

République Algérienne Démocratique Populaire  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



Université Abou-Bakr Belkaïd-Tlemcen  
Faculté de Technologie  
Département de Génie Electrique et Electronique  
Mémoire Magister en Microélectronique

Thème

Optimisation des émetteurs sélectifs et passivables des  
cellules solaires conventionnelles à base de mc\_si

Présenté par

***BENADLA NADJET***

Soutenu le 08/03/2012 devant la commission d'examen :

Président :	CHABANE-SARI Nesr-Eddine	Professeur.	U. Tlemcen
Examineurs :	GHAFFOUR Kheir-Eddine	Professeur.	U. Tlemcen
	HAMDOUN Abdelkader	M.C.A.	U. Tlemcen
Encadreur	ZERGA Abdellatif	M.C.A.	U. Tlemcen

Année universitaire 2011-2012

## REMERCIEMENTS

*Je remercie ALLAH le Tout-puissant de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce travail.*

*Cette étude a été effectuée au sein de l'Unité de Recherche des Matériaux et des Energies renouvelables (URMER) de la faculté des sciences, sous la direction de Monsieur A.ZERGA, maître de conférences à l'université Abou Bekr Belkaïd-Tlemcen. Je lui exprime particulièrement toute ma reconnaissance pour m'avoir fait bénéficier de ces compétences scientifiques, ses qualités humaines ainsi que ses précieux conseils.*

*J'exprime mes sincères remerciements à Monsieur N.CHABANE-SARI, Professeur à l'Université Abou Bekr Belkaïd-Tlemcen, de me faire l'honneur de présider ce jury.*

*Mes remerciements vont également à Monsieur K.GHAFFOUR Professeur à l'Université Abou Bekr Belkaïd-Tlemcen ainsi que Monsieur A.HAMDOUN Maître de conférences à la même Université, d'avoir accepté d'examiner ce travail. Qu'ils trouvent ici ma sincère reconnaissance.*

*Je tiens à remercier tout particulièrement Madame Z.BENADLA, Maître de Conférences à l'Université Abou Bekr Belkaïd pour son aide précieuse et son soutien moral.*

*Enfin, j'adresse mes vives reconnaissances à tous mes enseignants au département d'Electronique.*

## *Dédicaces*

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

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

*Nadjet*

# Table des matières

REMERCIEMENTS.....	i
<i>Dédicaces</i> .....	ii
Table des matières.....	iii
Liste des Figures.....	vi
Liste des Tableaux.....	viii
Introduction générale .....	1
Bibliographie.....	5
<b>I. Chapitre I : Généralités sur les cellules solaires</b> .....	<b>6</b>
I.1 Introduction.....	7
I.2 Historique .....	7
I.3 Le rayonnement solaire et le nombre de masse .....	8
I.4 La cellule photovoltaïque.....	10
I.4.1 L'effet photovoltaïque .....	10
I.4.2 L'interaction photon/semiconducteur .....	13
I.4.3 jonction P-N.....	15
I.4.4 Les différents rendements d'une cellule photovoltaïque .....	16
I.4.4.1 Rendement quantique externe.....	16
I.4.4.2 Réponse spectrale.....	18
I.4.4.3 Rendement quantique interne .....	18
I.4.5 Recombinaison des porteurs.....	19
I.4.5.1 Recombinaison volumique .....	19
I.4.5.2 Recombinaison surfacique .....	20
I.4.6 Schéma électrique équivalent.....	20
I.4.7 Caractéristiques électriques et paramètres de la cellule photovoltaïque .....	21
I.4.8 Pertes physiques et technologiques.....	23
I.4.8.1 Pertes physiques .....	25
I.4.8.2 Pertes technologiques.....	25
I.4.9 Limitation des pertes.....	26
I.5 Les filières photovoltaïques .....	28
I.5.1 Première génération : cellules solaires au silicium cristallin.....	29
I.5.1.1 Silicium multicristallin.....	30
I.5.1.2 Silicium monocristallin .....	31
I.5.2 Deuxième génération : cellules en couches minces .....	32
I.5.2.1 Cellules amorphe .....	32
I.5.2.2 Cellules CIGS.....	32
I.5.2.3 Cellules CdTe.....	32
I.5.3 Troisième génération : cellules à haut rendement.....	33
I.5.3.1 Cellules photovoltaïques organiques .....	33
I.5.3.2 Cellules à jonctions.....	33
I.6 Conclusion.....	34
I.7 Bibliographie .....	35

