techniques (lithographie, silicium FZ, double couche antireflet, émetteur sélectif) utilisés pour la cellule photovoltaïque record ne peuvent pas être adaptés pour l'industrie, vu le défi économique. La plupart des cellules photovoltaïque en silicium massif industrialisées ont la structure présentée sur la figure II-14. Afin de réduire le coût la structure de ces cellules est simplifiée. Par exemple, la texturation de la face avant est réalisée sous forme de pyramides aléatoires ou texturation acide, ensuite une simple couche anti réfléchissante en SiN est déposée. De même, le champ électrique face arrière est obtenu par recuit d'une couche en Al déposée par sérigraphie.

La particularité des cellules au silicium réside dans le fait que le substrat et l'élément actif sont un seul et même matériau semi-conducteur. Une fois les plaques découpées viennent la fabrication des cellules, qui va permettre d'exploiter les propriétés de semi-conducteur du silicium et de transformer l'énergie lumineuse captée en énergie électrique.

Le silicium monocristallin constituant le substrat de type P a une résistivité comprise entre $0.3\Omega\text{cm}$ et $10\Omega\text{cm}$. Son épaisseur totale varie entre $180\mu\text{m}$ en application spatiales, et plus de $300\mu\text{m}$ lors des utilisations dans les systèmes terrestres. Selon la performance électrique recherché, la profondeur de jonction se répartit entre 0.15 et $0.5\mu\text{m}$. On réalise la zone N^+ par diffusion. La concentration en impuretés pouvant dépasser 10^{20}cm^{-2} .

Le rendement de conversion de cette structure atteint 10 à 14% sous un spectre AM0, le courant de court circuit étant proche de $35\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$, et la tension de circuit ouvert entre 0.55 et 0.6V . L'enchainement des étapes ci-dessous représente un procédé industriel standard.

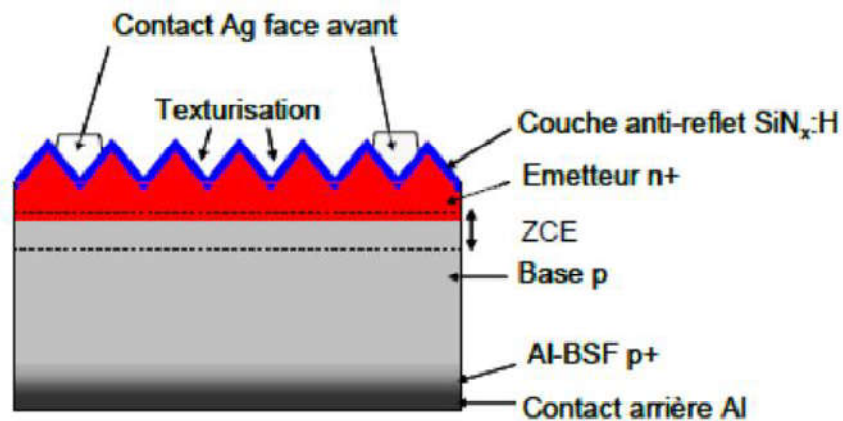


Figure II. 14 : Structure d'une cellule photovoltaïque industrielle en silicium [46]

II.5.2. Les types de cellules photovoltaïques à jonction P-N à base de silicium

Le silicium utilisé en photovoltaïque peut se rencontrer sous trois formes :

- ❖ silicium poly cristallin : il s'agit des matériaux photovoltaïque le plus utilisé, à lui seul plus de 50% du marché mondial. Il offre un bon rendement (12%) pour des coûts de fabrication maîtrisée

- ❖ silicium mono cristallin : son rendement est légèrement supérieur au silicium poly cristallin (15%), en revanche sa fabrication est plus délicate donc plus coûteuse.

- ❖ silicium amorphe : son rendement est bien inférieur à ceux des siliciums cristallins (6%) et son coût est proportionnellement inférieur.

II.5.2.1. Le procédé industriel de Fabrication d'une cellule solaire en silicium cristallin

Le silicium monocristallin constituant le substrat de type P a une résistivité comprise entre $0.3 \Omega\text{cm}$ et $10 \Omega\text{cm}$. Son épaisseur totale varie entre $180 \mu\text{m}$ en application spatiales, et plus de $300 \mu\text{m}$ lors des utilisations dans les systèmes terrestres. Selon la performance électrique recherché, la profondeur de jonction se répartit entre 0.15 et $0.5 \mu\text{m}$. On réalise la zone N+ par diffusion. La concentration en impuretés pouvant dépasser 10^{20}cm^{-3} .

Le rendement de conversion de cette structure atteint 10 à 14% sous un spectre AM0, le courant de court circuit étant proche de $35 \text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$, et la tension de circuit ouvert entre 0.55 et 0.6V .

L'enchaînement des étapes ci-dessous représente un procédé industriel standard auquel il faudra ajouter les sous-étapes de transport, nettoyage et mesure

II.5.2.1.1 Décapage

Les plaques dopées p à partir de bore lors de la cristallisation sont décapées dans un bain chimique afin d'éliminer les défauts superficiels créés par le sciage. Le bain acide est à base d'acide fluorhydrique HF, d'acide acétique CH_3COOH et d'acide nitrique HNO_3 .

II.5.2.1.2 Texturation :

La texturation de la surface en petites pyramides ou entonnoirs permet d'améliorer la collecte des photons dans toutes les directions en réduisant la réflexion. On parle aussi de confinement optique. La gravure sélective est par un bain alcalin de soude NaOH ou de potasse KOH avec des additifs organiques du type alcool isopropylique IPA. d'une scie à fil.

II.5.2.1.3 Dopage :

La zone dopée n est formée par diffusion de phosphore: couche n+ en surface et à la jonction. La diffusion thermique de phosphore P est à partir de trichlorure de phosphore POCl_3 dans un four à passage, $800^\circ\text{C} < T < 900^\circ\text{C}$, suivi d'un recuit. Le retrait de la couche résiduelle de silicate de phosphore se fait dans un bain d'acide fluorhydrique HF. [1]

II.5.2.1.4 Bords de plaque :

La couche n+ est retirée des bords de plaque (sur la tranche) pour séparer, l'émetteur de la face arrière. La gravure par plasma s'effectue par un mélange gazeux tétrafluoro-méthane CF₄ et oxygène O₂ soumis à un champ de radiofréquences. [1]

II.5.2.1.4 Couche antireflet :

Une couche antireflet à base d'oxydes ou de nitrure de silicium ou d'oxydes métalliques est déposée en face avant. Elle sert aussi à passiver la surface en limitant les recombinaisons entre charges afin de conserver la conductivité du matériau. Le dépôt chimique est en phase gazeuse via un plasma (PECVD) d'une couche de Si₃N₄ à partir de silane SiH₄ et d'ammoniac NH₃. [1]

II.5.2.1.5 Champ face arrière :

La face arrière est dopée p+ par diffusion d'aluminium. Cette couche joue aussi un rôle de conducteur ohmique avec l'électrode arrière. La diffusion thermique de l'aluminium Al est à 850°C à partir d'une pâte d'aluminium déposée sur toute la face arrière. [1]

II.5.2.1.6 Métallisation avant

Les contacts avant sont déposés par sérigraphie avec une pâte à l'argent au travers d'une grille. Puis, ils sont séchés dans une étuve à air à 150°C pendant un quart d'heure. [1]

II.5.2.1.7 Métallisation arrière

Une pâte en aluminium est ensuite déposée sur la quasi-totalité de la face arrière. De même, le métal est séché dans une étuve à air à 150°C pendant un quart d'heure. [1]

II.5.2.1.8 Co-firing :

Formation des contacts, passivation du volume et de la face arrière, la cuisson simultanée des contacts « co-firing » permet de combiner la formation des contacts avant (à travers le SiN) et arrière (BSF), ainsi que les effets getter (Al) et passivation par hydrogénation (SiN_x:H). Elle se fait par cuisson rapide sous air à environ 800°C pendant quelques secondes. [1]

II.5.2.1.9 Soudures et test des cellules

Les rubans de connexion sont ensuite soudés à température ambiante sur les faces avant et arrière. Finalement, les cellules sont testées et classées selon leurs performances. [1]



Figure II. 15 : Cellule photovoltaïque à base de silicium polycristallin. [7]

II.5.2.2. Cellules en silicium

Les cellules au silicium monocristallin offrent le meilleur rendement parmi les panneaux solaires disponibles dans le commerce : entre 13 à 15%. Il faudra donc moins de cellules pour atteindre la puissance désirée, mais comme le silicium monocristallin est aussi le plus cher, son seul avantage est finalement d'utiliser une surface réduite : il faut environ 7m² pour obtenir 1 kilo Watt-crête (kWc).



Figure II. 16 : Cellule photovoltaïque à base de silicium monocristallin. [7]

II.5.2.3 Cellules au silicium amorphe :

Les cellules au silicium amorphe sont des cellules à couche mince, c'est-à-dire qu'elles sont fabriquées en déposant une fine couche de silicium sur un support (ou "substrat"), par exemple du verre. L'épaisseur de silicium utilisée est beaucoup plus faible que pour les cellules mono ou poly cristallines qui sont réalisées à partir de tranches de silicium. Ce type de cellule est donc moins cher et plus facile à fabriquer. Sa faible épaisseur permet, par exemple, de les utiliser pour créer des panneaux solaires souples. Cependant ces cellules ont des rendements limités (de l'ordre de 5 à 7%, soit environ 15m² pour obtenir 1kWc) et sont donc réservées à des applications nécessitant peu de puissance. Les cellules au silicium amorphes sont beaucoup utilisées pour l'alimentation de petits appareils solaires (montre, calculatrice...).

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons rappelé quelques notions préliminaires sur le rayonnement solaire et son application dans le domaine photovoltaïque. Ensuite nous avons expliqué le fonctionnement des cellules photovoltaïques standard en silicium poly cristallin, mono cristallin et amorphe leurs caractéristiques et propriétés principales ainsi que les paramètres limitant rendement et leur coût.

Chapitre III

Simulation des cellules photovoltaïques à homojonction en silicium

Introduction :

Dans ce chapitre, nous avons présenté en premier lieu l'influence de l'épaisseur de l'émetteur des cellules solaires à homojonction sur la tension en circuit ouvert V_{oc} , la densité de courant J_{cc} , le facteur de forme FF et sur le rendement η , des différentes cellules en silicium cristallin ; silicium polycristallin et silicium amorphe. Ensuite on a repris les mêmes simulations mais dans des cellules solaires à homojonctions où on introduit une couche intrinsèque. A ce titre nous avons calculé le rendement de chaque cellule à jonction PN par le logiciel PC1D.

III.1. Simulation des cellules solaires à jonction PN avec différents types de silicium:

III.1.1. Présentation de logiciel utilisé :

Le logiciel couramment utilisé dans le domaine photovoltaïque c'est PC1D pour la simulation des différentes structures en silicium (plus de détail sur ce logiciel se trouve sur Annexes A).

III.1.2. Présentation des paramètres utilisés à la simulation des différentes structures à homojonction:

Le choix des paramètres des différents types de silicium (cristallin, poly-Si, amorphe) dopé ou intrinsèque repose sur des résultats expérimentaux montrés sur le tableau I, qui représente les valeurs les plus approchées possibles car les valeurs exactes sont difficiles à déterminer.

1 Texturé 3 95 One sun (AM 1.5, 100mW/cm ²)			
Les paramètres des couches	a-Si/n-a-Si	Poly-Si/n-poly-Si	p-c-Si
- Epaisseurs (µm)	0.001-0.06	0.001-0.06	50 – 300
- La constante diélectrique	11.9	11.9	11.9
- La bande d'énergie (ev)	1.6/1.7	1.1/1.8	1.12
- L'affinité électronique(%)	3.4- 4.05	3.4- 4.05	3.4- 4.05
- La mobilité des électron (cm ² /Vs)	0.2	20	1417
- La mobilité des trous (cm ² /Vs)	0.1	10	470
- Absorption (2.5 eV) (cm ⁻¹)	135015	3390	405
- Absorption (3eV) (cm ⁻¹)	178959	4364	396
- Dopage du fond (cm ⁻³)	1x10 ¹⁶	1x10 ¹⁶	1x10 ¹⁶
- Concentration du dopage (cm ⁻³)	-/5x10 ¹⁸	-/5x10 ¹⁸	5x10 ¹⁸
- Diffusion des électrons (cm ² /s)	0.0051	0.31	28.6
- Diffusion des trous(cm ² /s)	0.0026	0.08	10.96
- La longueur de diffusion (µm)	0.033	0.108	213.8
- La recombinaison de surface d'avant	10 ⁷	10 ⁷	-
- La recombinaison de surface arrière	10 ⁶	10 ⁶	-

Tableau III. 1. : Les paramètres physiques, utilisés comme données pour la simulation [Obtenue a partir d'un livre]

III.1.3. Présentation des structures à simuler :

Nous avons simulé trois structures à homojonction à base de silicium :

Structure 1 : Silicium cristallin (n)/silicium cristallin (p)

Structure 2 : Silicium polycristallin (n)/silicium polycristallin (p)

Structure 3: (Silicium amorphe (n)/silicium amorphe (p)

Dans les trois cas on a utiliser le logiciel « PC1D » (voire annexe A),

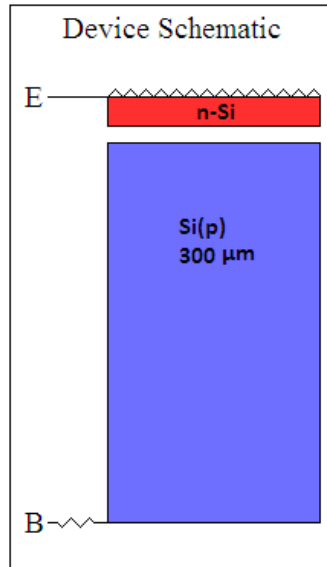


Figure III. 1: Structure des cellules solaires à homojonction des trois cas à simulé à l'aide de PCID

Après on a repris la simulation des mêmes structures mais on a ajouté entre la couche de l'émetteur et la couche de la base (substrat) une couche intermédiaire appelée couche intrinsèque

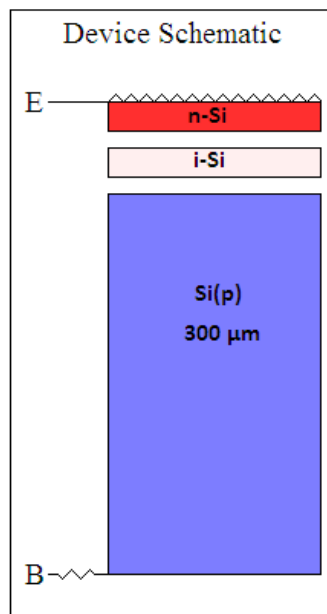


Figure III. 2: Structure des cellules solaires à homojonction des trois à cas simulé à l'aide de PCID

Dans ce travail, l'épaisseur de l'émetteur varie de (1- 60 nm).

