

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Ibn Khaldoun - Tiaret



Faculté des Sciences de la Matière
Département de physique

Mémoire

Présenté par

M^{elle} : Bouchikha Nabila

M^{elle} : Roudane Samia

Pour obtenir le diplôme de

Master II

Filière : Physique

Spécialité : Technologie et physique des couches minces nano structurées

Sujet :

Etude d'une cellule solaire à base d'un semi-conducteur en déposée en couches minces sur un substrat étranger

Soutenu le : 05 Juin 2016

Devant le jury :

• M.YANALLAH Khalifa	Professeur	Président	U-Tiaret
• M. O. HAMADOUCHE Nadir	MCB	Examineur	U-Tiaret
• M. DEHBI Abdelkader	Professeur	Encadreur	U-Tiaret
• M. YESREF Djamel	Docteur	Co-Encadreur	U-Tiaret

REMERCIEMENTS

Nous remercions le bon Dieu de nous avoir donné la volonté et la patience qui nous ont permis de mener à bien ce travail.

*Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à notre promoteur professeur **DEHBI Abdelkader**, Professeur à l'Université Ibn Khaldoun-Tiaret-pour sa patience et ses précieux conseils et ses encouragements apportés dans nos démarches et pour nous avoir fait bénéficier de ses compétences scientifiques, ses qualités humaines et sa constante disponibilité.*

*Nous exprimons nos profondes reconnaissances à monsieur **YESSEF Djamel** enseignant à l'Université Ibn Khaldoun-Tiaret, pour son aide et pour ses encouragements, de son expérience dans l'orientation et la direction de ce travail.*

*Nous remercions chaleureusement les membres du jury professeur **Yanallah Khalifa**, professeur à l'Université Ibn Khaldoun- Tiaret, qui nous fait l'honneur de présider le Jury de ce mémoire.*

*Nous exprimons nos sincères remerciements à Docteur **OULED HAMADOUCHE Nadir**, maître de conférences à l'Université Ibn Khaldoun- Tiaret qui a bien voulu juger ce travail.*

Nos vives reconnaissances à tous les membres de laboratoire de génie physique. Aussi nous adressons nos reconnaissances à tous les enseignants de département de physique, sans oublier nos collègues avec qui nous passons notre parcours d'étude dans la spécialité de technologie et physique des couches minces nanostructures.

Que tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail, trouvent ici l'expression de notre sincère gratitude.

Dédicace

A mon père.

Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour vous.

Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être.

Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation, Puisse Dieu, le tout puissant, te préserver et t'accorder santé, longue vie et bonheur.

A ma mère .Tu as fait plus qu'une mère puisse faire pour que ses enfants suivent le bon chemin dans leur vie et leurs études. Ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études.

Je te dédie ce travail en témoignage de mon profond amour.

Je vous dédie ce travail avec tous mes vœux de bonheur, de santé et de réussite à ma très chère sœur Farida, son mari Mourad et leur filles Lila.

Je vous dédie ce travail mes chères frères Amine et Yassine qui sont présent dans tous mes moments je vous souhaite un avenir plein de joie, de bonheur, de réussite et de sérénité.

A mes très chères sœurs Hanane, Hadjer et Kaouthar .Que Dieu vous préservés.

A mes chères Abd elraouf, Rafik et Douaa

A toutes mes chères amies, Je ne peux trouver les mots justes et sincères pour vous exprimer mon affection et mes pensées, vous êtes pour moi des frères, sœurs et des amis sur qui je peux compter.

Samia

Dédicaces

Je dédie ce mémoire, aux personnes qui me sont les plus chères :

A mes parents qui m'ont énormément soutenu dans les moments

Les plus difficiles, partagé mes joies et mes peines, qui ses

Toujours sacrifiés à mes dépends.

A mon oncle Boulenouar.

A mes frères Hamada et Mohamed.

A mes sœurs Sanaa, Nadia

A ma grand-mère El Hadja khadra.

Je tiens également à remercier Oussama pour ça façon très particulière

de 'motiver' et 'remonter' le morale.

A mes amis Samia ,Nesserine, Sabrina Fatiha et wahiba.

Ames collègues

A toute ma famille 'Bouchikha' 'Hassni'

Nabila

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1: Spectre électromagnétique.....16

Figure I-2 : Définition du nombre d'air masse (AM) et spectre d'émission du rayonnement solaire17

Figure I-3. Les différents phénomènes optiques..... 18

Figure I-4. L'effet photovoltaïque.....19

Figure I-5.schéma du principe des réflexions lumineuses sur une surface texturée.....22

Figure I- 6: schéma descriptive d'une cellule photovoltaïque.....23

Figure I-7. Phénomène d'absorption dans un semi-conducteur.....24

Figure I.8: Schéma d'une cellule solaire.....24

Figure I-9 : Caractéristiques $I=f(v)$ sous obscurité et sous éclairément d'une cellule Photovoltaïque.....26

Figure I-10. Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque27

Figure I-11. La cellule PERL.....29

Figure I.12. Diagramme énergétique d'une cellule solaire à couche BSF.....30

Figure I.13.Tandem solaire à deux jonctions31

Figure I.14.Cellule solaire de type Schottky.....31

Figure I.15.Cellule solaire de type structure MIS.....32

Figure I-16.Types de recombinaison.....35

Figure I-17.Rendement quantique externe d'une cellule photovoltaïque.....37

Figure I-18.Principales pertes intrinsèques pour une cellule photovoltaïque en silicium.....39

Chapitre II

Figure II-1 .Semi-conducteur extrinsèque.....49

Figure II-2.La jonction PN.....49

Figure II.3. Diagramme des bandes d'énergie des semi-conducteurs.....50

Figure II-4 : Répartition des matériaux sur le marché mondial du photovoltaïque.....52

Figure II-5.Structure de silicium cristallin.....53

Figure II-6.Bandes d'énergie dans le silicium.....53

Figure II-7 .Cellule de silicium monocristallin.....55

Figure II-8. Structure cristalline (a) amorphe (b).....56

Figure II-9.Densité d'états en échelle logarithmique dans la bande interdite du silicium polycristallin en présence de défauts (EV: bande de valence, EC :bande de conduction).....56

Figure II-10. La méthode d'Czochralski.....61

Figure II-11. Fusion de zone.....62

Liste des figures

Figure II-12. Schéma de procédé de découpe des plaquettes.....	63
Figure II-13. Les différentes étapes de fabrication des cellules photovoltaïques en silicium.....	65
Figure II-14. Schéma de l'installation de dépôt de silicium cristallin par VHF-PECVD.....	67
Figure II-15. Schéma de l'installation de dépôt de silicium par RTCVD.....	68
Chapitre III	
Figure III-1. une vue d'une cellule solaire à base du silicium polycristallin déposé sur un substrat Alumine.....	75
Figure III-2. Différents axes technologiques de la voie "haute température" développés pour la réalisation des couches minces de silicium poly-cristallin sur substrats.....	76
Figure III-3. Synthèse de l'alumine par procédé BAYER.....	83
Figure III-4. Représentation du plan basal de l'alumine- α (réseau d'ions d'oxygène avec les ions d'aluminium en petits cercles pleins et les sites vides en petits cercles vides).....	84
Figure III-5. Présentation de la maille primitive rhomboédrique de l'alumine- α	85
Figure III-6. Filiation des Alumines de transition en fonction de l'hydroxyde de départ et de la température.....	86
Figure III-7. Structure d'une cellule sur substrat isolant : Cellule à méso.....	88
Chapitre IV	
Figure IV-1. Fenêtre du logiciel PC1D utilisé en simulation numérique.....	93
Figure IV-2. Structure et paramètres de la cellule simulée.....	96
Figure IV-3. Evolution du rendement, du courant de court-circuit et de la tension de circuit ouvert en fonction de l'épaisseur de la cellule X_e	99
Figure IV-4. Evolution du rendement et du courant de court-circuit et la tension du circuit en fonction de l'épaisseur de l'émetteur.....	100
Figure IV-5. Evolution du rendement, du courant de court-circuit et de la tension du circuit ouvert en fonction du dopage de l'émetteur.....	101
Figure IV-6. Evolution du rendement, du courant de court-circuit en fonction du dopage de la base.....	102
Figure IV-7. Evolution du rendement, du courant de court-circuit et de la tension de circuit ouvert en fonction de la durée de vie.....	103
Figure IV-8. Evolution du rendement, du courant de court-circuit et de la tension de circuit ouvert en fonction de la concentration du BSF.....	104
Figure IV-9. Evolution du rendement, du courant de court-circuit et de la tension de circuit ouvert en fonction de l'épaisseur du BSF.....	105
Figure IV-10. Evolution du rendement, du courant de court-circuit et de la tension de circuit ouvert en fonction de la vitesse de recombinaison face avant.....	106
Figure IV-11. Evolution du rendement, du I_{cc} et de V_{co} en fonction de vitesse de recombinaison face arrière.....	107
Figure IV-12. La caractérisation I-V.....	108

Liste des tableaux

<i>Tableau I.1: Longueurs d'ondes approximatives des différentes couleurs dans le vide.....</i>	<i>17</i>
<i>Tableau II-1. Propriétés physique du silicium cristallin.....</i>	<i>54</i>
<i>Tableau III-1. Propriétés physiques, mécaniques, électriques et thermiques de l'alumine.....</i>	<i>77</i>
<i>Tableau III-1. Propriétés des différents matériaux hautes températures retenus comme substrat.....</i>	<i>79</i>
<i>Tableau III-3. Quelques propriétés de l'alumine-α.....</i>	<i>85</i>
<i>Tableau IV.1 : Paramètre de la cellule de référence.....</i>	<i>98</i>
<i>Tableau IV-2. Paramètres variables pendant la simulation.....</i>	<i>109</i>
<i>Tableau IV-3. les valeurs optimales de la cellule qui peuvent donner un bon rendement</i>	<i>107</i>

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE.....	11
CHAPITRE I : Généralité sur les cellules photovoltaïques	
I.1.Introduction.....	15
I.2.L'énergie solaire	15
I.2.1.Le rayonnement solaire	15
I.2.2.Spectre solaire	16
I.2.3.La masse d'air	17
I.2.4.Absorption de la lumière	18
I.3.Historique de photovoltaïque.....	18
I.4.La cellule solaire.....	19
I.4.1.Description de la structure d'une cellule solaire	20
I.4.1.1.Contacts face avant et arrière	21
I.4.1.2. Couche antireflet	21
I.4.1.3.Texturation de surface	21
I.4.1.4.Zone BSF	22
I.4.2.Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque	23
I.4.2.1.Absorption par les semi-conducteurs.....	23
I.4.2.2.Transfert d'énergie des photons aux charges électriques.....	24
I.4.2.3.Collecte des charges.....	25
I.4.3. Caractéristique et paramètre d'une cellule Photovoltaïque.....	25
I.4.3.1.Courant de court-circuit.....	26
I.4.3.2.Tension de circuit ouvert	26
I.4.3.3. Facteur de forme	27
I.4.4. Rendement de conversion η	27
I.4.5.Le Schéma électrique équivalent	27
I.4.6.Les différentes structures des cellules photovoltaïques.....	28
I.5.Recombinaison	33
I.6.La Génération.....	35
I.7.Rendement quantique et réponse spectrale	36

I.8. Les pertes physiques et technologiques.....	37
I.8.1. Pertes physiques	37
I.8.2. Pertes technologiques	39
I.9. Limitation des pertes	40
I.10. Conclusion	43
Références bibliographiques.	

CHAPITRE II : La filière des couches minces en silicium polycristallin

II.1. Introduction	47
II.2. Les semi-conducteurs	47
II.2.1. Les semi-conducteurs intrinsèques	47
II.2.2. Les semi-conducteurs extrinsèques.....	47
II.3. La jonction PN	49
II.4. Bande d'énergie	50
II.5. Les couches minces	51
II.6. Le silicium	52
II.6.1. Propriétés général du silicium.....	52
II.6.2. Les différents états du silicium.....	54
II.6.2.1. Etat monocristallin	55
II.6.2.2. Etat amorphe	55
II.6.2.3. Etat poly-cristallin.....	56
II.6.2.3.1. Les défauts de silicium polycristallin	57
II.6.3. Obtention d'un Silicium de qualité électronique.....	60
II.6.3.1. Extraction du silicium à partir de la silice.....	60
II.6.3.2. Purification du silicium.....	60
II.6.3.3. Obtention des lingots de silicium.....	60
II.7. Technique conventionnel de fabrication d'une cellule photovoltaïque en silicium.....	62
II.8. Techniques de dépôt de silicium sur substrat	65
II.8.1. Techniques de dépôt en phase solide	66
II.8.2. Techniques de dépôt en phase liquide	66
II.8.3. Techniques de dépôt en phase gazeuse	67

II.9.Conclusion.....	70
Références bibliographiques.	

Chapitre III: Substrat Alumine pour les applications PV en couches minces

III.1.Introduction.....	75
III.2.La filière haute température	75
III.3.Le choix du substrat	76
III.4.Alumine Al₂O₃	77
III.4.1.Définition de L'alumine.....	77
III.4.2.propriété de L'alumine	78
<i>III.4.2.propriété de L'alumine</i>	<i>78</i>
III.4.3.Extraction de l'alumine.....	79
III.4.4.Structures et générations des différentes variétés d'alumine	84
III.4.5.Applications d'alumine	86
III.5.Architecture d'une cellule solaire en couche mince déposée sur un substrat étranger	88
III.6. Conclusion	88

Référence bibliographiques.

CHAPITRE IV: Résultats et Discussions

IV.1.Introduction	91
IV.2.LOGICIEL DE SIMULATION : PC1D	91
IV.2.1.Le simulateur PC1D	91
IV.2.2. L'environnement de PC1D.....	93
IV.2.3.Les paramètres du dispositif (Device)	93
IV.2.4. Les paramètre des régions	94
IV.2.5.Les paramètre d'excitation	95
IV.2.6.Les résultats	95
IV.3.Simulation de la cellule photovoltaïque à base de silicium polycristallin (P-Si)	96

IV.4.Exploitation des résultats de la simulation	98
IV.4.1.Influence de l'épaisseur de la cellule sur le rendement, I_{cc} , V_{co}	99
IV.4.2.Influence de l'épaisseur de l'émetteur n^+ sur le rendement, I_{cc} , V_{co}	100
IV.4.3.Influence du dopage de l'émetteur n^+ sur le rendement, I_{cc} , V_{co}	101
IV.4.4.Influence du dopage de la base p sur le rendement, I_{cc} , V_{co}	102
IV.4.5.Influence du taux de recombinaison (la durée de vie) sur le rendement, I_{cc} , V_{co}	103
IV.4.6.Influence de dopage de la BSF sur le rendement, I_{cc} , V_{co}	104
IV.4.7.Influence de l'épaisseur de la BSF sur le rendement, I_{cc} , V_{co}	105
IV.4.8.Influence de la vitesse de recombinaison en surface avant sur le rendement, I_{cc} , V_{co}	106
IV.4.9.Influence de la vitesse de recombinaison en surface arrière sur le rendement, I_{cc} , V_{co}	107
IV.4.10.Caractérisation I-V	108
IV.5.Conclusion.....	109
Conclusion Générale	110

Introduction Générale

Introduction générale

Pendant des nombreuses années, l'épuisement des ressources énergétiques fossiles associé à l'augmentation continue de la demande en énergie, ainsi que la pollution engendrée par l'utilisation de ces carburants pose un gros problème. Le thème récurrent de la plupart de ces inquiétudes est le réchauffement de la planète causé par les gaz à effet de serre, et les changements climatiques qui en découlent.

Une partie importante de la solution à cette problématique réside dans l'accroissement de la part des énergies renouvelables dans le bouquet énergétique. En effet, ces énergies rejettent moins de gaz à effet de serre et des polluants, et ont une source d'énergie qui ne s'épuisera pas à cause d'une utilisation intensive.

Parmi ces énergies renouvelables, l'énergie photovoltaïque, qui est la conversion directe de l'énergie que nous envoie le soleil en électricité, laquelle a un rôle majeur à jouer. De plus, son impact sur l'environnement est parmi les plus faibles. Le développement de sa capacité installée est rapide, mais encore retenue par les coûts de production des systèmes photovoltaïques, et en particulier ceux des cellules solaires.

La technologie la plus largement utilisée actuellement pour la conversion photovoltaïque est celle des cellules solaires en couche mince de silicium cristallin. Pour réduire le coût du matériau de base de façon très significative, la recherche dans le domaine s'oriente sur deux axes essentiels, qui peuvent sembler opposés : augmenter le rendement des cellules, tout en diminuant les coûts de production.

Deux principales filières permettent l'élaboration des modules et des cellules photovoltaïques : la filière du silicium massif qui représente de nos jours 75% de la production mondiale de système photovoltaïques, et la filière des matériaux en couches minces qui représente 25% de la production mondiale de module solaire.

Particulièrement, les cellules photovoltaïques à base de couche mince de silicium cristallin, de par sa stabilité chimique dans le temps et son rendement théorique élevé, s'avère être une solution prometteuse qui fait l'objet de nombreuses études.

La technologie est orientée généralement vers le silicium poly-cristallin à petit ou moyen grain de l'ordre de (0.1-2) μm car il présente l'avantage d'un coût relativement bas, en plus d'une grande facilité de dépôt en couches minces.

En vue d'une utilisation pour les applications photovoltaïques en couches minces, il est nécessaire d'avoir un matériau caractérisé par une taille de grain la plus grande possible, ainsi un bon piégeage de la lumière absorbée qui nécessite l'utilisation d'une température plus élevée, et qui peut être obtenue par l'emploi d'un substrat transparent réflecteur en face arrière [1]. Pour cela, les techniques de dépôt de film mince (pc-Si) à haute température, nécessitent l'utilisation d'un substrat céramique [2] qui tolère les températures les plus élevées, jusqu'à la température de fusion du silicium (1410°C) et qui doit avoir un coefficient d'expansion thermique proche de celui du silicium et un faible coût pour une utilisation à échelle industrielle.

L'Alumine peut être considérée comme le matériau le plus adapté à ces critères cause de sa particularité de réfléchir la lumière dans la couche mince du silicium poly-cristallin.

Objectifs et structure du mémoire :

L'objectif principal de notre étude est de faire une simulation et optimisation d'une cellule solaire à base de silicium polycristallin déposé sur un substrat étranger (Alumine) par le simulateur PC1D.

Dans le premier chapitre, nous détaillons, tout d'abord, les motivations qui nous ont poussé vers le choix de ce thème en abordant brièvement l'historique du photovoltaïque. Ensuite, nous décrivons la structure et le fonctionnement des cellules photovoltaïques avant de donner les paramètres et les caractéristiques de ces cellules et nous donnons les principaux types de ces dernières. Nous terminons ce chapitre par une réponse spectrale du rendement quantique puis les pertes physiques et technologiques qui limitent ce rendement.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude des différents types de silicium et les étapes à suivre pour obtenir du silicium de qualité électronique. Puis, nous présentons des propriétés physiques, les différents défauts de structure présents dans le silicium polycristallin (impuretés introduites et leurs influences sur les propriétés du matériau), et la technique

conventionnelle de fabrication d'une cellule photovoltaïque en silicium, en fin, nous présentons les différentes Techniques de dépôt de silicium sur un substrat étranger.

Le troisième chapitre présent dans une première partie, les principales voies technologiques exploitées pour la réalisation de cellules à base de silicium en couche mince par une approche haute température et le choix de substrat. Dans la deuxième partie nous présenterons quelques notions sur l'Alumine (propriétés physico-chimiques, procédé d'extraction et leurs différentes structures), en suite nous donnons l'architecteur de la cellule.

Le quatrième chapitre est consacré à la simulation numérique à l'aide du logiciel PC1D pour l'obtention de rendement élevé d'une cellule photovoltaïque à base du silicium polycristallin déposé sur l'Alumine comme substrat.

***Chapitre I : Généralité sur les
cellules photovoltaïques***

I.1.Introduction :

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année 15000 fois la consommation énergétique de l'humanité. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 Kilowatt crête par mètre carré ($1KW_c / m^2$) répartie tout le spectre de l'ultraviolet à l'infrarouge [3].

Ce premier chapitre constitue une base théorique et bibliographique. Pour cela nous commençons tout d'abord par une description sur les cellules solaires, nous décrivons ensuite le fonctionnement des cellules photovoltaïques, leurs caractéristiques principales et leurs rendements.

I.2.L'énergie solaire :

L'énergie solaire produite par le soleil à la suite de réaction de fusions thermonucléaire, source de la plupart des énergies disponibles sur terre est exploitable pour la production d'électricité, inépuisable et non polluante. L'énergie solaire est selon le mode d'absorption se distingue par deux types: l'énergie solaire thermique ou bien l'énergie solaire photovoltaïque.

La conversion photovoltaïque est la transformation directe d'une énergie électromagnétique (rayonnement solaire) en énergie électrique de type continu directement utilisable à l'aide de cellules Solaires.

I.2.1.Le rayonnement solaire :

Le soleil se comporte comme un corps noir à la température d'environ $5800k$. Ceci conduit à un pic d'émission situé à une longueur d'onde de $0,5\mu m$ pour une puissance d'environ $60KW/m^2$ soit un total de $9,5 \cdot 10^{25}W$ [4]. 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 $1,36KW/m^2$ hors atmosphère.

I.2.2. Spectre solaire :

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique, sa décomposition en longueurs d'ondes est appelée spectre électromagnétique. Elle est en effet composée de toutes sortes de rayonnement de couleurs différentes, caractérisées par leur gamme de longueur d'onde. La fréquence de la lumière détermine sa couleur. Les photons, grains de lumière qui composent ce rayonnement, sont porteurs d'une énergie qui est liée à leur fréquence (longueur d'onde) par la relation :

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (I.1)$$

h : Constant du Planck ($h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ J.s).

ν : Fréquence.

C : vitesse de la lumière ($C = 3 \cdot 10^8$ m/s).

λ : Longueur d'onde (m).

C'est cette relation mise à jour par Louis de Broglie en 1924 qui a confirmé la nature à la fois corpusculaire et ondulatoire de la lumière présence de corpuscules «les photons» et propagation d'ondes avec une fréquence de vibration et une longueur d'onde. La figure (I.3) montre la partie visible du spectre électromagnétique. La gamme des longueurs d'onde visibles est comprise entre 390 nm (violet) à 780 nm (rouge). Le tableau (I.1) montre la gamme de longueur d'onde approximative des couleurs visibles [5].

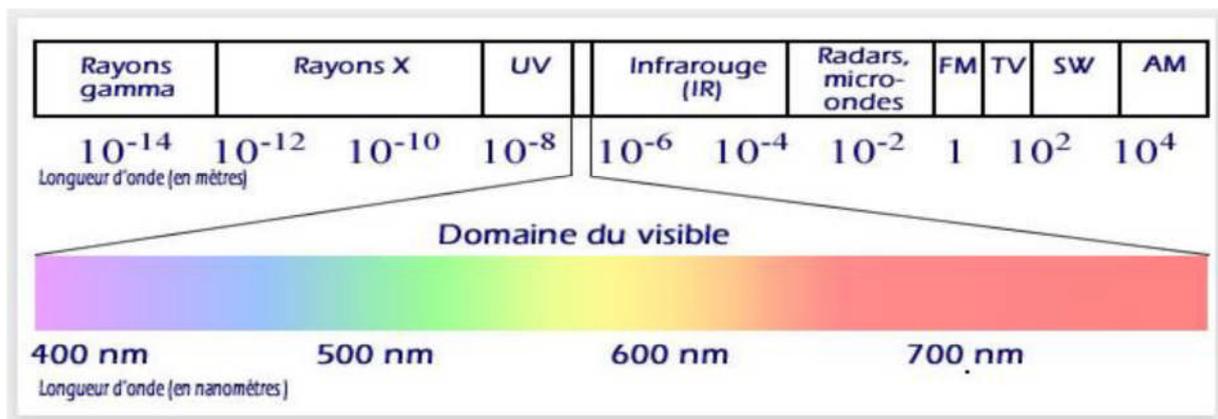


Figure I-1. Spectre électromagnétique.

Le spectre de lumière visible	
Couleur	Longueur d'onde (nm)
Rouge	622-780
Orange	597-622
Jaune	577-597
Vert	492-577
Bleu	455-492
Violet	390-455

Tableau I.1: Longueurs d'ondes approximatives des différentes couleurs dans le vide.

I.2.3. La masse d'air :

Afin de comparer et d'unifier les performances des cellules photovoltaïques élaborées dans les différents laboratoires du monde, il a été institué la notion d'Air Mass (AM) qui quantifie la quantité de puissance absorbée par l'atmosphère en fonction de l'angle θ du soleil par rapport au zénith :

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

Si le soleil est au zénith du lieu d'observation, $\theta = 0^\circ$, $AM = 1$: la notation utilisée est AM1. AM0 correspond à l'irradiante hors atmosphère, et est surtout utilisée pour prédire le comportement des cellules utilisées dans des applications spatiales. Le spectre standard le plus étudié est AM1.5G.

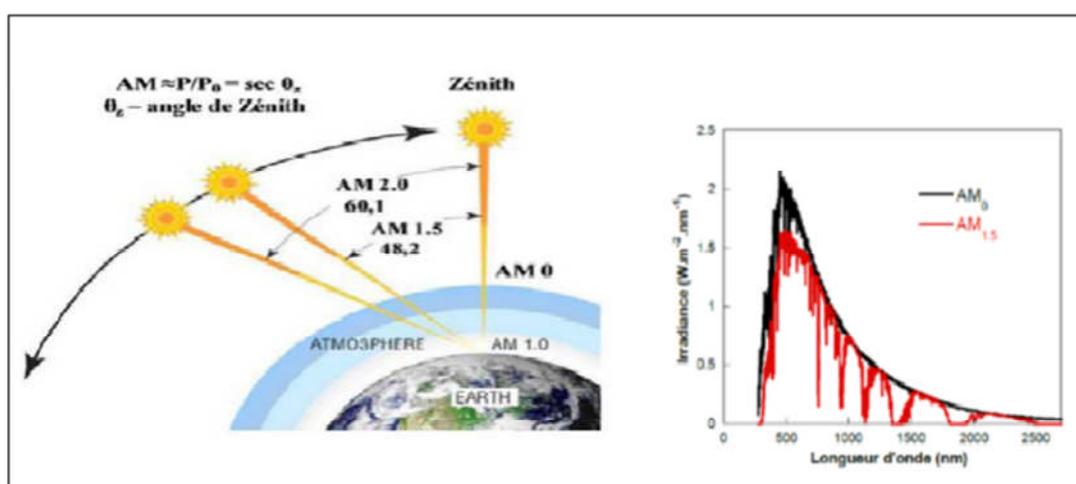


Figure I-2. Définition du nombre d'air masse (AM) et spectre d'émission du rayonnement solaire homologué par la Société Américaine de Tests et Matériaux (ASTM G173-03).

I.2.4. Absorption de la lumière :

La lumière se compose de photons, «grains de lumière», chacun porteur d'une énergie dépendant de sa longueur d'onde (ou couleur du rayon).

Ces photons peuvent pénétrer dans certaines matières même passés au travers : les objets transparents pour notre œil laissent passer la lumière visible.

Plus généralement, un rayon de lumière qui arrive sur un solide peut subir trois événements optiques :

- **Réflexion** : la lumière est renvoyée par la surface de l'objet.
- **Transmission** : la lumière traverse l'objet.
- **Absorption** : la lumière pénètre dans l'objet et n'en ressort pas l'énergie est restituée sous une autre forme.

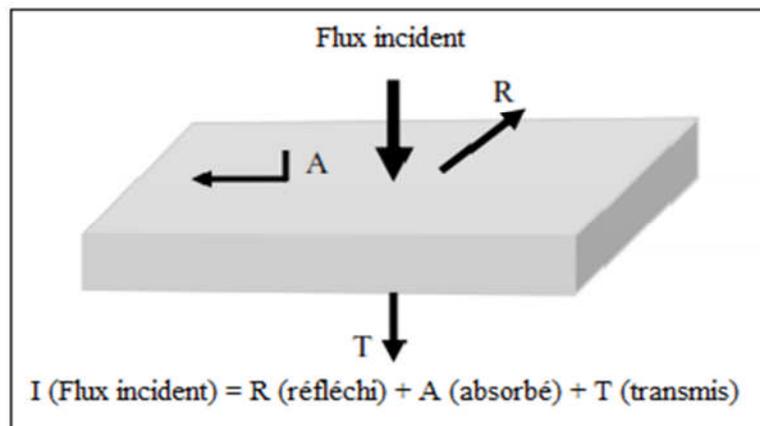


Figure I-3. Les différents phénomènes optiques.

I.3. Historique de photovoltaïque :

Le **phénomène photovoltaïque** est la transformation directe de la lumière en électricité à l'échelle atomique. Certains matériaux se caractérisent par une propriété connue sous le nom d'effet photoélectrique qui leur fait absorber les photons de la lumière et libérer des électrons. Lorsque ces électrons libres sont capturés, il en résulte un courant électrique qui peut être utilisé comme de l'électricité.

L'effet photoélectrique a d'abord été observé par un physicien français, Edmond Becquerel, en 1839, qui a découvert que des matériaux spécifiques produisaient de petites quantités de courant électrique lorsqu'ils étaient exposés à la lumière. En 1905, Albert Einstein a décrit la nature de la lumière et l'effet photoélectrique sur lequel s'appuie la

technologie photovoltaïque, ce qui lui a valu plus tard de remporter un Prix Nobel de physique. Le tout premier module photovoltaïque a été fabriqué par les Laboratoires Bell en 1954. Il a été présenté comme une batterie solaire et était surtout une simple curiosité car il était trop cher pour que son utilisation se généralise. Dans les années 60, l'industrie spatiale a commencé à faire la première utilisation sérieuse de la technologie pour fournir de l'électricité à bord des engins spatiaux. Par le biais des programmes spatiaux, la technologie a évolué, sa fiabilité a été établie et son coût a commencé à baisser. Durant la crise énergétique des années 70, la technologie photovoltaïque s'est imposée comme source d'électricité pour des applications non spatiales [5].