<b>II.</b>	<b>Chapitre II : Technologies des cellules solaires à base de mc-si.....</b>	<b>36</b>
II.1	Introduction.....	37
II.2	Techniques de fabrication d'une cellule photovoltaïque conventionnelle en mc-Si	38
II.2.1	Élaboration des lingots de Silicium Multicristallin .....	38
II.2.2	Découpe.....	38
II.2.3	Traitement de surface et texturisation.....	38
II.2.4	Formation de la jonction pn .....	39
II.2.5	Ouverture de la jonction .....	39
II.2.6	Couche antireflet et passivation de la face avant .....	39
II.2.7	Métallisation avant.....	41
II.2.8	Métallisation arrière.....	41
II.2.9	Co-firing.....	41
II.2.10	Soudures et test des cellules.....	41
II.3	Techniques de texturisation.....	41
II.3.1	Texturisation chimique ou humide (W et texturisation).....	41
II.3.1.1	Texturisation alcaline (basique) .....	41
II.3.1.2	Texturisation acide.....	42
II.3.2	Texturisation par Plasma.....	43
II.3.3	Texturisation mécanique .....	44
II.4	Théorie de la diffusion thermique .....	45
II.4.1	Procédés de diffusion .....	46
II.4.1.1	A partir de sources gazeuses .....	46
II.4.1.2	A partir de sources liquides .....	47
II.4.1.3	A partir de sources solides.....	47
II.4.2	Équations de la diffusion .....	48
II.4.2.1	Équations de Fick .....	48
II.4.2.2	Deuxième Loi de Fick.....	50
II.4.2.3	Résolution des équations de Fick.....	51
II.4.3	Mécanismes de diffusion à l'échelle atomique .....	54
II.4.3.1	Mécanisme interstitiel.....	54
II.4.3.2	Mécanisme substitutionnel.....	54
II.4.3.3	Coefficient de diffusion .....	55
II.5	Élaborations des différentes techniques de dépôt de la couche antireflet..	57
II.6	Les techniques de métallisation.....	60
II.6.1	La Photolithographie .....	60
II.6.2	L'évaporation sous vide.....	62
II.6.3	La Sérigraphie.....	63
II.6.3.1	Écrans :.....	65
II.6.3.2	Pâte de sérigraphie.....	66
II.6.3.3	Impression .....	67
II.6.3.4	Etuvage de la pâte.....	67
II.6.3.5	Délaitage de la pâte.....	68
II.6.3.6	Cuisson des contacts .....	68
II.7	Conclusion .....	68
II.8	Bibliographie .....	69

<b>III. Chapitre III : Simulation de la cellule conventionnelle à émetteur homogène .....</b>	<b>71</b>
III.1 Introduction.....	72
III.2 Présentation du package des programmes SILVACO .....	72
III.2.1 Les outils de simulation .....	74
III.2.2 Les outils interactifs .....	74
III.3 Présentation d'ATHENA .....	75
III.3.1 Modèle de diffusion dans ATHENA.....	75
III.3.2 Modèle de diffusion avancée (Advanced Diffusion Models) .....	76
III.4 Présentation d'ATLAS.....	77
III.4.1 Fichiers d'entrées et sorties d'Atlas.....	77
III.4.2 Les composants d'Atlas.....	78
III.4.3 Logique de programmation.....	81
III.5 Simulation de la diffusion du phosphore dans le silicium sous ATHENA	83
III.5.1 Profil expérimental de la diffusion du phosphore dans le silicium.....	83
III.5.2 Résultats de simulation et discussions.....	84
III.5.2.1 Effet de la température sur la diffusion .....	84
III.5.2.2 Effet de la concentration sur la diffusion .....	86
III.5.2.3 Effet du temps sur la diffusion.....	87
III.6 Simulation de la cellule conventionnelle à base de mc-Si.....	90
III.7 Conclusion .....	94
III.8 Bibliographie.....	96
<b>IV. Chapitre IV : Simulation de la cellule à émetteur sélectif .....</b>	<b>97</b>
IV.1 Introduction.....	98
IV.2 Etat de l'art des émetteurs sélectifs.....	98
IV.3 Simulation de la structure à émetteur sélectif sous ATLAS/SILVACO	100
IV.4 Comparaison des deux structures (émetteur sélectif et conventionnel)	105
IV.5 Optimisation de la structure à émetteur sélectif.....	107
IV.6 Conclusion .....	112
IV.7 Bibliographie.....	113
<b>Conclusion Générale.....</b>	<b>114</b>