Le substrat de silicium cristallin et de type p et d'épaisseur 300μm.

Le tableau III.1 contient la liste de tous les paramètres nécessaires à cette simulation.

Suppositions :

Pour étudier l'influence de l'épaisseur de l'émetteur, nous avons fixé l'épaisseur du substrat (300 μm) et nous avons varié l'épaisseur de la couche emetteur de (1-60 nm).

Dans ces cellules solaires de surface 1 cm^2 simulées, la concentration de dopage et de $2 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ de face avant (face éclairée), texturée en pyramides, cette texturation nous donne une réduction importante du coefficient de réflexion et ainsi des pertes optiques dans les cellules à étudier. Le substrat est d'épaisseur 300 μm dopé à 10^{16}cm^{-3} . Les résultats obtenus sont :

III.1.4. Simulation de la cellule à homojonction (silicium cristallin(n)/silicium cristallin(p)) :

III.1.4.1. Résultats de la simulation à l'aide de PC1D

III.1.4.1.1. Influence de l'épaisseur de l'émetteur sur la tension en circuit ouvert V_{co} :

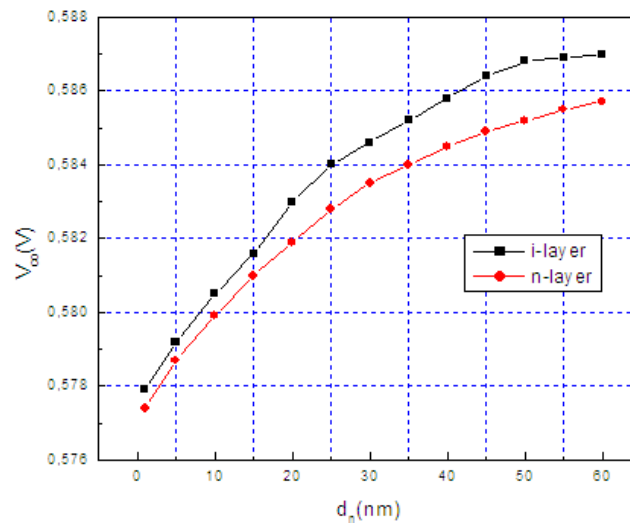


Figure III. 3: Effet de l'épaisseur de la couche émetteur cristallin (n) et de la couche intrinsèque dans une cellule à jonction PN sur la tension (V_{co}).

Interprétations des résultats:

On remarque que la tension varie de (0,577-0,585V) avec l'augmentation de l'épaisseur de l'émetteur. Nous pouvons donc conclure que l'épaisseur de l'émetteur d'influence sur la tension en circuit ouvert V_{co} .

D'autre part, nous remarquons que la valeur de celle-ci s'améliore à cause de l'ajout de la couche intrinsèque et qu'elle augmente de 0,577V jusqu'au 0,587. Dans ce cas aussi l'augmentation de l'épaisseur de l'émetteur influe sur la tension V_{co} .

III.1.4.1.2. Influence de l'épaisseur de l'émetteur sur la densité de courant J_{cc} :

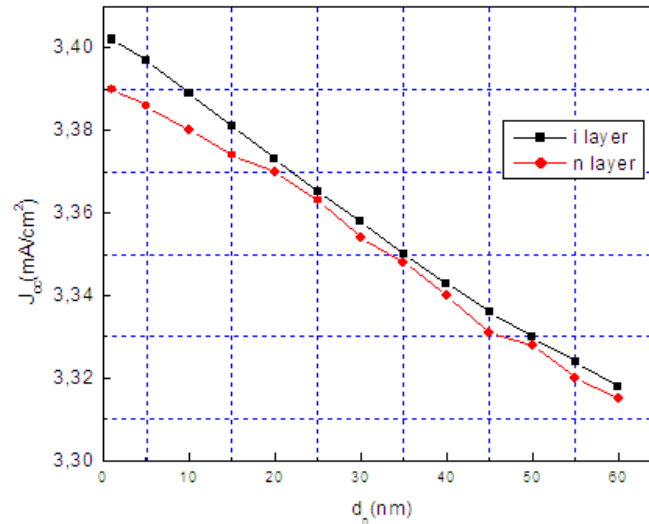


Figure III. 4: Effet de l'épaisseur de la couche émetteur cristallin (n) et de la couche intrinsèque dans une cellule à jonction PN sur la densité de courant (J_{cc})

Interprétations des résultats:

Nous notons, que la densité de courant (J_{cc}) diminue de 3.39 mA/cm² à 3.315mA/cm² lorsque l'épaisseur de l'émetteur varie de 1-60nm. L'épaisseur de l'émetteur joue un rôle important sur la valeur de la densité de courant (J_{cc}).

Et pour le cas où la structure contient une couche intermédiaire, la densité de courant J_{cc} diminue de 3.402mA/cm² à 3.318mA/cm², tandis que l'épaisseur d'émetteur augmente de (1-60nm).

III.1.4.1.3. Influence de l'épaisseur de l'émetteur sur le facteur de forme FF % :

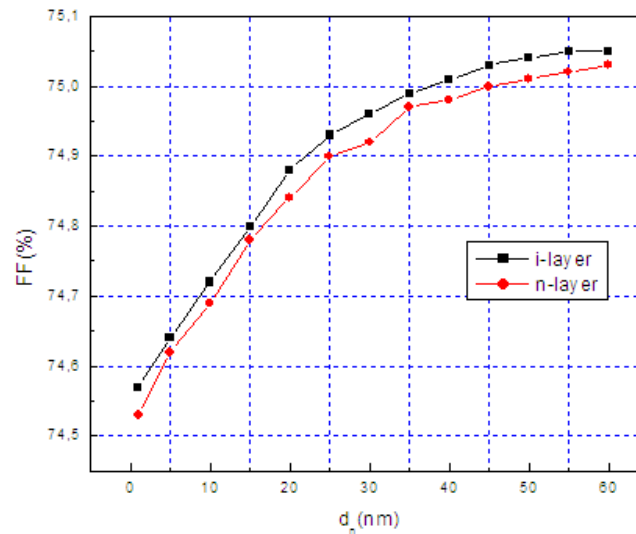


Figure III. 5: Effet de l'épaisseur de la couche émetteur cristallin(n) et de la couche intrinsèque dans une cellule a homojonction PN sur le facteur de forme (FF %).

Interprétations des résultats:

Nous pouvons dire que les valeurs de facteur de forme FF varient légèrement entre (74,53 et 75,03%). Ainsi ils dépendent de l'épaisseur de la couche émetteur.

La même remarque est faite pour le cas où la cellule à homojonction contient au milieu une couche intrinsèque qui augmente la valeur de facteur de forme de 74,57% jusqu'à 75,05%. Dans ce cas là le facteur de forme FF reste constant lorsque l'épaisseur de l'émetteur augmente.

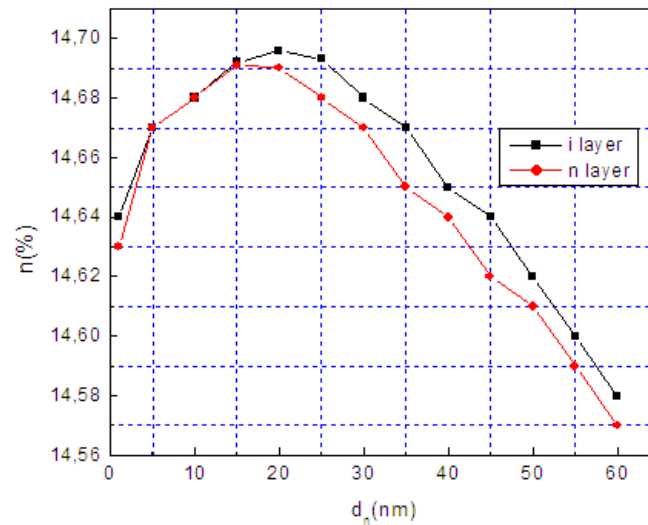
III.1.4.1.4. Influence de l'épaisseur de l'émetteur sur le rendement η :

Figure III. 6: Effet de l'épaisseur de la couche émetteur cristallin (n) et de la couche intrinsèque dans une cellule à homojonction PN sur le rendement (η)

Interprétations des résultats :

D'après les résultats obtenus, nous pouvons conclure que l'épaisseur de l'émetteur de la cellule est un facteur important pour l'absorption des photons. Il n'est pas nécessaire de fabriquer des cellules solaires à homojonction avec des épaisseurs trop grandes pour cela nous choisissons que l'épaisseur de l'émetteur soit la plus mince avec lequel nous avons un rendement de 14,69%.

La même remarque est conclue pour le cas de la cellule solaire avec couche intrinsèque qui à pour effet d'augmenté le rendement aussi 14,696%.

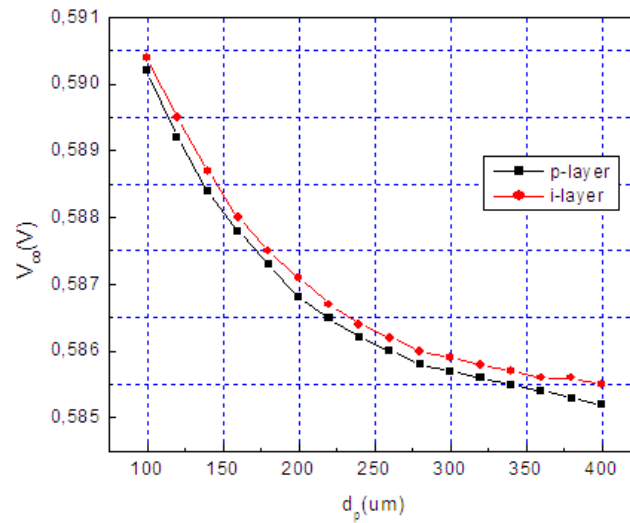
III.1.4.1.5. Influence de l'épaisseur de base (p) sur la tension en circuit ouvert V_{co} :

Figure III. 7: Effet de l'épaisseur de la base (p) et de la couche intrinsèque dans une cellule à jonction PN sur la tension (V_{co}).

Interprétations des résultats :

On remarque que plus l'épaisseur de la base (couche de type p) augmente plus la tension en circuit ouvert diminue, donc il arrive jusqu'à 0.585V dans la cellule sans couche (i), et à 0.585V dans la couche avec couche intrinsèque (i). on conclue que l'épaisseur de la base influe sur la tension en circuit ouvert dans les deux structure.

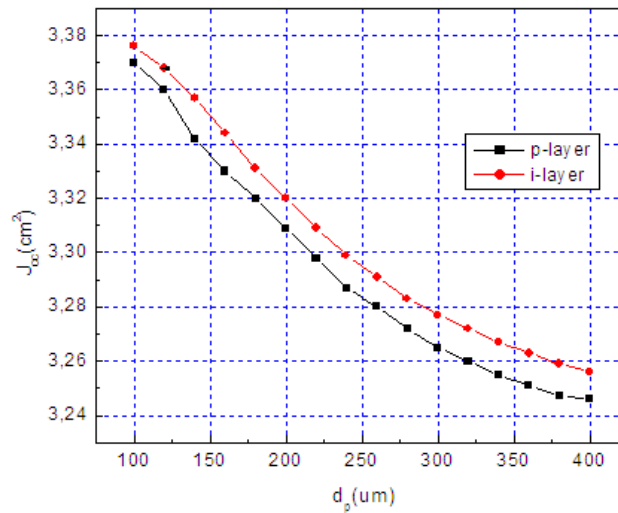
III.1.4.1.6. Influence de l'épaisseur de base (p) sur la densité de courant J_{cc} :

Figure III. 8: Effet de l'épaisseur de base (p) cristallin et de la couche intrinsèque dans une cellule à jonction PN sur la densité de courant (J_{cc})

Interprétations des résultats :

Nous notons, que la densité de courant (J_{cc}) diminue de $3.37 \text{ mA}/\text{cm}^2$ à $3.246 \text{ mA}/\text{cm}^2$ lorsque l'épaisseur de base varie de $100\text{-}400 \mu\text{m}$. L'épaisseur de la base joue un rôle important sur la valeur de la densité de courant (J_{cc}).

Et pour le cas où la structure contient une couche intermédiaire, la densité de courant J_{cc} diminue de $3.376 \text{ mA}/\text{cm}^2$ à $3.256 \text{ mA}/\text{cm}^2$, tandis que l'épaisseur base augmente de ($100\text{-}400 \mu\text{m}$).