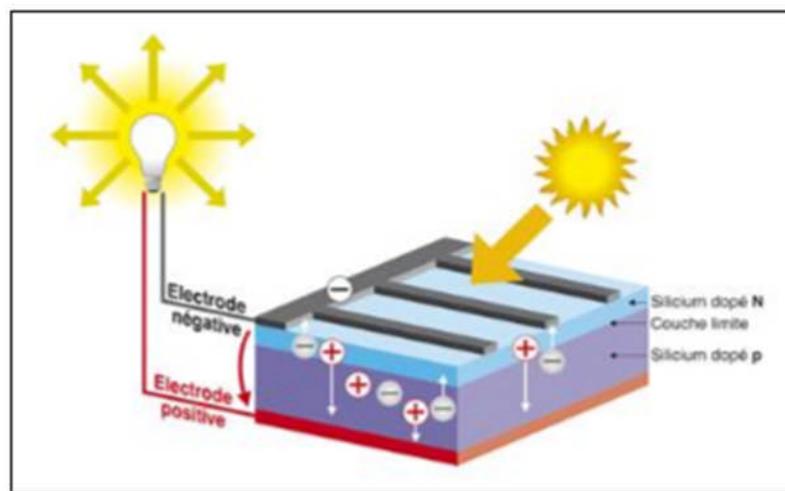


Figure I-4. L'effet photovoltaïque.

I.4. La cellule solaire :

La cellule solaire est un composant semi-conducteur qui converti l'éclairement incident en puissance électrique. Pour simplifier, la cellule photovoltaïque est physiquement une tranche de silicium que l'on prend entre deux électrodes métallique (+) et (-) pour collecter le courant produit. Cette cellule se compose d'une jonction PN, elle est obtenue en dopant les deux faces d'une tranche de silicium. Sous l'action d'un rayonnement solaire, les atomes de la jonction libèrent des charges électriques de signes opposés qui s'accumulent de part et d'autre de la jonction pour former un générateur électrique.

Cellule solaire ou photopile sont des termes équivalents, qui désignent généralement des capteurs de petite taille, utilisés soit tels quels, soit assemblés dans un panneau solaire, ou module photovoltaïque [6].

La conversion d'énergie photovoltaïque met en jeu trois phénomènes physiques, intimement liées simultanément [7]:

- L'absorption de la lumière dans le matériau.
- Le transfert d'énergie des photons aux charges électriques.
- la collecte des charges.

Il est donc clair qu'un matériau doit avoir des propriétés optiques et électriques spécifiques pour permettre la conversion photovoltaïque [8].

I.4.1. Description de la structure d'une cellule solaire :

La première structure de la cellule solaire était très simple. Elle était incapable d'offrir des performances élevées et de délivrer une puissance satisfaisante aux charges. Elle avait aussi beaucoup d'inconvénients et des pertes importantes soit par réflexion, soit par les contacts ohmiques et par la recombinaison. Cette structure a subi plusieurs modifications. La structure actuelle tend à optimiser les performances de la structure classique. Elle est constituée de plusieurs couches, l'élément de base de ces structures est la jonction P-N, elle joue le rôle principal dans le dispositif solaire, et elle est le siège de la génération des porteurs et de leurs séparations. Pour que la pile solaire soit utile, et pour que l'électricité qu'elle produit passe convenablement dans la charge, la grille doit avoir une forme spéciale afin que la surface active de la cellule ne soit pas occultée [9].

Quand la lumière du soleil traverse le verre et l'adhésif, elle rencontre une couche antireflet (ARC). Cette couche est également transparente, elle réduit la quantité de lumière du soleil réfléchie par la cellule. Sans ARC, la pile solaire agit comme un miroir et reflète jusqu'à 30% de la lumière frappant la cellule. L'ARC réduit au minimum cette réflexion, en ramenant les pertes de réflexion à moins de 5% de sorte que la lumière du soleil va atteindre la surface de la cellule et diminuer les pertes optiques.

La couche extérieure de la cellule est en verre pour protéger la structure contre l'environnement. Il est attaché au reste de la cellule avec un adhésif transparent. Les deux régions principales de la jonction sont appelées respectivement émetteur et base.

I.4.1.1. Contacts face avant et arrière :

Les contacts métalliques de l'émetteur et du substrat servent à collecter le courant de porteurs photo générés. Les contacts doivent être ohmiques, c'est à dire que la caractéristique $I = f(V)$ du contact doit être linéaire. La résistance des contacts est un paramètre très important. La forte résistance des contacts augmente la résistance série de la cellule et baisse le facteur de forme ainsi que le rendement [9].

Les contacts sont généralement réalisés par sérigraphie. Les doigts de sérigraphie possèdent une largeur minimale de 100 μm et une épaisseur de 10 μm à 30 μm permettant de conduire une forte densité de courant. Pour les cellules photovoltaïques à haut rendement, la pulvérisation cathodique ou l'évaporation sous vide sont utilisées [9].

I.4.1.2. Couche antireflet :

La quantité de photons pénétrant la cellule photovoltaïque dépend de la réflectivité de sa surface. La réflectivité caractérise la quantité de photons réfléchi par la surface, soit une perte du rayonnement incident. Pour minimiser la réflexion de la lumière en surface, cette dernière est recouverte d'une couche anti-réfléchissante (Anti-Reflective Coatings). Le rôle de la couche anti réfléchissante est de réduire la réflectivité de la cellule au niveau de la face avant. Sans couches anti réfléchissantes, la cellule solaire agit comme un miroir et reflète jusqu'à 33% de la lumière incidente sur la cellule. Cette couche réduit au minimum cette réflexion, en ramenant les pertes de réflexion à moins de 5% de sorte que la lumière du soleil va atteindre la surface de la cellule et diminuer les pertes optiques. Différentes couches anti réfléchissantes sont utilisées en photovoltaïque, elles peuvent être isolantes comme le TiO_2 , SiO_2 , ZnS , MgF_2 et SiNx ou conductrice comme le ZnO ou l'ITO.

I.4.1.3. Texturation de surface :

La texturation du silicium est utilisée pour diminuer la réflectivité de la surface de la cellule. Cette opération vise à développer en surface un relief micrométrique, généralement de forme pyramidale. La figure (I.5) présente le principe de réflexions multiples propre à la texturation. Le relief de la surface entraîne une baisse de la réflexion en face avant un rayon arrivant à incidence normale (par rapport au plan de la cellule) sur une pyramide sera réfléchi sur la face d'une pyramide adjacente, cette double réflexion sur les pyramides diminue le coefficient de réflexion totale, qui ne vaut plus R mais R^2 . D'autre part, un rayon d'incidence

normale sera transmis dans la cellule avec un angle de réfraction θ différent de 0° . Le trajet de ce rayon dans le silicium sera donc augmenté d'un facteur $1/\sin \theta$ par rapport au cas d'une surface plane et perpendiculaire à l'éclairement, ce qui aura pour effet d'augmenter la part de photons absorbés par le matériau. Pour finir, la texturation de la surface entraîne un piégeage plus important de la lumière pénétrant dans la cellule. Sur la face arrière de la cellule, il existe un angle d'incidence critique θ_c à partir duquel le rayon est totalement réfléchi et prolonge son trajet dans le semi-conducteur, augmentant là aussi l'absorption des photons.

En appliquant la loi de Descartes, on trouve que cet angle vaut 170 dans le cas du silicium dans l'air. Ce phénomène est particulièrement important dans le cas des cellules de faible épaisseur, et peut être renforcé par une texturation de la face arrière et/ou une couche antireflet sur cette même face. Différents procédés sont utilisés pour texturer la surface du silicium: attaques chimiques de la surface (KOH, NaOH,) texturisation mécanique, texturisation laser [9].

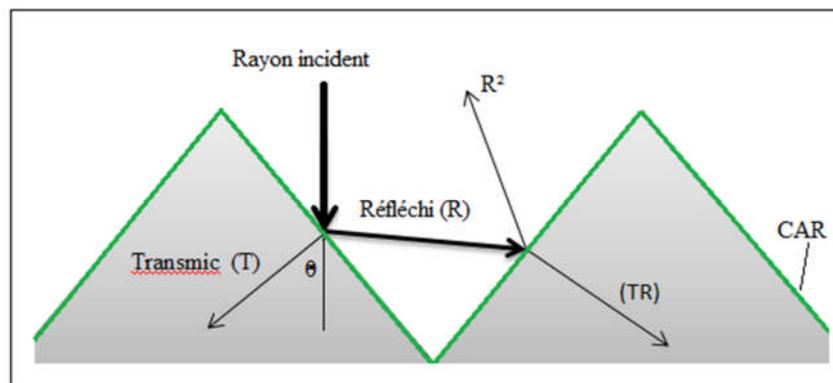


Figure I-5. Schéma du principe des réflexions lumineuses sur une surface texturée.

I.4.1.4. Zone BSF :

Un BSF (Back Surface Field) est une couche fortement dopée sur la face arrière de la cellule. Cette zone a le même type de dopage que celui de la base, conduisant à une structure P- P+. Ce dernier consiste à créer une barrière de potentiel sur la face arrière de la cellule pour assurer une passivation.

La barrière de potentiel induite par la différence du niveau de dopage entre la base et le BSF tend à confiner les porteurs minoritaires dans la base. Donc le but du champ arrière est de diminuer la vitesse de recombinaison [9].

La structure globale d'une cellule photovoltaïque avec contacts sur les deux faces est présentée sur la figure I-6.

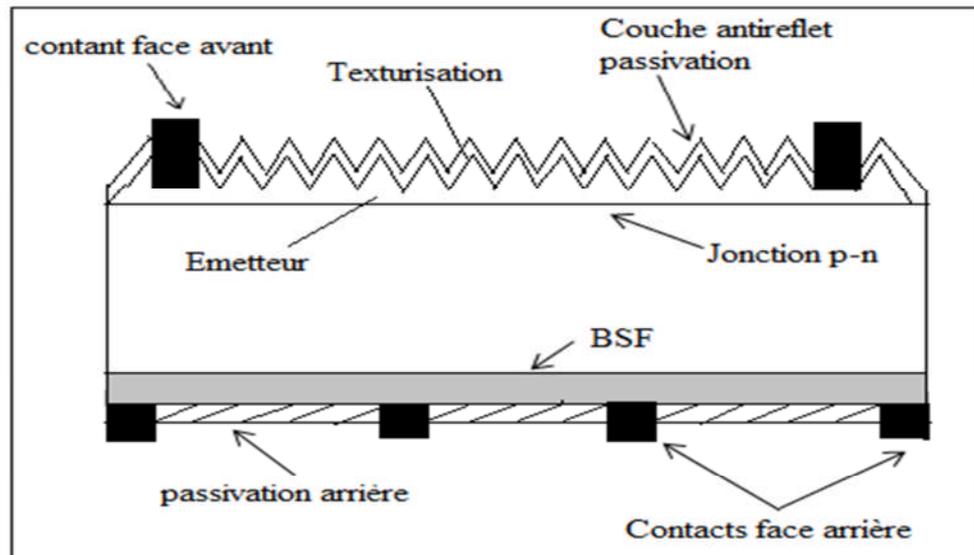


Figure I- 6. schéma descriptive d'une cellule photovoltaïque.

I.4.2.Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque :

Le fonctionnement d'une cellule solaire repose sur l'effet photoélectrique, découvert par A. Becquerel en 1835 et expliqué par A. Einstein en 1905 [10]. Il s'agit de l'absorption de photons par un matériau, qui convertit cette énergie lumineuse en énergie électrique. Dans le cas qui nous intéresse, le matériau est un semi-conducteur, le silicium à titre d'exemple, et la source d'énergie lumineuse est le soleil [11].

I.4.2.1.Absorption par les semi-conducteurs :

L'absorption de la lumière dans les semi-conducteurs peut être décrite de manière quantique. Un photon incident d'énergie égale à la largeur de bande interdite du matériau est absorbé. L'énergie de ce photon est transférée à un électron de la bande de valence qui passe dans la bande de conduction, laissant dans la bande de valence un trou (chargé positivement), voir (figure I.-4). Si l'énergie du photon incident est inférieure à la largeur de la bande interdite du matériau, le photon le traverse sans être absorbé. Si l'énergie du photon est supérieur à la largeur de bande interdite du matériau, l'excès d'énergie (par rapport à la

largeur de la bande interdite du matériau) donné à l'électron est converti en chaleur et est donc perdu (temps de relaxation très rapide, de l'ordre de la femto-seconde), c'est la thermalisation des porteurs. Les photons absorbés créent une paire électron-trou [12].

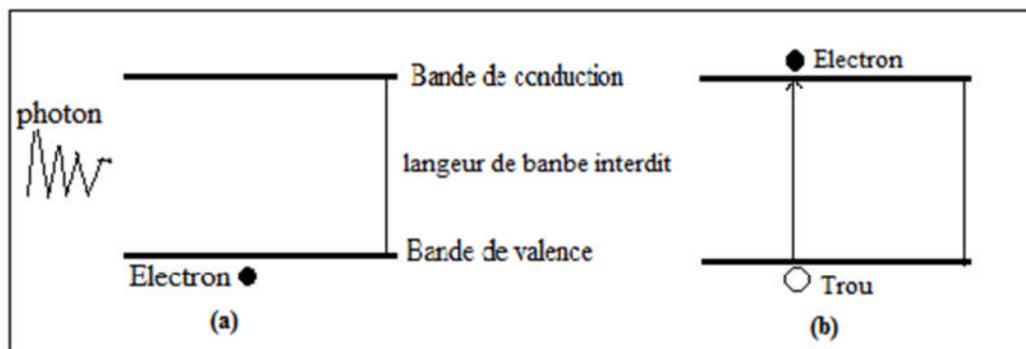


Figure I-7. Phénomène d'absorption dans un semi-conducteur.

(a) Un photon incident pénètre dans le semi-conducteur. (b) Son énergie est suffisante pour extraire un électron libre de la bande de valence et le transférer à la bande de conduction.

I.4.2.2. Transfert d'énergie des photons aux charges électriques :

Les photons absorbés créent une paire électron-trou, les porteurs de charges ainsi photogénérés sont ensuite séparés et collectés vers un circuit extérieur. Dans la cellule solaire, la séparation des porteurs de charges se fait grâce à la jonction PN (figure I-8).

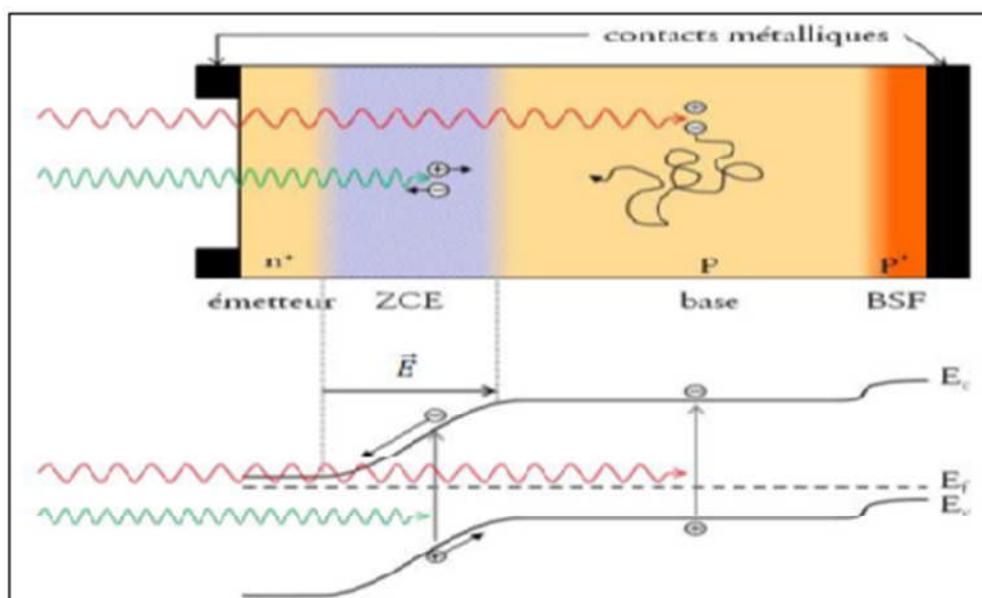


Figure I-8. Schéma d'une cellule solaire.

Ces deux zones (P et N) forment respectivement la base et l'émetteur de la cellule. La juxtaposition des zones P et N forme un champ électrique, qui repousse les électrons vers la zone N et les trous vers la zone de type P, à la jonction de ces deux parties, il y a alors une déplétion en porteurs de charge, c'est la zone de charge d'espace (ZCE). Lors de l'absorption d'un photon, un électron de la bande de valence du semi-conducteur va être excité et se retrouver en bande de conduction, laissant un défaut d'électron dans la bande de valence deux porteurs de charge mobiles sont donc générés, l'électron et le trou. Si cela se produit hors de la ZCE, les porteurs minoritaires (électrons dans le type P et trous dans le type N) vont diffuser dans le matériau jusqu'à se recombiner ou arriver à la ZCE. Si un porteur se trouve dans la ZCE, que ce soit parce qu'il y a été généré ou qu'il s'est déplacé jusque-là, le champ électrique le poussera vers la zone où il sera majoritaire : les électrons vers la zone N et les trous vers la zone P [11].

I.4.2.3. Collecte des charges :

Les charges sont ensuite collectées par des contacts métalliques sur les faces avant et arrière de la cellule. Un courant est ainsi généré par la cellule [11].

I.4.3. Caractéristique et paramètre d'une cellule photovoltaïque :

C'est un courant de porteurs minoritaires proportionnel à l'intensité lumineuse. Ce courant s'oppose au courant de diode, appelé courant d'obscurité I_{obs} , qui résulte de la polarisation du composant. Le courant résultant I est :

$$I = I_{ph} - I_{obs}$$

$$I_{obs} = I_0 \left[\frac{qv}{e^{nkT}} - 1 \right]$$

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\frac{qv}{e^{nkT}} - 1 \right] \quad (I-3)$$

Ou

q : charge élémentaire $q = 1,6 \cdot 10^{-19} C$.

k : constante de Boltzmann [$k = 1,38 \cdot 10^{-23} JK^{-1}$].

T : température [K].

v : tension aux bornes de la jonction [volt].

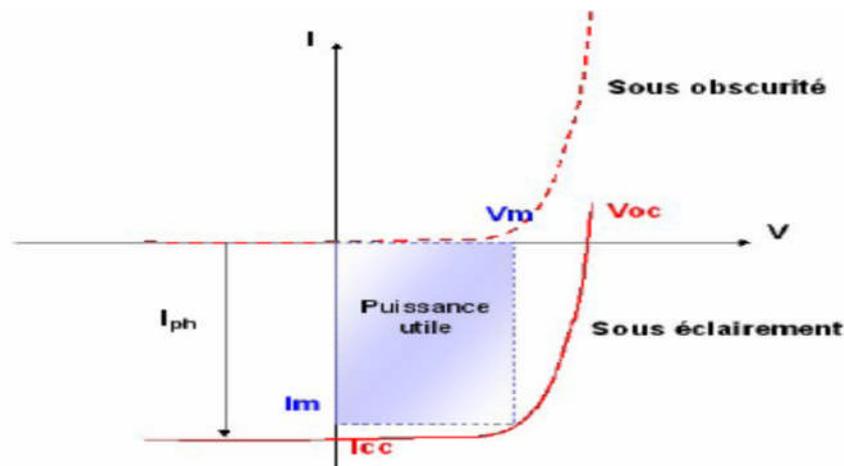


Figure I-9. Caractéristiques $I=f(v)$ sous obscurité et sous éclairage d'une cellule Photovoltaïque.

Plusieurs paramètres importants caractérisent la courbe courant-tension d'une cellule photovoltaïque :

I.4.3.1. Courant de court-circuit :

Le courant de court-circuit I_{cc} exprimé en mA, est le courant qui circule dans la cellule sous éclairage et en court-circuitant les bornes de la cellule. Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et il dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs de charges et de la température.

$$(V=0) : I = -I_{ph} = I_{cc} \quad (I-4)$$

I_{ph} : photocourant.

I.4.3.2. Tension de circuit ouvert :

La tension exprimée en V mesurée aux bornes des électrodes quand le circuit est ouvert est appelée «tension de circuit ouvert» V_{co} . Quand le courant qui traverse la cellule est nul, la tension est donnée par la relation :

$$V_{co} = \frac{KT}{q} \ln \left(\frac{I_{cc}}{I_s} + 1 \right) \quad (I-5)$$

I_s : Courant de saturation.

I.4.3.3. Facteur de forme :

La puissance fournie au circuit extérieur par une cellule photovoltaïque sous éclairage dépend de la résistance de charge (résistance externe placée aux bornes de la cellule). Cette puissance est maximale (notée $P_m = P_{max}$) pour un point de fonctionnement P_m ($I_m = I_{max}$, $V_m =$) de la courbe courant-tension (figure II.20). Le facteur de forme est défini par la relation suivante:

$$FF = \frac{P_m}{V_{co} I_{cc}} = \frac{V_m I_m}{V_{co} I_{cc}} \quad (I-6)$$

I.4.4. Rendement de conversion η :

Le rendement η de la cellule solaire exprimé en pourcentage, désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule (P_{max}) et la puissance lumineuse incidente P_{inc} .

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{FF \cdot I_{cc} \cdot V_{co}}{P_{inc}} \quad (I-7)$$

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert

I.4.5. Le Schéma électrique équivalent :

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

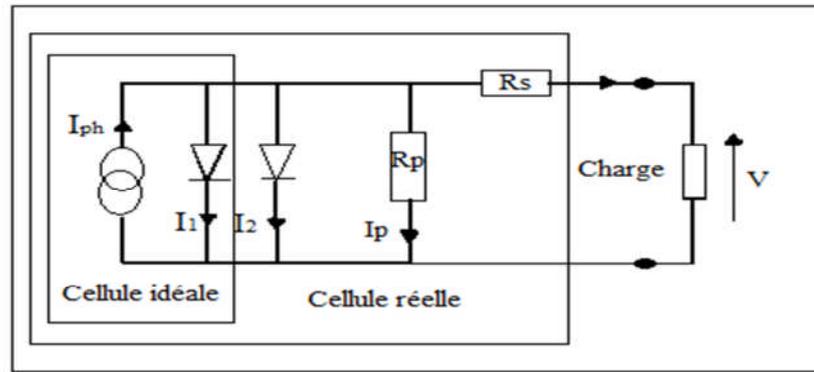


Figure I-10. Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque.

L'équation du courant devient :

$$I = I_1 + I_2 + I_p - I_{ph}$$

I_1 : courant de diffusion dans la base et l'émetteur.

I_2 : le courant de génération/ recombinaison.

$$I = I_{01} \left(\exp \left(\frac{q(V - IR_s)}{n_1 kT} \right) - 1 \right) + I_{02} \left(\exp \left(\frac{q(V - IR_s)}{n_2 kT} \right) - 1 \right) + \frac{V - IR_s}{R_p} - I_{ph} \quad (\text{I-8})$$

n_1, n_2 : Facteurs de qualité de la diode.

I_{01}, I_{02} : Courant de saturation.

I.4.6. Les différentes structures des cellules photovoltaïques :

Les dispositifs photovoltaïques récents tendent à convertir convenablement le maximum de l'énergie lumineuse en électricité et réduire efficacement les pertes électriques et optiques, et optimiser les propriétés des surfaces. Les structures photovoltaïques liées aux exigences technologiques et industrielles, doivent se rapprocher d'une cellule idéale et minimiser les pertes dans les contacts ohmiques, de la réflexion et recombinaison (amélioration de qualité cristalline).

Dans cette optique, la technologie photovoltaïque a vu plusieurs variantes au niveau des structures solaires ces dernières années, grâce aux méthodes d'élaboration et aux techniques de dépôt et du traitement thermique [13].

I.4.6.1. Structure d'une cellule photovoltaïque à haut rendement (PERL):

La structure de la cellule photovoltaïque à haut rendement (PERL) « Passivated Emitter with Rear, Locally diffused ». Cette cellule est réalisée sur un substrat de Si-FZ (Float zone) de type p. La face avant (face éclairée) de la cellule texturée en «pyramide inversées». Ce type de texturation permet une réduction importante du coefficient de réflexion et ainsi les pertes optiques. La réduction des pertes résistives d'environ 50% a permis aussi aux photopiles d'atteindre des rendements de l'ordre de 24% pour le silicium [14].

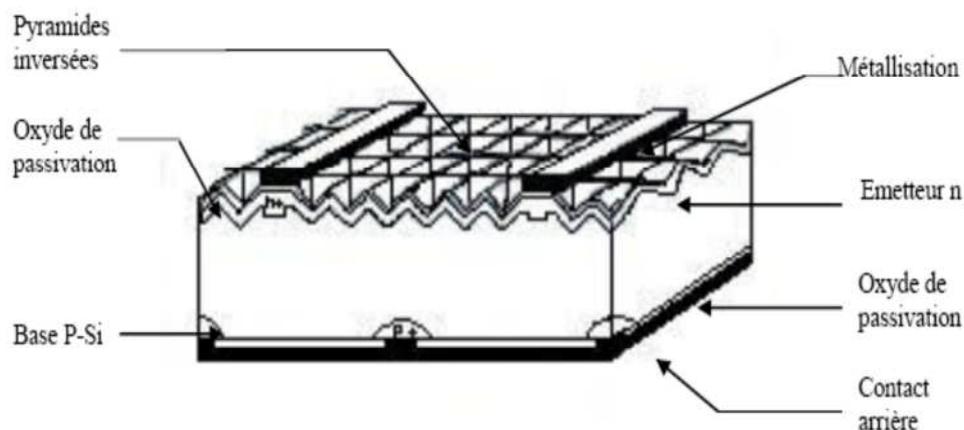


Figure I-11. La cellule PERL.

I.4.6.2. Cellules à jonctions multiples :

La contrainte de la dégradation des cellules soumises à la lumière poussé les chercheurs et les industriels à trouver des astuces dans l'architecture du dispositif pour minimiser cet effet. Les cellules à jonctions multiples, en plus de leur rendement étendu dans le rouge répondent à ce souci. En effet, en multipliant le nombre de jonctions avec des matériaux à gap légèrement différent, tout en réduisant l'épaisseur de chacune, les difficultés à surmonter sont:

- *un bon appariement des courants puisque c'est la cellule la plus mauvaise qui va imposer son courant.
- *des interfaces fortement recombinantes, le plus souvent réalisées avec du silicium.

I.4.6.3. Hétéro structure :

En déposant un autre semi-conducteur sur le silicium, on obtient une hétérojonction. On s'arrange pour que l'essentiel du processus photovoltaïque ait lieu dans le silicium. Les matériaux envisageables pour cette utilisation doivent posséder les propriétés suivantes :

- * Transparence pour le spectre solaire, ($E_g > 3\text{eV}$).
- * Conductivité électrique élevée pour faciliter et éventuellement remplacer la métallisation des contacts ohmiques.
- * Créer une barrière de potentiel élevée.
- * Posséder un indice de réfraction voisin de «2» pour jouer le rôle d'une couche anti réflexion [15].

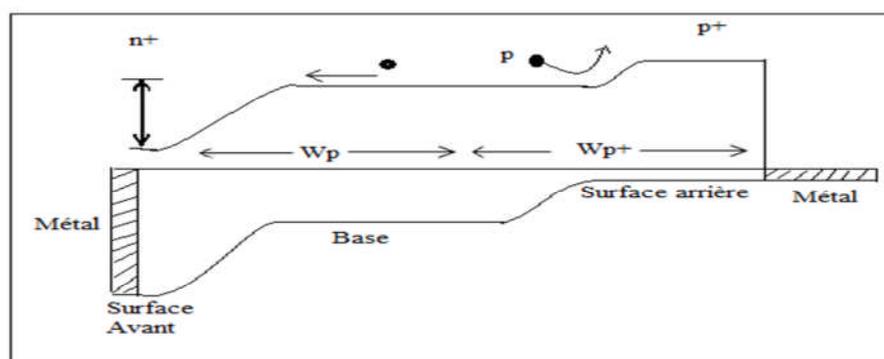
Deux matériaux remplissent ces conditions, l'oxyde d'étain (SnO_2) et l'oxyde d'indium (InO_3). Les rendements pour ce type de cellules sont compris entre 10 et 12%.

I.4.6.4. La structure BSF :

Le BSF (champ de surface arrière), aussi appelé « High-low-Junction » est une zone très dopée sur la totalité de la face arrière des photopiles avec un dopage de même type que celui de la base pour obtenir une structure n-p-p+. Le principal dopant utilisé est le bore et l'épaisseur de la couche p+ (WBSF) est d'environ 5 à 15 μm . En créant ainsi un gradient d'accepteurs en face arrière de la cellule, il est possible d'obtenir :

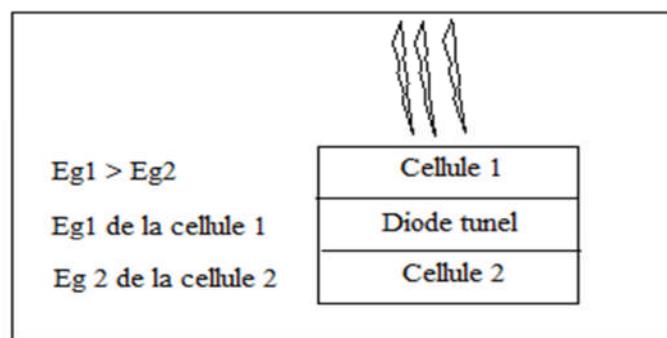
- Une augmentation du courant de court-circuit.
- Une augmentation de la réponse spectrale aux grandes longueurs d'onde.
- Une réduction de la résistance des contacts.

Le schéma suivant donne le diagramme énergétique d'une cellule solaire à couche BSF.



*Figure I-12. Diagramme énergétique d'une cellule solaire à couche BSF.***I.4.6.5. Tandem solaire :**

Les cellules solaires à une seule jonction ne permettent pas d'exploiter convenablement le spectre solaire, le spectre solaire est très large, et comme plusieurs matériaux solaires ayant une faible absorption dans le bleu et dans l'infrarouge ; il faut empiler plusieurs cellules dans l'ordre décroissant du gap. La réponse spectrale dans les tandems s'élargit le long du spectre de l'infrarouge vers le bleu et même le violet la tension de circuit ouvert V_{co} des tandems solaires atteint des valeurs très optimisées. Par exemple, le tandem à trois jonctions d'InGaP/GaAs/Ge a une tension de 2.1 eV, il peut exploiter de 300 vers 1900 nm. Une des structures Tandem qui offrent des rendements élevés est AlGaAs/GaAs, GaAs/Ge, AlGaAs/Si et InP/InGaAs [15].

*Figure I-13. Tandem solaire à deux jonctions.***I.4.6.6. Cellule solaire de type Schottky :**

Le dépôt d'un métal, convenablement choisi, en couche mince sur le silicium permet d'obtenir un autre type de cellules solaires connu sous le nom de « cellule Schottky ». Le diagramme énergétique de ce type de cellules sous illumination est montré sur la (Figure). Ci-dessous [17].