## Liste des Figures

Figure 0.1 : Evolution de la production mondiale de cellules photovoltaïques (en MWc). .....	2
Figure 0.2 : Représentation de la production de cellules photovoltaïques en fonction du substrat utilisé[3]. .....	3
Figure I.1 : Définition de l’Air Masse [3]. .....	9
Figure I.2: Représentation graphique des spectres AM0 et AM1.5 .....	9
Figure I.3 : Schéma de la structure d’une cellule photovoltaïque en silicium.....	12
Figure I.4: Mécanisme physique de production du courant photovoltaïque. ....	13
Figure I.5 : Transitions interbandes d’électrons dans un semi conducteur. ....	14
Figure I.6 : Coefficient d’absorption du Silicium et profondeur de pénétration des photons en fonction de la longueur d’onde [4]. .....	14
Figure I.7 : Rendement quantique externe d’une cellule photovoltaïque [4]. .....	17
Figure I.8 : Schéma électrique équivalent d’une cellule photovoltaïque réelle. [3]. .....	20
Figure I.9 : (a) caractéristiques courant-tension de la cellule photovoltaïque sous éclaircissement et sous obscurité et (b) représentation conventionnelle de la courbe I(V). .....	22
Figure I.10 : Mécanismes de perte dans une cellule solaire. ....	24
Figure I.11 : Structure d’une cellule photovoltaïque en silicium [10]. .....	27
Figure I.12 : Représentation de l’atome de silicium faisant apparaître : .....	29
Figure I.13 : Représentation de la maille élémentaire de type diamant du silicium [5]. .....	29
Figure I.14 : Cellule photovoltaïque au silicium cristallin [5] .....	30
Figure I.15: Photo d’un substrat de silicium multicristallin (échelle : 10×10 cm <sup>2</sup> ). .....	30
Figure I.16 : Cellule en silicium monocristallin [5] .....	31
Figure I.17 : Cellule photovoltaïque au silicium amorphe [5] .....	32
Figure I.18 : Schéma de principe d’une cellule organique [5] .....	33
Figure II.1 : Enchaînement des étapes de fabrication des systèmes photovoltaïques.....	37
Figure II.2: Schéma d’un four de croissance de lingot POLIX [2]. Les photos montrent le creuset avec (a) le matériau initial et (b) le lingot obtenu [3]. .....	38
Figure II.3 : Schéma résume les différentes étapes de fabrication de cellules photovoltaïques industrielles en silicium multicristallin (les dimensions ne sont pas respectées) [4]. .....	40
Figure II.4 : Pyramides obtenus par une Texturisation basique en utilisant une solution de KOH [7] .....	42
Figure II.5 : Texturisation acide d’une surface de cellule solaire [8] .....	43
Figure II.6 : Texturisation par plasma après 1, 10 et 15minutes [8]. .....	44
Figure II.7: Principe du processus de diffusion [10] .....	46
Figure II.8 : Diffusion dans un four à partir de sources gazeuses. ....	47
Figure II.9: Diffusion à partir de sources liquides. ....	47
Figure II.10 : Procédé de dopage à partir de sources solides. Les plaquettes de verre dopé permettent de réaliser un dépôt sur les substrats montés sur une nacelle (ou porte substrats) [11]. .....	48
Figure II.11: Schématisation d’une surface de silicium traversée par un flux de dopants [12]. .....	49
Figure II.12 : Schématisation d’un volume élémentaire de silicium traversé par un flux de dopant [12]. .....	51
Figure II.13 : profil de diffusion du phosphore dans le silicium [14]. .....	53
Figure II.14 : Mécanismes de diffusion interstitielle [15]. .....	54
Figure II.15 : Mécanismes de diffusion substitutionnelle [15]. .....	55
Figure II.16 : Profil des coefficients de diffusion intrinsèque des principaux dopants [16]. .....	56
Figure II.17 : (a) Réacteur PECVD de type direct et (b) réacteur PECVD de type remote [18]. ..	58
Figure II.18 : Plaques de silicium de 200 mm x 200 mm [22]. .....	60
Figure II.19 : Le principe de la technique de « lift-off » [27]. .....	62
Figure II.20 : Schéma d’un dispositif à évaporation sous vide [29]. .....	63