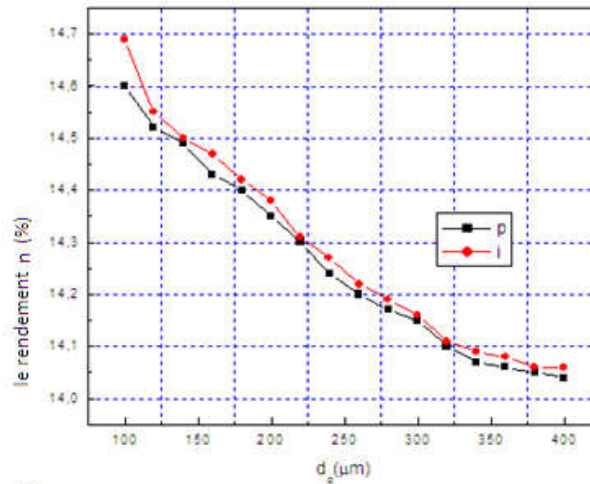
III.1.4.1.7. Influence de l'épaisseur de base Si (p) sur le rendement η :

Figure III. 9: Effet de l'épaisseur de base cristallin (p) et de la couche intrinsèque dans une cellule a homojonction PN sur le rendement (η)

Interprétations des résultats :

On remarque , que le rendement (η) diminue de 14.6 % à 14.04% lorsque l'épaisseur de base varie de 100-400 μm . L'épaisseur de base joue un rôle moins important que celle de l'émetteur sur la valeur de rendement , mais il a une influence .

Et pour le cas où la structure contient une couche intermédiaire, le rendement diminue de 14.69% à 14.06%, tandis que l'épaisseur de base augmente de (100-400 μm).

III.1.4.1.3. Influence de l'épaisseur de l'émetteur sur le facteur de forme FF % :

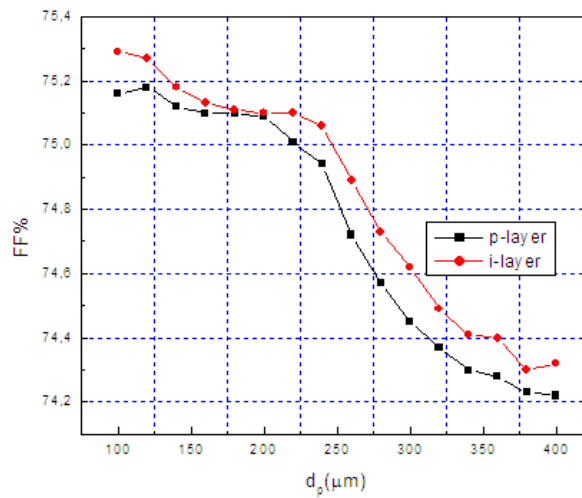


Figure III. 10: Effet de l'épaisseur de la couche base cristalline(p) et de la couche intrinsèque dans une cellule a homojonction PN sur le facteur de forme (FF %).

Interprétations des résultats :

On remarque d'après les courbes, que si l'épaisseur de base(p) augmente de (100 a 400 μm),le facteur de forme dans la cellule sans (i) diminue de (75,16 à 74,22%)et il diminue aussi dans la cellule avec la couche (i) de (75,29 à 74,32%)

III.1.4.2. Réponse spectrale de la cellule solaire à homojonction (silicium cristallin (n) /silicium cristallin(p)) :

Mesure spectrale est de repérer les zones de la cellule qui génèrent le plus de photocourant, où au contraire le moins de L'objectif de la photocourant, par exemple une faible réponse aux basses longueurs d'ondes met en évidence un problème a la surface, alors qu'une faible réponse dans les longueurs d'ondes intermédiaires peut montrer que la longueur de diffusion des porteurs générés dans le volume est trop faible pour que ceux-ci soient collectés.

La figure IV.7 représente le rendement quantique, la réponse spectrale est obtenue en utilisant l'expression suivante :

$$RS = \frac{q(1-R)}{h\nu.RQI} \dots\dots\dots(III.1)$$

RQI : le rendement quantique interne.

R : le coefficient de réflexion.

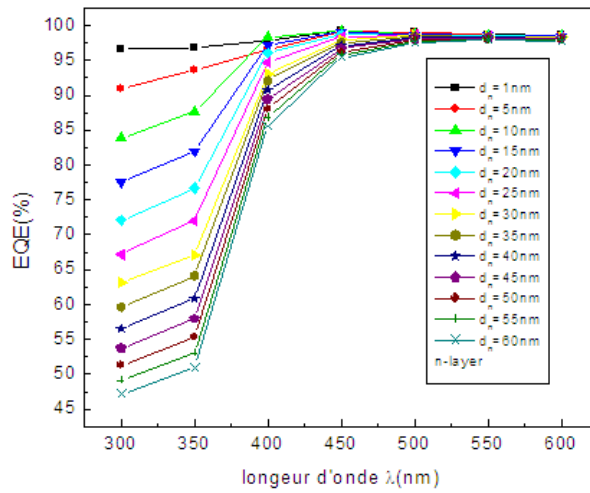


Figure III. 11: EQE spectre solaire d'une cellule à jonction PN en fonction de l'épaisseur de la couche n (couche émetteur) d_n (1, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50 et 60 nm).

Ces courbes sont calculées à partir de Pc1D

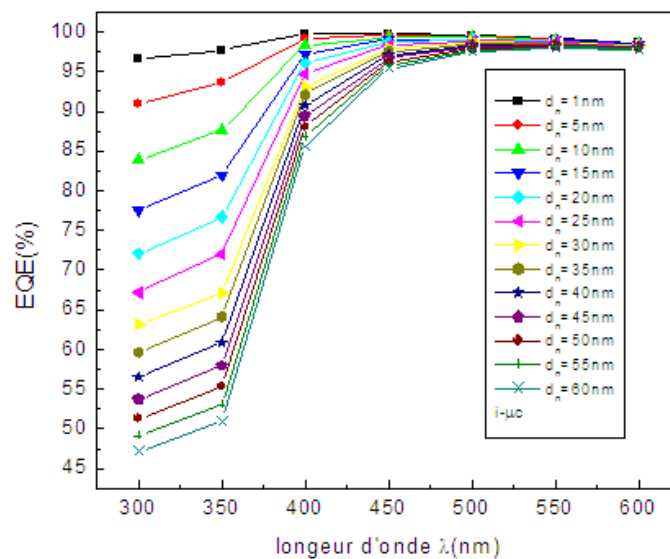


Figure III. 12: EQE spectre d'une cellule a jonction PN en fonction de l'épaisseur de la couche i (couche intrinsèque) d_i (1, 3, 5, 10 et 15 nm). Ces courbes sont calculées à partir de Pc1D.

Interprétations des résultats :

D'après les résultats en trouvant que le spectre solaire augmente en parallèle avec la longueur d'onde jusqu'au maximum c'est 99.77% dans la cellule avec couche intrinsèque, et un peu moins dans la cellule normale 99.3% , en plus de sa en remarque que plus l'épaisseur de l'émetteur est fine plus l'influence de la longueur d'onde sur la cellule augmente c'est-à-dire l'absorption va augmenté.

III.1.5. Simulation de la cellule à jonction PN (silicium polycristallin(n)/silicium polycristallin(p)) :

III.1.5.1. Résultats de la simulation à l'aide de PC1D (émetteur et base en silicium polycristallin poly-Si) :

III.1.5.1.1. Influence de l'épaisseur de l'émetteur sur la tension en circuit ouvert V_{co} :

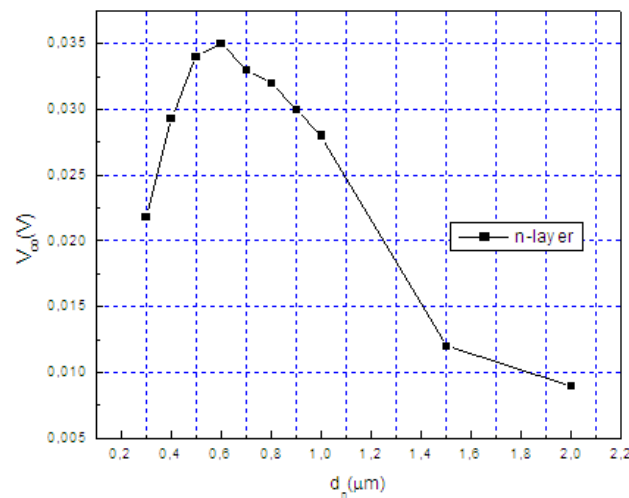


Figure III. 13: Effet de l'épaisseur de la couche émetteur poly cristallin (poly-Si)(n) et de la couche intrinsèque dans une cellule a jonction PN sur le (V_{co})

Interprétations des résultats:

On remarque dans ce travail que la tension diminue de (0.0218-0.009V) avec l'augmentation de l'épaisseur de l'émetteur (0.3-2μm), donc on peut dire que l'influence de l'épaisseur de l'émetteur sur la tension en circuit ouvert V_{co} est importante.

Mais l'ajout de la couche intrinsèque dans la cellule solaire la tension se stabilise autour de 0.555V.

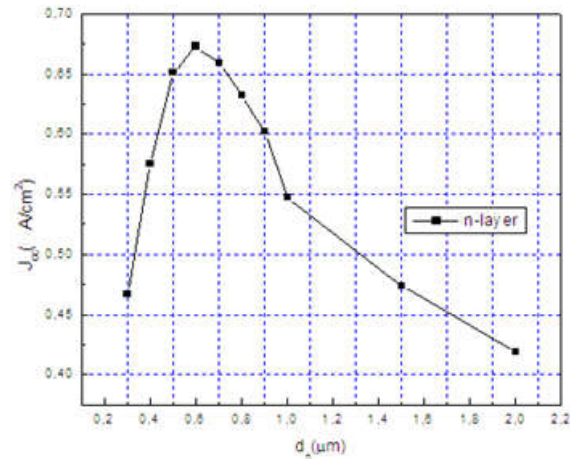
III.1.5.1.2. Influence de l'épaisseur de l'émetteur sur la densité de courant J_{cc} :

Figure III. 14: Effet de l'épaisseur de la couche émetteur poly cristallin (poly-Si)(n) et de la couche intrinsèque dans une cellule a jonction PN sur la densité de courant (J_{sc})

Interprétations des résultats:

Notons ici que, la densité de courant (J_{cc}) augmente de $37.9 \text{ mA}/\text{cm}^2$ jusqu'à $37.4 \text{ mA}/\text{cm}^2$ avec l'augmentation de l'épaisseur de l'émetteur de 1-60nm donc la variation de l'épaisseur de l'émetteur influe sur la densité de courant (J_{cc}).

Et pour le cas où la structure contient une couche intermédiaire (couche intrinsèque) la densité de courant J_{cc} diminue de $37.6 \text{ mA}/\text{cm}^2$ à $37.3 \text{ mA}/\text{cm}^2$ tandis que l'épaisseur d'émetteur augmente de (1-60nm) donc on peut dire aussi que la couche intrinsèque a pour effet de diminué aussi la densité de courant J_{cc} .

III.1.5.1.3. Influence de l'épaisseur de l'émetteur sur le facteur de forme FF %:

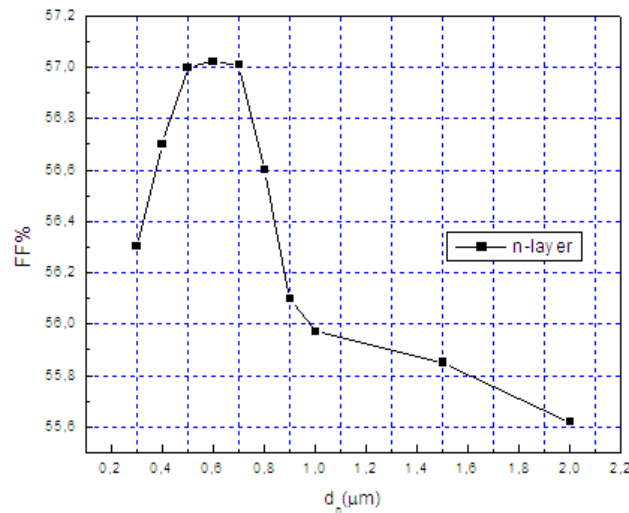


Figure III. 15: Effet de l'épaisseur de la couche émetteur poly cristallin (poly-Si)(n) et de la couche intrinsèque dans une cellule à jonction PN sur le facteur de forme (FF %)

Interprétations des résultats :

On peut dire que les valeurs de facteur de forme FF augmentent (59.5 à 60.5%) avec l'augmentation de l'épaisseur (1-60nm), donc ils sont dépendants de l'épaisseur de la couche émetteur.

La même remarque est faite pour le cas où la cellule à jonction pn en polycristallin contient au milieu une couche intrinsèque qui augmente la valeur de facteur de forme jusqu'à 62.5%, dont le cas où la variation de l'épaisseur reste influençable sur le facteur de forme FF.

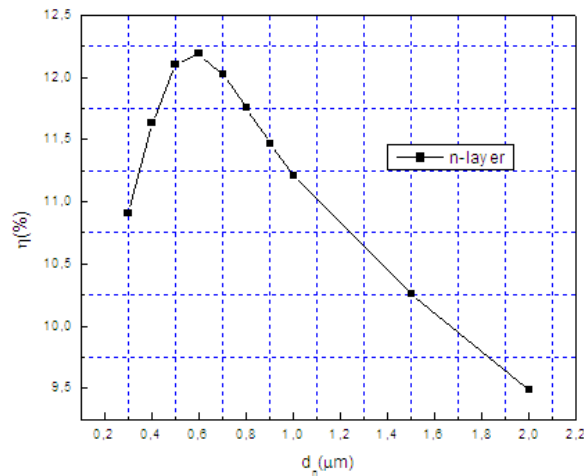
III.1.5.1.4. Influence de l'épaisseur de l'émetteur sur le rendement η :

Figure III. 16: Effet de l'épaisseur de la couche émetteur poly cristallin (poly-Si)(n) et de la couche intrinsèque dans une cellule à jonction PN sur le (η)

Interprétations des résultats:

D'après les résultats obtenus, nous pouvons conclure que l'épaisseur de l'émetteur de la cellule augmente considérablement avec l'augmentation de rendement $12,9\%$ donc c'est un facteur important pour l'absorption des photons.