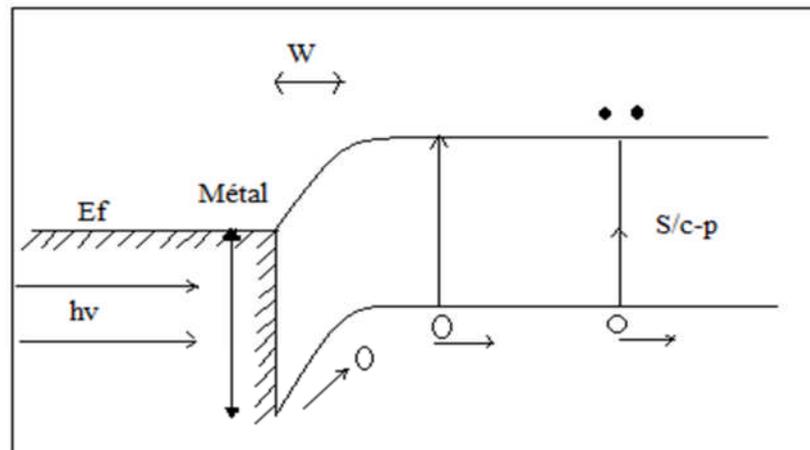


Figure I-14. Cellule solaire de type Schottky.

La couche métallique doit être très mince pour permettre à la lumière d'atteindre le semi-conducteur. Le photo-courant résultant à trois composantes. En effet, la lumière d'énergie « $h\nu > q\Phi_B$ » peut être absorbée dans le métal et fait passer des trous au-dessus de la barrière dans le semi-conducteur. Les rayonnements de courtes longueurs d'onde sont absorbés dans la région de déplétion dans le semi-conducteur et ceux de grandes longueurs d'onde sont absorbés dans la région neutre, créant des paires électron-trou comme dans la jonction « P-N ». Les avantages de la jonction Schottky sont :

- * Traitement à basses températures (aucune diffusion à haute température n'est exigée).
- * Adaptation au silicium poly cristallin et une pile solaire en couches minces.
- * Résistance élevée aux radiations dues au champ électrique dans la ZCE [18].

I.4.6.7. Cellule solaire de types structure MIS :

Rappelons, tout d'abord, qu'il est plus judicieux de parler de structures CIS (Conducteur-Isolant-Semi-conducteur), car le conducteur peut être un métal, un oxyde conducteur, un semi-conducteur ou un électrolyte. Cependant, l'appellation MIS est la plus répandue dans la littérature.

Dans ce type de cellules, un film isolant très mince de l'ordre de 0.2 nm est formé entre le métal et le substrat semi-conducteur. L'isolant est obtenu soit par oxydation superficielle du silicium (thermiquement ou chimiquement par le (HNO_3)), soit par dépôt de (SiO_2) en atmosphère contrôlée. Puisque l'oxyde peut être formé à basses températures et aucun procédé de diffusion n'est impliqué, on s'attend à ce que cette structure fabriquée sur

des substrats poly-cristallins ou amorphes fournisse une solution rentable pour des applications terrestres. Un rendement de 18% est obtenu avec cette structure sous éclairage AM1 [19].

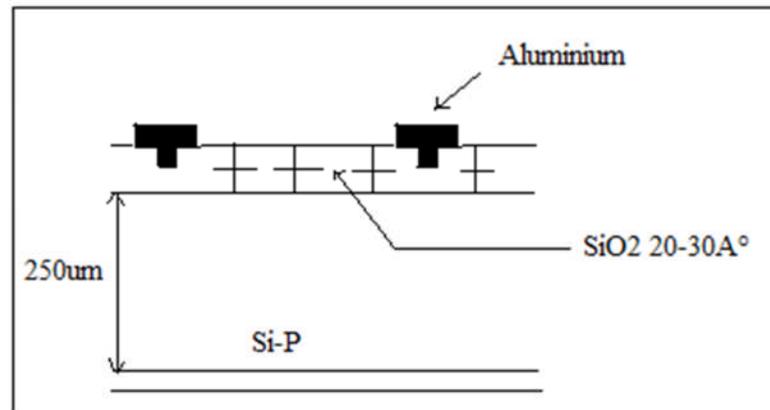


Figure I-15. Cellule solaire de type structure MIS.

I.5.Recombinaison :

La recombinaison est à l'opposé de la génération. Elle correspond aux mécanismes conduisant à la perte de paires électron-trou, avec l'énergie excédentaire émise sous forme de phonons ou de photons. Expérimentalement, elle correspond à une durée de vie des porteurs minoritaires τ_n capable d'être mesurée. Celle-ci correspond au temps moyen au bout duquel un pair électron -trou générée se recombine. La valeur de ce paramètre peut être déterminée, permettant de définir les taux de recombinaison R_n pour les électrons, R_p pour les trous par [20].

$$R_{n,p} = \frac{\Delta_{n,p}}{\tau_{n,p}} \quad (I-9)$$

Avec :

$R_{n,p}$: Densité des porteurs générés.

$\tau_{n,p}$: Durée de vie de ces porteurs

L'interprétation de la durée de vie n'est pas simple car il existe différents mécanismes de recombinaison intervenant simultanément en surface et en volume d'un échantillon. On définit donc une durée de vie effective, qui tient compte de l'ensemble de ces mécanismes.

En générale, la recombinaison peut être caractérisée comme suit :

I.5.1. Recombinaison directe (de bande à bande) :

Ce mécanisme se produit quand un électron de la bande de conduction tombe dans l'état vide de la bande de valence associée au trou. Cette transition de bande à bande est en général une transition radiative dans les semi-conducteurs à gap direct. En d'autre terme, c'est l'annihilation d'un électron de la bande de conduction et d'un trou de la bande de valence. Ce processus est expliqué par l'attraction de la charge négative de l'électron et de la charge positive du trou qui conduit ces porteurs à l'annulation. L'énergie libérée pendant le processus produit un photon qui émet de la lumière [21] [22].

I.5.2. Recombinaison indirecte (de bande aux impuretés, avec l'aide de piège) :

La recombinaison se produit quand un électron arrive dans un état d'énergie permise qu'on appelle « piège ». La force responsable de ce mécanisme se situe dans la bande interdite. Elle est provoquée par la présence d'un atome étranger ou un défaut structural, tel que les macles ou les dislocations. Une fois le piège rempli, il ne peut pas accepter un autre électron, puis l'électron occupant cet état d'énergie de piège va encore faire un deuxième saut vers un état vide dans la bande de valence. On peut envisager ce processus comme une transition en deux étapes d'un électron de la bande conduction à la bande de valence, ou comme étapes d'un électron qui passe de la bande de conduction à la bande de valence ou comme disparition de l'électron et du trou qui se rencontrent dans ce piège. Ceci s'appelle la recombinaison indirecte. Dans cette recombinaison non radiative, l'énergie dégagée est transmise à un ou plusieurs phonons. Souvent, elle libère l'énergie thermique ou produit des vibrations du réseau [23].

I.5.3. Recombinaison Auger :

Nous avons une recombinaison de type Auger, lorsque l'énergie de l'électron qui se recombine dans la bande de valence est transférée sous forme d'énergie cinétique à un autre électron libre.

L'énergie transférée est libérée ensuite sous forme de phonons. Ce mécanisme est prédominant pour les régions fortement dopées [24]. Cette recombinaison nécessite trois particules: au moins un trou et un électron et la troisième peut être un trou ou un électron. Ce

type de recombinaison est similaire à la recombinaison de bande à bande, mais la troisième particule reçoit l'énergie à partir de la recombinaison [25].

Le taux de recombinaison est donné par la relation :

$$R = (C_n n + C_p p)(pn - n_i^2) \quad (\text{I-10})$$

Avec C_n et C_p sont des coefficients d'Auger.

I.5.4.Recombinaison de surface :

Recombinaison au niveau des surfaces et des interfaces peuvent avoir un impact significatif sur le comportement des dispositifs semi-conducteur. C'est parce que les surfaces est interface contient généralement un grand nombre de centres de recombinaison en raison de l'interruption soudaine du cristal semi-conducteur, ce qui laisse un grand nombre d'états électrique actives. En outre, les surfaces et les interfaces sont plus susceptibles de contenir des impuretés car elles sont exposées pendant le processus de fabrication du dispositif [26].

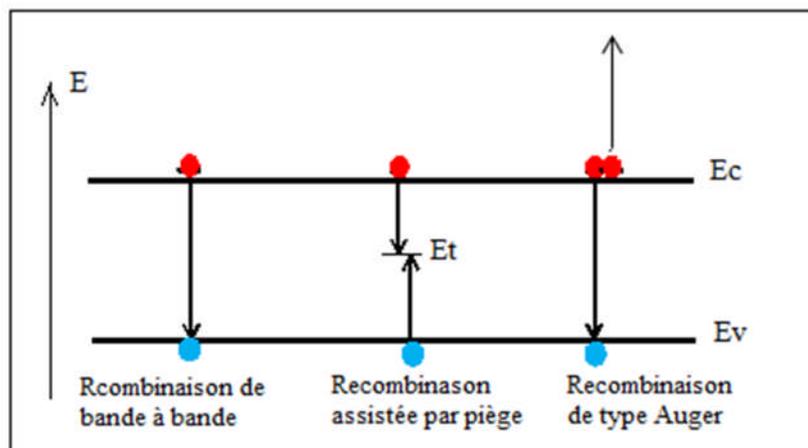


Figure I-16.Types de recombinaison.

I.6.La Génération :

La génération peut être considérée comme le mécanisme inverse de la recombinaison. La génération des porteurs est un processus pour reconstituer l'équilibre d'un semi-conducteur qui a été perturbé. La génération se produit quand il y a un déficit de la concentration en porteur comparée à la concentration d'équilibre.

Des porteurs doivent être créés dans le semi-conducteur pour atteindre cet équilibre. Lorsqu'on expose l'une des faces de la cellule solaire sous un flux solaire,

on constate immédiatement un phénomène intéressant au niveau de cette structure, la radiation lumineuse peut ainsi atteindre le cristal semi-conducteur, et en particulier la jonction. Cette radiation est capable de générer une paire électron-trou. On peut faire une analogie entre les deux processus génération et recombinaison, autrement dit, les trois mécanismes de la recombinaison peuvent être inversés pour créer des porteurs. Il s'agit de la génération bande à bande, intrinsèque, de la génération extrinsèque par l'intermédiaire du niveau de dopage ou bien le piégeage, et la génération Auger.

La génération bande à bande peut se produire quand un électron est sorti directement dans la bande de conduction. Ceci peut se produire par l'absorption de la lumière, photo-génération. Des centres d'impuretés peuvent être utilisés pour la génération, l'électron n'aurait pas besoin autant d'énergie pour atteindre la bande de conduction comme le cas de la génération bande à bande. La génération Auger se produit souvent quand un champ électrique est appliqué [23] [27].

I.7. Rendement quantique et réponse spectrale :

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

$$EQE = \frac{I_{cc}(\lambda)}{\varphi(\lambda)} \frac{E(\lambda)}{e} = \frac{I_{cc}(\lambda)}{\varphi(\lambda)} \frac{hc}{e\lambda} \quad (I-11)$$

Où $\varphi(\lambda)$ est le flux lumineux incident ($W \cdot m^{-2}$) et S est la surface de la cellule (m^2).

Le rapport $I_{cc}(\lambda)/\varphi(\lambda)$ est appelé « réponse spectrale » de la cellule, elle est notée $SR(\lambda)$. Elle représente le rapport de l'intensité $I(\lambda)$ générée par la cellule sur la puissance incidente $P_{inc}(\lambda)$, pour chaque longueur d'onde:

$$SR = \frac{I(\lambda)}{P_{inc}(\lambda)} = \frac{I(\lambda)}{\varphi(\lambda) \cdot S} \quad (I-12)$$

On peut donc redéfinir le rendement quantique externe comme suit [28], [29]:

$$EQE = SR(\lambda) \cdot \frac{hc}{e\lambda} \quad (I-13)$$

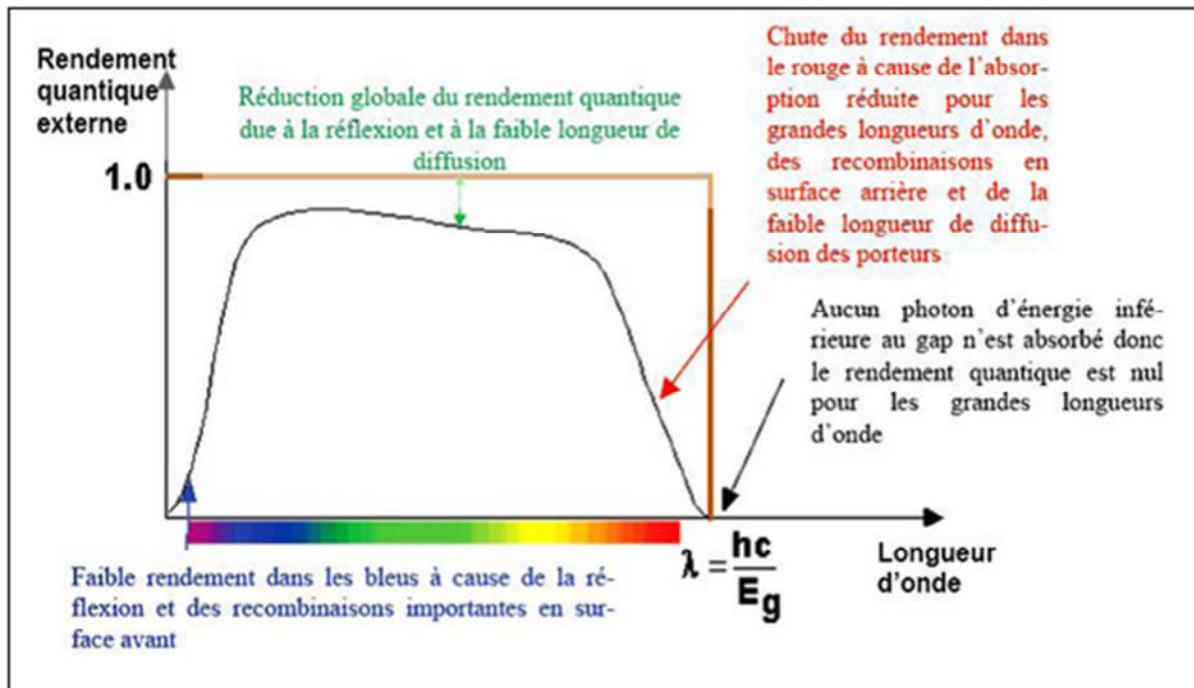


Figure I-17. Rendement quantique externe d'une cellule photovoltaïque.

I.8. Les pertes physiques et technologiques :

Le rendement de conversion photovoltaïque peut être exprimé en prenant en compte les facteurs de pertes [30] :

$$\eta = \frac{\int_0^{\lambda_g} p(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} p(\lambda) d\lambda} \times \frac{E_g \int_0^{\lambda_g} N(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} p(\lambda) d\lambda} \times \frac{qV_{oc}}{E_g} \times FF \times (1 - R) \times \frac{S - S_{m\acute{e}tal}}{S} \times \eta_a \times \eta_{col} \quad (I-14)$$

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

I.8.1. Pertes physiques :

I.8.1.1. Pertes par les photons de grande longueur d'onde :

Tous les photons possédant une longueur d'onde supérieure à celle associée au gap du semi-conducteur ($\lambda > \lambda_g$) ne peuvent générer de paire électron/trou et sont donc perdus. Les mécanismes d'absorption assistée par phonons permettent néanmoins de repousser la limite inférieure de l'énergie correspondant au gap du matériau (1.052 eV au lieu de 1.124 eV dans le cas d'une absorption assistée par un phonon dans le silicium) [31]. Sous un éclairement d'AM1.5, ces pertes sont évaluées à 23.5% dans le cas du silicium [32].

I.8.1.2. Pertes dues à l'énergie excédentaire des photons :

Un photon absorbé génère seulement une paire électron/trou. L'excès d'énergie, supérieur à la largeur de la bande interdite, est principalement dissipé sous forme de chaleur. Sous un éclairement d'AM1.5, ces pertes sont évaluées à 33% de la puissance totale dans le cas du silicium [32].

I.8.1.3. Facteur de tension :

C'est le rapport de la tension maximale développée par la cellule (V_{oc}) par la tension de gap (E_g/q). La tension aux bornes d'une cellule n'est qu'une fraction de la tension de gap à cause notamment de la chute de potentiel au niveau des contacts et de la jonction. Les meilleures valeurs obtenues de V_{oc} sont de l'ordre de 700 mV, pour les cellules à haut rendement.

I.8.1.4. Facteur de forme FF :

L'équation courant-tension est régie par les équations de Boltzmann sous forme exponentielle ($e^{q/kT}$). La courbe I(V) ne peut donc avoir une forme rectangulaire et, même dans le cas d'une cellule idéale, le facteur de forme ne peut dépasser 0.89 [33]. Ce terme dépend également fortement des paramètres technologiques modélisés par les résistances série et parallèle.

Le rendement est donc limité par ces différents facteurs à une valeur théorique maximale.

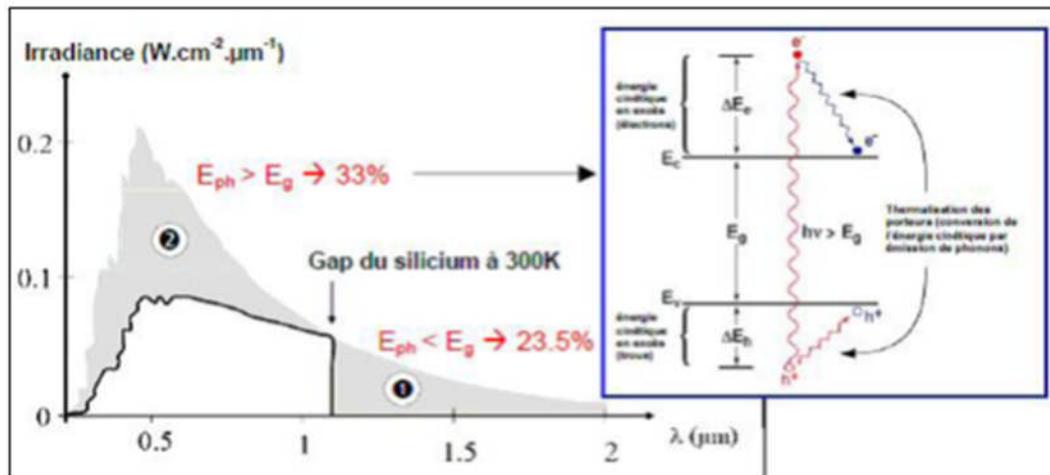


Figure I-18. Principales pertes intrinsèques pour une cellule photovoltaïque en silicium. (1) Pertes des photons de grandes longueurs d'onde. (2) Pertes dues à l'énergie excédentaire des photons. L'insert illustre le phénomène de thermalisation.

I.8.2. Pertes technologiques :

I.8.2.1. Réflectivité :

Une partie de l'énergie incidente est réfléchiée par la surface (non métallique) de la cellule. Le coefficient de réflexion R peut être optimisé par la mise en œuvre de traitements de surface adéquats et de couche antireflet.

I.8.2.2. Taux d'ombrage :

Les contacts métalliques (de surface $S_{\text{métal}}$) présents sur la face avant afin de collecter les porteurs entraînent des pertes de puissance puisqu'ils couvrent une partie de la surface S de la cellule. Le taux d'ombrage est un compromis entre les pertes dues à la couverture partielle de l'émetteur par les contacts et les pertes de facteur de forme provoquées par la résistance en série, liée à la largeur de la métallisation.

I.8.2.3. Rendement d'absorption :

A cause de l'épaisseur limitée de la cellule, une part non négligeable de photons, ayant néanmoins l'énergie requise, traverse l'épaisseur de la structure sans être absorbés. Des

techniques de piégeage par réflexion sur la face arrière peuvent augmenter de manière significative l'absorption, particulièrement dans le cas des cellules très fines.

I.8.2.4. Rendement de collecte :

C'est le rapport entre le nombre de porteurs effectivement collectés et le nombre total de porteurs photo-générés. En effet, certains porteurs se recombinent dans le volume ou à la surface de la cellule, ce phénomène dépendant directement de la durée de vie τ des porteurs minoritaires. Ces recombinaisons peuvent être réduites en mettant en œuvre différents traitements, abordés plus loin dans ce rapport.

I.9. Limitation des pertes :

La recherche et les techniques actuelles ont permis de réduire, parfois significativement, les pertes de rendement.

I.9.1. L'émetteur et la base :

L'émetteur (dopage type N) est réalisé par dopage en surface d'un substrat de silicium de type P. La partie dopée P du substrat (c'est-à-dire la majeure partie de celui-ci sauf la surface) constitue la base. L'interface de ces deux zones est celle d'une jonction PN qui permet de dissocier les paires électron-trou créées.

L'épaisseur totale de la cellule est actuellement proche de 200 μm . Les trous photogénérés ayant une longueur de diffusion (L_p) plus faible que celle des électrons (L_n). En pratique, on réalise un émetteur de faible épaisseur (0.2 - 0.3 μm) mais fortement dopé ($\approx 10^{20} \text{ cm}^{-3}$) une base de plus grande épaisseur faiblement dopée ($\approx 10^{15}$ à 10^{16} cm^{-3}) [34].

Le fort dopage de l'émetteur permet de limiter la résistance du contact métal-semi-conducteur (créé par la connexion entre les contacts métalliques et l'émetteur) et de créer un champ électrique suffisant au niveau de la ZCE.

I.9.2. La texturisation de la surface :

La réflexion est à l'origine de pertes importantes pour la cellule. La texturisation est utilisée pour diminuer la réflectivité de la surface de la cellule. Cette opération vise à développer en surface un relief micrométrique, généralement de forme pyramidale. Le relief créé permet d'augmenter la surface et induit des réflexions multiples sur les facettes des pyramides [35].

La texturisation assure ainsi le piégeage d'un maximum de lumière réduisant les pertes liées à la réflectivité. Différents procédés sont utilisés pour réaliser la texturisation : attaques chimiques de la surface (KOH, NaOH, acides), texturisation mécanique, plasma ou laser. Ces méthodes peuvent faire passer la réflectivité effective de 39% à moins de 10%.

I.9.3. Les contacts face avant et face arrière :

Les contacts constituent la structure de collecte qui récupère et envoie les porteurs photogénérés vers le circuit externe. Pour assurer efficacement cette tâche, les contacts doivent être ohmiques. De mauvais contacts, c'est à dire entraînant une forte résistance série, auront essentiellement une répercussion sur le facteur de forme de la cellule et sur le courant récupéré [34].

I.9.4. La passivation :

Sur les surfaces de la cellule, le réseau cristallin s'interrompt brutalement. Certaines liaisons électroniques du silicium sont pendantes et deviennent des centres de recombinaisons pour les porteurs de charges. A ces liaisons s'ajoutent les impuretés présentes dans le réseau cristallin et les défauts du cristal (dislocations. . .).

La passivation consiste à améliorer la qualité électronique en surface et en volume en neutralisant les sites actifs, sources de recombinaisons. Les deux mécanismes de passivation de la surface qui permettent de réduire les recombinaisons sont [35]:

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

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

➤ **Passivation par effet de champ**

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

I.10.Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les bases indispensables à la compréhension du sujet. Nous avons rappelé quelques notions sur le rayonnement solaire, et son application dans le domaine photovoltaïque. Nous avons ensuite expliqué le fonctionnement des cellules photovoltaïques et leurs caractéristiques principales ainsi que les paramètres limitant leur rendement et leur coût. Puis nous avons abordé les technologies de réduction des pertes des cellules.

Référence Bibliographiques

- [1] YESREF Djamel. Optimisation d'une cellule solaire à base du silicium poly cristallin en couche mince déposé sur un substrat en céramique Soutenu le 04 juillet 2013, (magister).
- [2] **Mazel, Frédéricv**, Développement de substrats céramiques pour cellules.
- [3] Soltan Belakhal « conception & commande des machines à Aimant Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables ». Thèse de doctorat. Université de Constantine, 2010.
- [4] OBSERV'ER. Baromètre du Solaire Photovoltaïque, Systèmes Solaires, Avril 2004, N°160, pp.69-83.
- [5] Energie solaire photovoltaïque.doc / B. Flèche - D. Delagnes / juin 07.
- [6] A-Labort, P.Cumunel, B.Jean-Paul, B.Faraggi, « Cellules Solaires les basse de l'énergie photovoltaïque », ETSF, Ed Dunod, 2010.
- [7] S.R Wenham, M.A Green, M.E.Watt, “ Applied Photovoltaic Bridje Printer”. Sidney, 1994.
- [8] Y.Marouf, « Modélisation des Cellules Solaire en InGaN en utilisant Atlas Silvaco », Mémoire Magistère, université Mohamed Kheider-Biskra,2013.
- [9] Nichiporuk Oleksiy « *simulation, fabrication et analyse des cellules photovoltaïque à contacts arrières interdigités*», l'institut nationale des sciences appliquées de Lyon pour obtenir le grade docteur (2005)
- [10] A. Einstein, “Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt,” *Annalen der Physik*, vol. 322, p. 132–148, 1905.
- [11] M.Grau, ”Réalisation des nouvelles structures cellules solaire photovoltaïque à partir de couche minces de silicium cristallin sur substrat de silicium préparé par frittage de poudres”,Thèse Doctorat, L'institut national des sciences appliquées-Lyon, 2012.
- [12] D .Kohen,“Etude des nanofils de silicium et de leur intégration dans des systèmes de récupération d'énergie photovoltaïques”,Thèse Doctorat, Université Gratian-politane,2012.
- [13] Benmachiche Samira. *Etude des paramètres limitant le rendement d'une photopile à base d'une structure MIS*. Magister en Physique Université de Batna (2009).p 27.
- [14] Benaicha Mouna, « Etude des matériaux semi-conducteurs III-V application à la conversion photovoltaïque», mémoire de magister en physique. Université de Batna. En physique Université de Batna (2004).
- [15] Bouzide Fayçal. « *Effet de la température sur les propriétés électriques d'une photopile*», mémoire de magister en physique Université de Batna (2004).
- [16] José Maria Roman. «*State of the art of III-V Solar cell s. Fabrication technologies, Device designs and application. Advanced photovoltaic cell design*» (2004).
- [17] S.M.Sze. «*Physics of semiconductor devices*». John Wiley and sons. (1981).

Références Bibliographiques

- [18] A.H.M. Shousha, M.A. EL-KHOSHEIRY «Computer Simulation of Amorphous MIS Solar Cells» *Renewable Energy*, Vol.11, N4, pp. 419-420, (1997)
- [19] R.sinsh, M.A.Green, K.Rajkanan, «*Review of conductor –isolator-semiconductor (CIS) solar cells*», solar cells, 3(1981).
- [20] W. Shockley, W.T. Read, “Statistics of the recombinations of holes and electrons”. *Physical Review*, 1952, vol. 87, no5, p. 835-842. (s.d.)
- [21] Roman Maciejko. «*Optoélectronique presse internationales polytechniques*» (2002).
- [22] E.Rosencher, B.Vinter. *Optoélectronique.Thomson.CSF.Masson* (1977).
- [23] Mohamed Bouaouina. « *Contribution à l'étude et à l'optimisation des performances des cellules solaire à base de GaAs et de Si*». Mémoire de Magister en physique énergétique université de constantine (2001).
- [24] N. B.Benabdallah, “Propriétés physiques des semi-conducteurs (Si monocristalline Ge) et simulation des cellules solaires à base de Si et SiGe”, Thèse magister, Université Abou backr belkaid-Telemcen, 2006.
- [25] S.Daniel, “Modiling Zadialon effet on a triple junction solar cell using silvaco Atlas”, Theses naval postgraduate school monterey –California,2012.
- [26] B.Van Zeghrve, “principe of Electraic Devis”, Book.2001.
- [27] E.Rosencher, B.Vinter. *Optoélectronique.Thomson.CSF.Masson* (1977).
- [28] Roshanak Radbeh «Réalisation et caractérisation des cellules organiques à couches composites polymères incluant des nanotubes de carbones ». Thèse de doctorat, Université de Limoges ,2008.
- [29] Sridhar et al « Modeling of PV Array Performance Enhancement by MPPT Algorithm ». *International Journal of Computer Applications*.Volume 7-No.5, 0975-8887 September 2010.
- [30] MARTINUZZI S., PALAIS O., PASQUINELLI M. and FERRAZZA F. *N-type multi-crystalline silicon wafers and rear junction solar cells*. *The European Physical Journal–Applied Physics*, 2005, vol. 32, pp. 187-192.
- [31] GREEN M.A. *Silicon Solar Cells: Advanced Principles and Practice*. Sydney, Australia: Centre for photovoltaic devices and systems, UNSW, 1995, 366 p.
- [32] RICAUD A. *Photopiles solaires*. Lausanne, Suisse : Presse polytechniques et universitaires romandes, 1997, 332 p.
- [33] SHOCKLEY W. and QUEISSER H.J. Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells. *Journal of Applied Physics*, 1961, vol. 32, n°3, pp. 510-519.
- [34] Julien DUPUIS. *Elaboration et caractérisation de couches de SiOxNy:H et SiNx:H réalisées par méthode PECVD : application à la face arrière des cellules photovoltaïque en silicium*. 2009-ISAL-0085 Année 2009.
- [35] Jean-François LELIVRE. *Elaboration de SiNx :H par PECVD : optimisation des propriétés optiques, passivantes et structurales pour applications photovoltaïques*. Thèse de doctorat. INSA de Lyon.2007.

Chapitre II : la filière des couches minces en Silicium Polycristallin

II.1.Introduction :

L'élément principal constituant la cellule solaire est le silicium, qui est le deuxième élément le plus abondant à la surface de notre planète, après l'oxygène. La matière première utilisée pour obtenir le silicium purifié utilisé par les industries électronique et photovoltaïque est le quartz. Sa réduction carbothermique dans des fours à arc permet d'obtenir du silicium de qualité métallurgique, d'une pureté de l'ordre de 98 %. [1]

II.2.Les semi-conducteurs :

Les matériaux semi-conducteurs sont des corps dont la résistivité est intermédiaire entre celle des conducteurs et celle des isolants. Les quatre électrons de valence du silicium permettent de former quatre liaisons covalentes avec un atome voisin.