Figure II.21 : (a) Opération de sérigraphie des contacts, (b) Occupation du masque par la pâte.	64
Figure II.22 : Doigt de contact par sérigraphie; les pyramides de texture sont également évidentes [31].	65
Figure II.23 : Un écran pour transférer le modèle de contact avant à une cellule solaire [32].	65
Figure II.24 : Illustrations des étapes d'impression (mouvement de la racle)	67
Figure III.1 : l'environnement de VWF [2].	72
Figure III.2 : Organigramme de la structure VWF [1].	73
Figure III.3: Principe du modèle de diffusion PLS de Athena [3]	76
Figure III.4 : Fichiers d'entrées et sorties d'Atlas [4].	77
Figure III.5 : Les composants (ou les modules) d'Atlas [4]	78
Figure III.6 : Ordre des groupes des commandes dans un programme Atlas	81
Figure III.7 : Profil SIMS de diffusion expérimental du phosphore dans le silicium [6].	83
Figure III.8 : Profil de diffusion du phosphore dans le silicium multicristallin avec différentes températures à un temps de diffusion de 1h (concentration en fonction de la profondeur de l'émetteur).	85
Figure III.9: : Profil de diffusion du phosphore dans le silicium multicristallin avec différentes températures à un temps de diffusion de 2h (concentration en fonction de la profondeur de l'émetteur).	86
Figure III.10 : Profil de diffusion du phosphore dans le silicium multicristallin avec différentes températures à un temps de diffusion de 1h et concentration de $2 \times 10^{20}$ at. $\text{cm}^{-3}$ (concentration en fonction de la profondeur de l'émetteur).	87
Figure III.11 : Profil de diffusion du phosphore dans le silicium multicristallin avec différents temps à une température de diffusion de $800^\circ\text{C}$ et concentration de $2 \times 10^{20}$ at. $\text{cm}^{-3}$ (concentration en fonction de la profondeur de l'émetteur).	88
Figure III.12 : Profil de diffusion du phosphore dans le silicium multicristallin pour différents temps, à une température de diffusion de $850^\circ\text{C}$ et concentration de $2 \times 10^{20}$ at. $\text{cm}^{-3}$ (concentration en fonction de la profondeur de l'émetteur).	89
Figure III.13 : Structure de la cellule solaire conventionnelle à simuler.	90
Figure III.14 : Structure matérielle d'une cellule solaire conventionnelle (en haut)	92
Figure III.15 : Caractéristique I(V) de la cellule solaire conventionnelle.	93
Figure III.16 : Rendement quantique interne (rouge), externe (vert) en fonction de la longueur d'onde.	94
Figure IV.1 Représentation schématique d'une structure à émetteur sélectif.	99
Figure IV.2 : Structure de la cellule solaire à émetteur sélectif.	100
Figure IV.3 : a) Structure matérielle de la cellule solaire à émetteur sélectif ; b) Vue rapprochée de l'émetteur ;	102
Figure IV.4 : Caractéristique I(V) de la cellule solaire à émetteur sélectif.	104
Figure IV.5 : Rendement quantique interne (rouge), rendement quantique externe (vert).	104
Figure IV.6 : Réponse spectrale : structure à émetteur sélectif (rouge), conventionnelle (noire).	106
Figure IV.7 : Rendement quantique interne : structure à émetteur sélectif (rouge), conventionnelle (noire).	106
Figure IV.8 : Variation du rendement en fonction de la concentration de l'émetteur faiblement dopé.	107
Figure IV.9 : a) Variation du rendement en fonction de la concentration de l'émetteur fortement dopé.	108
Figure IV.10: Variation du rendement en fonction de la concentration de la base.	108
Figure IV.11 : Variation du rendement en fonction de la concentration de la BSF.	109
Figure IV.12 : Largeur du doigt (x) et la largeur de la zone fortement dopée (d).	110
Figure IV.13 : a) Variation du rendement en fonction de la largeur du doigt pour une structure à émetteur sélectif.	110