La même remarque est conclue pour le cas de la cellule solaire avec couche intrinsèque qui à pour effet d'augmenté le rendement aussi 13% , donc la couche intrinsèque influe aussi sur le rendement.

III.1.5.2. Réponse spectrale de la cellule solaire à jonction PN en silicium polycristallin) :

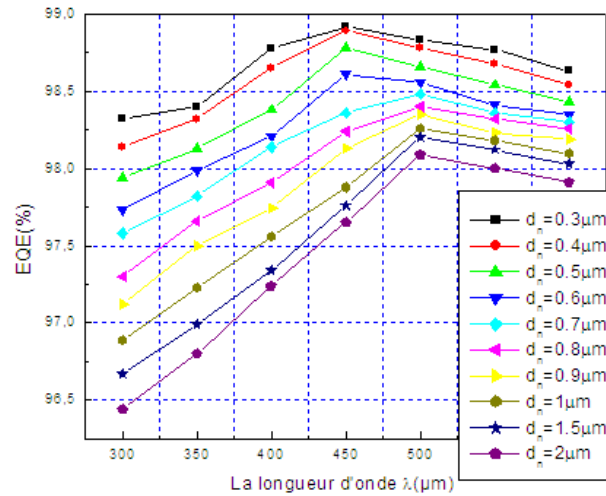


Figure III. 17: EQE spectre d'une cellule à jonction pn en polycristallin d_{ni} (0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.5 et 2 μm). Ces courbes sont calculées à partir de Pc1D

III. 2. Etude expérimentale de la cellule solaire à jonction pn en silicium amorphe

C'est l'étude de troisième cas où la cellule solaire est construite avec le silicium amorphe (a-Si), la simulation est basée sur les mêmes paramètres utilisés précédemment.

III.2.1. Analyse de la caractéristique I(V):

La cellule simulée est une cellule solaire à jonction pn construite avec le silicium amorphe. L'émetteur est le silicium amorphe type (n) dopée à $5 \cdot 10^{18} \text{cm}^{-3}$, d'épaisseur 5nm. La base c'est en silicium amorphe de type (p) dopée 10^{16}cm^{-3} , et d'épaisseur à 300 μm . La face avant est texturée en pyramides. Le BSF est fortement dopée $5 \cdot 10^{18} \text{cm}^{-3}$, son épaisseur est de 1nm.

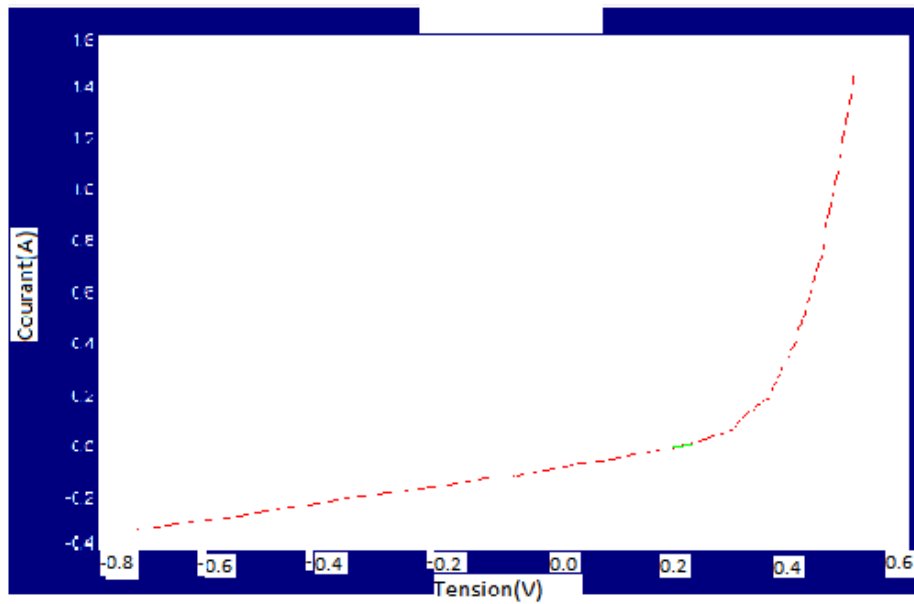


Figure III. 18: La caractéristique $I(V)$ de la cellule solaire à jonction pn en silicium amorphe (silicium amorphe(n) / silicium amorphe(p)).

Interprétations des résultats:

On peut dire que la caractéristique $I(V)$ et les résultats obtenus ($V_{co}=400.1\text{mV}$, $J_{cc}=27.78\text{ mA}$, $FF=80.84\%$, $\eta=9.49\%$), sont similaires à la caractéristique d'une diode étudiée théoriquement sous éclairage.

III.2.2.la Réponse spectrale :

La zone pp+ engendre un champ électrique interne et joue un rôle important dans le fonctionnement des cellules solaires. En effet, elle a quatre effets sur les performances des cellules solaires :

Repousser les électrons vers la jonction n-p, et améliorer le rendement de collecte des porteurs.

Motiver le piégeage des porteurs minoritaires.

Diminuer les recombinaisons en surfaces arrière des porteurs minoritaires.

Augmenter l'absorption optique d'une partie du spectre solaire incident représente le rendement quantique interne. la réponse spectrale est obtenue en utilisant l'expression (II-29) déjà citée en (II.3.3.2)

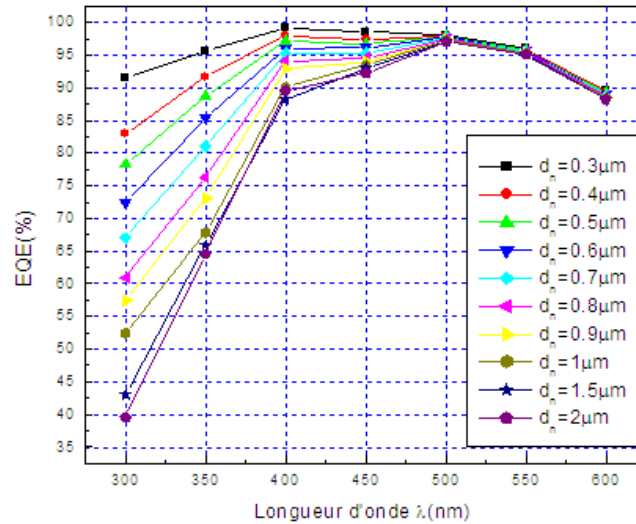


Figure III. 19: EQE spectre d'une cellule à jonction pn en fonction de l'épaisseur de la couche n (couche émetteur) de silicium amorphe d_{ni} (0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1, 1.5, et 2 μm). Ces courbes sont calculées à partir de PCID

III. 3. Résultats de simulation de la variation de l'épaisseur d'émetteur ou de substrat de la cellule à jonction PN (Al/ITO/ silicium amorphe(n) / silicium amorphe(p)/BSF/Al)

III.3.1. Etude de l'influence de l'épaisseur de l'émetteur n+(silicium amorphe) :

Pour étudier l'influence de l'épaisseur de l'émetteur, nous avons pris une cellule d'épaisseur de base (silicium amorphe(p)) fixe (250 μm), et nous avons varié celle de l'émetteur (silicium amorphe(n)) de (1-60nm).

III.3.1.1. Influence de l'épaisseur de l'émetteur amorphe sur la tension en circuit ouvert V_{co} :

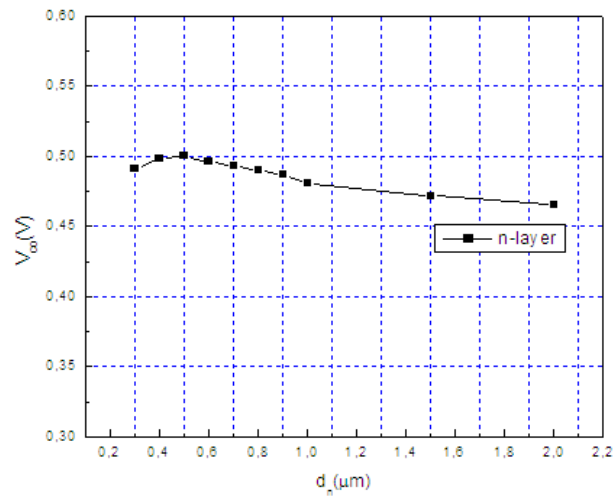


Figure III. 20: Effet de l'épaisseur de la couche émetteur de silicium amorphe (a-Si)(n) sur la tension en circuit ouvert (V_{co}), dans une cellule a jonction pn

Interprétations des résultats:

On remarque que la variation de l'épaisseur de l'émetteur n'a pas de grande influence sur la tension en circuit ouvert de (0,46_0,5 V), la courbe montre qu'elle change très légèrement au moment où l'épaisseur de l'émetteur augmente.

III.3.1.2. Influence de l'épaisseur de l'émetteur sur la densité de courant J_{cc} :

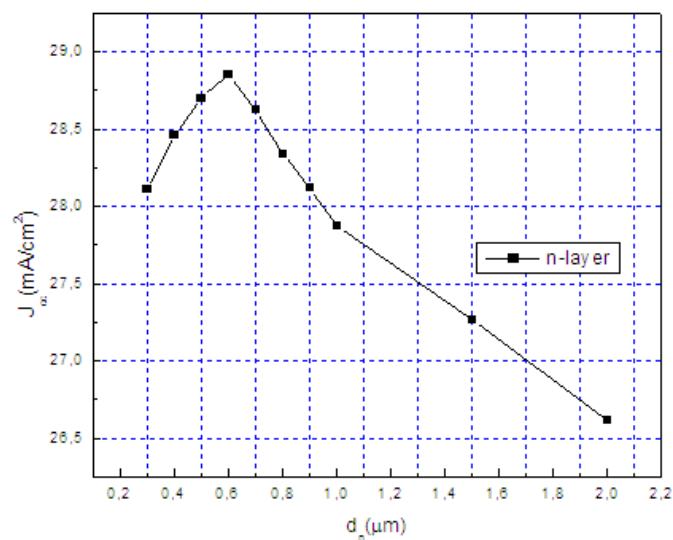


Figure III. 21: Effet de l'épaisseur de la couche émetteur de silicium amorphe (a-Si)(n) sur la densité de courant (J_{cc}), dans une cellule a jonction pn

Interprétations des résultats:

Nous notons, que la densité de courant (J_{cc}) diminue de 28.85mA/cm^2 à 26.61mA/cm^2 lorsque l'épaisseur de l'émetteur varie de $0.3\text{-}2\mu\text{m}$. Donc on conclut que l'épaisseur de l'émetteur joue un rôle important sur la valeur de la densité de courant (J_{cc}).

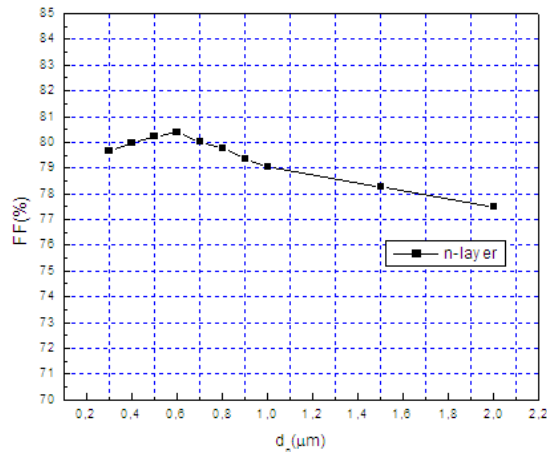
III.3.1.3. Influence de l'épaisseur de l'émetteur sur le facteur de forme FF % :

Figure III. 22: Effet de l'épaisseur de la couche émetteur de silicium amorphe ($a\text{-Si}(n)$) sur le facteur de forme (FF %), dans une cellule à jonction pn

Interprétations des résultats:

Nous pouvons dire que les valeurs de facteur de forme FF varient de (78 à 80,32%). Elles sont donc indépendantes de l'épaisseur de la couche émetteur. Pas d'influence remarquable.

III.3.1.4. Influence de l'épaisseur de l'émetteur sur le rendement η :

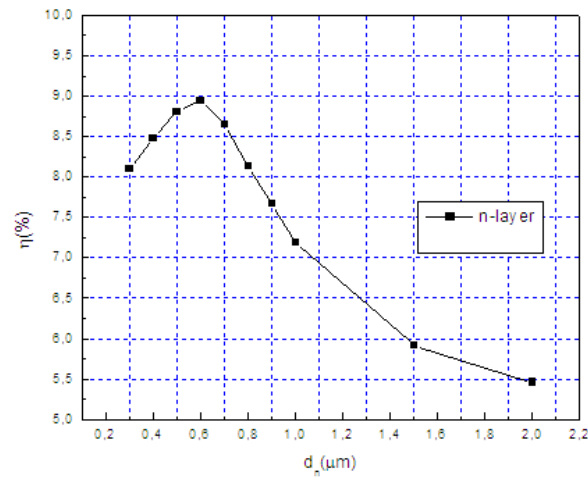


Figure III. 23: Effet de l'épaisseur de la couche émetteur de silicium amorphe (a-Si)(n) sur le rendement (η), dans une cellule à jonction pn

Interprétations des résultats:

D'après les résultats obtenus, nous pouvons conclure que l'épaisseur de l'émetteur de la cellule est un facteur important pour l'absorption des photons. C'est pourquoi nous devons opter pour le choix des cellules solaires à jonction en silicium amorphe avec des épaisseurs d'émetteur mince avec lequel nous avons un rendement de 8.94%.