Dans ce cas, tous les électrons sont utilisés et aucun n'est disponible pour créer un courant électrique. [2]

II.2.1.Les semi-conducteurs intrinsèques :

Les électrons situés sur la couche la plus éloignée du noyau, qui participent aux liaisons covalentes peuvent, sous l'effet de l'agitation thermique, devenir porteur de charge. Le diagramme énergétique est constitué de deux bandes (conduction et valence) séparé par une bande interdite. Pour franchir cette bande l'électron doit acquérir de l'énergie (thermique, photon, ...). Mais le nombre d'électrons libres dans un semi-conducteur intrinsèque reste très faible. Ici le nombre de trou et d'électron est égal. [3]

II.2.2.Les semi-conducteurs extrinsèques :

Pour augmenter la conductivité des semi-conducteurs on y introduit des impuretés. Ce procédé est appelé dopage.

II.2.2.1.Semi-conducteur dopé n :

Matériau dopé n est un semi-conducteur dont la concentration en électrons est largement supérieure à la concentration en trous. Ils ont introduit généralement du phosphore, de l'Arsenic ou encore de l'Antimoine.

Ils associent à l'Arsenic un niveau donneur E dans la bande interdite très proche de la bande de conduction. L'intérêt est que pour les températures supérieures à 0°K, les atomes d'arsenic sont ionisés ce qui revient à faire passer l'électron du niveau donneur à la bande de conduction. La concentration de donneurs sera donc supérieure à la concentration d'accepteurs ($N_d - N_a$) ce qui correspond à la définition d'un semi-conducteur dopé n [4].

A la température ambiante pratiquement tous les donneurs sont ionisés et si la concentration en atomes donneurs est N_d , la densité de porteurs libres du semi-conducteur sera :

$$n = n_0 + N_d$$

n_0 : la densité d'électrons générés par le processus de rupture de liaisons de covalence qui engendre des paires électrons-trous.

II.2.2.2.Semi-conducteur dopé P :

Il s'agit d'un semi-conducteur dont la concentration en trous est largement supérieure à la concentration en électrons. Ils ont introduit généralement du Bore, de l'Aluminium, du Gallium ou encore de l'Indium, prenons le cas du Silicium dans lequel du Bore. On associe au Bore un niveau accepteur E_a dans la bande interdite très proche à la bande de valence [4] [5].

De la même façon que pour le semi-conducteur dopé n, la concentration en trous du semi-conducteur sera

$$P = p_0 + N_a$$

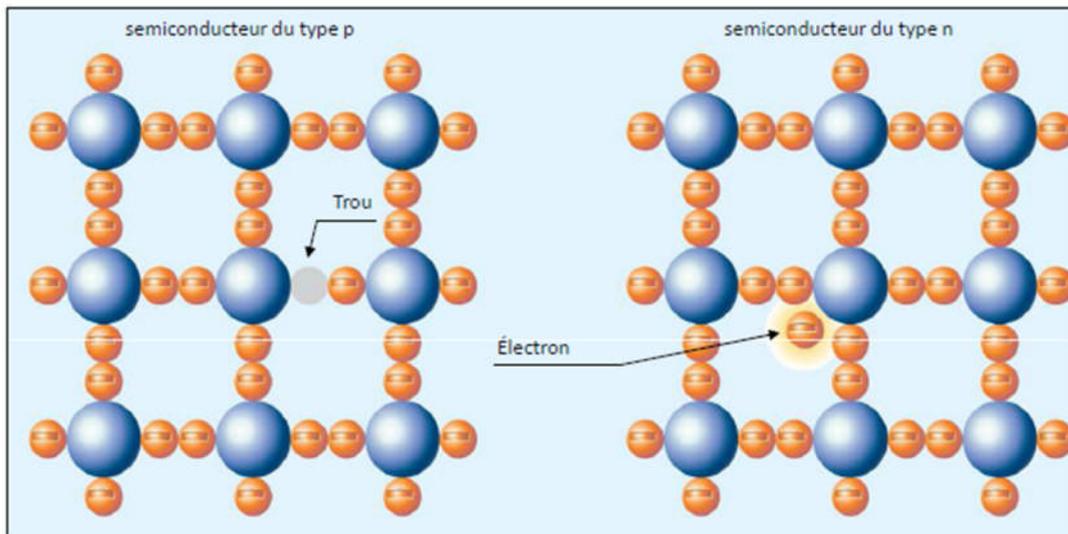


Figure II-1. Semi-conducteur extrinsèque.

II.3. La jonction PN :

Une jonction PN est l'accolement d'une région dopée P et d'une région dopée N. Lors de cet assemblage les porteurs de charges libres s'attirent et se recombinent dans la zone de jonction où les porteurs libres disparaissent : c'est la zone de transition. Il ne reste donc plus que les ions dans cette zone qui vont créer un champ électrique interne au niveau de la jonction et qui empêche les charges libres restantes dans chaque zone de traverser la jonction pour se recombiner [2].

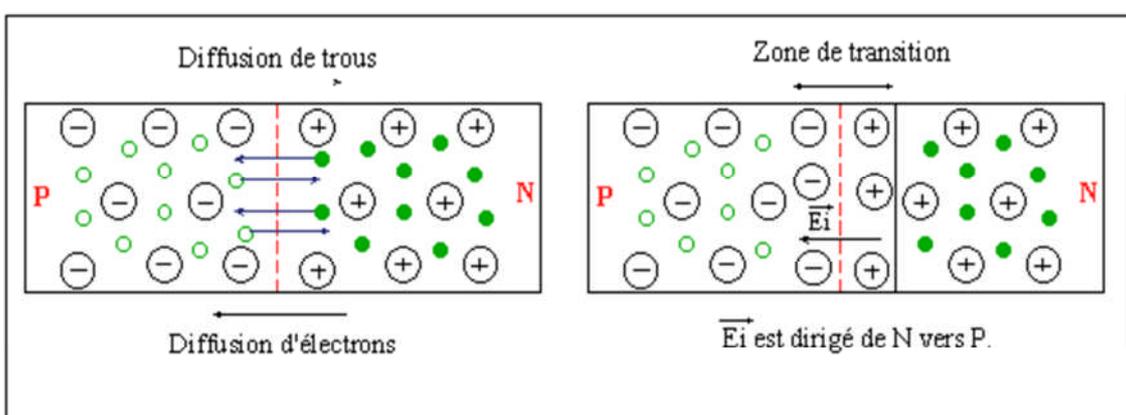


Figure II-2. La jonction PN.

II.4. Bande d'énergie :

Bien que les électrons d'un atome isolé aient des niveaux d'énergie permis bien définis, le comportement de ces électrons dans un réseau cristallin périodique est différent. Si la distance entre les atomes est suffisamment petite, comme dans le cas du réseau cristallin du silicium, la présence des atomes voisins génère une sorte d'interférence entre les niveaux permis de chaque atome. Cela entraîne une multitude quasi continue d'états autour de chaque niveau permis de l'atome individuel. Cet ensemble d'états, très proches entre eux, est plutôt considéré alors comme une bande d'énergie permise, avec une densité d'états associée. Les niveaux d'énergie des électrons de valence et le niveau d'énergie d'ionisation génèrent ainsi deux bandes d'énergies permises particulièrement intéressantes, la bande de valence et la bande de conduction, séparées par une bande dépourvue de niveaux permis, nommée bande interdite (Figure II-3). La particularité de ces bandes permises tient au fait que les électrons peuvent circuler librement dans toute la maille cristalline et ainsi générer des courants de conduction électrique (s'agissant d'électrons partagés par les atomes du cristallin) [6].

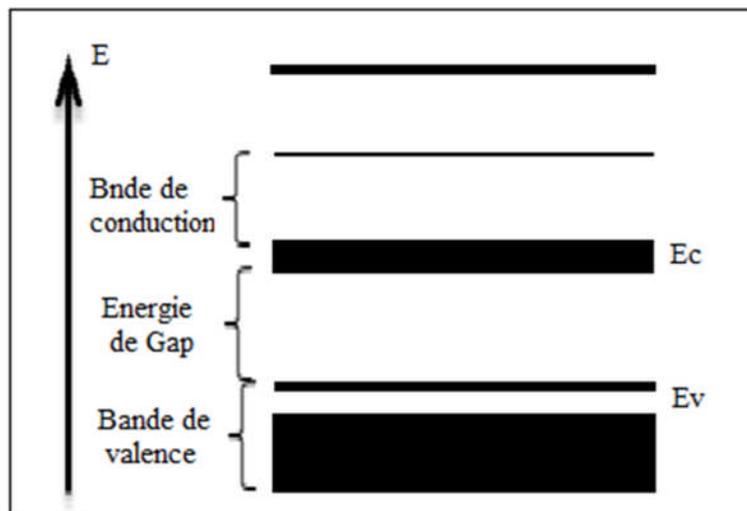


Figure II-3. Diagramme des bandes d'énergie des semi-conducteurs.

II.5. Les couches minces :

Une couche mince est une fine couche d'un matériau déposé sur un autre matériau, appelé "substrat" dont l'une des dimensions qu'on appelle l'épaisseur a été fortement réduite de telle sorte qu'elle varie de 10 μm à 50 μm (typiquement ce sont des couches de 10 à 100 nanomètres d'épaisseur) [7].

II.5.1. Propriétés des couches minces :

Une couche dite mince est un objet dont l'une des dimensions géométriques est très faible. Cela explique un rôle essentiel des interactions surfaciques dans l'établissement des propriétés physiques de ces objets. D'ailleurs, c'est la raison principale pour laquelle les propriétés physiques des couches minces diffèrent de manière significative de celles des corps massifs. L'aire totale des grains cristallins est supérieure à celle des deux faces d'une couche mince.

En général, les couches minces utilisées dans les applications pratiques sont polycristallines ; leur état est métastable, hors de l'équilibre et éloigné du minimum énergétique. D'un point de vue microscopique, elles se composent de grains cristallins enrichis par des défauts qui sont séparés par des zones enrichies par des impuretés. Les dimensions des grains cristallins sont du même ordre de grandeur que l'épaisseur de la couche mince.

La microstructure des couches minces est extrêmement sensible aux propriétés chimiques et physiques du matériau mis en jeu lors de sa croissance, ainsi que des conditions physiques de dépôt à chaque étape d'évolution de la couche mince. En particulier, les propriétés des couches minces sont très sensibles à la nature du substrat sur lequel elle est formée. Cela explique, par exemple, le fait que des couches minces d'un même matériau et d'une même épaisseur peuvent présenter des propriétés physiques différentes sur des substrats de nature différente.

L'épaisseur de percolation, au-delà de laquelle les îlots coalescent et la couche mince devient continue, varie essentiellement suivant la nature du matériau, la vitesse du dépôt, la température du substrat, l'adhérence de sa surface [8].

II.6. Le silicium :

La filière silicium représente aujourd'hui l'essentiel de la production mondiale des panneaux photovoltaïques. Il s'agit d'un matériau extrêmement abondant, stable et non toxique. Cette filière est elle-même subdivisée en plusieurs technologies distinctes de par la nature du silicium employé et/ou sa méthode de fabrication. Cette filière comporte deux technologies le silicium monocristallin et le silicium multi-cristallin (polycristallin) [9].

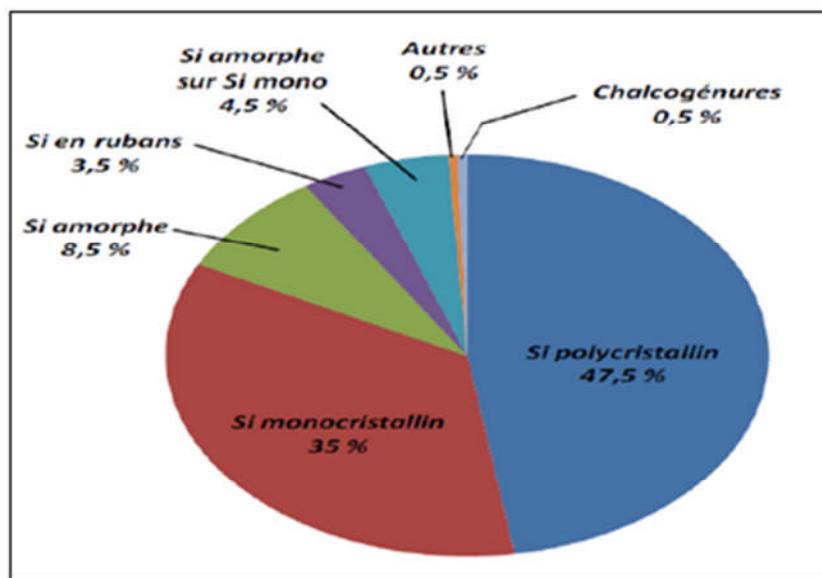


Figure II-4. Répartition des matériaux sur le marché mondial du photovoltaïque [6].

II.6.1. Propriétés général du silicium :

Le Silicium est un matériau monoatomique fait partie de la quatorzième colonne du tableau périodique de Mendeleïev qui cristallise dans la structure diamant. Il est constitué de deux réseaux cubiques faces centrées (CFC), imbriqués, décalés l'un par rapport à l'autre d'un quart de la diagonale principale. La maille élémentaire contient deux atomes de silicium, occupant les positions $(0, 0,0)$ et $(1/4, 1/4, 1/4)$. Chaque atome de silicium possède une coordination tétraédrique et établit des liaisons de valence avec ses quatre voisins [11].

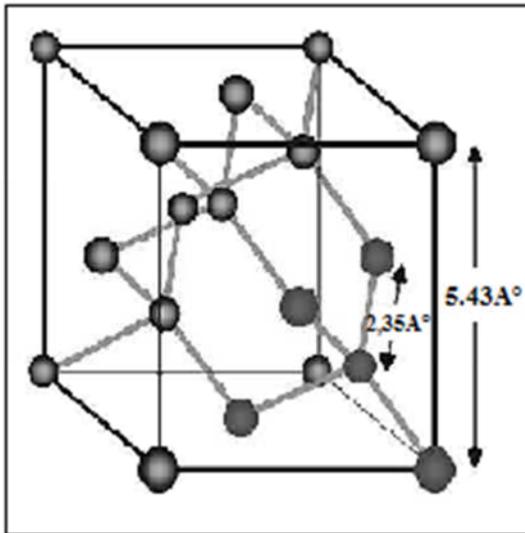


Figure II-5. Structure de silicium cristallin [12].

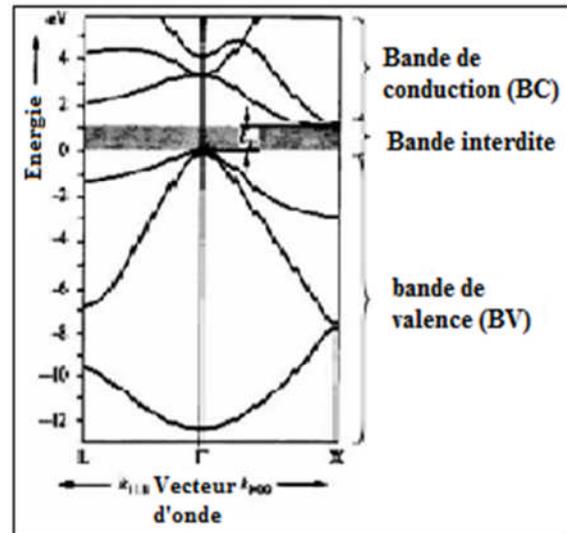


Figure II-6. Bandes d'énergie dans le silicium [13].

Chaque atome du réseau est entouré par quatre proches voisins équidistants, formant un tétraèdre, avec lesquels il échange ses quatre électrons de valence. Dans ce réseau, les atomes occupent des positions bien définies et périodiques avec une distance interatomique de l'ordre de 2.37 Å.

La liaison entre les plus proches voisins est de type sp^3 (angle de liaison 109°), ce qui donne des états électroniques conduisant à des bandes d'énergies permises et interdites. La largeur de la bande interdite "gap" à 0°K est de l'ordre de $E_g = 1.12 \text{ eV}$. La largeur du gap E_g détermine l'importance des propriétés électroniques du semi-conducteur.

A ce type de liaison correspondent des états électroniques, qui sont couplés entre eux dans le potentiel périodique dans le cristal, conduisant à des bandes d'énergie permises et interdites pour les électrons. La bande interdite, appelée "gap" et séparant la bande permise supérieure, appelée bande de valence (BV) et pleine au zéro absolu, de la bande permise au-dessus, appelée bande de conduction (BC) et vide au zéro absolu, est égale à $E_g = 1.12 \text{ eV}$ à température ambiante (Figure II.8.b). Comme le minimum de la bande de conduction est repéré à un autre point dans la zone de Brillouin que le maximum de la bande de valence, on parle d'un gap indirect [14] [15].

II.5.1.1. Propriétés physique :

Propriétés	Silicium
Structure	Diamant
Densité (g/cm ³)	2,328
Constante diélectrique	11,9
N _c (cm ⁻³)	2,8.10 ¹⁹
N _v (cm ⁻³)	1,04.10 ¹⁹
Affinité d'électron	4,05
Energie de Gap à 300°K (eV)	1,12
Concentration intrinsèque des porteurs (cm ⁻³)	1,45.10 ¹⁰
Durée de vie minoritaire (s)	2,5.10 ⁻³
Mobilité des électrons	1500
Mobilité des trous	450
Indice de réfraction	3,44

*Tableau II-1. Propriétés physique du silicium cristallin***II.6.2. Les différents états du silicium :**

Le silicium massif n'existe pas dans la nature à l'état pur. Il est extrait puis purifié à partir de la silice SiO₂ par différentes étapes de réduction et de purification chimique.

Pour les applications microélectroniques et pour la fabrication des composants et dispositifs, le silicium est élaboré à l'état monocristallin sous forme de substrats massifs par les méthodes standard de Czochralski ou de la zone flottante. En couches minces, les dépôts monocristallins de silicium sont obtenus par épitaxie en phase vapeur ou liquide. Selon l'application recherchée pour un dispositif voulu, d'autres techniques sont mises en jeu, telles que la méthode CVD ou le dépôt par sputtering, pour obtenir des couches minces de silicium dont la structure pourra être amorphe à poly-cristalline.

II.6.2.1. Etat monocristallin :

La structure monocristalline est définie comme étant un arrangement ordonné et périodique d'atomes au sein d'un réseau cristallographique dont l'élément élémentaire est appelée maille [4]. Le silicium cristallin dans la structure cubique diamant, qui est une structure cubique à faces centré (CFC) à motif, avec une distance interatomique ou paramètre de maille $d=2.35 \text{ \AA}$, et des angles de liaison bien définis [16], comme l'indique la figure (II.6.a).

Les liaisons chimiques dans le silicium sont de type covalentes et à ce type de liaison correspond des états électroniques couplés entre eux par potentiel périodique du cristal, conduisant à des états permis et interdits pour les électrons, et qui définissent l'existence de bandes d'énergies permises et interdites.

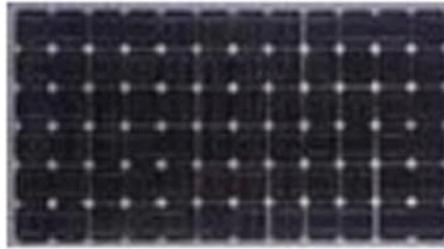


Figure II-7 .Cellule de silicium monocristallin.

II.6.2.2. Etat amorphe :

Cet état est systématiquement défini comme étant dépourvu d'ordre cristallin à longue distance par rapport à la distance interatomique. Les angles inter-liaison et les distances interatomiques ne sont pas respectés et seul un ordre à courte distance peut exister. Dans le silicium amorphe, les premiers voisins d'un atome de silicium seront bien aux sommets d'un tétraèdre, mais il y aura distorsion des angles de liaisons en atteignant les seconds, troisièmes voisins. On aboutira à une disposition des atomes ou certaines liaisons chimiques ne peuvent pas être satisfaites pour des raisons géométriques. Les niveaux d'énergie correspondant aux liaisons non satisfaites sont situés dans la région de la bande interdite du cristal puisque c'est précisément l'hybridation qui crée la bande interdite.

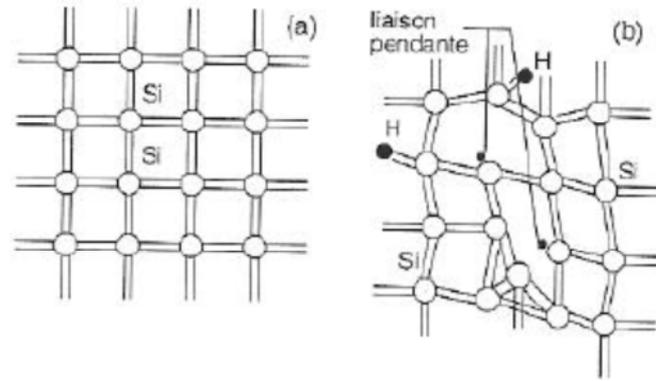


Figure II-8. Structure cristalline (a) amorphe (b).

II.6.2.3. Etat poly-cristallin :

La structure du silicium polycristallin se situe entre celle du silicium monocristallin et celle du silicium amorphe. Elle est constituée de grains dont la taille varie de quelques centaines de nanomètres à quelques millimètres suivant les conditions d'élaboration, séparés entre eux par des joints de grains. Les joints de grains délimitant des grains d'orientations différentes constituent des zones désordonnées, souvent assimilées à du silicium amorphe. La figure II-9 représente la densité d'états dans la bande interdite du silicium polycristallin, similaire à celle du silicium amorphe.

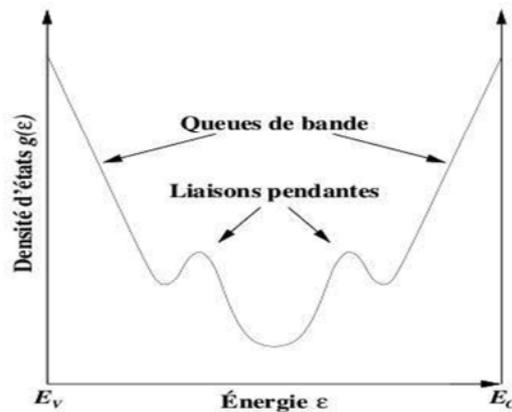


Figure II-9. Densité d'états en échelle logarithmique dans la bande interdite du silicium polycristallin en présence de défauts (E_V : bande de valence, E_C : bande de conduction) [17].

Le désordre induit par les joints de grains et la distorsion des liaisons entre les atomes de silicium provoquent une distribution des états électroniques. Cela se traduit par l'apparition d'états localisés dans la bande interdite au niveau des bandes de conduction et de valence sous forme de queues de bande. Les liaisons pendantes (liaisons non satisfaites) introduisent quant à elles deux états électroniques au milieu du gap. Les grains peuvent être de différentes tailles. Leur qualité cristalline est fonction de la densité des défauts intragranulaires parmi lesquels les dislocations, les sous joints et les joints de macle. En présence de ces défauts, la structure de bande du silicium peut être modifiée.

D'autre part, les couches de silicium polycristallin ont un niveau de pureté moins élevé par rapport au silicium monocristallin. La présence d'impuretés telles que l'oxygène, le carbone et les métaux de transition, pouvant être incorporées dans la couche lors de la fabrication du silicium polycristallin, limite la longueur de diffusion des porteurs minoritaires dans les applications telles que le photovoltaïque. D'autres impuretés peuvent être introduites intentionnellement dans la couche pour le dopage ou la passivation des défauts.

II.6.2.3.1. Les défauts de silicium polycristallin :

a) Les défauts cristallographiques :

➤ Les joints de grains :

Les joints de grains délimitent des grains d'orientations différentes. Ils constituent des zones désordonnées. Les joints de grains contiennent une forte densité de liaisons pendantes. Ces défauts introduisent des niveaux localisés dans la bande interdite qui ont pour effet de piéger les porteurs de charges minoritaires. En effet, les liaisons pendantes attirent les porteurs majoritaires. Il s'ensuit une zone de charge d'espace qui agit comme un puits de potentiel à l'égard des porteurs minoritaires. Ils constituent donc des centres de recombinaison. Cela entraîne une atténuation de la densité des porteurs minoritaires, conduisant à une dégradation des propriétés électriques du semi-conducteur polycristallin dans sa globalité. Les joints de grains sont aussi le siège d'une ségrégation des éléments dopants qui deviennent inactifs. Cet effet est plus important si le rayon atomique du dopant

est grand par rapport rayon atomique du silicium ou lorsque la densité en éléments dopants augmente.

➤ Les défauts intragranulaires

Parmi les défauts intragranulaires du silicium, nous distinguons les dislocations, les sous joints.

- Les dislocations sont des défauts linéaires, créées à partir d'un glissement de certains plans atomiques par rapport à d'autres ou de la distorsion de deux régions adjacentes l'une par rapport à l'autre dans la structure cristalline. Elles sont dues aux chocs thermiques lors de l'élaboration du matériau ou encore à la présence d'impuretés. Ces défauts sont électriquement actifs. Ils augmentent la vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires ce qui provoque la réduction de leur longueur de diffusion. De plus, elles induisent des liaisons pendantes, zones de ségrégation des impuretés. Cela entraîne un affaiblissement des propriétés électriques du silicium polycristallin [19]. Une forte densité de dislocations entraîne l'apparition de sous joints.
- Les sous joints séparent à l'intérieur d'un cristal des zones d'orientation proche. En général, l'angle de désorientation est inférieur à 15° . Ces joints sont actifs électriquement à cause de la présence de dislocations.

Les propriétés électriques du silicium polycristallin sont fonction des défauts intergranulaires mais aussi de ceux contenus dans les grains. Nous allons voir dans le prochain paragraphe l'effet de la présence d'impuretés dans la couche.

b) les défauts chimiques :

Par défauts chimiques, nous entendons les impuretés incorporées dans le silicium polycristallin soit dans la chambre du dépôt, soit lors du processus de cristallisation, ou alors intentionnellement pour la passivation des défauts ou pour le dopage de la couche. Dans cette section, nous n'aborderons pas les impuretés servant pour le dopage de la couche.

➤ **L'hydrogène**

Comme nous venons de le voir, Les joints de grains et les dislocations constituent des centres de recombinaison des porteurs de charges. Ils sont électriquement actifs et tendent à limiter les performances du silicium polycristallin. La réduction de leur densité est une condition nécessaire au bon fonctionnement du composant. L'incorporation d'atomes d'hydrogène pendant ou après l'élaboration du matériau permet de passiver les défauts. Le procédé consiste à former des liaisons entre les atomes d'hydrogène et les défauts structuraux contenus dans le silicium (liaisons pendantes). Les barrières de potentiel créées dans les joints de grains se trouvent réduites ainsi que la densité d'états électroniques dans la bande interdite. La mobilité des porteurs de charge se trouve activée et leur longueur de diffusion augmentée.

La passivation à l'hydrogène se trouve ralentie lorsqu'une forte ségrégation d'éléments se produit au niveau des joints de grains où ils s'accumulent, ce qui empêche la pénétration de l'hydrogène [20]. L'hydrogène passive les défauts contenus dans les joints de grains mais aussi ceux contenus dans les grains. L'hydrogénation des couches polycristallines (et amorphes) permet de passiver les liaisons pendantes générées par les dislocations. Elle permet donc de réduire la densité des défauts électriquement actifs comme l'ont reporté Ditizio et al. et Jousse et al. [21].

➤ **L'oxygène**

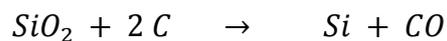
L'oxygène est l'impureté la plus courante dans le silicium polycristallin en raison de sa forte affinité pour le silicium. Il provient essentiellement de l'atmosphère et occupe généralement des sites interstitiels. En forte concentration, il précipite sous forme de SiO_x qui affecte la génération et la durée de vie des porteurs minoritaires [22]. En effet, sa présence conduit à un piégeage des impuretés dans la couche et à une dégradation de la durée de vie et de la longueur de diffusion des porteurs minoritaires [23].

II.6.3.Obtention d'un Silicium de qualité électronique :

II.6.3.1.Extraction du silicium à partir de la silice :

La silice est un composé chimique nommé aussi dioxyde de silicium, de formule chimique SiO_2 , elle se présente sous la forme d'un minéral dur.

Le silicium (Si) est donc extrait de la silice (SiO_2) grâce à la réaction chimique simplifiée suivante :



Cette réaction se réalise dans un four à arc car elle nécessite de faire fondre la silice. La température du four peut atteindre 3000 °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.

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

II.6.3.2.Purification du silicium :

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. Au final, le procédé de purification aboutit à l'obtention de lingots de silicium purifiés à 99,99 % :

II.6.3.3.Obtention des lingots de silicium :

Une fois l'étape de purification terminée, vient l'étape de cristallisation du silicium liquide. Il existe deux méthodes par lesquelles ils ont possible d'obtenir du silicium monocristallin de qualité électronique. La première permet d'obtenir du silicium polycristallin (composé de plusieurs cristaux). La deuxième permet d'obtenir du silicium monocristallin (composé d'un seul cristal).

a) La méthode de Czochralsky :

Pour le procédé de Czochralski ou Cz, un germe de silicium est plongé dans le bain de silicium légèrement surfondu, et le Si du bain est épitéaxie sur ce germe. Le lingot et le creuset contenant le silicium liquide sont en rotation dans le sens opposés. Le lingot qui se forme est tiré vers le haut à une vitesse de dizaine de centimètre par heure.

On obtient ainsi un lingot de section circulaire (Figure II-10). Ses flancs sont ensuite découpés pour obtenir une forme pseudo-carrée permettant une meilleure compaction des cellules dans le module [24].

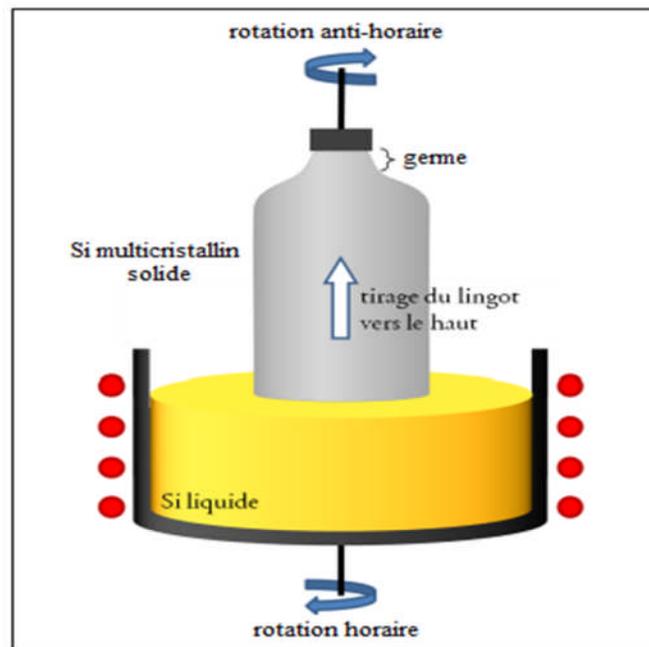


Figure II-10. Schéma représentatif de *La méthode d’Czochralski*. [24].

b) La fusion de Zone :

La méthode de ZF consiste à faire passer une tige de silicium sur un germe cristallin est balayé par un enroulement parcouru HF. Le champ magnétique de l'enroulement induit un champ électrique dans la tige, chauffant et fondant l'interface entre la tige et le germe. Le matériau se solidifie et cristallise à l'interface donnant naissance à une tige monocristalline. Ces matériaux permettent d'atteindre une efficacité de conversion de l'ordre de 24% au laboratoire et entre 15- 20% dans la production industrielle. Les photopiles à base de matériaux cristallins sont connues par leur fiabilité et stabilité et elles sont utilisées dans la production de forte puissance [24].