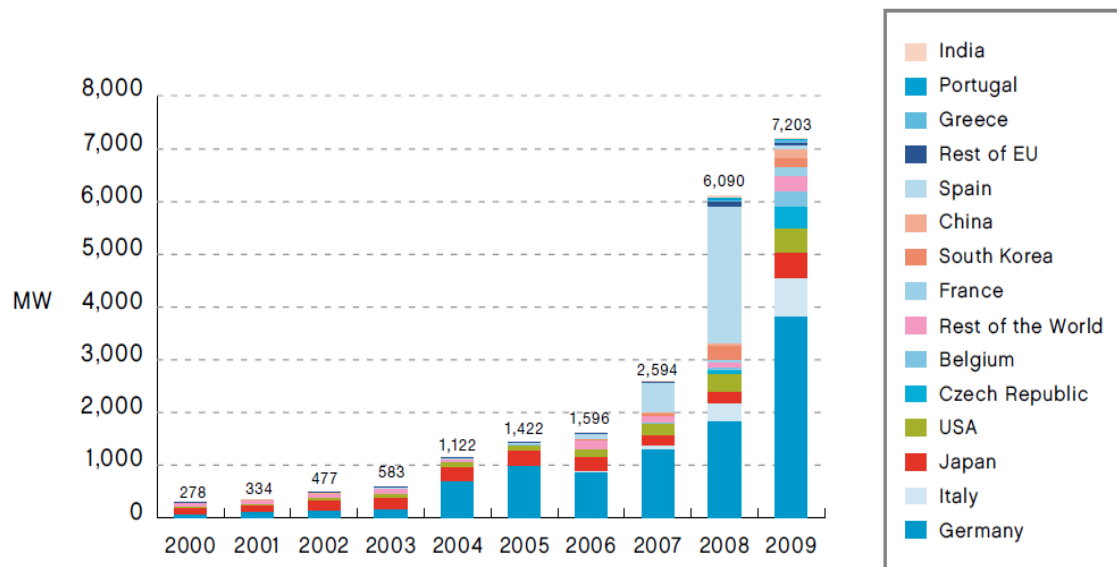
Figure IV.14 :a)Variation du rendement en fonction de la largeur du doigt pour une structure à émetteur homogène. ....111  
 Figure IV.15 : Variation du rendement en fonction de la largeur de la zone fortement dopée....112

## Liste des Tableaux

Tableau II.1 : Valeurs de  $D_i$  selon plusieurs références pour différents dopants (d'après [16])....56  
 Tableau II.2 : Valeurs moyennes de l'indice de réfraction des différents matériaux utilisés.....57  
 Tableau III.1 : Paramètres de la structure simulée (cellule conventionnelle). ....93  
 Tableau III.2 : Paramètres calculés pour une cellule solaire conventionnelle.....104  
 Tableau IV.1 : Paramètres calculés pour une cellule solaire à émetteur sélectif.....105  
 Tableau IV.2 : Paramètres des deux structures .....105  
 Tableau IV.3 : Résultats avec une couche  $\text{SiN}_x\text{:H}$  et double couches, une  $\text{SiN}_x\text{:H}$  l'autre  $\text{SiO}_2$ .109

# **Introduction générale**

La production d'électricité d'origine solaire est une des plus séduisante forme d'énergie renouvelable. Elle a connu un essor fulgurant en ce début du siècle, avec une production annuelle de 1GW pour l'année 2003 et 7.2 GW pour l'année 2009[1], (figure 0.1).

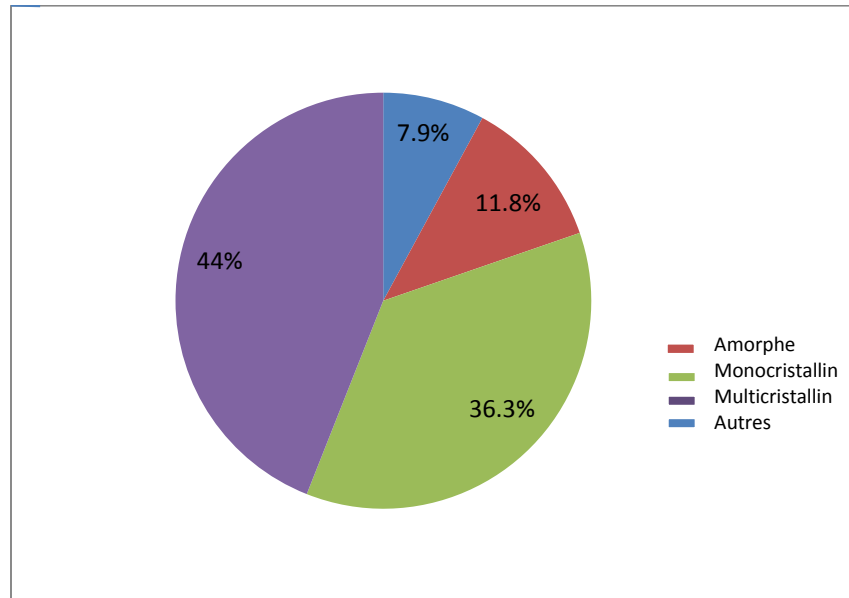


**Figure 0.1: Evolution de la production mondiale annuelle de cellules photovoltaïques (en MWc)[1].**

Les projections les plus courantes prévoient un marché annuel de croissance de 12% pour l'année 2012, et une puissance entre 9 et 21 GW pour 2020. Pour faire face à cette croissance, 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.