III.3.2. Etude de l'influence de l'épaisseur de substrat de type (p) (silicium amorphe(p)) :

Remarque :

Nous avons choisi un émetteur de 5nm pour toutes les autres simulations qui suivent, cela est dû au rendement élevé obtenu par rapport aux autres épaisseurs plus grandes

III.3.2.1. Influence de l'épaisseur de substrat amorphe type (p) sur la tension en circuit ouvert

V_{co} :

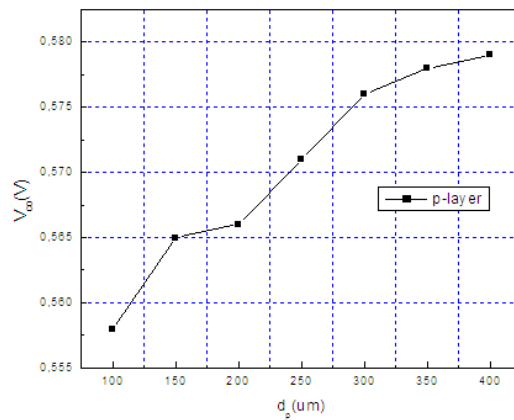


Figure III. 24: Effet de l'épaisseur de substrat type p sur la tension en circuit ouvert (V_{co}), dans une cellule a jonction pn

Interprétations des résultats:

On remarque sur cette courbe que la tension augmente de (0.563- 0.615V) avec l'augmentation de l'épaisseur de l'émetteur (50-400 μm), donc on peut dire que l'influence de l'épaisseur de substrat sur la tension en circuit ouvert V_{co} est importante.

III.3.2.2. Influence de l'épaisseur de substrat amorphe type (p) sur la densité de courant J_{sc} :

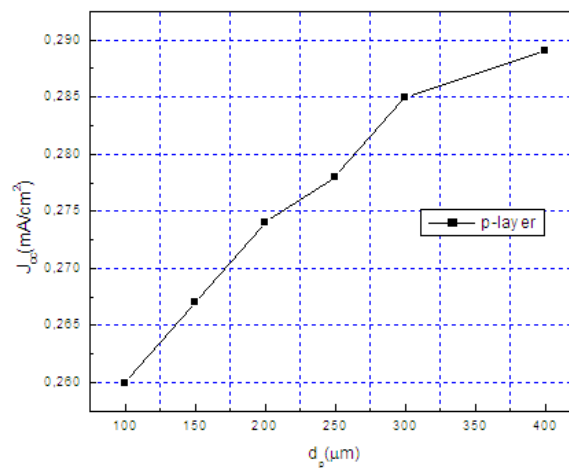


Figure III. 25: Effet de l'épaisseur de substrat type p sur La densité de courant (J_{sc}), dans une cellule a jonction pn

Interprétations des résultats:

On remarque que la densité de courant (J_{cc}) augmente aussi considérablement (de 25.5 mA/cm^2 à 29.7 mA/cm^2) avec l'augmentation de l'épaisseur de substrat type p. on peut dire donc que l'épaisseur de substrat influe sur la densité de courant (J_{cc}).

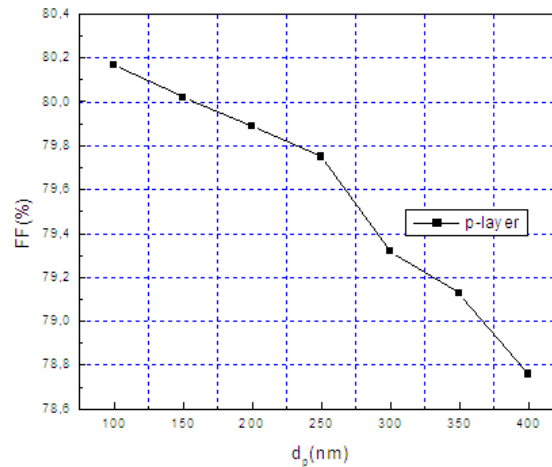
III.3.2.3. Influence de l'épaisseur de substrat amorphe type p sur le facteur de forme FF %:

Figure III. 26 : Effet de l'épaisseur de substrat type p sur le facteur de forme (FF %), dans une cellule à jonction pn

Interprétations des résultats:

On peut dire que les valeurs de facteur de forme FF diminuent légèrement (de 80.17% à 78.76%) avec l'augmentation de l'épaisseur ($50\text{-}400\mu\text{m}$), donc ils sont dépendants de l'épaisseur de substrat.

Dans ce cas la variation de l'épaisseur reste influençable sur le facteur de forme FF.

III.3.2.4. Influence de l'épaisseur de substrat amorphe type p sur le rendement η :

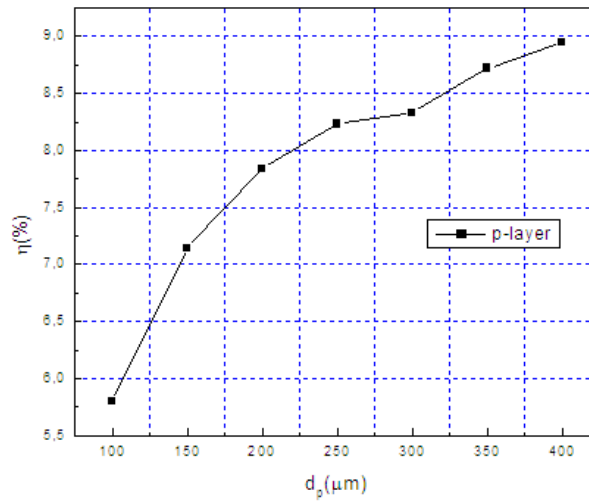


Figure III. 27: Effet de l'épaisseur de substrat type p sur le rendement (η), dans une cellule amorphe à jonction pn

Interprétations des résultats:

D'après les résultats obtenus, nous pouvons conclure que l'épaisseur de substrat de la cellule est un facteur important pour l'absorption des photons autrement dit sur le rendement de la cellule solaire à jonction pn en silicium amorphe.

III.4. Résultats de simulation de la variation de dopage d'émetteur ou de substrat de la cellule à jonction pn (silicium cristalin (n) / silicium cristalin (p)) :

Maintenant, nous fixons tous les paramètres de la cellule solaire à jonction pn (**cristalin (n) / silicium cristalin (p)**), on choisie une épaisseur d'émetteur d'environ 5nm, et une épaisseur de substrat de 250 μm , ensuite nous faisons varier le dopage de l'émetteur .

III.4.1. Etude de l'influence de la variation de dopage de l'émetteur (n) et du substrat (p) (silicium cristalin).

III.4.1.1. Influence de dopage de l'émetteur sur la tension en circuit ouvert V_{co}

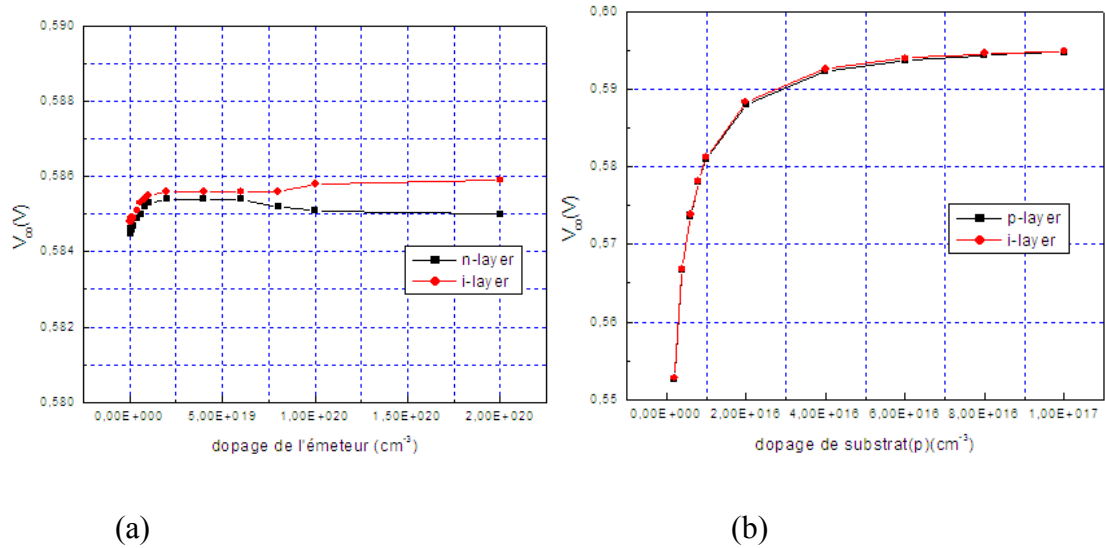


Figure III. 28: Effet de dopage de l'émetteur (a), et du dopage de substrat (b) (silicium cristalin) sur la tension (V_{co}), dans une cellule a jonction pn

Interprétations des résultats:

Nous notons ici dans la figure (a), que la tension en circuit ouvert V_{co} est indépendante à la variation de dopage de l'émetteur sur l'intervalle $[10^{17}, 10^{20}] \text{ cm}^{-3}$. par contre au deuxième figure (b) en remarque que le dopage du substrat entre $[10^{15}, 10^{17}]$ influe sur la tension V_{co} et elle augmente de (0.55V_0.59V) dans les deux jonction avec et sans couche intrinsèque .

III.4.1.2. Influence de dopage de l'émetteur et de substrat sur la densité de courant J_{cc} :

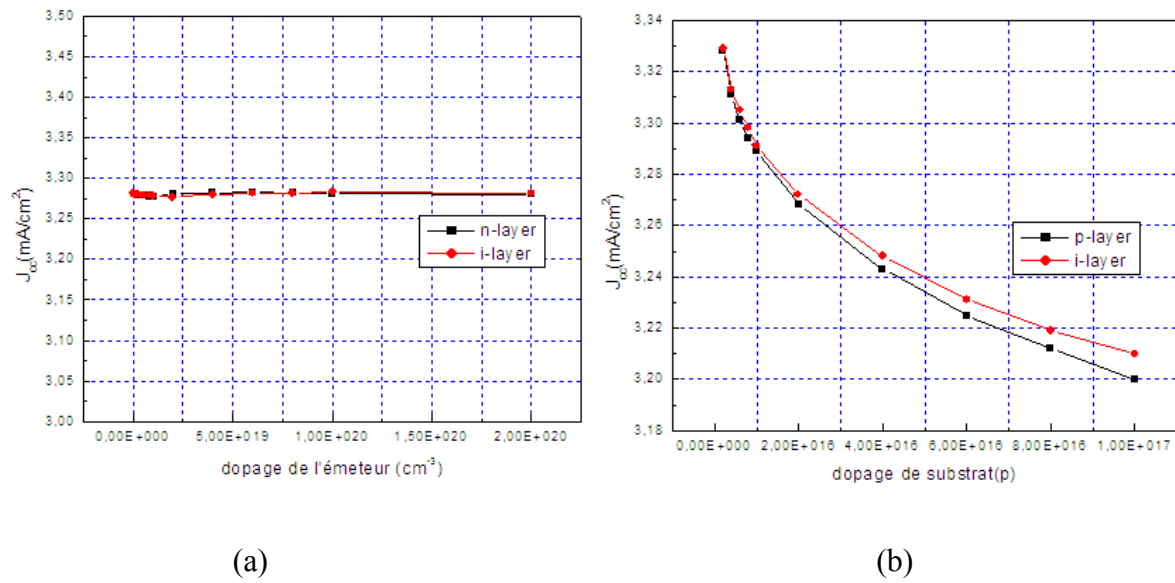


Figure III. 29: Effet de dopage de l'émetteur (a), et l'effet de substrat (b) (silicium cristalin) sur la densité de courant (J_{cc}) dans une cellule à jonction pn

Interprétations des résultats :

Nous remarquons dans la courbe (a) que le courant de court circuit J_{cc} varie très peu en fonction du dopage de l'émetteur. Mais par contre au figure (b) elle diminue de (33.2_32mA/ cm²) dans les deux jonction avec et sans couche intrinsèque , au même temps avec l'augmentation de dopage du substrat de [10¹⁵, 10¹⁷] .

III.4.1.3. Influence de dopage de l'émetteur et de substrat sur le rendement η dans la cellule du silicium cristalin :

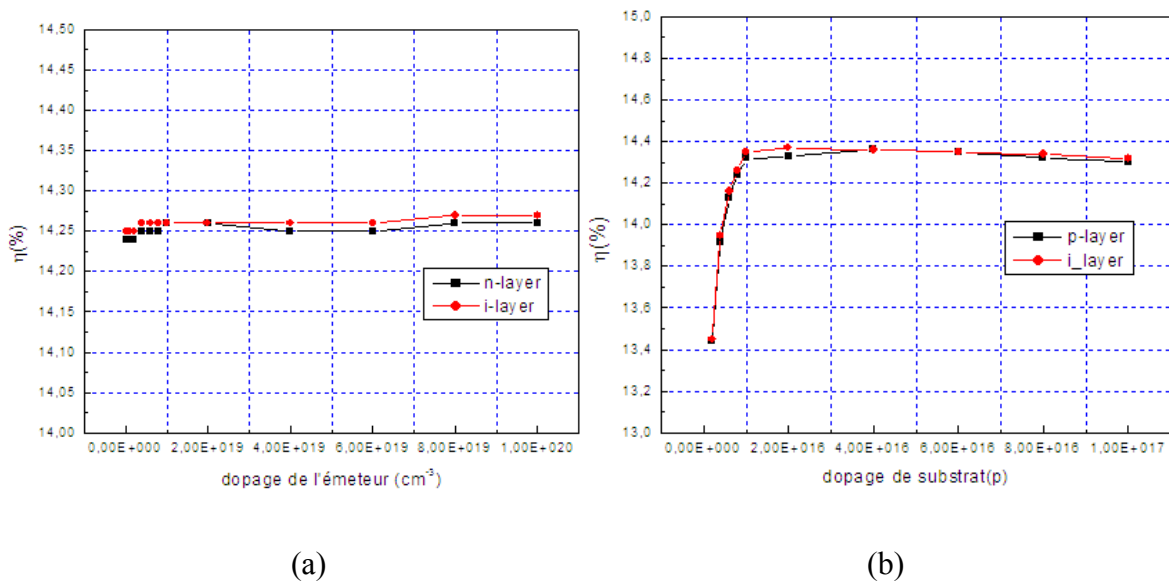


Figure III. 30: Effet de dopage de l'émetteur (a), et l'effet de dopage de substrat (b) (silicium cristalin) sur rendement η dans une cellule a jonction pn

Interprétations des résultats:

La valeur du rendement est légèrement variée dans l'intervalle $[10^{17}, 10^{20}] \text{ cm}^{-3}$ et sur les deux jonction (np, nip) malgré l'augmentation de dopage de l'émetteur figure (a), et la valeur du rendement reste presque constante. De l'autre coté sur la figure (b) le rendement est augmenté de [13.4 à 14.3] avec l'augmentation de dopage de substrat.