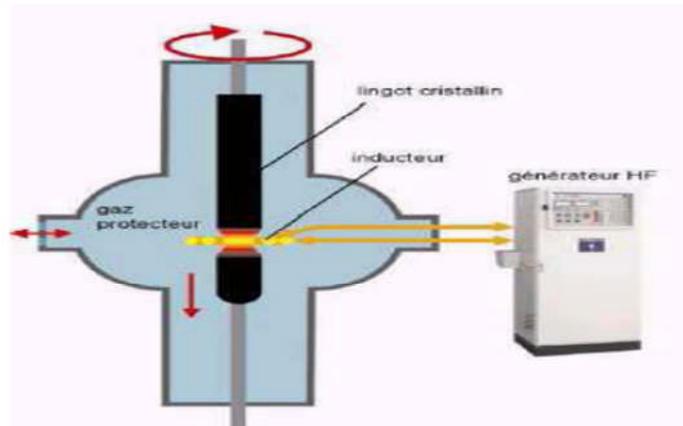


Figure II-11. Schéma représentatif de Fusion de zone [24].

II.7. Technique conventionnel de fabrication d'une cellule photovoltaïque en silicium :

L'industrie photovoltaïque est concentrée à plus de 90% [10] sur l'utilisation du silicium comme matériau de base. Ce semi-conducteur présente, en effet, différents avantages :

- Il est abondant à la surface du globe car facilement extrait à partir du sable.
- Il n'est pas toxique comme certains semi-conducteurs.
- Il possède un oxyde naturel (SiO_2) présentant d'excellentes propriétés électroniques et il peut être dopé facilement (avec le phosphore ou le bore).
- 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.
- 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)
- Nous allons présenter le processus conventionnel de fabrication des cellules photovoltaïques en silicium. Les différentes étapes sont résumées sur la Figure (II-13).

II.7.1. Elaboration des lingots de Silicium :

- Le silicium est d'abord porté à fusion dans un double creuset en graphite et en silice calorifuge Afin de faciliter la récupération ultérieure du lingot et éviter la contamination du silicium par le creuset, un agent encapsulant a préalablement été ajouté. La température du bain, légèrement supérieure à la température de fusion du

silicium (1420°C), est stabilisée avant de retirer la partie inférieure du creuset réfractaire.

- La chaleur s'évacue par cette voie entraînant une solidification dirigée verticalement. Une structure colonnaire perpendiculaire au fond du creuset est obtenue, avec des sections de grains cristallins pouvant atteindre plusieurs cm^2 . Les longueurs de diffusion des porteurs minoritaires dans le matériau brut, du silicium de type p dope a environ 10^{16}cm^{-3} au bore, sont de l'ordre de 120 à 150 μm .

II.7.2.Découpe :

- Les lingots sont découpés en briques grâce à une scie à ruban, puis en plaques minces à l'aide d'une scie à fil. Les substrats obtenus, d'épaisseur $\sim 200\text{-}300\mu\text{m}$ et de Section 10×10 , 12.5×12.5 ou 15.6×15.6 sont ensuite nettoyés

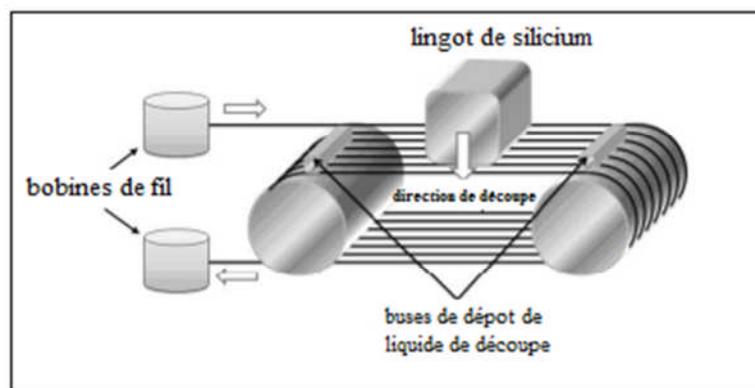


Figure II-12. Schéma représentatif de procédé de découpe des plaquettes.

II.7.3.Traitement de surface et texturisation :

L'étape de sciage entraîne des dommages en profondeur à la surface des wafers, de l'ordre du rayon du fil de la scie. Un fort décapage à la soude retire la zone perturbée.

Puis, l'étape de texturisation est entreprise sur les faces avant et arrière à l'aide d'une solution acide ou basique.

II.7.4.Formation de la jonction PN :

Dans l'étape suivante, le substrat est placé dans un four de diffusion à environ 850°C pendant 20 minutes dans un mélange gazeux de N_2 , O_2 et de POCl_3 . Un verre au phosphore

(P_2O_5) se forme sur tout le pourtour de la plaque, à partir duquel le phosphore va diffuser sur une profondeur moyenne de $0.2\mu m$. On procède ensuite à la désoxydation, c'est-à-dire l'élimination du verre conducteur, par acide fluorhydrique (HF à 10%). Les substrats sont ensuite rincés à l'eau désionisée.

II.7.5. Ouverture de la jonction :

Les plaquettes sont superposées les unes sur les autres (~ 400 à la fois) et gravées latéralement par plasma ($CF_4 + O_2$ -15min- $\approx 100^\circ C$). L'émetteur n'est ainsi plus en contact avec la face arrière de la cellule.

II.7.6. Couche antireflet (CAR) et passivation de la face avant :

Le nitrure de silicium hydrogène ($SiN_x : H$) est ensuite déposé par PECVD afin de faire office de couche antireflet et de passivation. On peut noter également que la couche de SiN joue le rôle de barrière de diffusion contre les impuretés, réduisant le risque d'introduction, pendant les étapes ultérieures, d'impuretés métalliques pouvant court-circuiter la jonction. De plus, les contacts métalliques lors de leur recuit pénétreront moins profondément dans l'émetteur [25]. La technique PECVD [26] permet d'obtenir des vitesses de dépôt relativement élevées, à basse température ($< 400^\circ C$).

II.7.7. 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 $1500^\circ C$ pendant un quart d'heure.

II.7.8. 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 $150^\circ C$ pendant un quart d'heure

II.7.9. Co-firing : formation des contacts, passivation du volume et de la face arrière :

La cuisson simultanée des contacts « cofiring » 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). Elle se fait par cuisson rapide sous air à environ 800°C pendant quelques secondes.

II.7.10. 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 classifiées selon les résultats

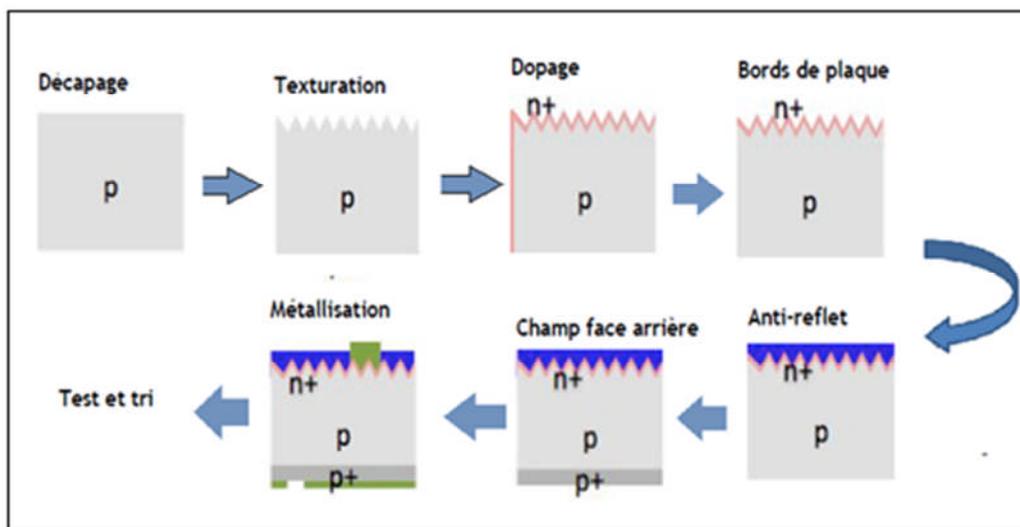


Figure II-13. Les différentes étapes de fabrication des cellules photovoltaïques en silicium.

II.8. Techniques de dépôt de silicium sur substrat :

Une troisième voie d'élaboration de couches minces de silicium consiste en la réalisation directe du dépôt sur un substrat. Ce dépôt peut être obtenu à partir d'une source de silicium solide, liquide ou gazeuse [27].

II.8.1. Techniques de dépôt en phase solide :

Le dépôt de silicium en couches minces peut être réalisé à partir d'une source solide. C'est la voie retenue au laboratoire et qui consiste à fondre une poudre de silicium de qualité métallurgique dans un plasma thermique, puis à la déposer sous la forme liquide sur un substrat de type céramique. Les dépôts sont obtenus à une vitesse de l'ordre de $100 \mu\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ et sont caractérisés par une taille de grains supérieure à $100 \mu\text{m}$. Ce procédé permet également d'obtenir un matériau hydrogéné par addition d'une faible quantité d'hydrogène dans le mélange plasmagène. Cette technique a été utilisée par les sociétés Daido Hoxan et Tonan Corp et a permis dans le premier cas la réalisation de cellules photovoltaïques de $500 \mu\text{m}$ d'épaisseur et de 10,7% de rendement de conversion, et de $330 \mu\text{m}$ d'épaisseur et de 4,3% de rendement de conversion dans le second cas [28]. Enfin, une approche originale a été développée par la société Texas Instruments Corp. consistant à réaliser une cellule photovoltaïque à partir de poudres de silicium métallurgique purifiées de $750 \mu\text{m}$ de diamètre, incorporée au sein d'une feuille d'aluminium. Ces travaux ont permis d'obtenir des rendements de conversion de l'ordre de 11,5% sur un mini module de 10cm^2 de surface [29].

II.8.2. Techniques de dépôt en phase liquide :

L'une des méthodes les plus utilisées pour l'élaboration de couches minces de silicium en phase liquide est la méthode d'épitaxie en phase liquide (EPL). Dans cette technique, un substrat de silicium est plongé dans un bain métallique liquide saturé en silicium dont la température est progressivement abaissée à une vitesse de $10^\circ\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ à $50^\circ\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ [30]. Durant l'abaissement de la température une sursaturation de la solution a lieu provoquant le dépôt du silicium sur le substrat. Le dopage des couches peut être réalisé par introduction d'éléments dopants dans le bain fondu. Les couches obtenues sont déposées à une vitesse de croissance qui atteint actuellement $4 \mu\text{m}\cdot\text{mn}^{-1}$ [31] et ont généralement une épaisseur comprise entre $20\mu\text{m}$ et $30 \mu\text{m}$. Le rendement de conversion de ces couches est néanmoins limité à 10% à cause de la faible taille des grains et des phénomènes de recombinaison des porteurs de charge aux joints de grains.

II.8.3. Techniques de dépôt en phase gazeuse :

Pour les applications photovoltaïques, le dépôt direct en phase gazeuse par des techniques CVD semble être le mieux adapté car il offre la possibilité d'avoir de grandes vitesses de dépôt ($>1 \mu\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$) et un matériau caractérisé par un haut rendement de conversion. Ainsi, des résultats récemment publiés par la société Astropower Corp montrent que des cellules solaires de 1cm^2 de surface, à base de silicium cristallin déposé sur des substrats de mullite par CVD à haute température, atteignent un rendement de conversion de 16,6% [32]. Malheureusement, seulement quelques détails des étapes du procédé ont été publiés jusqu'ici, parmi lesquelles la passivation des lacunes cristallographiques et la désactivation de l'activité électrique des impuretés par effet getter, qui permettent l'augmentation des longueurs de diffusion des porteurs minoritaires de $40 \mu\text{m}$ à $150 \mu\text{m}$.

Parmi les nombreuses techniques utilisées, la technique de dépôt chimique en phase vapeur par filament chaud (HWCVD) permet, à partir d'un mélange de silane et d'hydrogène, la réalisation de couches minces de silicium intrinsèques et dopées. Le filament, généralement en tungstène ou en tantale, est porté à une température comprise entre 1300°C et 1900°C . Il permet la dissociation du mélange gazeux et l'obtention d'une couche mince de silicium sur un substrat, dont la température est généralement inférieure à 500°C . Le silicium est déposé à une vitesse de l'ordre de $100 \text{nm} \cdot \text{min}^{-1}$ et est de type microcristallin avec des grains d'une taille de l'ordre de 30nm . L'épaisseur des dépôts est généralement de l'ordre de $1,5 \mu\text{m}$. Il est également possible d'effectuer le dopage des couches par addition de B_2H_6 ou PH_3 au mélange gazeux [34].

Les couches de silicium microcristallin peuvent également être obtenues par PECVD (plasma enhanced chemical vapour deposition) à partir d'un mélange de silane SiH_4 fortement dilué dans de l'hydrogène. A de basses températures, cette technique permet l'élaboration de couches de silicium polymorphe hydrogéné de quelques nanomètres d'épaisseur sur des substrats de verre, feuilles de polymère ou d'acier inoxydable, avec une vitesse de dépôt de l'ordre de $6 \text{nm} \cdot \text{min}^{-1}$ à $15 \text{nm} \cdot \text{min}^{-1}$. Avec l'élévation de la température du substrat autour de 450°C , il est possible d'obtenir des couches microcristallines [35]. Cette technique est également utilisée pour la réalisation de cellules tandem constituées de silicium amorphe hydrogéné et de silicium microcristallin qui atteignent actuellement des rendements de conversion compris entre 10% et 12% [36].

Afin d'augmenter les vitesses de dépôt, certaines équipes de recherche ont développées des installations utilisant des électrodes à haute fréquence VHF-PECVD [37] (Very High Frequency PECVD) pour le dépôt de silicium microcristallin (figure II-14). L'excitation à haute fréquence permet d'obtenir une plus forte dissociation de l'hydrogène et du silane, nécessaire à une vitesse de dépôt élevée. Cette technique a permis l'élaboration de couches microcristallines caractérisées par des tailles de grains de l'ordre de 10 nm avec une vitesse de dépôt de l'ordre de $65 \text{ nm}\cdot\text{min}^{-1}$.

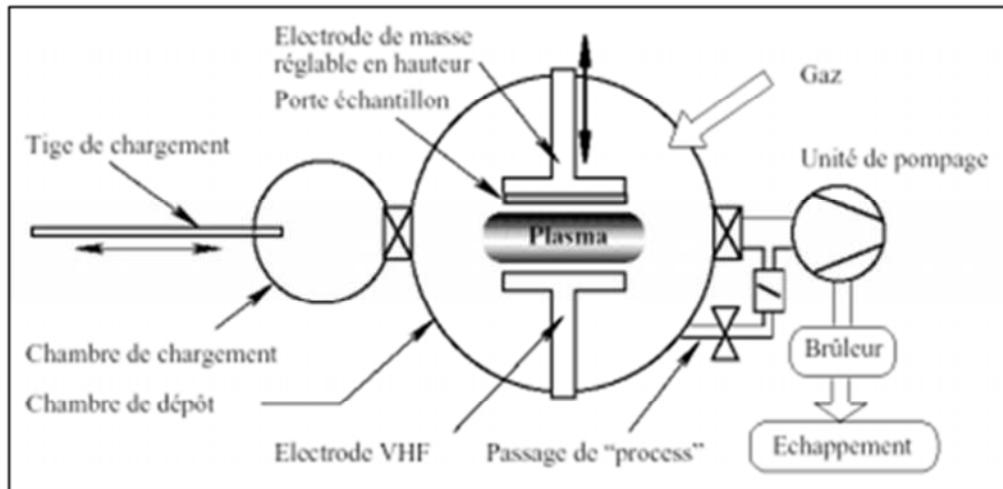


Figure II-14. Schéma de l'installation de dépôt de silicium cristallin par VHF-PECVD [32].

L'amélioration de la vitesse de croissance et de la taille des grains des couches déposées peut être obtenue par une élévation de la température à des valeurs comprises entre 600°C et 1410°C [38]. Dans cette approche, il est nécessaire de choisir des substrats adaptés aux températures retenues pour le procédé. Les substrats utilisés doivent alors avoir une bonne résistance aux températures de dépôt, un coefficient d'expansion thermique proche de celui du silicium afin d'éviter les tensions mécaniques dans la couche lors du refroidissement et enfin un faible coût pour une utilisation à échelle industrielle. Ces contraintes limitent ce choix à des substrats de silicium ou à des substrats de type céramique comme la mullite, la silice, l'alumine, le graphite ou encore le carbure de silicium.

Parmi les différentes techniques de dépôt à haute température, la méthode LPCVD (low pressure chemical vapour deposition) permet la réalisation de cellules photovoltaïques en silicium cristallin à basse pression [39]. Le dépôt est réalisé à une température de 1000°C et une pression de 1mbar avec une vitesse de croissance comprise

entre 1 et 4 $\mu\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$. La couche obtenue a une épaisseur variant entre 1 et 10 μm .

La technique de dépôt développée au Laboratoire Phase de Strasbourg permet en revanche de faire croître des couches de silicium à pression atmosphérique par recuit thermique en phase gazeuse (RTCVD)[40]. Les couches sont déposées sur un substrat étranger peu coûteux (mullite, alumine,...) par décomposition pyrolytique du SiHCl_3 dilué dans de l'hydrogène (figure II-15). Durant la phase de dépôt, la surface du substrat est chauffée à une température comprise entre 1000°C et 1250°C grâce à une douzaine de lampes halogènes à filament de tungstène. Dans ce cas, la réaction de dépôt est déclenchée par la température du substrat et non par le flux de gaz. Le dopage des couches au bore est réalisé par introduction de trichloroborane BCl_3 dans le mélange gazeux. Les couches sont obtenues à des vitesses de croissance comprise entre 4 $\mu\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ et 10 $\mu\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$, et sont caractérisées par des épaisseurs qui varient entre 4 μm et 50 μm et des tailles de grains comprises entre 0,5 μm et 15 μm .

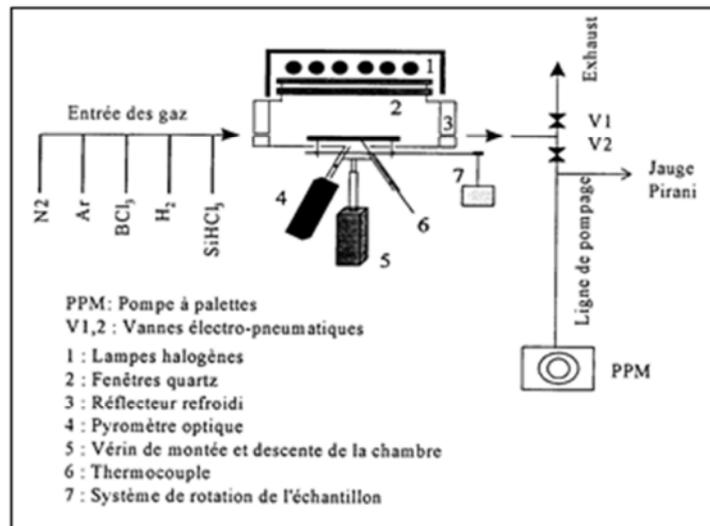


Figure II-15. Schéma de l'installation de dépôt de silicium par RTCVD [40].

II.9.Conclusion :

La réalisation de cellules solaires en couches minces de silicium apparaît, grâce aux nombreux avantages qu'elle présente, comme une solution prometteuse en vue d'une réduction du coût des générateurs photovoltaïques. Parmi ces avantages on peut citer la réduction du nombre d'étapes de fabrication, le gain de matière important puisqu'une faible épaisseur de silicium (entre 20 et 50 μm) suffit pour la réalisation de la cellule solaire, et enfin la possibilité de réaliser des dépôts sur de grandes surfaces, de l'ordre de 1m^2 .

Reference bibliographiques

- [1] G. B. Haxel, J. B. Hedrick, and G. J. Orris, "Rare earth elements—critical resources For high technology," 087-02 US Geological Survey Factsheet, 2002.
- [2] <http://www.goodfellow.com/csp/active/static/F/Silicium.html>.
- [3] S. M. SZE, Physics of Semiconductor Devices. John Wiley & Sons, 1981
- [4] N. B. Benabdallâh ; «Propriétés physiques des semi-conducteurs (Si monocristallin et Ge) et Simulation des cellules solaires à base de Si et Si Ge» ; thèse de Magistère ; Université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen Algérie ; (2006).
- [5] [en ligne] ; disponible sur le site : <http://dduk.free.fr/Repository/Articles/SemiCond>, (date de consultation: 15/02/2015)
- [6] BENAHMED BENABDALLAH Nadia. Propriétés physiques des semi-conducteurs (Si monocristallin et Ge) et Simulation des cellules solaires à base de Si et SiGe. Thèse de magister physique énergétique et matériaux. Université de Tlemcen 2006, p 9.
- [7] Selma MOSTEFA KARA » étude et simulation de cellules photovoltaïques a couches minces à base de CIS et CIGS » Mémoire de Magister », 2012.
- [8] Sarah MENAKH Contribution à l'étude des propriétés de films ZnO » Mémoire de Magister », 2010.
- [9] Vighetti Stéphane « Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau : Choix et dimensionnement des étages de conversion ». Thèse de doctorat, Université Grenoble, Institut polytechnique de Grenoble, 2010.
- [10] A. Luque, Practical Handbook of Photovoltaics (seconde edition) 2012.
- [11] J.F.Lelieve, "Elaboration de SiNx : H par PECVD : optimisation des propriétés optiques, passivantes et structurales pour applications photovoltaïques", Thèse de Doctorat. INSA de Lyon, 2007.
- [12] M. Sze, « Physics of semiconductors devices », 3rd edition, NewYork, Wiley, 2007.
- [13] Francis Lévy, « Traité des Matériaux : Physique et technologie des semiconducteurs» Vol. 18, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1995.
- [14] M.Grau, "Réalisation des nouvelles structures cellules solaire photovoltaïque à partir ces de silicium cristallin sur substrat de silicium préparé par frittage de poudres", Thèse Doctorat, L'institut national des sciences appliquées-Lyon, 2012.
- [15] A.Touil, "Etude des informations de phase dans le silicium, Mémoire de magistère", Université Mentouri-Constantine, 2007
- [16] H. Mathieu, "Physique des semiconducteurs et des composants électroniques", Edition Masson, Paris, 1990
- [17] P. Münster, « Silicium intrinsèque et dopé in situ déposé amorphe par SAPCVD puis cristallisé en phase solide », Thèse, Université de Rennes 1, Rennes, 2001.

- [18] H. E. Ghitani and M. Pasquinelli, S. Martinuzzi, « Influence of dislocations on photovoltaic properties of multicrystalline silicon solar cells », *Journal de Physique III* 3 (1993)1941-1946.
- [19] V. Randle, « Mechanisms of grain boundary engineering » *Acta Mat.* 54 (2006)1777-1783.
- [20] C. H. Seager and D. S. Ginley, « Passivation of grain boundaries in polycrystalline silicon », *Appl. Phys. Lett.* 34 (1979) 337340.
- [21] R. A. Ditzio, G. Liu, S. J. Fonash, B.C. Hsieh, and D. W. Greve, « Short time electron cyclotron resonance hydrogenation of polycrystalline silicon thin-film transistor structures » *Appl. Phys. Lett.* 56 (1990) 11401142.
- [22] L. Jिंगgang, « Light element impurities and related defects in polycrystalline silicon for photovoltaic application », Thesis of the North Carolina State University, 2003.
- [23] J. Degoulange, I. Périchaud, C. Trassy, and S. Martinuzzi, « Multicrystalline silicon wafers prepared from upgraded metallurgical feedstock », *Solar Energy Materials and Solar Cells* 92 (2008) 12691273.
- [24] BENAHMED BENABDALLAH Nadia. *Propriétés physiques des semi conducteurs (Si monocristallin et Ge) et Simulation des cellules solaires à base de Si et SiGe*. Thèse de magister en physique énergétique et matériaux. université Tlemcen (2006) p p(27 ,28).
- [25] ABELES.F, optical properties of solids. North-Holland publishing.Company.1972.1026p
- [26] RICARD.A.plasema réctifs paris:SFV.1995.156p. (23).
- [27] M.BENMANSOUR « DÉVELOPPEMENT, CONTRÔLE ET MODÉLISATION D'UN PROCÉDÉ DE PROJECTION DE POUDRES DE SILICIUM PAR PLASMA RF – APPLICATION AUX COUCHES MINCES PHOTOVOLTAÏQUES » thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie PARIS VI (2003) pp 30.
- [28] R.B.Bergmann *Appl.Phys.A*, Vol.69, pp.187-194, 1999
- [29] K.J. Weber, A.W. Blakers, K.R. Catchpole *Appl Phy A*, Vol. 69, pp. 195-199, 1999
- [30] J.D.Levine, G.B.Hotchkiss, M.D.Hammerbacher 22nd IEEE Photovo. Specialists Conf, pp. 1045, New York, 1991
- [31] A. Fave, B. Semmanche, S. Berger, P. Kleimann, F. Mazel, J. M. Olchowik, A. Laugier 16th European photovoltaic solar energy conference, p. 1140-1143, Glasgow,

Mai 2000

- [32] J.Hotzel, K.Peter, G.Willeke, E.Bucher 14th European Photovoltaic Solar Energy Conf., p.1421, UK, 1997
- [33] A.M.Barnett, D.Hford, J.C.Checchi, J.Sculik, R.B.Hall, C.L.Kendall, J.A.Rand 14th European Photovoltaic Solar Energy Conf., p.999, UK, 1997
- [34] H.Brummack, R.Bruggemann, H.Nwanka, A.Hiezenberger, M.B.Schubert 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conf. P.679, 1997
- [35] J.P. Kleider, C. Longeaud, M. Gauthier, M. Meaudre, R. Meaudre, R. Butté, Vignoli, P. Roca i Cabarrocas Appl. Phys. Lett., 75, p. 3351, 1999
- [36] H.Keppner, J.Meier, P.Torres, D.Fischer, A.Shah Appl. Phys. A., Vol.69, pp. 169-177, 1999
- [37] H.N.Wanka, M.Bschubert, A.Hierzenberger, V.Baumung 14th Europ. Photovoltaic Solar Energy Conf. P.1003, 1997
- [38] P.Torres, J.Meier, U.Kroll, H.Keppner, A.Shah, U.Malang 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conf, pp. 711, 1997
- [39] S.Reber, W.Wettling Appl. Phys. A, Vol.69, pp.215-220, 1999
- [40] R. Rogel, K. Kission, T. Mohammed-Brahim, M. Sarret, O. Bonnaud, J.P. Kleider Proc. 2nd Conf. and Exh on Photovoltaic Solar Energy vienna, pp 1701 à 17041998.

***Chapitre III : Substrat d'Alumine
pour les applications PV en
couches minces***

III.1.Introduction :

Le silicium poly-cristallin déposé sur un substrat adapté par une approche haute température apparaît être le matériau le moins coûteux à élaborer.

De ce fait, ce deuxième chapitre dans un premier temps présente l'ensemble des axes de recherche et un état de l'art entrepris dans la voie haute température pour la réalisation des couches minces Si-poly et de mettre en évidence les nombreuses difficultés que rencontre actuellement cette filière. Dans un second temps nous présenterons les différents critères du choix du substrat alumine et leur caractéristiques et à la fin du chapitre nous présentons la technique de dépôt du silicium sur un substrat céramique.

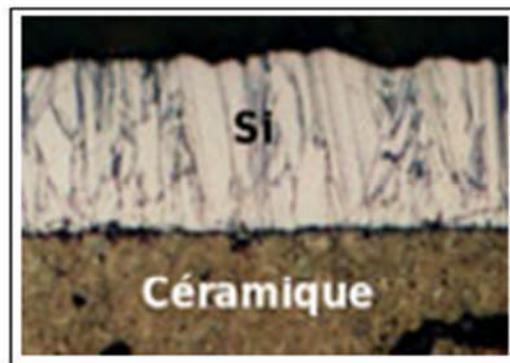


Figure III-1. Une vue d'une cellule solaire à base du silicium polycristallin déposé sur un substrat Alumine.

III.2.La filière haute température :

Pour les applications photovoltaïques on peut distinguer entre deux familles de technique de dépôt de silicium selon que la température maximale de procédé utilisé permet l'emploi d'un substrat de verre ou pas [1]. La température maximale supportée par le substrat de verre se situe aux alentours de 600°C. Ce qui permet à la distinction entre la voie « basse température » et la voie « haute température »

Par ailleurs, la réalisation des couches minces en silicium poly-cristallin sur substrats, avec une taille du grain importante, nécessite des températures assez élevées. De ce fait, la voie haute température reste privilégiée et elle fait l'objet jusqu'à ce jour de plusieurs travaux de recherche. La figure III-2 illustre l'ensemble des axes de recherche et de développement entrepris dans la voie haute température pour la réalisation des couches minces pc-Si.