A l'heure actuelle, la réalisation des cellules à base de silicium cristallin reste la filière la plus avancée sur le plan technologique et industriel. Ceci est dû à son abondance sur terre sous forme de silice, sa stabilité thermique et son nom toxicité. Cependant, dans le coût du module, le prix du matériau intervient pour environ 40% et de nombreuses études visent donc à réduire les coûts relatifs à la préparation des substrats [2,3].

La figure.0.2 représente la répartition de la production des cellules photovoltaïques.



**Figure 0.2 : Représentation de la production de cellules photovoltaïques en fonction du substrat utilisé [3].**

Cette figure illustre l'exploitation du silicium monocristallin et multicristallin. La tendance est à l'augmentation de la part de ce dernier, grâce à un procédé de croissance moins coûteux. Il est possible de réduire les coûts en développant de nouveaux procédés qui permettent d'augmenter le rendement de conversion, toutefois sans augmenter le nombre d'étapes ni le coût de fabrication.

C'est cette dernière voie que nous allons nous attacher à suivre au cours de ce travail. Sur une base de travail étudiant le phénomène de diffusion du phosphore( $\text{POCl}_3$ ) dans le silicium multicristallin qui présente une forte concentration de dopants en surface, ce qui réduit la résistance du contact, et augmente la vitesse de recombinaison en surface. la connaissance de ces paramètres limitatifs du rendement nous permet de proposer le concept d'émetteur sélectif qui sera comparé à une structure conventionnelle considéré comme référence en simulant avec logiciel SILVACO (2D). Cette simulation va nous aidé à montrer que l'optimisation de l'émetteur d'une cellule solaire à base de silicium multicristallin peut améliorer le rendement de façon significative.

Ce manuscrit se présente de la façon suivante :

- Dans le premier chapitre, nous décrivons les notions préliminaires et le fonctionnement des cellules photovoltaïques industrielles, les pertes physiques et technologiques limitant le rendement de conversion, les différents rendements quantiques ainsi que les différentes filières photovoltaïques.

- Dans le second chapitre, nous exposons les procédés de fabrication des cellules photovoltaïques à base de silicium multicristallin en détaillant les différentes techniques de fabrication (texturisation, dépôt de la couche anti reflet, la diffusion thermique qui nous intéresse avec les lois de Fick, et la métallisation en se basant sur la sérigraphie qui est adaptée au procédé industriel de la cellule photovoltaïque).
- Le troisième chapitre présente les résultats de simulation de la diffusion du  $\text{POCl}_3$  dans le silicium à l'aide du module ATHENA en étudiant les effets de température, du temps et de concentration sur l'émetteur de la cellule. Comme il présente aussi les résultats de simulation de la cellule photovoltaïque à émetteur homogène (référence) à l'aide du le module ATLAS.
- Le quatrième chapitre présente les résultats de simulation de la structure à émetteur sélectif et la comparaison avec la structure de référence en vue d'une validation des résultats obtenus.

## Bibliographie

- [1] : EPIA report « Global market outlook for photovoltaics until 2014 » automn 2011
- [2] : Observer « Baromètre du Solaire Photovoltaïque », Systèmes Solaires, Avril 2004, N°160 PP.69-83.
- [3] : OLEKSIY NICHIPORUK. « Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités »,Thèse en physique. INSA de Lyon, 2005.
- [4] : LUC DEBARGE « Etude de procédés industrialisables de réalisation d'émetteurs sélectifs de cellules photovoltaïques à base de silicium », thèse de doctorat. ULP Strasbourg, 2001.

# **Chapitre I : Généralités sur les cellules solaires**

## I.1 Introduction

Les cellules photovoltaïques (PV) permettent la production de l'électricité directement à partir du rayonnement solaire, sans nécessiter ni pièces mobiles ni production de chaleur et sans entraîner de pollution atmosphérique locale ou globale. Les technologies du photovoltaïque ont pendant longtemps reposé sur l'utilisation du silicium cristallin.

Dans ce chapitre, nous allons présenter les notions indispensables à la compréhension du thème étudié. La première partie de ce chapitre est consacrée à l'histoire du photovoltaïque. La seconde partie introduit l'effet photovoltaïque, la caractéristique courant en fonction du potentiel  $I(V)$ , la réponse spectrale et les pertes limitant le rendement de conversion. Les filières photovoltaïques seront citées dans la troisième partie. Enfin de chapitre, nous abordons l'effet de passivation.