III.4.1.4 Influence de la variation de dopage de substrat et de l'émetteur de silicium cristalin

Sur le facteur de forme FF(%) :

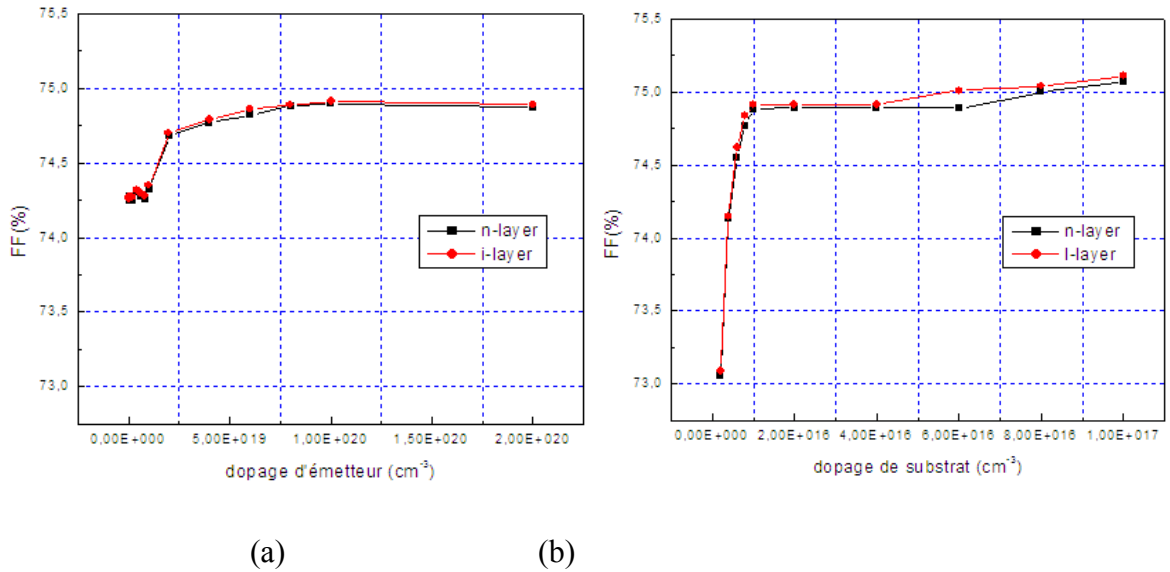


Figure III. 31: Effet de dopage de l'émetteur (a), et l'effet de substrat (b) (silicium cristalin) sur la densité de courant (J_{cc}) dans une cellule a jonction pn

Interprétations des résultats:

Nous remarquons dans la courbe (a) que le facteur de forme FF varie très peu entre [74.25-74.9%] en fonction du dopage de l'émetteur. Mais par contre au figure (b) l'augmentation de FF est plus remarquable (73.06_75.11%) dans les deux jonction avec et sans couche intrinsèque , a cause de l'augmentation de dopage du substrat de [10¹⁵, 10¹⁷]

III.4.1.5. Influence du dopage de l'émetteur et de substrat de la cellule solaire poly cristalin sur la densité de courant J_{cc} :

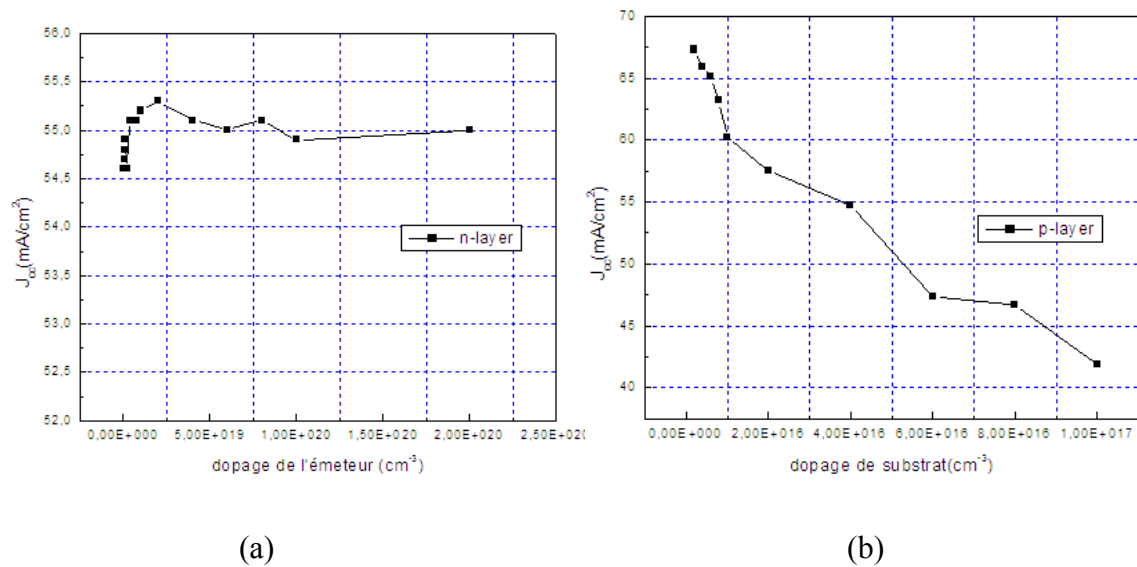


Figure III. 32: Effet de dopage de l'émetteur (a), et l'effet de substrat (b) (silicium cristalin) sur la densité de courant (J_{cc}) dans une cellule à jonction pn dans une cellule à jonction pn

Interprétations des résultats:

Nous remarquons dans la courbe (a) que le courant de court circuit J_{cc} varie très peu en fonction du dopage de l'émetteur. Mais par contre au figure (b) elle diminue de (67_41mA/ cm²), au même temps avec l'augmentation de dopage du substrat de [10¹⁵, 10¹⁷]

III.4.1.6. Influence de dopage de l'émetteur(n) et substrat (p) , poly cristalin sur la tension

V_{co} :

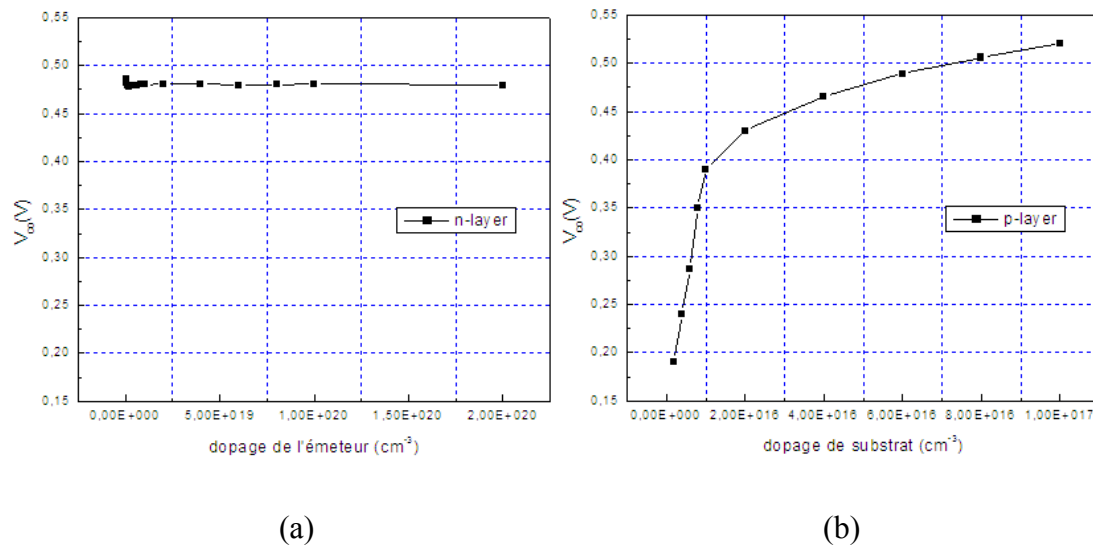


Figure III. 33: Effet de dopage de l'émetteur type n (a), et dopage de substrat type p (b) , sur la tension de circuit ouvert (V_{co}), dans une cellule a jonction pn

Interprétations des résultats :

On remarque que l'augmentation du dopage de substrat p (b) , fait augmenter la tension de circuit ouvert V_{co} , de 0.19 V jusqu'à 0.52V , par contre on remarque la stabilité de ce dernier malgré l'augmentation de dopage de l'émetteur dans la figure (a) ,

III.4.1.7. Influence de dopage de l'émetteur type n et de substrat poly cristalin type p sur le rendement η :

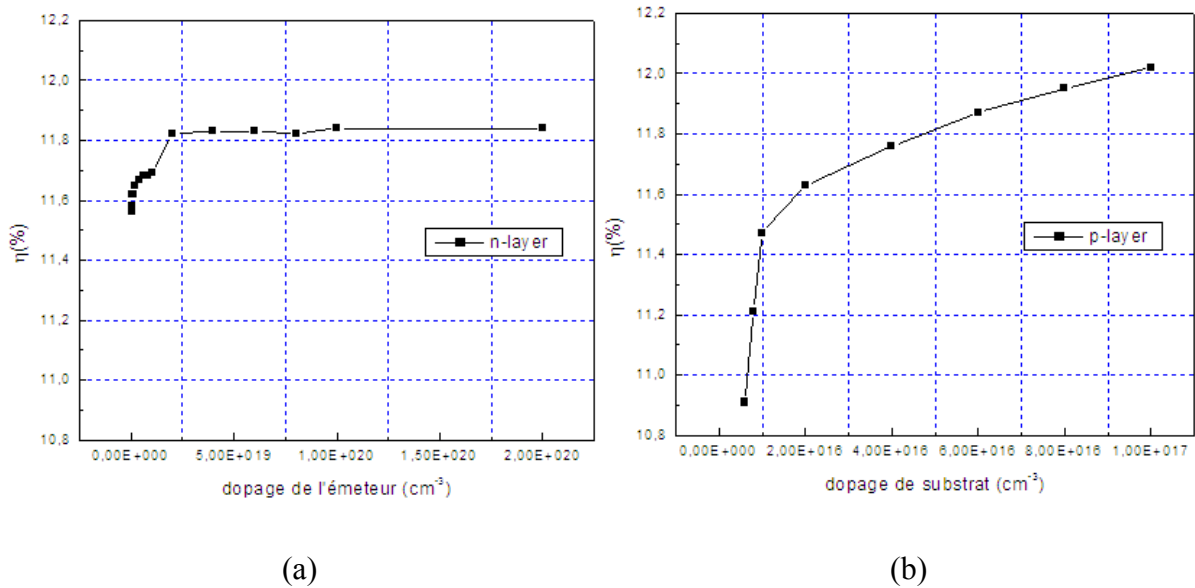


Figure III. 34: Effet de dopage de l'émetteur (a), et de substrat sur le rendement η , dans une cellule jonction pn poly cristalin

Interprétations des résultats:

La valeur du rendement est légèrement variée dans l'intervalle $[10^{17}, 10^{20}] \text{ cm}^{-3}$ et sur les deux jonction (np, nip) malgré l'augmentation de dopage de l'émetteur figure (a), et la valeur du rendement reste presque constante. De l'autre côté sur la figure (b) le rendement est augmenté de [9.49 à 12.02] avec l'augmentation de dopage de substrat.

III.5. Résultats de simulation de la variation de dopage de l'émetteur et de substrat, de la cellule à jonction pn silicium amorphe

Nous fixons tous les paramètres de la cellule solaire de silicium amorphe on choisie une épaisseur d'émetteur d'environ 6nm, et une épaisseur de substrat de $300\mu\text{m}$, ensuite nous faisons varier le dopage du l'émetteur et de substrat.

III.5.1. Influence de dopage p et n sur la tension en circuit ouvert V_{co} : (silicium amorphe).