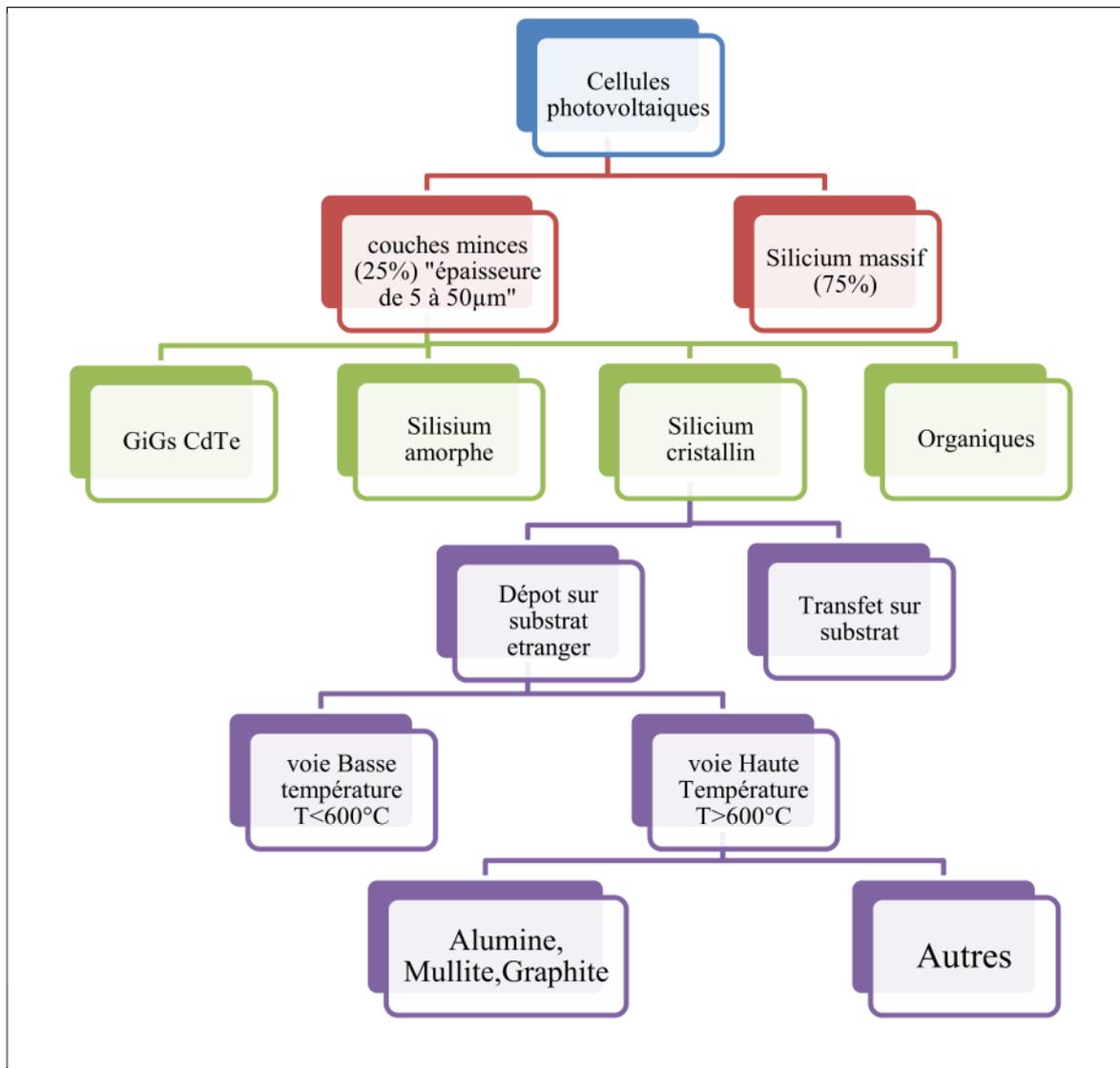


Figure III-2. Différents axes technologiques de la voie "haute température" développés pour la réalisation des couches minces de silicium poly-cristallin sur substrats.

III.3. Le choix du substrat :

Le choix d'un substrat étranger doit tenir en compte la possibilité d'utiliser le substrat comme réflecteur arrière. La famille céramique des carbures (graphite, carbure de silicium SiC, etc.....) est généralement absorbant et donc défavorable d'un point de vue confinement optique. Par opposition les céramiques riches en oxygènes (Alumine, Mullite) ont la particularité de réfléchir la lumière de façon diffuse, ce qui est très favorable pour le piégeage de la lumière dans la couche mince de silicium. Par ailleurs, l'alumine offre une réflectivité

de la lumière d'incidente environ de 60%. Le choix de ce substrat doit satisfaire à un grand nombre de critères que sont :

- Une résistance aux températures de dépôt, RT-CVD (900-1200 °C)
- Une résistance élevée aux chocs thermique,
- Un coefficient d'expansion thermique proche de celui du silicium afin d'éviter les fissures et le décollement dans la couche lors du refroidissement,
- Un confinement efficace de la lumière dans la couche mince de silicium (substrat non absorbant et servant de réflecteur arrière),
- Un faible coût pour une utilisation à échelle industrielle (rapide et peu coûteux)

Le tableau III-1. Regroupe les principales propriétés des substrats les plus fréquemment utilisés par la voie haute température :

	Si	Al ₂ O ₃	C graphite	SiC	Mullite
T maximale (°C)	1410	1500	1400	2000	1700
Coefficient d'expansion Thermique (10 ⁻⁶ °C ⁻¹)	3.9	8.5	3.5	4.7	5
Conductivité thermique	-----	30	-----	120	7
Propriétés optiques	Absorbe la lumière Incidente	Transparent : réflecteur arrière	Absorbe la lumière Incidente	Absorbe la lumière Incidente	Transparent : Réflecteur arrière
Prix	élevé	Faible	faible	élevé	faible

Tableau III-1. Propriétés des différents matériaux hautes températures retenus comme substrat [2].

III.4. Alumine Al₂O₃ :

III.4.1. Définition de L'alumine :

L'alumine est une céramique largement utilisée grâce à l'association de bonnes propriétés (résistance mécanique, dureté élevée, résistance à la corrosion, stabilité thermodynamique) et d'avantages économiques. Par ailleurs, l'alumine sans transformation de phase est souvent choisie comme matériau modèle pour représenter le comportement des céramiques monolithiques. Pour ce matériau, les propriétés dépendent fortement de la taille des grains [3].

L'alumine ou oxyde d'aluminium a pour formule $Al_2 O_3$, Sa bonne tenue mécanique à haute température, sa dureté élevée, son excellente résistance à l'usure, sa grande résistivité électrique et son inertie chimique importante font de l'alumine un matériau utilisé dans des domaines très variés [4].

L'alumine est un composé très dur: seul le diamant et quelque produit de synthèse ont une dureté supérieure. A température ambiante, elle est inattaquée par les composés chimiques courants. Elle fond à plus de 2000°C [5], [6]. L'alumine très pure peut être utilisée jusqu'à 1700°C. Elle est étanche aux gaz jusqu'à 1300°C [6]. La combinaison d'un coefficient thermique élevé; d'une faible dilatation thermique et d'une résistance élevée à la compression permet une bonne tenue aux chocs thermique. On l'utilise donc comme matériaux réfractaire, par exemple pour revêtement de fours ou comme creusets, tubes et gaines de thermocouples soumis à des chocs thermiques. L'alumine offre également une bonne isolation électrique à température élevée et une bonne résistance à l'usure, ce qui permet de l'utiliser comme matériau d'outillage [6].

III.4.2. Propriété de l'alumine

Propriétés optiques

L'Alumine comme la mullite est caractérisée par une forte absorption. Cependant ces longueurs d'onde sont absorbées dans la de 5-10 μm de silicium, bien avant d'avoir atteint le substrat. [7].

Dans le domaine visible proche IR, l'Alumine n'absorbe pas la lumière. Des coefficients de réflexion de 60% peuvent être obtenus selon la pureté, la densité ainsi que l'épaisseur du substrat.

Sa bonne tenue mécanique à haute température, sa dureté élevée, son excellente résistance à l'usure, sa grande résistivité électrique et son inertie chimique importante font de l'alumine un matériau utilisé dans des domaines très variés tel que la photovoltaïque. Le Tableau (III.1) présente ses principales propriétés mécaniques, physiques, thermiques, électriques et de résistance aux produits chimiques.

	Propriétés	Valeurs
Physiques	- Masse molaire (g/cm ³)	3,9
	- Poids moléculaire (g/mol)	102
	- Température maximal de l'utilisation sous air (°C)	1700-1800
Mécaniques	- Module d'Young	300-400
	- Coefficient de poisson	0,25
	- Résistance à la flexion (MPa)	380
	- Ténacité (Mpa.m ^{-1/2})	2-3
Electriques	- Constante diélectrique	9-10
	- Résistivité électrique à 20°C (Ohm.cm)	>10 ¹⁴
	- Résistance diélectrique (KV/mm)	10-20
Thermiques	- Chaleur spécifique (J/K/Kg)	900
	- Conductivité thermique (W/m/K)	
	• à 20°C	26-35
	• à 500°C	10-15
	- Dilatation linéaire (x10 ⁻⁶) de 20 à 1000°C	8-9
- Point de fusion (°C)	2050	

Tableau III-2. Propriétés physiques, mécaniques, électriques et thermiques de l'alumine [6].

III.4.3.Extraction de l'alumine :

L'extraction de l'alumine est un procédé chimique qui permet d'extraire l'oxyde d'aluminium appelé alumine contenu dans la bauxite. L'alumine est la principale matière première qui permettra la fabrication de l'aluminium métal par un procédé d'électrolyse.

La mise au point du procédé a été faite au cours de la deuxième moitié du XIX^e siècle. Plusieurs procédés ont été élaborés : le procédé Deville, le procédé Peniakoff Sapeck, le procédé Petersen Haglund. C'est finalement le procédé inventé par Karl Josef Bayer qui sera

universellement utilisé. Le procédé Orbite semble offrir une alternative moins polluante au procédé Bayer, mais doit faire ses preuves dans l'industrie.

III.4.3.1. Procédé de BAYER :

Aujourd'hui plus de 99 % des alumines à usage céramique sont issues du procédé BAYER. Il fournit des produits à faibles coûts, mais toutefois la pureté est limitée à environ 99,98 %. Pour les applications nécessitant un haut degré de pureté, l'emploi de poudres issues du procédé ALUN est impératif. Leur coût est alors très supérieur à celui du procédé BAYER.

Les principales impuretés contenues dans les alumines BAYER sont d'une part la soude NaOH, résultant du milieu sodique utilisé pour la dissolution, et les diverses impuretés Fe, Ca, Si,....provenant du minerai. La plus grande part de la soude est prisonnière du réseau cristallin. Elle sera d'autant plus faible que la croissance des cristallites aura été plus lente, ce qui est obtenu au détriment de la productivité. Le reste de la soude en surface des particules croît avec leur finesse. Il est lavable à l'eau éventuellement acidifiée [8].

En 1888, le docteur Karl Joseph BAYER développe un procédé d'extraction d'alumine de la bauxite qui, encore aujourd'hui, reste le principal moyen de production industrielle de l'alumine. Ce procédé fut mis en œuvre pour la première fois en 1893, par la société "L'alumine pure", à Gardanne (sud de la France), localité à la fois proche de la bauxite et du charbon nécessaire à l'apport thermique.

Le procédé BAYER (FigureIII-2) consiste tout d'abord à broyer la bauxite afin d'obtenir des grains de diamètre inférieur à 315 μm . Ce broyage est nécessaire pour augmenter la surface de contact entre la liqueur et la bauxite et améliorer le rendement de la réaction d'attaque. La liqueur recyclée provient de l'étape de filtration de l'hydrate après précipitation. Cette liqueur reçoit un apport de soude (NaOH) et chaux (CaO) avant le broyage afin de se situer dans les conditions d'attaque et de la rendre plus "agressive" vis-à-vis de la bauxite. Le recyclage permanent de la liqueur et plus généralement de l'eau est à l'origine du synonyme du procédé BAYER : « Cycle BAYER ». Le mélange bauxite-liqueur est une suspension rouge (ou pulpe) qui est envoyée dans les autoclaves d'attaque.

Le mélange bauxite-liqueur provenant du broyage (ou pulpe) est préchauffé puis envoyée dans les autoclaves d'attaque pendant plusieurs heures. La température et la pression à laquelle est soumise la pulpe dans les autoclaves dépend de la bauxite et du type

de procédé. Une bauxite hydrargillitique peut s'attaquer à pression atmosphérique tandis que quelques dizaines de bars et plus de 250°C sont nécessaires pour solubiliser l'alumine présente dans une bauxite diasporique. L'alumine se solubilise dans la liqueur sous forme d'aluminate de soude tandis que certains composés se déposent sous forme de tartres insolubles et rendent nécessaire un entretien régulier des autoclaves d'attaque. La pulpe est diluée à la sortie de l'attaque afin d'en faciliter la décantation.

Au cours de l'étape d'attaque du procédé BAYER, deux phénomènes se produisent :

- Dissolution de l'alumine contenue dans la bauxite.
- Formation de résidus solides : les boues rouges.

Voici la réaction principale du procédé BAYER :



Cette réaction est réversible suivant les conditions de pression et de température. Les conditions d'attaque déplacent l'équilibre vers la droite et permettent la solubilisation de l'alumine présente dans la bauxite. D'autres composés se solubilisent et sont à l'origine des impuretés de l'alumine issue du procédé BAYER (figure III-2). Les boues sont composées des corps insolubles provenant de la bauxite et de silicoaluminates formés lors de l'attaque.

La décantation et le lavage des boues sont nécessaires pour séparer les deux phases de la pulpe:

- La liqueur contenant l'aluminate de soude
- Les boues appauvries en alumine.

La séparation des boues et de la liqueur composant la pulpe s'effectue par décantation. Les particules solides tombent au fond du bac de décantation (plusieurs dizaines de mètres de diamètre) et sont extraites par pompage vers le lavage des boues. La liqueur surnageant est filtrée puis envoyée à la précipitation.

Après certains traitements appropriés, La liqueur est refroidie, diluée avec l'eau de lavage des boues rouges puis envoyée dans d'immenses bacs agités (plusieurs milliers de m³). L'hydrate d'alumine précipite lentement de bac en bac au fur et à mesure que la température diminue. Les grains d'hydrate sont maintenus en suspension afin de ne pas

décanter au fond des bacs. Au dernier bac de précipitation, on récupère la suspension surnageant.

La liqueur est ensuite filtrée afin de séparer l'hydrate humide et la liqueur appauvrie en alumine. Celle-ci est alors envoyée à l'attaque de la bauxite où elle sera enrichie en soude et chaux. La cinétique de précipitation est très lente (plusieurs dizaines d'heures), ce qui explique l'utilisation de bacs de très grand volume. En effet pour un débit de liqueur donné, un grand volume correspond à un grand temps de séjours dans les bacs de précipitation.

Afin d'accélérer la cinétique de précipitation de l'hydrate, 90% de l'hydrate humide récupéré après filtration est recyclé puis utilisé en tant qu'amorce de cristallisation.

L'hydrate d'alumine $\text{Al}(\text{OH})_3$ produit est ensuite filtré, lavé, essoré avant stockage. Il peut être commercialisé tel quel ou bien calciné en alumine Al_2O_3 .

La cristallisation de l'hydrate d'alumine (sous forme d'hydrargillite) est une étape complexe du procédé. Les mécanismes de cristallisation font intervenir nucléation, croissance et agglomération, ce qui rend la conduite délicate. Les conditions de précipitation détermineront la granulométrie, la morphologie et la quantité d'impuretés de l'hydrargillite et donc de l'alumine calcinée.

La précipitation est obtenue par dilution et refroidissement de la liqueur. Ces conditions

Permettent de déplacer l'équilibre suivant vers la gauche :



Plusieurs facteurs agissent sur l'équilibre et la vitesse de précipitation :

- La température
- La concentration en soude
- La concentration en alumine
- L'amorce d'hydrargillite.

Dans certains procédés, les grains les plus fins sont susceptibles de s'agglomérer (procédé Américain). La morphologie des grains obtenus est liée à la présence, ou non, de cette étape d'agglomération. En présence des seuls phénomènes de nucléation et croissance (cycle Européen) des grains à structure dite « radiale » sont obtenus [9].

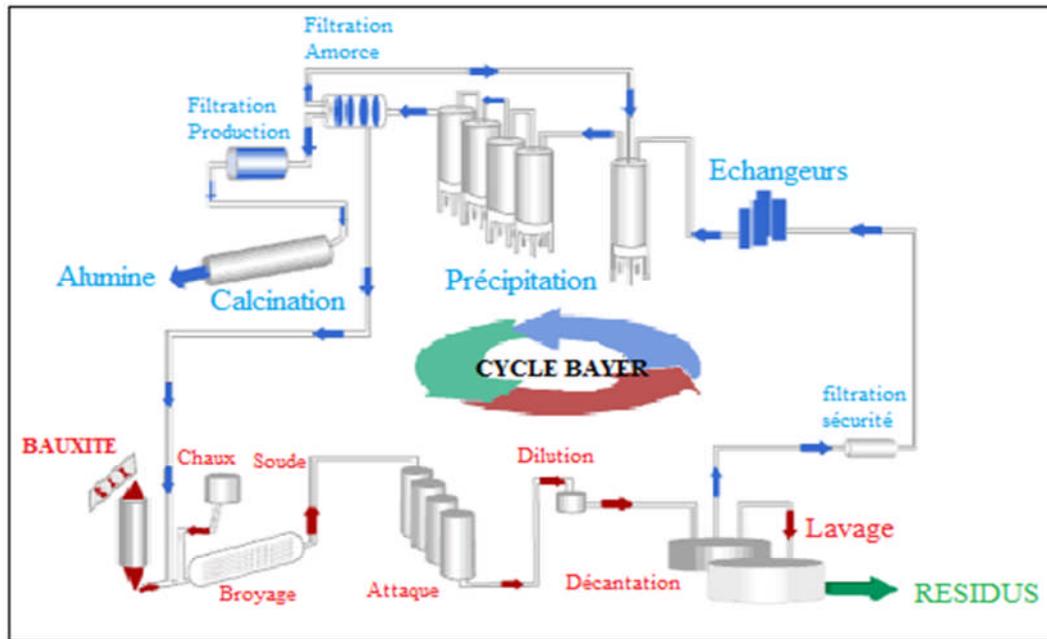


Figure III-3. Synthèse de l'alumine par procédé BAYER [9].

Après cristallisation, l'hydrate est transformé par calcination à haute température ($>1100^{\circ}\text{C}$). Le produit obtenu est constitué des diverses phases de transition, et de la phase α . La proportion relative de chacune de ces phases dépend : de la température de calcination, de la technologie de four employé, et dans une moindre mesure des caractéristiques physico-chimiques du trihydrate.

La décomposition du trihydrate en alumine se fait sous la forme d'une transformation topotactique (maintien de la morphologie initiale du cristal) : l'arrangement des ions oxygène des radicaux OH est conservé lors de la déshydratation sans être affecté par le réarrangement des ions Al. L'orientation cristallographique du trihydrate est donc conservée jusqu'à la phase finale agglomérée où la structure est détruite.

La morphologie et la taille des cristallites d'alumine- α sont dépendantes de la température et du temps de séjour, des impuretés de l'hydrate de départ, et du minéralisateur utilisé. L'ajout de minéralisateurs spécifiques à chaque fabricant est destiné à réduire la concentration en Na_2O et à contrôler la taille des grains. Cela conduit à des morphologies spécifiques et caractéristiques : le fluor donne des cristallites plates hexagonales, le bore des formes plus arrondies, etc. En outre, le mode de décomposition d' $\text{Al}(\text{OH})_3$ et le chemin de décomposition sont particulièrement importants.

III.4.3. Structures et générations des différentes variétés d'alumine :

L'alumine cristallise sous différentes formes l'une stable ($\alpha - Al_2O_3$), les autres métastables (γ -, δ -, θ -, ϵ -, η -, χ - Al_2O_3) [10]. elle existe aussi à l'état amorphe. Les phases métastables sont considérées comme des alumines de transition (ou basse température). Les phases α , γ , δ , θ et κ sont observables sous formes d'alumine pure et les autres (ϵ , η , χ) ne le sont qu'en présence d'ajoutes tels que ZrO_2 , des silicates et des alcalins.

La phase alpha : a une structure rhomboédrique. Les ions O^{2-} forme un empilement hexagonal compact. Les cations Al^{3+} occupent 2/3 des sites octaédriques (figure III-4. Figure 1II-5). Les paramètres de cette cellule hexagonale unité sont : $a_0=4,7589\text{\AA}$, $C_0=12,951\text{\AA}$, $\alpha=\beta=90^\circ$ et $\gamma=120^\circ$. Cette phase est stable au-delà de 1150°C .

La transformation qui aboutit à sa formation est exothermique et irréversible.

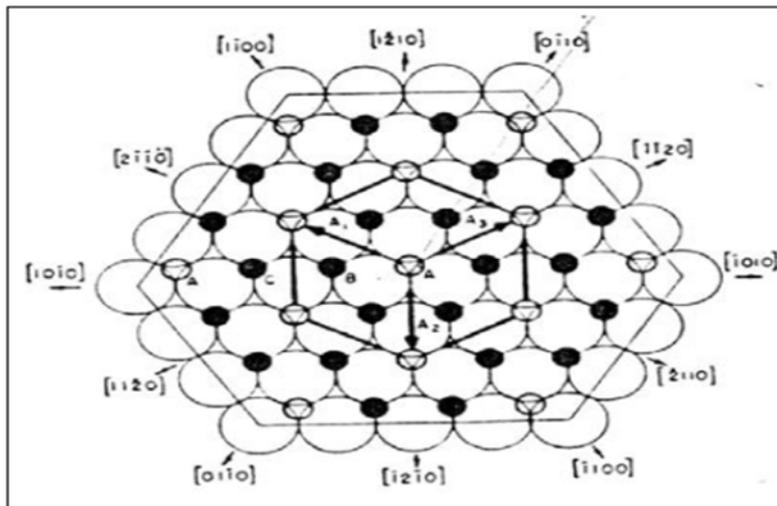


Figure III-4. Représentation du plan basal de l'alumine- α (réseau d'ions d'oxygène avec les ions d'aluminium en petits cercles noirs et les sites vides en petits cercles blancs) et de ses directions cristallographiques principales [11].

Al^{3+} dans les sites interstitiels octaédriques et tétraédriques, qui s'ordonnent progressivement avant d'évoluer vers la phase alpha.

La phase κ : à une structure orthorhombique, avec les plans compacts d'ions O^{2-} , les ions Al^{3+} occupant les sites tétraédriques et octaédriques.

Ces phases peuvent être obtenues par déshydratation partielle des hydroxydes d'aluminium, $\gamma - Al(OH)_3$ (gibbsite) ; $\alpha - Al(OH)_3$ (bayerite), $\gamma - AlO(OH)$ (boehmite), $\alpha - AlO(OH)$ (diaspore), ou de l'oxyde hydraté $5Al_2O_3 \cdot H_2O$ (tohdite). La figure III-6 résume les séquences de transformations d'une phase métastable à l'autre, vers la phase stable a lorsque l'on augmente la température.

$\alpha-AlOOH \rightarrow 700^\circ-800^\circ C \rightarrow \alpha-Al_2O_3$	(I-3)
$\gamma-Al(OH)_3 \rightarrow 150^\circ-300^\circ C \rightarrow \chi \rightarrow 650^\circ-750^\circ C \rightarrow \kappa \rightarrow 1000^\circ C \rightarrow \alpha-Al_2O_3$	(I-4)
$5Al_2O_3 \cdot H_2O \rightarrow 700^\circ-800^\circ C \rightarrow \kappa' \rightarrow 750^\circ C \rightarrow \kappa \rightarrow 900^\circ C \rightarrow \alpha-Al_2O_3$	(I-5)
Vapeur (CVD) $\rightarrow \kappa \rightarrow \alpha-Al_2O_3$	(I-6)
$\gamma-AlOOH \rightarrow 300^\circ-500^\circ C \rightarrow \gamma \rightarrow 700^\circ-800^\circ C \rightarrow \delta \rightarrow 900^\circ-1000^\circ C \rightarrow \alpha-Al_2O_3$	(I-7)
$\alpha-Al_2O_3 \rightarrow 200^\circ-300^\circ \rightarrow \eta \rightarrow 600^\circ-800^\circ C \rightarrow \theta \rightarrow 1000^\circ-1100^\circ C \rightarrow \alpha-Al_2O_3$	(I-8)
Fondu (liquide) $\rightarrow \gamma \rightarrow \delta, \theta \rightarrow \alpha-Al_2O_3$	(I-9)

Figure III-6. Filiation des alumines de transition en fonction de l'hydroxyde de départ et de la température. Les températures de transition sont données à titre indicatif et peuvent varier avec les conditions opératoire [12]

Les équations représentent les filiations des alumines de transition en fonction de l'hydroxyde de départ et de la température. Les températures de transition sont données à titre indicatif et peuvent varier avec les conditions opératoires [12].

III.4.6.Applications de l'alumine :

Les différentes applications des films minces d'alumine concernent les domaines suivants:

- **Chimique:** utilisation comme barrière anti diffusion pour protéger le substrat contre un environnement hostile ou corrosif.
- **Mécanique:** protection contre l'usure et l'érosion par des particules solides.
- **Thermique:** couche de protection thermique.

- **Corrosion et oxydation:** protection de l'acier contre la corrosion à haute température.
- **Electronique:** couche de passivation, oxyde de grille, masquage photolithographie.
- **Optique:** réalisation de guide d'onde optique dans le visible et l'infrarouge et protection des capteurs solaires.
- **Biomatériau:** films biocompatibles pour des applications orthopédiques [6].

Autres application de l'alumine

- Isolant électrique et/ou composant de résistance à la corrosion pour lasers à états gazeux, et pour équipements de procédés des semi-conducteurs (Chuck, bras de manipulation et bague d'étanchéité)
- Isolant électrique pour tubes électroniques, spectromètres de masse, détecteurs ioniques
- Substrat isolant pour diodes lasers
- réflecteur/ cavité diffusante pour lasers à état solide (YAG) et équipements de photothérapie (lumière pulsée)
- pièce de structure pour les équipements de vide poussé et/ou cryogénique, pour les installations de rayonnements nucléaires, pour les équipements travaillant à hautes températures
- Pièce d'usure, d'étanchéité et/ou de résistance à la corrosion, piston pour pompes, vannes et systèmes de dosages, vannes d'échantillonnage sanguin [6].

III.5.Architecture d'une cellule solaire en couche mince déposée sur un substrat étranger :

L'architecture de la cellule photovoltaïque, c'est à dire sa géométrie et la disposition des contacts électriques n et p, dépend de la nature du substrat utilisé : qu'il soit conducteur ou isolant. Dans le cas où le substrat est isolant il y a Plusieurs types de structures de cellules sont réalisés comme exemple la structure méssa (Figure III-11).

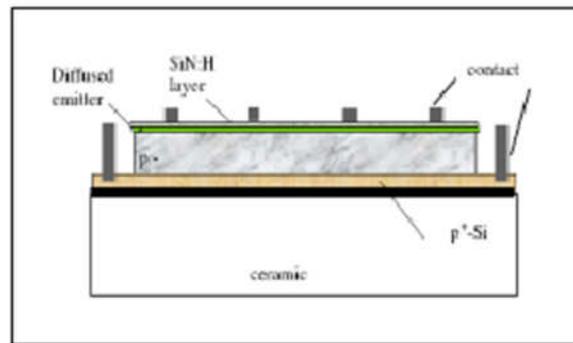


Figure III-7. Structure d'une cellule sur substrat isolant : Cellule à méso.

III.6.Conclusion :

Dans cette approche, il est nécessaire de choisir des substrats adaptés aux températures retenues pour le procédé comme les substrats de type céramique particulièrement l'Alumine. Ces substrats jouent un rôle très important sur les performances photovoltaïques, car ils présentent une bonne tenue mécanique, une résistance à la température et une bonne réflectivité de la lumière et par conséquent un bon confinement optique à l'intérieur de la couche silicium.

Dans le chapitre suivant nous nous présentant la géométrie et les profils de dopage des cellules photovoltaïques à base pc-Si en couches minces déposé sur un substrat Alumine, nous avons utilisé la simulation effectuée avec le simulateur PC1D

References Bibliographiques

- [1] J. H. Werner, R. B. Bergmann, R. Brendel. «The challenge of crystalline thin film solar cells» *Adv. Sol. State. Phys. Vol.34* (1994)
- [2] **Malek BENMANSOUR**, «Développement, Contrôle et Modélisation d'un procédé de projection de poudres de silicium par plasma RF – Application aux couches minces photovoltaïques», *Thèse, PARIS*, 2003.
- [3] M. Azar ; « Mise en forme et frittage des poudres de céramique nanostructures: Cas D'une alumine de transition », thèse de doctorat, Ecole doctorale : Matériaux de Lyon D'ordre 2009-ISAL-0065.
- [4] M. M. Sovar ; «Docteur de l'institut national polytechnique de Bucarest 46», thèse de doctorat, École doctorale: Matériaux, Structure, Mécanique (2006).
- [5] KH. Bendada et M. W.Boulakradche ; « Optimisation des conditions de dosage par spectroscopie d'absorption atomique (SAAF et SAAET) : Application à la détermination de la pollution et de la bioaccumulation des métaux lourds » ; Mémoire de master, Université Houari Boumediene (U.S.T.H.B) Algérie ; (2011).
- [6] [En ligne] ; disponible sur le site : <http://aluminium.hot.lu/alumine>,(date de consultation 14/02/2014).
- [7] M.A Green « Silicon Solar cells, advanced principles practice. Appendice D'optical properties of silicon at 300 k peulié par le centre for photovoltaic Devices, UNSW, Australie (1995).
- [8] Y. JORAND, « Elaboration et caractérisation de composites dispersives ternaires base alumine-zircone à vocation thermomécanique », Thèse de Doctorat, (INSA de Lyon, GEMPPM), (1991).
- [9] C. Bernard, "Les aluminés et leurs applications", Aluminium Péchiney, Ed. Techno-Nathan (1990).
- [10] Maria Magdalena Sovar « du tri-isoproxyde aux d'aluminium par dépôt chimique en phase vapeur : composition et propriétés des revêtements obtenues» ; Thèse du doctorat, institut national polytechnique de toulouse.206.
- [11] Michael Decup ; «impact des procédés industriels de traitement sur les propriétés diélectriques des substrats d'Alumine utilisés dans les modules de commutation haute tension» ; Thèse de doctorat de l'université Toulouse.2010.
- [12] Santo P. souza, Santos H. souza et al standard, (Saocarlos, Brasil, 3(4), (2000), P104.

***Chapitre IV : Résultat et
Discussions***

IV.1.Introduction :

Durant ces dernières années, et à cause des couts élevés de l'expérimentation (méthodes d'élaboration et techniques de fabrication), les chercheurs se sont orientés vers la simulation. Il existe principalement quatre types de simulateurs, nous citons à titre d'exemple, les simulateurs fonctionnels ou logiques, les simulateurs électriques ou analogiques, les simulateurs technologiques et ceux de composants ou de dispositifs, citons PC1D, ORIEL, PVSYST, UQAQ, AMPS1D, RAUPV2, SCAPS.

Dans ce chapitre, nous allons présenter le calcul du rendement d'une cellule photovoltaïque par la simulation à l'aide du logiciel PC1D, ainsi que l'effet des différents paramètres physiques et technologiques sur les performances photovoltaïques des cellules solaires en couches minces à base du silicium polycristallin déposé sur un substrat d'Alumine.