## I.2 Historique

Le développement des cellules photovoltaïques a commencé en **1939** lorsque *Henri Becquerel* a mis en évidence l'apparition d'une tension aux bornes de deux électrodes immergées dans une solution électrolytique quand celle-ci était exposée à la lumière naturelle. Ensuite, *Albert Einstein* a découvert que la lumière n'avait pas un caractère ondulatoire, mais que son énergie était portée par des particules (photons), l'énergie d'un photon est donnée par la relation :

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

Où  $h$  est la constante de Planck,  $c$  est la vitesse de la lumière dans le vide et  $\lambda$  est sa longueur d'onde.

En 1954 *Chapain et al* [1] ont développé la première cellule solaire au Silicium, avec un rendement énergétique de 6%. En 1958, une cellule avec un rendement de 9 % a été mise au point. Ainsi, les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace. Quelques années plus tard, en 1973 la première maison alimentée par des cellules photovoltaïques fût construite au sein de l'Université de Delawar (USA). Dix ans plus tard, la première voiture alimentée par énergie photovoltaïque a parcouru une distance de 4 000 km en Australie. Et depuis cette époque, les recherches sur les cellules photovoltaïques développées à l'échelle industrielle, n'ont cessé de s'accroître. Actuellement, le rendement de conversion d'une cellule à base de Silicium multicristallin dépasse 20%.



### I.3 Le rayonnement solaire et le nombre de masse

Le développement, l'optimisation et la caractérisation de cellules photovoltaïques impliquent la connaissance de la source d'énergie utilisée qui est le soleil. La surface de celui-ci se comporte comme un corps noir à la température d'environ 5800 K ; ceci conduit à un pic d'émission situé à une longueur d'onde de 0.5 pour une puissance d'environ 60 MW/m<sup>2</sup>, soit un total de 9.510<sup>25</sup> W.

Le rayonnement reçu par la Terre en incidence normale avoisine les 1400 W/m<sup>2</sup> avant d'aborder la couche atmosphérique. En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire subit une atténuation et une modification de son spectre à cause des divers facteurs liés à la surface de la terre : absorption par les molécules des différentes couches de l'atmosphère, conditions climatiques, latitude du lieu d'observation et la saison. La couche d'ozone par exemple, absorbe une partie du rayonnement sur une large bande de l'ultraviolet au visible, et l'oxygène présente deux bandes étroites d'atténuation vers 690 et 760 nm. La vapeur d'eau enfin possède de nombreuses bandes d'absorption dans le visible et encore plus dans l'infrarouge. Ces divers effets font que le flux énergétique reçu au niveau du sol se réduit alors à 1000 W/m<sup>2</sup> avec un spectre décalé vers le rouge [2].

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) et elle est donnée selon la relation suivante :

$$AM = \frac{1}{\cos\theta} \quad (1.2)$$

Cette grandeur quantifie la quantité de puissance absorbée par l'atmosphère en fonction de l'angle  $\theta$  du soleil par rapport au zénith.

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

Le spectre standard le plus étudié est AM1.5G correspondant à l'angle égal à 48.2° au dessus de l'horizon, le terme G signifiant global car il tient compte à la fois des radiations directes et diffuses par opposition à AM1.5D qui ne tient compte que des directes. AM1.5G fournit une

irradiance de  $970 \text{ W/m}^2$ , mais il a été arrondi à  $1 \text{ kW/m}^2$ . On donne sur la Figure I.1 un schéma représentatif de quelques irradiances.

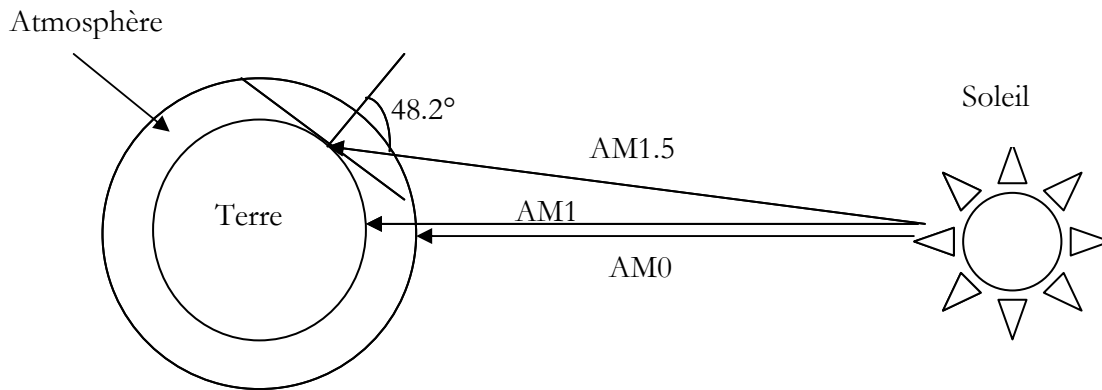


Figure I.1 : Définition de l’Air Masse [3].