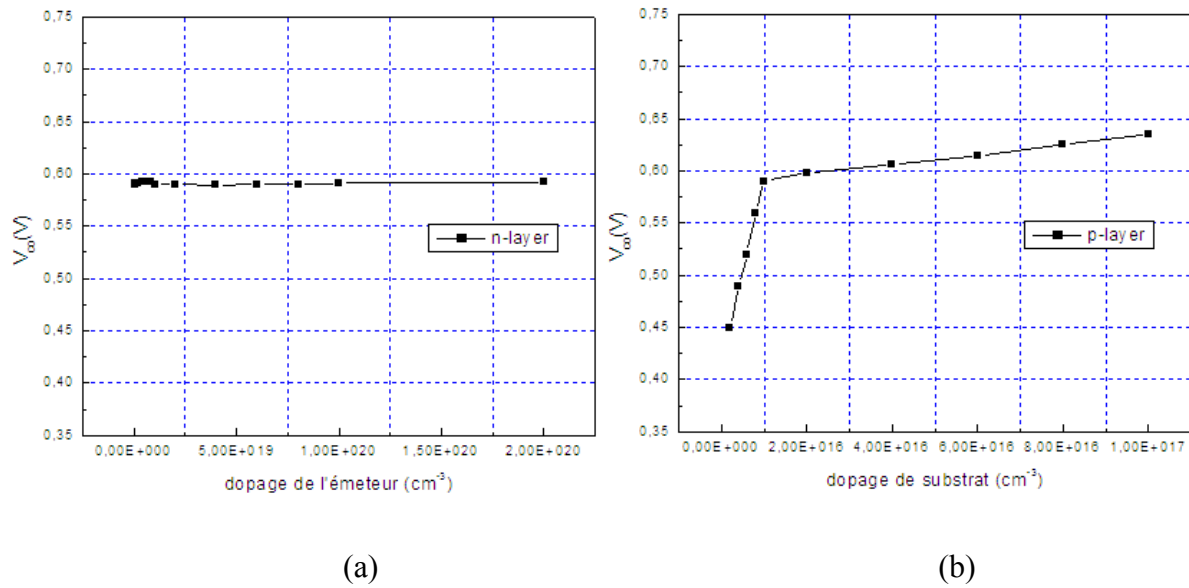


Figure III. 35: Effet de dopage de l'émetteur (a), et du dopage de substrat (b) (silicium amorphe) sur la tension (V_{co}), dans une cellule à jonction pn

Interprétations des résultats:

On remarque que l'augmentation du dopage de substrat p (b), fait augmenter la tension de circuit ouvert V_{co} , de 0.45 V jusqu'à 0.63 V, par contre on remarque la valeur de ce dernier reste stable malgré l'augmentation de dopage de l'émetteur dans la figure (a).

III.5.2. Influence de dopage de l'émetteur type n et de substrat amorphe type p sur le courant de court circuit J_{cc} :

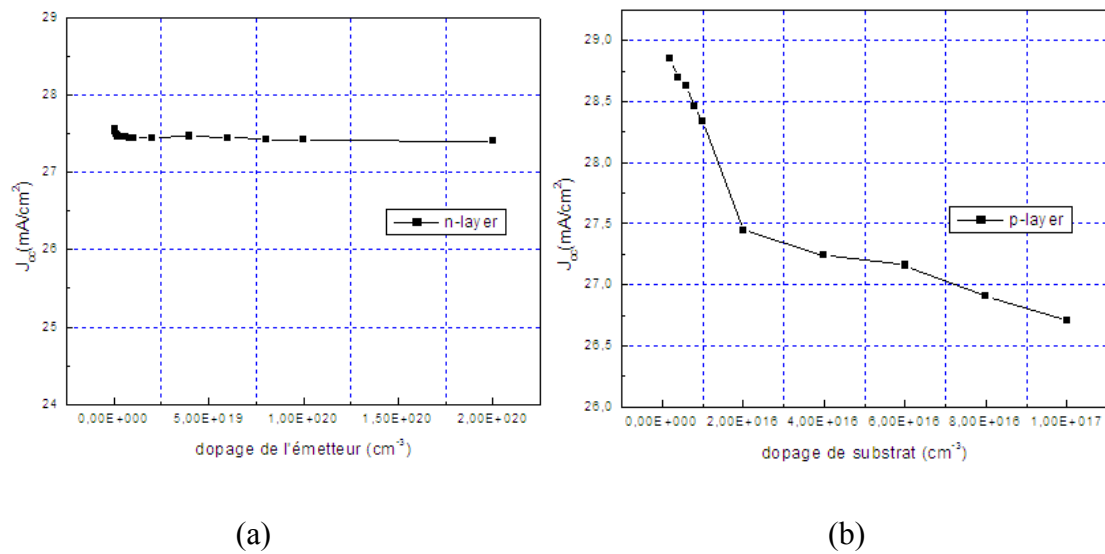


Figure III. 36: Effet de dopage de l'émetteur (a), et l'effet de substrat (b) (silicium amorphe) sur la densité de courant (J_{cc}) dans une cellule à jonction pn dans une cellule à jonction pn

Interprétations des résultats :

Nous remarquons dans la courbe (a) que le courant de court circuit J_{cc} varie très peu en fonction du dopage de l'émetteur. Mais par contre au figure (b) elle diminue de (28.85_26.71mA/ cm²), au même temps avec l'augmentation de dopage du substrat de [10^{15} , 10^{17}].

III.5. 3. Influence de dopage de l'émetteur type n et de substrat amorphe type p sur le rendement η :

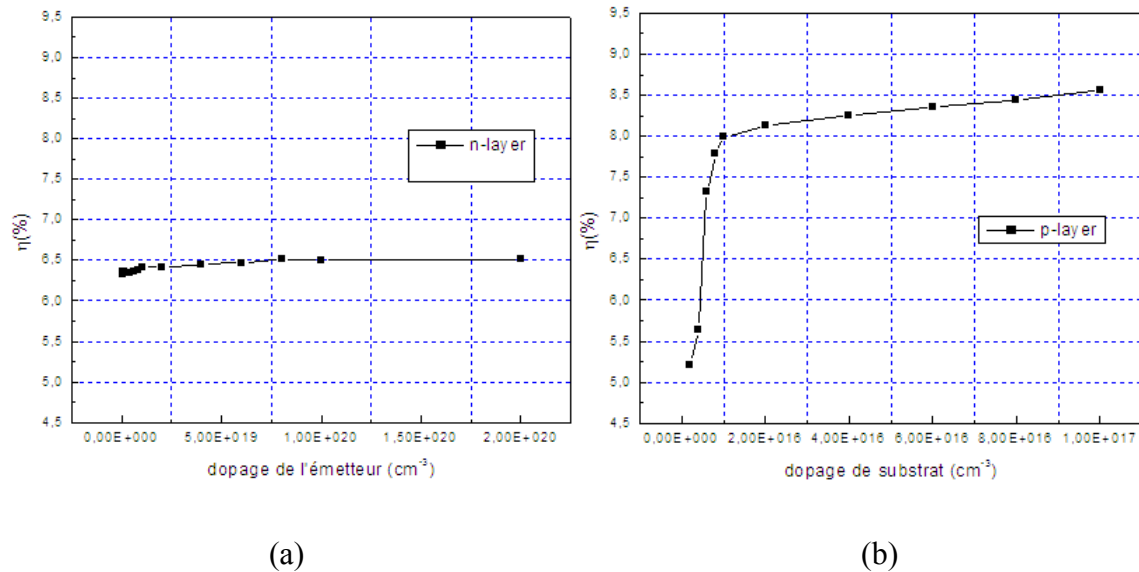


Figure III. 37: Effet de dopage de l'émetteur (a), et l'effet de substrat (b) (silicium amorphe) le rendement (η) dans une cellule a jonction pn .

Interprétations des résultats :

La valeur du rendement n'a pas variée dans l'intervalle $[10^{17}, 10^{20}] \text{ cm}^{-3}$ et sur les deux jonction (np, nip) malgré l'augmentation de dopage de l'émetteur figure (a), c'est-à-dire la valeur du rendement reste presque constante. De l'autre coté sur la figure (b) le rendement est augmenté de [5.21 à 8.56] avec l'augmentation de dopage de substrat .

Conclusion :

Une optimisation des paramètres d'une cellule photovoltaïque est nécessaire quelque soit la structure, pour avoir un bon rendement. Habituellement, les paramètres à optimiser sont l'épaisseur de l'émetteur et du substrat de la cellule solaire a étudier, les niveaux et les profils de dopage,etc. Les valeurs des paramètres optimaux dépendent, bien sûr, de la structure de la cellule solaire, de la qualité du matériau, de la vitesse de recombinaison en surface (faces avant et arrière). L'optimisation de la cellule solaire comprend donc de nouvelle étude sur la détermination de la résistance série R_s , qui doit être de plus en plus minimum, afin d'obtenir une structure conduisant au rendement maximum.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'étude des cellules solaires à homojonction et savoir leurs procédés de fabrication est liés Plusieurs paramètres. Le but de cette étude est d'optimisée ces structures. Ces optimisations sont obtenues grâce au logiciel PC1d qui étudie le fonctionnement des cellules solaires homojonction. Ils nous a permis d'obtenir le rendement de conversion électrique ($\approx 14.96\%$) (cas de cristallin).

Au premier temps nous avons essayé d'élargir nos connaissances physiques concernant le matériau le plus utilisé dans l'industrie des cellules photovoltaïques « le silicium ». Le silicium est très abondant sur la croute terrestre, non toxicité et possède une technologie métrisable grâce à la technologie micro-électroniques .Cette technologie qui existe depuis environ 50 ans engendre actuellement plus de 80% des ventes au niveau mondial.

L'étude est dédié aux bases indispensables à la compréhension de la suite de notre travail. Nous avons rappelé quelques notions préliminaires sur le rayonnement solaire et son application dans le domaine photovoltaïque. Ensuite nous avons expliqué le fonctionnement des cellules photovoltaïques standards et leurs caractéristiques principales ainsi que les paramètres limitant leur rendement et leur coût.

Le seconde chapitre est dessiné à faire une description générale des différentes technologies photovoltaïques et nous avons aussi fait une étude théorique sur les principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Le troisième chapitre présent l'étude comparative des différentes structures a base de silicium et nous avons présenté les propriétés électriques des différentes cellules photovoltaïques qui sont (la tension de circuit ouvert (V_{co}), la densité de courant de court circuit (J_{cc}), le rendement (η), le facteur de forme (FF), la puissance débitée P , la réponse spectrale, et le rendement quantique).

La simulation(1D) par PC1d intervient pour nous aider à mieux comprendre le fonctionnement des cellules a homojonction . par l'étude de l'influence des différents paramètres d'une cellule solaire à homojonction sur les performances de la cellule (tension en circuit ouverts V_{co} , densité de courant en court-circuit J_{cc} , facteur de forme FF et rendement de conversion électrique η). Nous avons pue optimisé les différents paramètres géométriques et physiques afin d'atteindre un rendement maximum .

dans une première partie, l'étude a permis de démontrer l'importance de la couche intrinsèque et le choix de la largeur de la structure, les épaisseurs de l'émetteur et du substrat pour atteindre un bon rendement :

- (14.69%) pour le silicium cristalin
- (13%)Pour silicium poly cristalin .
- (8.94%)Pour le silicium amorphe.

Dans une deuxième partie on a montré l'importance de dopage de substrat et sa grande influence sur les paramètres physiques des trois types de cellule (cristalin, poly cristalin et amorphe), et on a prouvé que le dopage de l'émetteur est nécessaire mais il n'a pas de grande influence sur les paramètres physiques des trois cellules solaires.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] JM. Jancovici « **Ne suffit-il pas d'attendre d'avoir moins d'énergie fossile ?** » Disponible sur <http://www.manicore.com/documentation/serre/fossile.html>, (2008).
- [2] EPIA (European Photovoltaic Industry Association) « **Global market outlook for photovoltaics 2014-2018.** », Disponible sur <http://www.epia.org/publications/epia-publications.html>, (2014).
- [3] EPIA (European Photovoltaic Industry Association). « **Solar Generation V – 2008, Solar electricity for over one billion people and two million jobs by 2020** ». Disponible sur <http://www.epia.org/publications/epia-publications.html>, (2008)
- [4] MJ. Kerr, P. Campbell, A. Cuevas « **Lifetime and efficiency limits of crystalline silicon solar cells.** » Conference Record of the 29th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, New Orleans, USA, pages 438- 441, (2002).
- [5] <http://www.goodfellow.com/csp/active/static/F/Silicium.html>
- [6] <http://fr.wikipedia.org/wiki/Silicium>
- [7] D. Diouf « **cellules photovoltaïques silicium à hétérojonctions et à structure interdigitée en face arrière.** » Thèse de doctorat de l'Université Paris-sud 11 faculté des sciences d'Orsay, (2010)
- [8] M.A.Green, K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta, « **Solar Cell Efficiency Progress in photovoltaics** », vol. 1G, pp 435-440, (2008)
- [9] S. Brigand, " **Les principes de l'énergie solaire photovoltaïque**", complément technique Mars/Avril 2008, www.editionsdumonde.com, consulté le 12/11/2011.
- [10] www.carbonelorraine.com
- [11] <http://www.lei.ucl.ac.be/~matagne/SOLAIRE/SEM13/S13P11.HTM>
- [12] P.H. Haumesser, « **Elaboration Par croissance Czochralski, et Propriétés Laser de Monocristaux Dopés Par l'Ytterbium** », Thèse de doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie, (2000)
- [13] G.C. Joyce, D.T.J. Hurle, Q. QAE. Vaughan, « **Novel Development of the Weighing Methode For Automatic Czochralski, Cristal Growth of Semiconductors.** », Journal of Crystal Growth 132,1 (1993)
- [14] <http://membres.lycos.fr/energiesoltp/principe.htm>
- [15] P. Chaploz, « **Les Couches Epaissees en Silicium Amorphe Application Comme Detecteurs de Rayons X** » Thèse N° 1485 de doctorat à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, (1996)
- [16] S. Amtalbian, « **Du transfert de films minces de silicium monocristallin vers un procédé cellule à faible budget thermique.** », Thèse de doctorat à l'Institut des Nanotechnologies de LYON (INL) – INSA de LYON, (2008)
- [17] **Observ'ER. « Baromètre du Solaire Photovoltaïque** ». Systèmes Solaires, N° 160, pp.69-83, (Avril 2004).
- [18] O. Nichiporuk « **Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités** », L'institut national des sciences appliquées de Lyon, (2005)
- [19] A. Goetzberger, C. Hebling « **Photovoltaic materials, past, present, future. Solar En.Mat.&Sol.Cells** », Vol. 62, pp. 1-19, (2000).
- [20] SZE S.M., Semiconductor devices. New York : John Wiley, p.867, (1981)
- [21] D. Diouf « **cellules photovoltaïques silicium à hétérojonctions et à structure interdigitée en face arrière.** » Thèse de doctorat de l'Université Paris-sud 11 faculté des sciences d'Orsay, (2010)
- [22] Keck et al., The Review of Scientific Instruments **25**, 331 (1954).
- [23] J. Czochralski, Z. Physik Chem. **92**, 219 (1918).
- [24] : **Jean-François LELIEVRE. Elaboration de SiNx:H par PECVD : optimisation**

des propriétés optiques, passivantes et structurales pour applications photovoltaïques. These de doctorat. INSA de Lyon. 2007.