IV.2.LOGICIEL DE SIMULATION : PC1D

VI.2.1.Le simulateur PC1D :

Le PC1D (personnel computer one-dimensionnel) est l'un des programmes qui a été élaboré pour modéliser et exploiter les composants semi-conducteurs, notamment les composants photovoltaïques. Il est capable de résoudre les équations couplées non linéaires qui gouvernent les phénomènes physiques du dispositif étudié. A l'aide du PC1D, la compréhension des cellules solaires et leurs phénomènes physiques internes tels que le mouvement des porteurs minoritaires, la recombinaison et la photo-génération, devient aisée.

Le PC1D fonctionne sous Windows 3011 ou bien Windows 95, il exige au moins le microprocesseur est 80387 et 80386 CPU, seul le fichier PC1D.EXE est nécessaire aux calculs demandés. Il doté aussi d'un fichier d'aide PC1D.HLP et comprend d'autres fichiers additionnels contenant les paramètres de plusieurs semi-conducteurs, tels que le **GaAs, a-Si, AlGaAs, Si, InP, et Ge**. Il contient aussi trois spectres solaires standards (**AM0, AM1.5 G, AM1.5 D**) plusieurs exemples sont aussi fournis afin de mieux exploiter le PC1D, aucun programme n'est exigé pour leur installation.

Le programme PC1D a été élaboré par Paul A. Basaure durant ses travaux de recherche à la faculté d'ingénierie électrique à l'université d'Iowa et fut rendu public, pour la première fois, après l'avoir annoncé à la 18ème conférence sur le photovoltaïque IEEE PVSC (décembre 1985).

La version 1 fut le premier programme à résoudre avec succès les équations complexes des composants à semi-conducteurs sur un PC, les versions antérieures résolvaient seulement les équations des porteurs minoritaires pour des régions à dopage uniforme, cependant, les versions récentes offrent les solutions de ces équations pour différents profils de dopage (Uniforme, Exponentiel, Gaussien).

La version 2 du PC1D a été améliorée par le même programmeur (Paul A. Basaure) au sein du département photovoltaïque aux laboratoires nationaux de Sandia, Cette version a eu sa démonstration en septembre 1988 et rendu public juste après son annonce à la conférence IEEE PVSC (Mars 1989). Le programme incluait une nouvelle interface ou boîte de dialogue qui sert à entrer les données et une autre pour la souris. A l'aide de cette version on peut modéliser les hétéro-structures. Plusieurs additifs ont été ajoutés à cette version, telle que la texturation des surfaces de cellules solaires.

La version 3 a vu des améliorations numériques peu importantes, nous citons la rapidité et les critères de convergence. Elle a été distribuée en Octobre 1991.

La version 4 qu'on a exploitée dans notre étude, est apparue en 1995, elle est plus développée que les versions antérieures (1, 2,3), la différence réside dans sa rapidité (vitesse de calcul), de meilleurs critères de convergence et de stabilité, le nombre d'itérations est jusqu'à 200, le nombre des éléments a atteint 500, le nombre des régions 5, ainsi que la prise en compte de plusieurs éléments caractérisant les cellules solaires. On trouve aussi dans cette version des corrections et des ajustements physiques tels que le modèle de mobilité des porteurs majoritaires, la correction de coefficient de recombinaison bande-a-bande ($9.5E-14$ à $9.5E-15\text{cm}^3/\text{s}$), du rapport N_c / N_v (2.8 à 1.06) et l'absorption par les porteurs libres, pour les niveaux de dopage élevés. Parmi les avantages, la facilité d'interagir avec le simulateur grâce aux nombreuses boîtes de dialogue qui apparaissent au cours de l'utilisation du PC1D, la possibilité d'étudier les performances des cellules en fonction de plusieurs paramètres par le mode **BATCH** (12 paramètres à la fois). Grâce à ces améliorations et aux corrections tant

physiques que numériques, cette version est capable d'offrir des résultats précis sous forme graphique et forme tableau en mode Batch.

IV.2.2. L'environnement de PC1D :

L'utilisation de PC1D est très pratique. 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 présentée sur la Figure IV-1, 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.

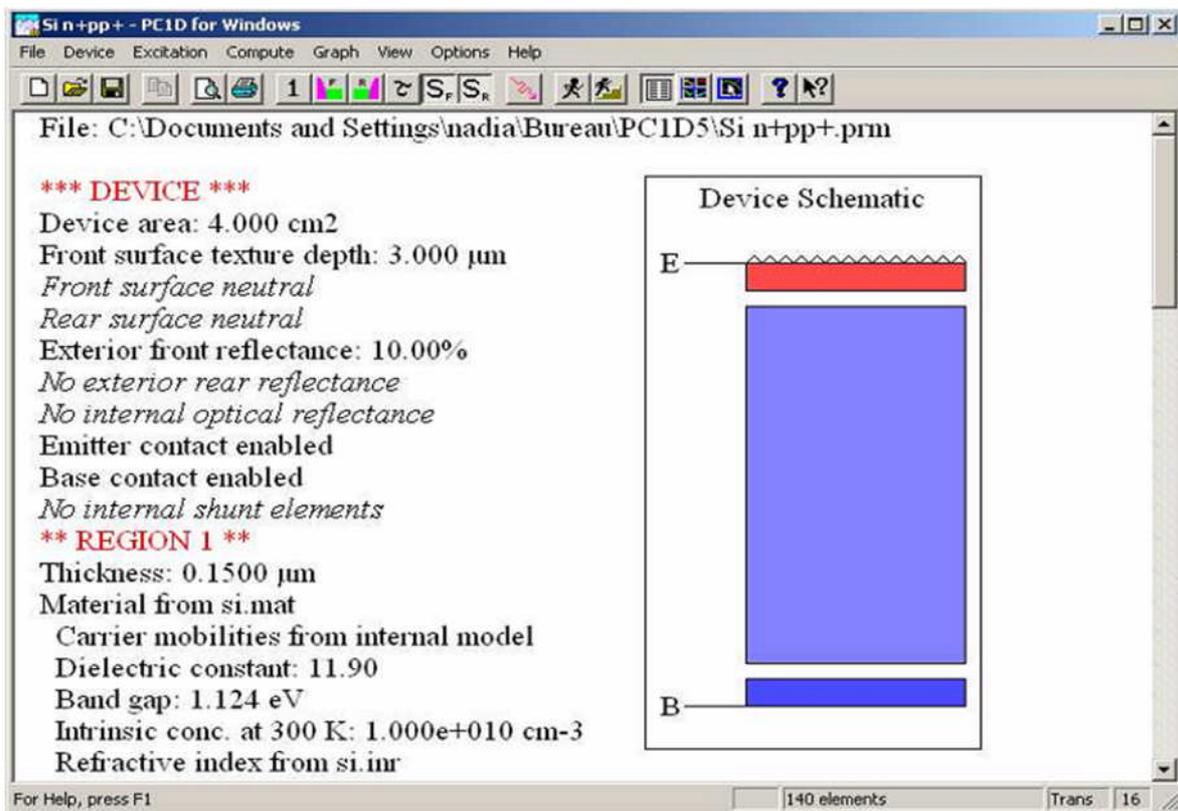


Figure IV-1. Fenêtre du logiciel PC1D utilisé en simulation numérique.

IV.2.3. Les paramètres du dispositif (Device) :

- **Aire du dispositif (Device)** : la surface du dispositif est très importante car elle influe sur la photo courant d'une manière appréciable.
- **Surface texturée** : les surfaces texturées utilisées dans toutes les structures étudiées sont composées de micro pyramides inversées de profondeur (depth) 3 μm et d'angle facial 54,74°.

La texturisation est très importante, car elle permet de diminuer les pertes par réflexion du rayonnement incident.

- 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 potentielle aux surfaces.
- Nous n'avons pas introduit de couches antireflets, car elle est remplacée par la texturation.
- **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'elle peut être conducteur, diode ou condensateur. Dans notre cas nous considérons qu'il n'y a pas d'élément qui peut shunter le circuit.

IV.2.4. Les paramètre des régions :

- **L'épaisseur de l'émetteur** est relativement mince par rapport à la base.
- Le matériau utilisé: les paramètres qui le décrivent, sont stockés dans des fichiers d'extension

(*mat), ils sont fourni avec le logiciel dans une diskette. Les paramètres stockés dans ce fichier sont :

- La mobilité.
- La constante diélectrique.
- L'énergie de gap (eV).
- La concentration intrinsèque (cm⁻³).
- L'indice de réfraction.
- Coefficient d'absorption.
- 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 profils 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**

IV.2.5. 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 plupart des cas, on choisit la température ambiante, $T=25^{\circ}\text{C}$.
- Il y a deux sources de Thévenin 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 $0,1 \text{ W/cm}^2$. 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.

IV.2.6. Les résultats obtenus :

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.

IV.3.Simulation de la cellule photovoltaïque à base de silicium polycristallin (P-Si) :

IV.3.1.Structure simulée :

La structure de la cellule utilisée pour la simulation est de type n^+pp^+ , de surface 1 cm^2 avec une texturisation à la surface avant dotée d'une région d'émetteur de type N d'épaisseur X_j (μm) dopée n^+ d'une base dopée P et une épaisseur de la cellule X_e de $29 \mu\text{m}$. Les recombinaisons en face avant et arrière sont prises pour S_f et S_b de l'ordre de $2 \cdot 10^4$ et 10^6 cm/s respectivement. Dans cette étude, on considère qu'il n'y a pas d'influence des contacts ainsi que le substrat sur les performances de la cellule.

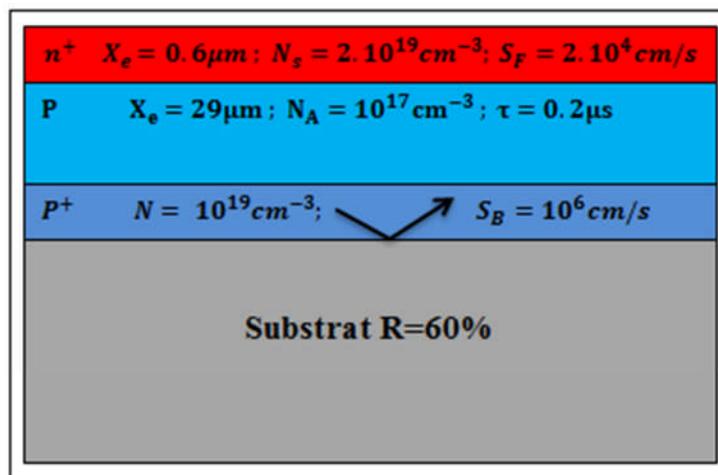


Figure IV2. Structure et paramètres de la cellule simulée.

Pour simuler l'influence des différents paramètres, nous avons tout d'abord défini une cellule solaire de référence avec un ensemble de paramètres fixés, puis nous avons fait varier les paramètres un par un (les autres restant fixes) afin d'analyser leur influence sur les caractéristiques de la cellule solaire.

Les valeurs des paramètres de la cellule de référence de silicium type P sont les suivantes :

Couche antireflet	
n_{car}	2.03
d_{car} (nm)	75
Texturisation	
Angle (°)	54.74
Depth (µm)	3
Emetteur	
Xj (µm)	0.6
Ns (cm^{-3})	2. E20
Profil de diffusion :	Erfc
Base	
ρ (Ωcm^{-1})	1. E17
τ (µs)	0.2
Xe (µm)	29
BSF	
X_{BSF} (µm)	4
C_{BSF} (cm^{-3})	1. E19
Passivation	
S_F (cm/s)	2. E4
S_B (cm/s)	1. E6

Tableau IV-1. Paramètre de la cellule de référence.

Avec :

n_{car} : Indice de réfraction de la couche antireflet.

d_{car} : Épaisseur de la couche antireflet en (nm).

Depth : profondeur de texturisation en (µm).

Angle : angle facial de texturisation en degré.

Xj : profondeur de jonction en (µm).

Ns : concentration des atomes en (cm^{-3}).

ρ : Résistivité en (Ωcm).

τ : durée de vie des porteurs minoritaires en (µs).

Xe: épaisseur de la cellule solaire en (µm).

X_{BSF} : Épaisseur de la couche de BSF en (µm).

C_{BSF} : Concentration des atomes de la couche de BSF en (cm^{-3}).

S_F, S_B : vitesse de recombinaison des faces avant et arrière de la cellule en (cm/s).

IV.4. Exploitation des résultats de la simulation :

A partir de la cellule de référence décrite précédemment, Nous avons simulé une cellule de même type n^+pp^+ , nous avons tous d'abord, varier l'épaisseur de la cellule, la profondeur, le dopage de l'émetteur et de BSF, le dopage de la base et la durée de vie des porteurs minoritaires. Puis nous avons analysé l'influence de la vitesse de recombinaison sur la face avant pour déterminer les meilleurs paramètres géométrique de la cellule. Le tableau suivant résume l'ensemble des variations que l'on peut faire :

Paramètre	Valeur minimale	Valeur maximale
épaisseur de la cellule	5 μm	100 μm
épaisseur de l'émetteur	0.1 μm	1 μm
dopage de l'émetteur	10 ¹⁹ cm ⁻³	2.10 ²¹ cm ⁻³
dopage da la base	10 ¹⁶ cm ⁻³	2.10 ¹⁷ cm ⁻³
durée de vie des porteurs minoritaires	0.01 μs	0.2 μs
épaisseur du BSF	1 μm	5 μm
dopage du BSF	10 ¹⁸ cm ⁻³	5.10 ¹⁹ cm ⁻³
vitesse de recombinaison face avant	10cm/s	10 ⁷ cm/s
vitesse de recombinaison face arrière	10cm/s	10 ⁷ cm/s

Tableau IV-2. Paramètres variables pendant la simulation.

VI.4.1. Influence de l'épaisseur de la cellule sur le rendement, I_{cc} , V_{co} :

Pour étudier l'influence de l'épaisseur de la cellule sur le rendement, nous avons varié ces derniers et fixé les autres paramètres, les résultats obtenus sont les suivants :

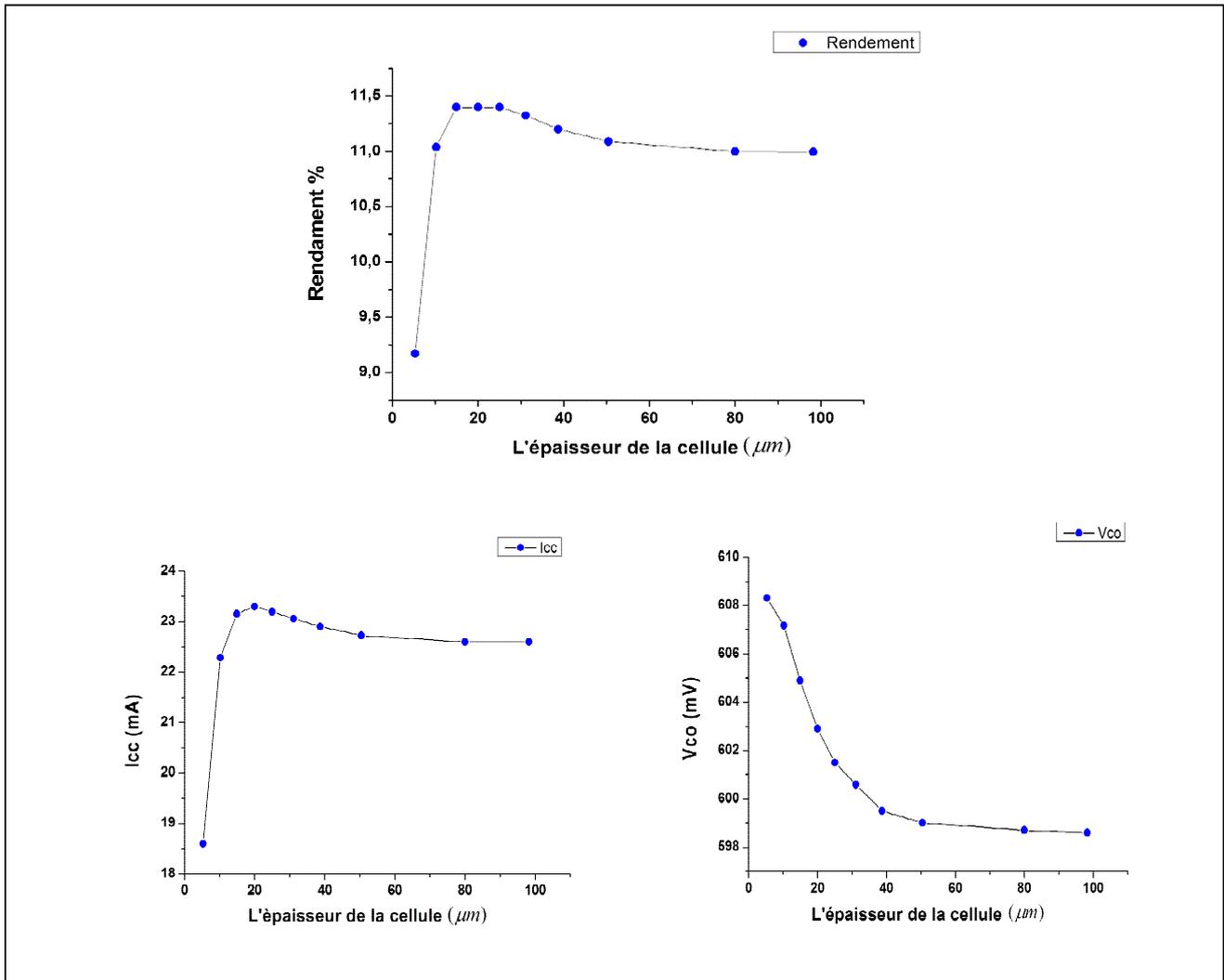


Figure IV-3. Evolution du rendement, du courant de court-circuit et de la tension de circuit ouvert en fonction de l'épaisseur de la cellule Xe.

Dans la figure (IV-3), on remarque que dans l'intervalle $[5,20]$ μm , il y'a une augmentation du rendement qui peut atteindre des valeurs de 11.4%. Lorsque l'épaisseur dépasse $20\mu m$ le rendement diminue puis il demeure constant. On voit aussi que le courant prend la même allure que le rendement.

On constate que l'épaisseur de la cellule est un facteur très important pour l'absorption des photons.

IV.4.2. Influence de l'épaisseur de l'émetteur n^+ sur le rendement, I_{cc} , V_{co} :

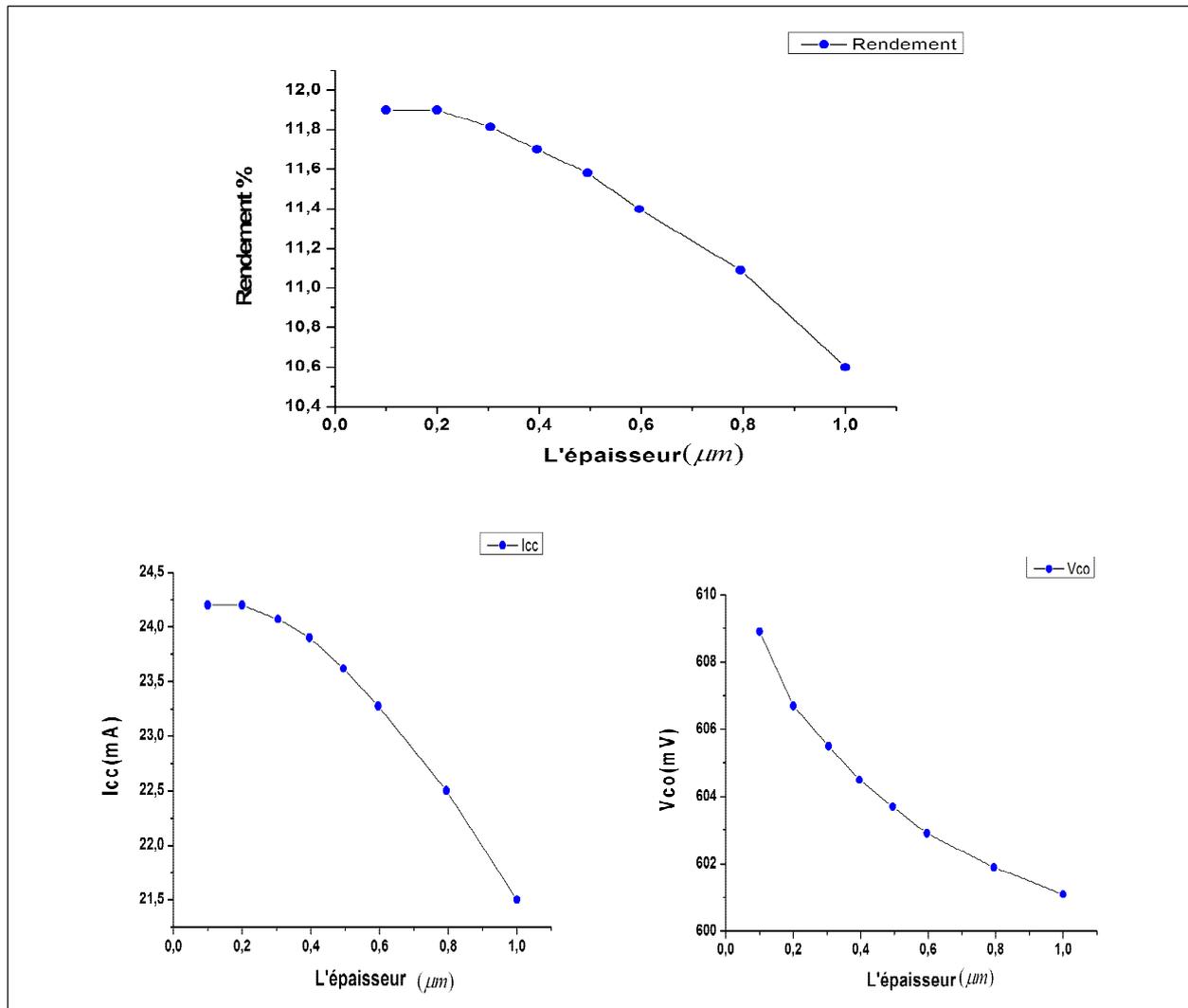


Figure IV-4. Evolution du rendement et du courant de court-circuit et de la tension du circuit en fonction de l'épaisseur de l'émetteur.

On remarque que la croissance de l'épaisseur de l'émetteur conduit à une dégradation totale des performances de la cellule (le rendement, le courant de court-circuit et la tension du circuit ouvert) à cause de l'augmentation de la recombinaison en face avant (figure IV-4).

IV.4.3. Influence du dopage de l'émetteur n^+ sur le rendement, I_{cc} , V_{co} :

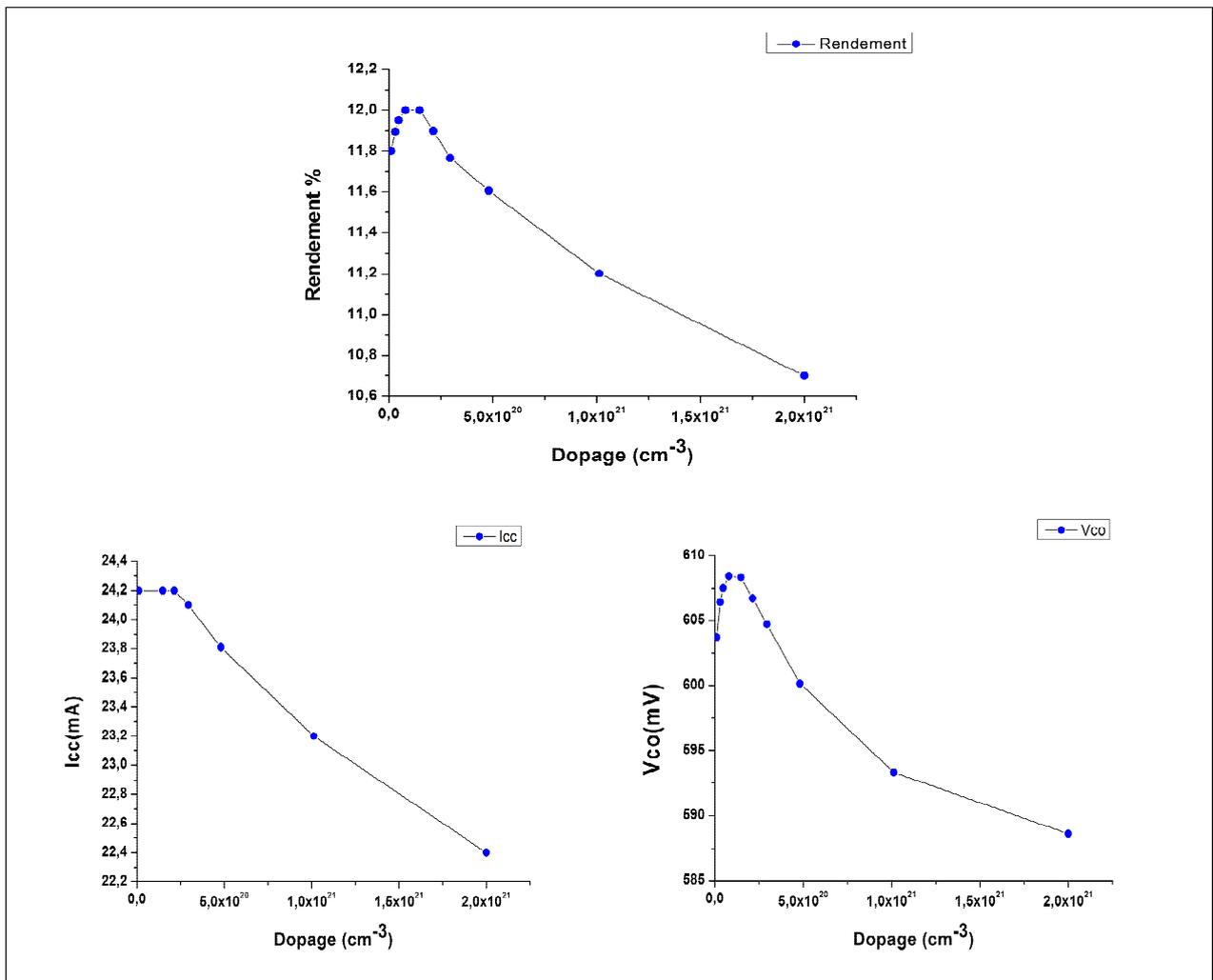


Figure IV-5. Evolution du rendement, du courant de court-circuit et de la tension du circuit ouvert en fonction du dopage de l'émetteur.

Dans l'intervalle $[10^{19}, 10^{20}] \text{ cm}^{-3}$, on remarque qu'il y'a une augmentation du rendement et de la tension de circuit ouvert avec la croissance du dopage de l'émetteur. Le rendement arrive à son maximum quand il devient proche du niveau de 10^{20} cm^{-3} . Par contre le courant de court-circuit dans cet intervalle reste constant. Lorsque le niveau du dopage de l'émetteur dépasse la valeur de 10^{20} cm^{-3} , il y'a une dégradation totale des performances de la cellule.

Dans la figure (IV-5) on constate que le rendement prend sa valeur optimale pour un dopage de $N_D = 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ et une épaisseur de $X_e = 0,2 \mu\text{m}$.

IV.4.4. Influence du dopage de la base p sur le rendement, I_{cc} , V_{co} :

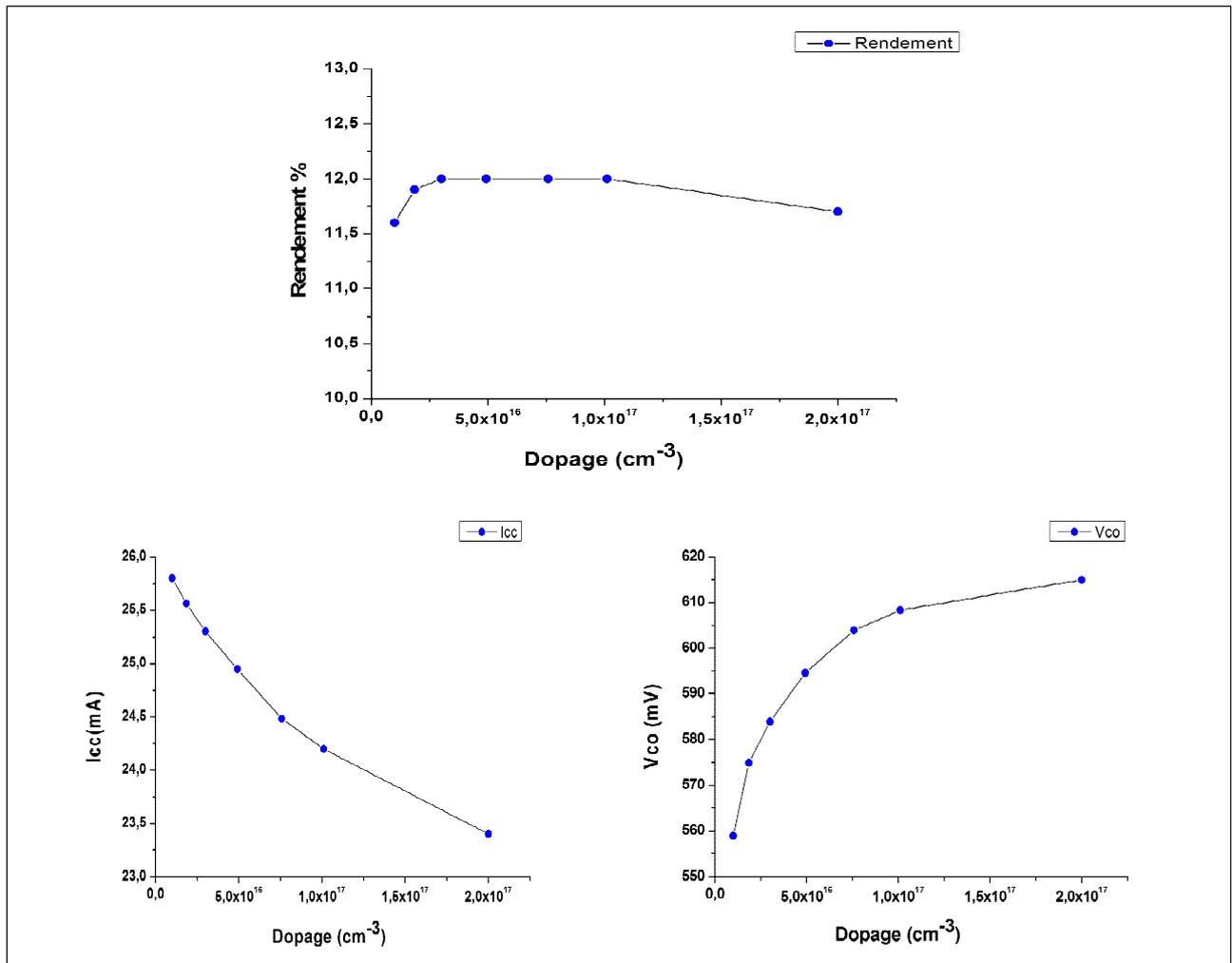


Figure IV-6. Evolution du rendement, du courant de court-circuit en fonction du dopage de la base.