[25] : **Julien DUPUIS**. *Elaboration et caractérisation de couches de SiOxNy:H et SiNx :H réalisées par méthode PECVD : application à la face arrière des cellules photovoltaïques en silicium*. 2009-ISAL-0085 Année 2009.

[26] : **S. Quoizola**, *Épitaxie en phase vapeur de silicium sur silicium mesoporeux pour report sur substrats économiques et application photovoltaïque bas coût*. These de doctorat. INSA de Lyon. 2003.

[27] : **Alain Ricaud**, *Convertisseurs photovoltaïques*. Nov. 2007

[28] : **Fatima ABDO**, *croissance des couches minces de silicium par épitaxie en phase liquide à basse température pour application photovoltaïques*. Institut national des sciences appliquées de Lyon, 2007.

[29]: **HONSBURG C. and BOWDEN S.** *Photovoltaic: Devices, Systems and Applications* [CDROM]. Sydney, Australia: University of New South Wales, 1998.

[30]: <http://www.ioffe.rssi.ru/SVA/NSM/Semicond/Si/bandstr.html>

[31]: **GREEN M.A.** *Silicon Solar Cells. Advanced Principles and Practice*. Sydney, Australia. Centre for photovoltaic devices and systems, UNSW, 1995, 366 p.

[32] : **Bernard FONTAINE** *La production photovoltaïque d'électricité*. CNRS. Juillet 2009.

[33]: **Goetzberger A, Hebling C.** *Photovoltaic materials, past present, futur*. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2000, vol.62, pp. 1-19.

[34]: **Goetzberger A, Hebling C, Schock H. W.** *Photovoltaic materials, history, status and outlook*. Material Science and Engineering R 40, 2003, pp. 1-46.

[35] : **P.H. Haumesser**. *Elaboration par croissance Czochralski, caractérisation spectroscopique et propriétés laser de monocristaux dopés par l'Ytterbium*. These de doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie ,2000.

[36]: **G.C. Joyce, D.T.J. Hurle et Q.Q.A.E. Vaughan.** *Novel Development of the Weighing Method for Automatic Czochralski Crystal Growth of Semiconductors*. Journal of Crystal Growth 132, 1 (1993).

[37]: <http://membres.lycos.fr/energiesoltpe/principe.htm>.

[38] : **RICAUD A.** *Photopiles solaires*. Lausanne, Suisse : Presse polytechniques et universitaires romandes, 1997, 332 p.

[39] : **M. MADANI.** *Réalisation des couches antireflets dans des cellules solaires à couches mince*. These de magistère en physique, université de Tlemcen, 2006, PP 96-97.

-
- [40] : SZLUFCHIK J., SIVOTHTHAMAN S. NLIS J.F. et al. *Low-cost industrial technologies of crystalline silicon solar cells*, Proceeding of the IEEE vol.85 (1997) n°5, pp. 711-729.
- [41] **A. Ould Abbas-Bensaoula**, these de doctorat d'etat 2003 LPM, Tlemcen.
- [42] A. ZERGA «Modelisation, Simulation et Caracterisation des Cellules Solaires au silicium »Synthese des travaux de recherche de l'habilitation universitaire presentee a l'Universite de Tlemcen (2009).
- [43] **monocristallin**[<http://energieveloppement.blogspot.com/2012/01/cellules-photovoltaique-technologies.html>]
- [44] Thèse Nichiporuk Oleksiy« **Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigitée** » L'institut national des sciences appliquées de Lyon
- [45] : **Observ'ER**. Baromètre du Solaire Photovoltaïque. Systèmes Solaires, Avril 2004, N° 160, pp.69-83
- [46] : Y. Feng, X. Ju, W. Feng, H. Zhang, Y. Cheng, J. Liu, A. Fujii, M. Ozaki, and K. Yoshino, Applied Physics Letters 94, 123302 (2009).
- [47] [www.photovoltaique](http://www.photovoltaique.info) .info
- [48] : **A. Benyoucef**. « Contribution à l'étude des performances de matériaux photovoltaïquesà base de couches d'alliages Si_{1-x}Gex et Si_{1-x-y}GexCy ». Mémoire de magister en physique, Université de Tlemcen, 2004.

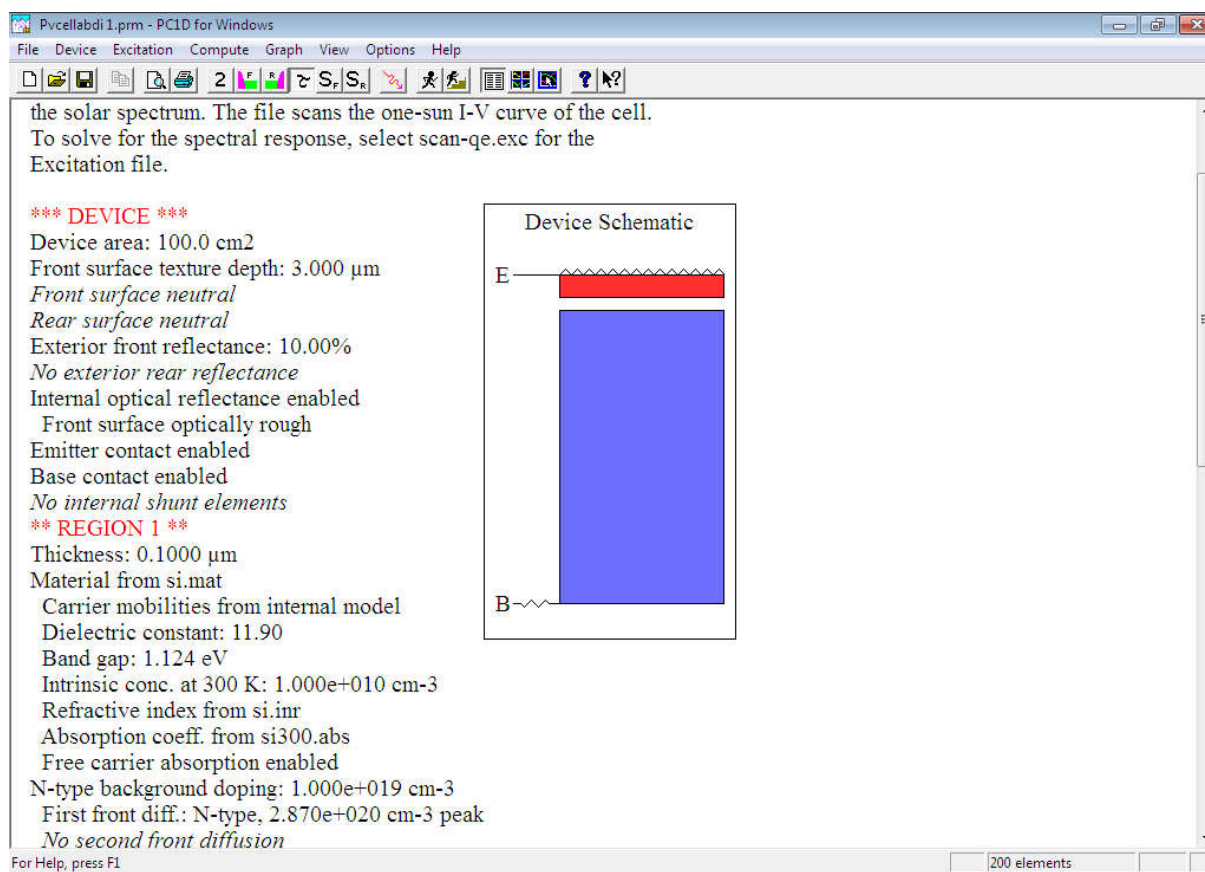
Annexe

Annexe

I. LOGICIEL DE SIMULATION : PC1D

I.1. Aperçu du logiciel :

Le logiciel de simulation numérique des cellules solaire PC1D a une réputation internationale dans la recherche photovoltaïque, il a été développé à l'université « New South Wales de Sydney » en Australie ; qui est l'une des pionnières dans ce domaines. Son utilisation est très pratique, il permet de simuler n'importe qu'elle structure photovoltaïque, selon les matériaux disponibles en fichiers data, en jouant sur les paramètres variables (largeur, surface, dopage, etc...). Les résultats de la simulation, sont très proches des résultats expérimentaux, donc c'est un gain de temps et d'argent. La fenêtre du logiciel PC1D est présenté sur la Figure ci-dessous, ce logiciel se divise en quatre parties, les trois premières sont pour la programmation où il faut introduire les paramètres du dispositif, des régions et de l'excitation. La quatrième partie concerne les résultats de la simulation.



1.2. Les paramètres du dispositif (Device) :

- **Aire du dispositif (Device)** : la surface du dispositif est très importante car elle influence sur le photocourant d'une manière appréciable. Dans notre simulation, nous avons choisi une surface de 4cm².
- **Surface texturée** : les surfaces texturées utilisées dans toutes les structures étudiées sont composées de micro pyramides inversées de profondeur (depth) 3µm et d'angle facial 54,74°. La texturation est très importante, car elle permet de diminuer les pertes par réflexion du rayonnement incident. Nous avons texturé seulement la face avant, car l'autre face est considérée à l'obscurité.
 - Les deux faces sont considérées comme neutres, du fait qu'il n'y a pratiquement pas de charges aux interfaces, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de barrière de potentiel aux surfaces.
 - Nous n'avons pas introduit de couches antireflets, car elle est remplacée par la texturation. Cette couche est généralement de la silice (SiO₂), elle peut être remplacée par d'autres matériaux qui sont transparents au spectre solaire et qui sont donnés dans le logiciel sous forme de fichiers.
- **Réflectance optique interne** : elle est négligée dans notre simulation, nous considérons que les surfaces sont spéculaires et non diffuses c'est-à-dire non rugueuses.
- **Par défaut**, l'émetteur et la base sont connectés au circuit, tandis que le collecteur est déconnecté.
- **Quatre résistances shunt** peuvent être introduites, chacune d'elles peut être un conducteur, une diode ou un condensateur. Dans notre cas nous considérons qu'il n'y a pas d'élément qui peut shunter le circuit.

1.3. Les paramètres des régions :

- L'épaisseur de l'émetteur est relativement mince par rapport à la base. Dans le cas du silicium elle varie sur un intervalle compris entre 0,1µm et 2,5µm.
- Le matériau utilisé: les paramètres qui le décrivent, sont stockés dans des fichiers d'extension (*.mat), ils sont fournis avec le logiciel dans une diskette.

Les paramètres stockés dans ce fichier sont :

- La mobilité : le modèle utilisé est le modèle de Thuber et al 1981.
- La constante diélectrique.

- L'énergie de gap (eV).
- La concentration intrinsèque (cm⁻³).
- L'indice de réfraction.

Coefficient d'absorption : le modèle utilisé est celui de Rajkanan et al 1979.

- **Absorption des porteurs libres**

- **Type et concentration de dopage** : de type n ou p, la concentration maximale est de 10¹⁹ cm⁻³
Ce logiciel présente quatre profil de dopages : le profil uniforme, le profil exponentiel, le profil gaussien et le profil erfc.

- **Les recombinaisons en volume** : le modèle utilisé est basé sur la statistique de Read Shockley-Hall décrivant les recombinaisons par pièges, situées dans la bande de valence.
- Les recombinaisons face avant et arrière.

1.4. Les paramètres d'excitation :

- Deux fichiers intégrés dans le logiciel permettent de simuler la caractéristique courant-tension et autres caractéristiques en utilisant le fichier « One-Sun.exc », ou la réponse spectrale en utilisant le fichier « Scan-qe.exc ».
- Le mode d'excitation : il y a trois modes d'excitation (en équilibre, stationnaire et transitoire). Pour une bonne simulation numérique, le mode transitoire est vivement recommandé.
- Dans la plus part des cas on choisit la température ambiante, T=25°C.
- Il y a deux sources de Thevenin identiques, l'une pour la base et l'autre pour le collecteur.
- Seulement la face avant est éclairée (coté n), par un flux lumineux d'une intensité de 0,1 W/cm². Pour avoir la réponse spectrale, le logiciel fait un balayage sur l'intervalle de longueurs d'onde compris entre [300, 1200] nm. Pour avoir la caractéristique, il utilise directement le fichier d'aire masse « am 15g.spc ». La seconde source est désactivée, car la face arrière n'est pas éclairée dans notre cas [48].

1.5. Les résultats :

Les résultats que nous pouvons visualiser en utilisant le fichier d'excitation « One- Sun.exc » sont :

- La valeur du courant de court circuit.
- La valeur de la tension en circuit ouvert.
- La valeur de la puissance maximale.

Et ceux obtenus avec le fichier « Scan-qe.exc » sont :

- La valeur de courant de court circuit.
- La valeur de la puissance maximale.