D'après les résultats obtenus, on remarque que dans l'intervalle $[10^{16}, 3.10^{16}] \text{ cm}^{-3}$, le rendement en fonction du dopage de la base est faible avant qu'il atteigne son maximum à $3.10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Cela est dû, à l'excès des recombinaisons. Au-delà de cette valeur le rendement reste presque constant.

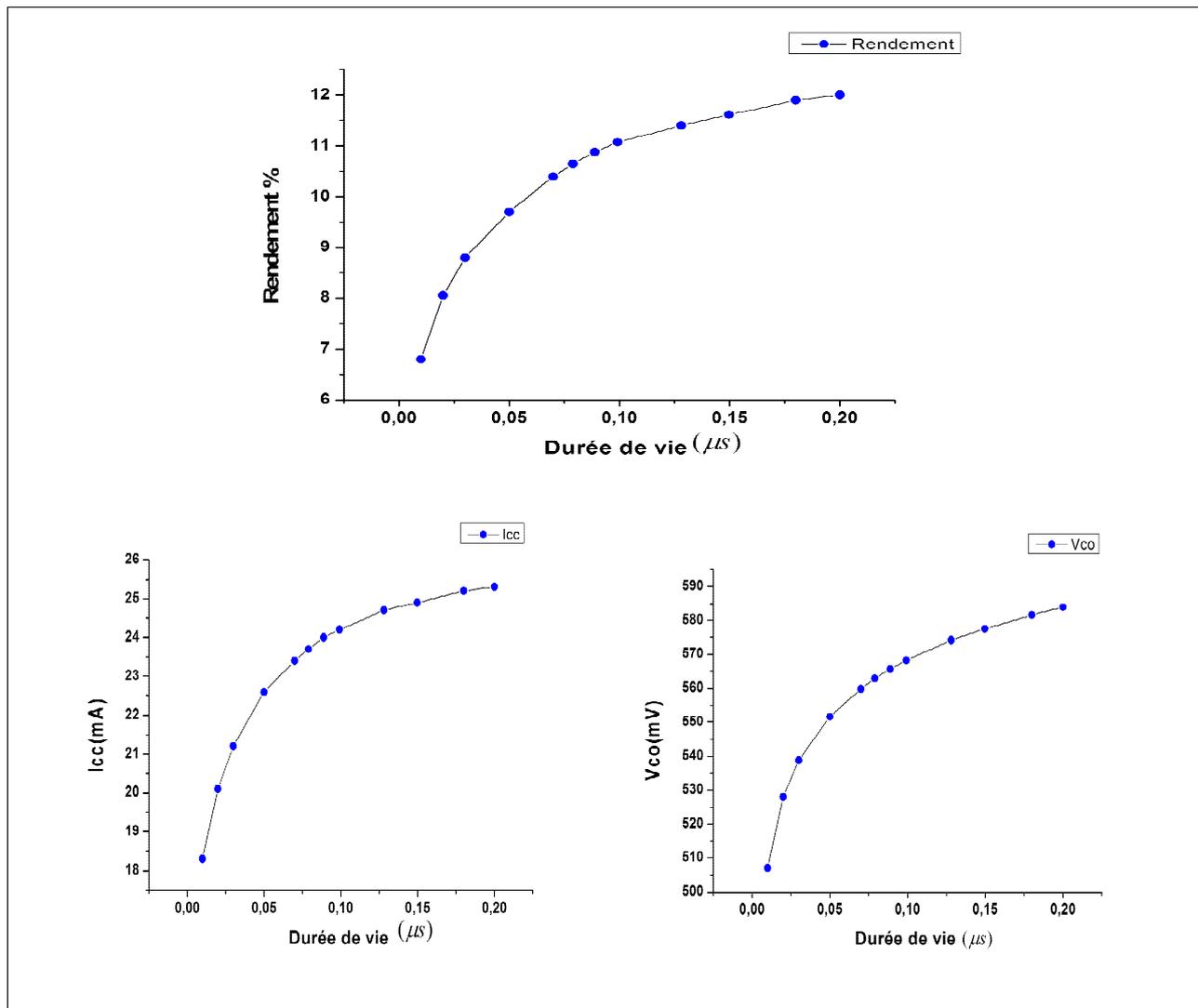
IV.4.5. Influence du taux de la recombinaison (la durée de vie) sur le rendement, I_{cc} , V_{co} :

Figure IV-7. Evolution du rendement, du courant de court-circuit et de la tension de circuit ouvert en fonction de la durée de vie.

Sur la figure IV-7. On constate l'influence de la durée de vie des minoritaires sur les paramètres de la cellule. Cela dit ; le rendement, le courant de court-circuit et la tension du circuit ouvert augmentent avec l'augmentation de la durée de vie un résultat qui peut être interprété par l'élimination des recombinaisons en volume.

IV.4.6. Influence du dopage de BSF sur le rendement, I_{cc} , V_{co} :

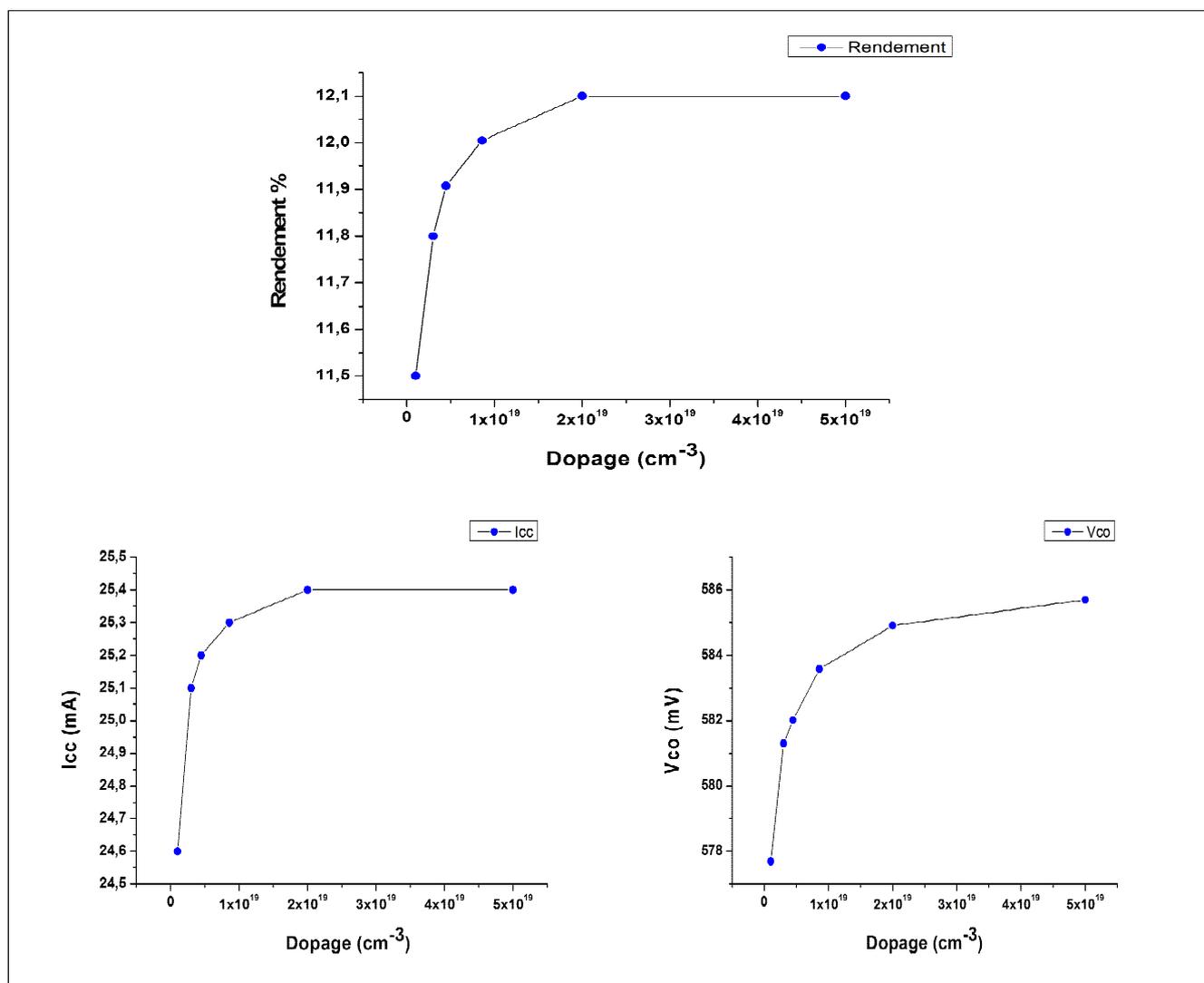


Figure IV-8. Evolution du rendement, du courant de court-circuit et de la tension de circuit ouvert en fonction de la concentration du BSF.

Dans la figure IV-8, on remarque que la croissance du niveau de dopage conduit à une augmentation importante de toutes les caractéristiques de la cellule jusqu'à, atteindre une valeur de ($1 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$). Au-delà de cette valeur les trois paramètres (le rendement, I_{cc} , V_{co}) restent constantes.

Par conséquent, le dopage du BSF permet de réduire la recombinaison des porteurs de charges au niveau de la cellule solaire.

IV.4.7. Influence de l'épaisseur de BSF sur le rendement, I_{cc} , V_{co} :

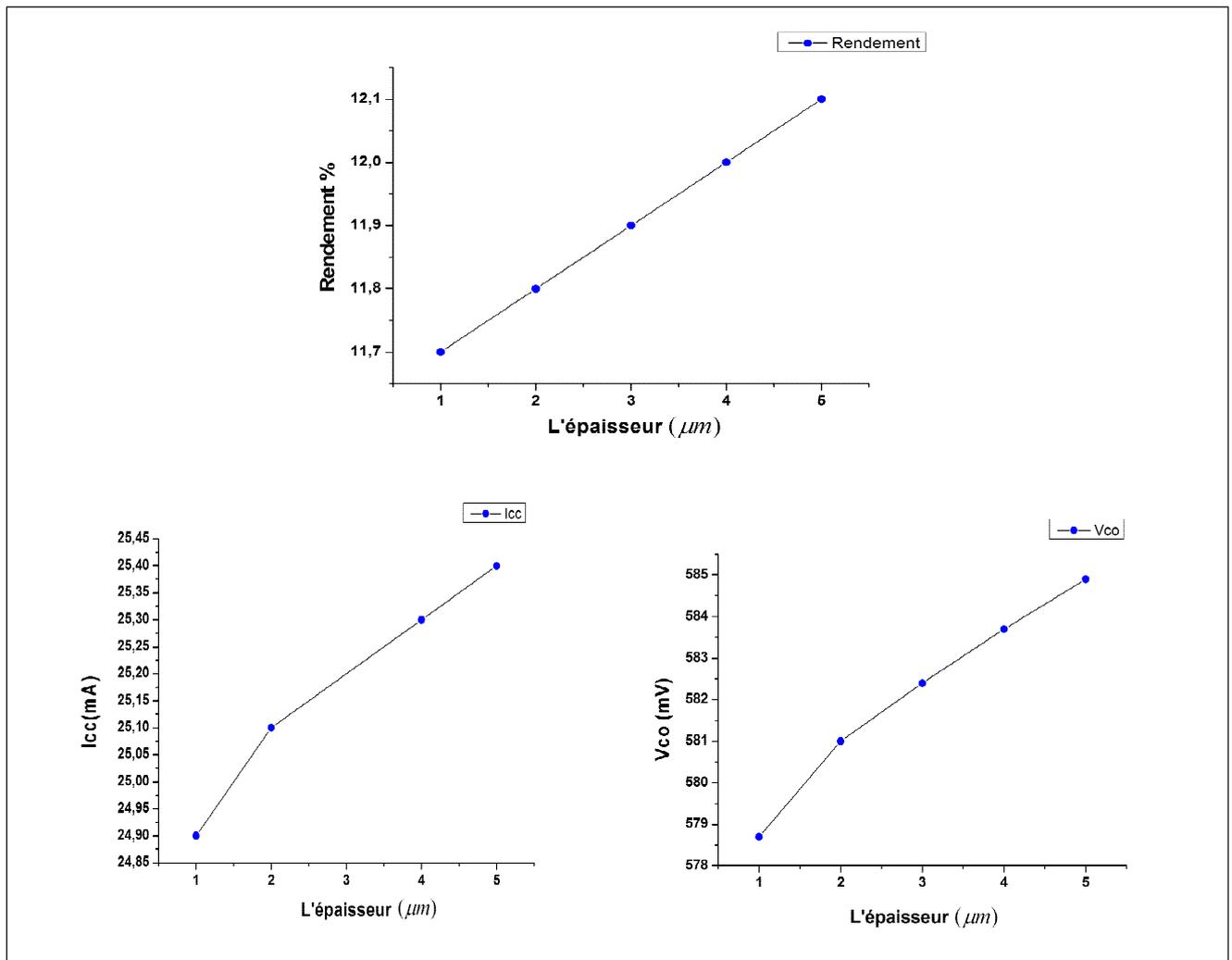


Figure IV-9. Evolution du rendement, du courant de court-circuit et de la tension de circuit ouvert en fonction de l'épaisseur du BSF.

D'après les résultats obtenus, on remarque que l'augmentation de l'épaisseur du BSF conduit à une amélioration également des performances de la cellule.

On constate que l'épaisseur du BSF doit être importante pour assurer une recombinaison bien réduite.

IV.4.8. Influence de la vitesse de recombinaison en surface avant sur le rendement, I_{cc} , V_{co} :

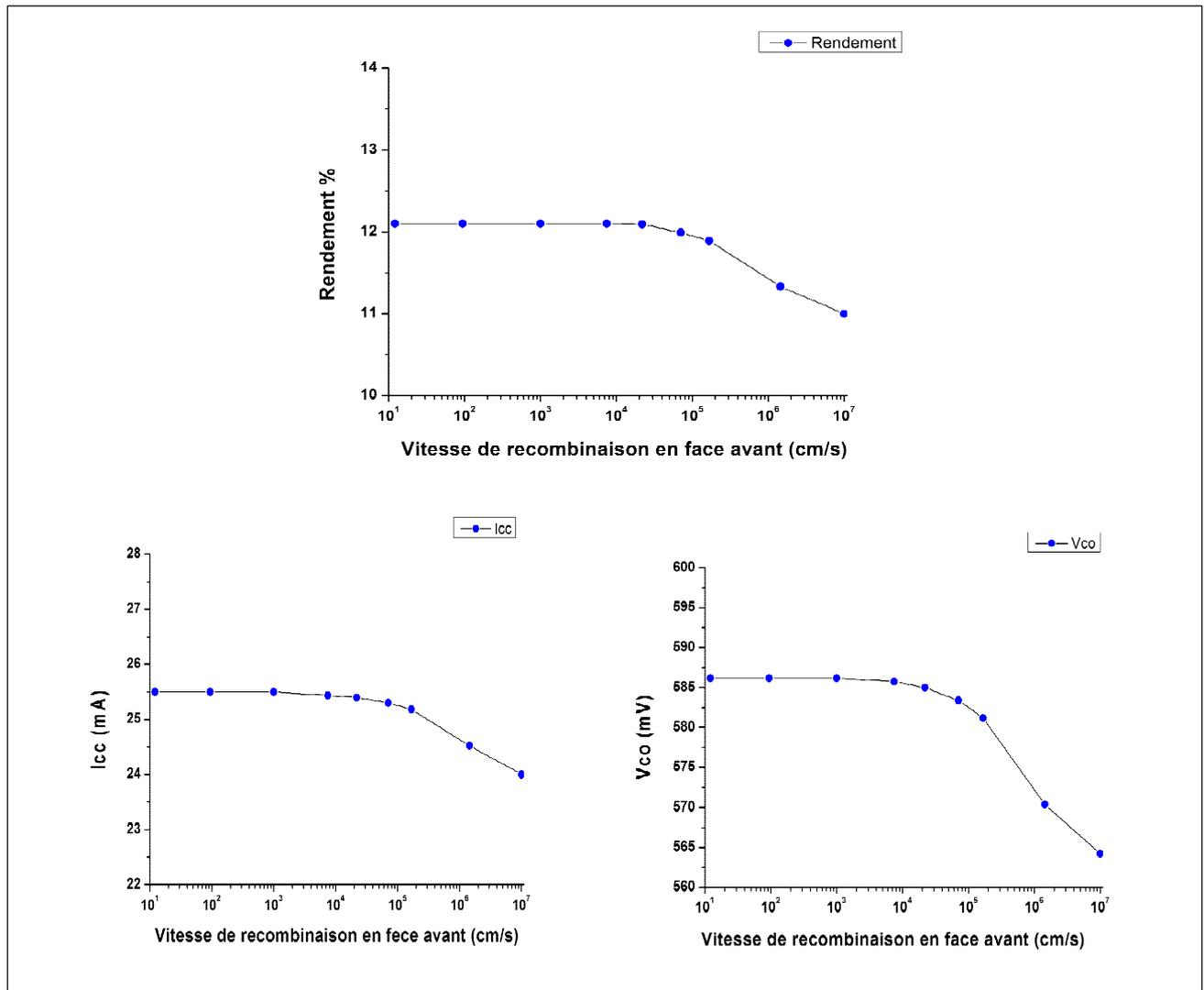


Figure IV-10. Evolution du rendement, du courant de court-circuit et de la tension de circuit ouvert en fonction de la vitesse de recombinaison face avant

D'après la figure (IV-10), On remarque que les caractéristiques de la cellule dans l'intervalle $[10, 10^4]$ cm/s restent constantes. Par contre, si la vitesse de recombinaison dépasse 10^4 cm/s il y'a une dégradation complète des performances de la cellule.

IV.4.9. Influence de la vitesse de recombinaison en face arrière sur le rendement, I_{cc} , V_{co} :

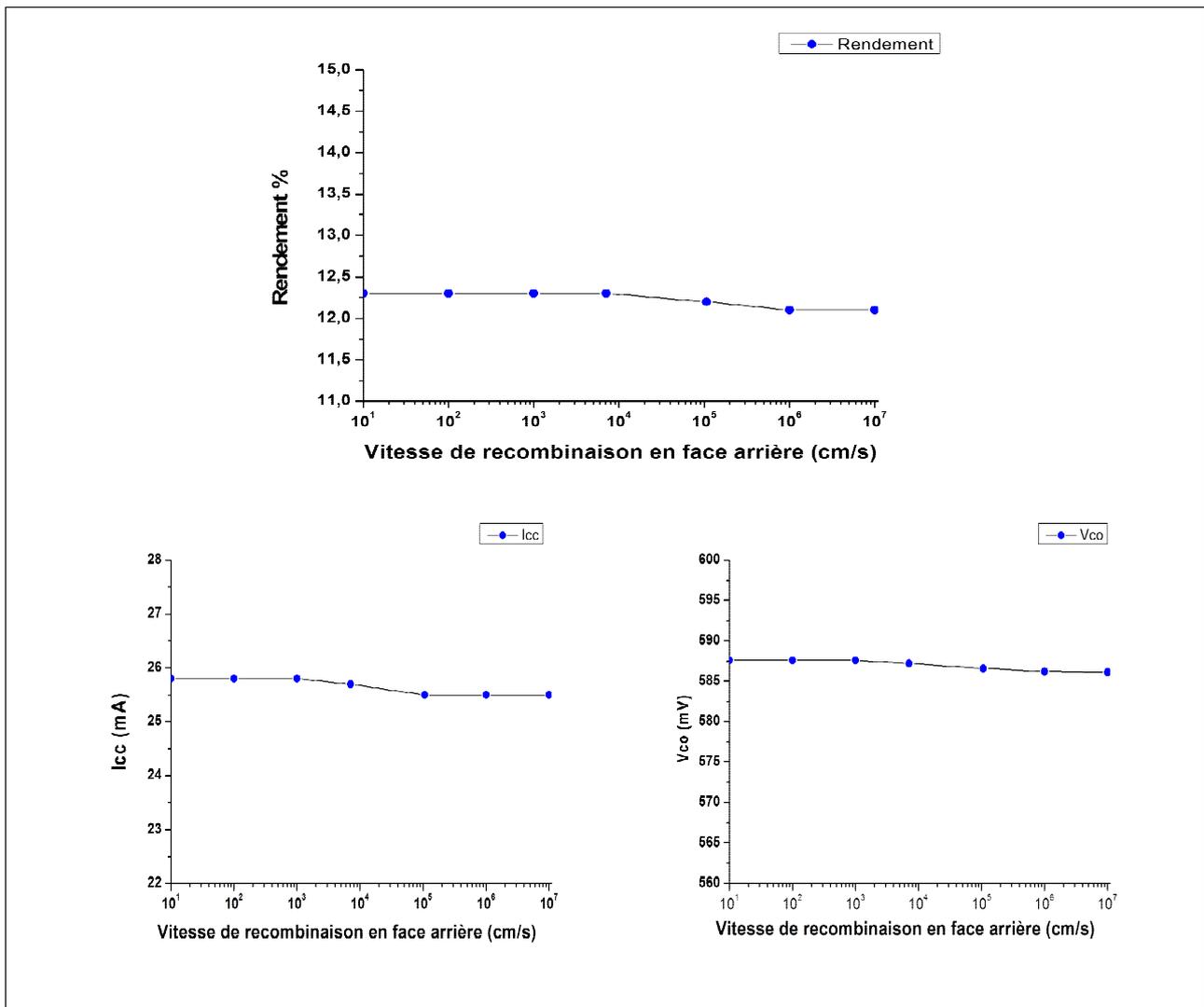


Figure IV-11. Evolution du rendement, du courant de court-circuit et de la tension de circuit ouvert en fonction de vitesse de recombinaison face arrière.

On remarque que les trois paramètres (le rendement, I_{cc} , V_{co}) restent constant quel que soit la vitesse de recombinaison en face arrière, qui est dû à l'élimination de la recombinaison dans cette région.

IV.4.10. Caractéristique $I = f(V)$:

La cellule solaire simulée est à base de silicium polycristallin en couche mince déposée sur un substrat, d'Alumine d'épaisseur $20\mu\text{m}$ dopée à 10^{17} cm^{-3} , avec une face avant texturée. Le BSF est d'épaisseur $4\mu\text{m}$ dopé à 5.10^{19} cm^{-3} . Le substrat a été pris en compte par un coefficient de réflexion de 60%. Les résultats obtenus sont présentés sur la figure IV-12.

$$P_{\text{max}} = 12.3\text{mW} \quad I_{\text{cc}} = 25.8\text{ mA} \quad V_{\text{co}} = 598.8\text{ mV} \quad \eta = 12.3\%.$$

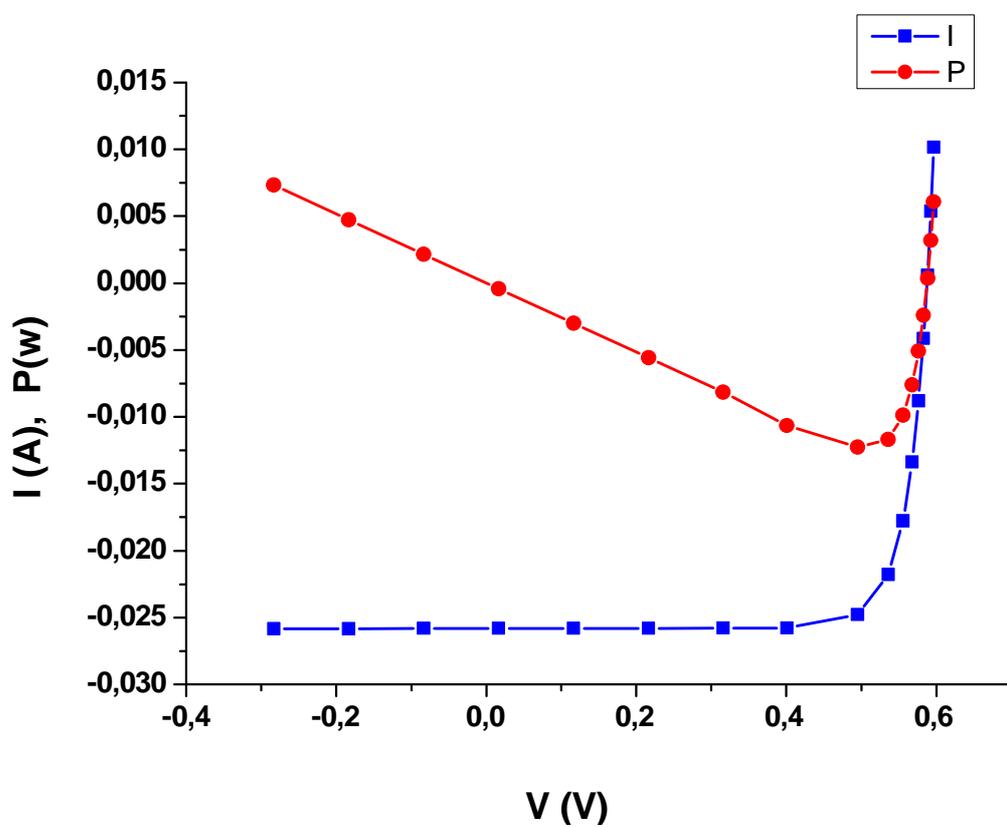


Figure IV-12. La caractérisation I-V.

IV.5.Conclusion :

Dans ce chapitre. Nous avons permis en évidence l'effet des épaisseurs et du dopage de l'émetteur, et de la base sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire à base du silicium polycristallin en couche mince déposée sur un substrat d'Alumine, à l'aide du simulateur PC1D.

Le tableau suivant résume les valeurs optimales de la cellule qui peuvent donner un bon rendement (12.3%) :

Couche antireflet	Valeur optimale
	2.03
	75
épaisseur	
$X_e(\mu\text{m})$	20
Emetteur	
$X_j(\mu\text{m})$	0.2
$N_s(\text{cm}^{-3})$	1.10^{20}
Base	
$\rho(\Omega\text{cm}^{-1})$	3.10^{16}
$\tau(\mu\text{s})$	0.2
BSF	
$X_{BSF}(\mu\text{m})$	5
$C_{BSF}(\text{cm}^{-3})$	2.10^{19}
Passivation	
$S_F(\text{cm/s})$	1000
$S_B(\text{cm/s})$	1000

Tableau IV-3. Les valeurs optimales de la cellule qui peuvent donner un bon rendement.

Conclusion générale

Afin de pallier au problème du coût qui freine le développement des cellules solaires, plusieurs solutions ont été trouvées, notamment dans la technologie des couches minces, le dépôt direct de silicium polycristallin sur substrat étranger correspond aux exigences de bas coût d'une filière de couche mince compétitive.

La taille de grain du polysilicium joue un rôle dominant dans la détermination des propriétés électriques et photovoltaïques du silicium. Les joints de grain agissent en tant que pièges et centres de recombinaison. Pour réduire la densité de ces joints et améliorer le rendement, il faut augmenter la taille de grains qui peut être obtenue par une élévation de la température à des valeurs comprises entre 600°C et 1410°C.

La filière « silicium en couche mince » dans le domaine photovoltaïque est basée sur la réduction de l'épaisseur des cellules solaires, ce qui conduira à l'abaissement du coût des matériaux. Cette réduction doit être accompagnée par un piégeage efficace de la lumière, appelé confinement optique dans la couche mince de silicium polycristallin. Un bon confinement optique obtenu par le recours aux couches anti-reflet et un substrat réflecteur réfléchissant en face arrière.

Les techniques de dépôt de films minces nécessitent l'utilisation d'un substrat céramique qui tolère les températures les plus élevées, jusqu'à la température de fusion du silicium (1410°C). Lequel doit avoir un coefficient d'expansion thermique proche de celui du silicium et un faible coût pour une utilisation à échelle industrielle.

Cette simulation à l'aide du logiciel PC1D a été choisie pour connaître la valeur de variation influençant le rendement de la cellule par les différents paramètres, tels que l'influence de la base, l'émetteur, le BSF et l'effet de passivation en surface.

Les résultats de la simulation obtenus montrent qu'une épaisseur de 20µm du matériau photovoltaïque pc-Si est suffisante pour réaliser une cellule solaire et permettant d'atteindre un rendement de **12.3%**. Ce résultat justifie complètement la diminution de l'épaisseur de la cellule.

الملخص

هذا العمل يهدف الى دراسة خلية شمسية مؤسدة على فيلم رقيق من مادة السيلسيوم متعدد البلورات مثبتة على ركيزة من نوع سيراميك (Alumine) حيث هذا التركيب هو على النحو $n^+pp^+/substrat$.

تمت المحاكاة باستعمال البرنامج PC1D لدراسة تأثير مختلف الوسائط على مردود الخلية، و النتائج المتحصل عليها سمحت لنا بتحقيق مردود قدره 12.3% لسلك من الخلية مقدر ب $20\mu m$.

هذه النتائج تبرر امكانية تخفيض سمك الفيلم ، و كذلك الدور الذي تلعبه ركائز السيراميك على فعالية الخلايا الضوئية من خلال الحبس الشعاعي داخل الطبقة النشطة.

الكلمات المفتاحية: خلية ضوئية، فيلم رقيق، السيلسيوم متعدد البلورات، ركيزة، الومينا ، المردود ، الحبس الشعاعي، PC1D.

Résumé

Le but de ce mémoire est de voir l'influence des différents paramètres d'une cellule solaire à base du silicium polycristallin en couche mince déposé sur un substrat d'Alumine, dont la structure de cette cellule est de type $n^+pp^+/substrat$.

La simulation par logiciel PC1D a été choisie pour connaitre la valeur de variation influençant sur le rendement de la cellule par les différents paramètres tels que, la base, l'émetteur, le BSF et les passivations sur les surfaces.

Après la simulation, les résultats montrent qu'il est possible d'atteindre un rendement convenable (12.3%) avec un film de $20\mu m$ d'épaisseur.

Ce résultat justifie la diminution de l'épaisseur de la couche silicium, ainsi le rôle que jouent ces substrats sur les performances photovoltaïque, permettant un confinement optique favorable dans la couche active.

Mots clés : cellule solaire, couche mince, silicium polycristallin, substrat, Alumine, PC1D, Rendement, confinement optique.