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

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

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

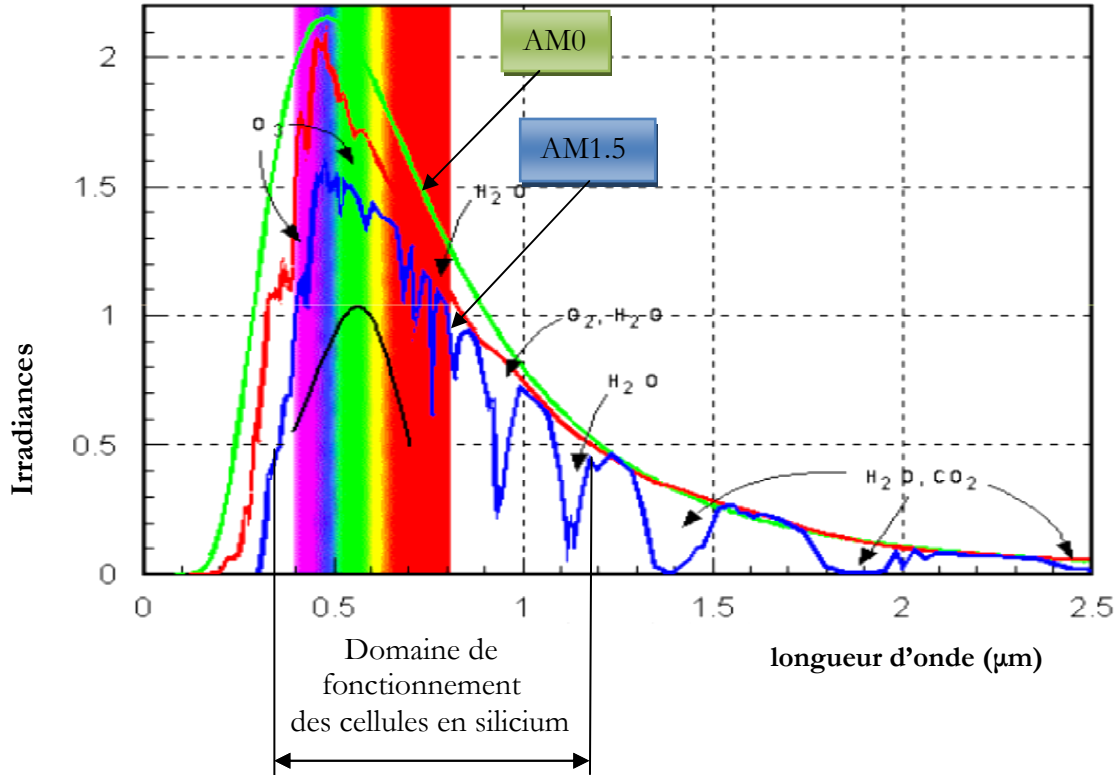


Figure I.2: Représentation graphique des spectres AM0 et AM1.5 d’après le domaine spectral utile aux cellules en silicium est mis en évidence [4].

Selon cette figure (I.2), Il apparaît clairement que la partie la plus importante du spectre solaire à la surface de la terre correspond au domaine du visible et du proche infrarouge. On note cependant que les irradiances définies par le nombre AM ne tiennent toutefois pas compte de la variété des conditions climatiques et de l'altitude du lieu. La terre présente ainsi de grandes disparités dans la répartition de la puissance solaire.

Dans le paragraphe suivant, nous allons introduire la cellule photovoltaïque et expliquer l'effet photovoltaïque.

## I.4 La cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un composant électronique qui, exposé à un rayonnement lumineux (des photons), il produit de l'électricité. L'effet photovoltaïque est à l'origine de ce phénomène. La tension obtenue, fonction de la l'intensité de la lumière incidente, est une tension continue.

Les cellules photovoltaïques les plus répandues sont constituées de semi-conducteurs, elles sont souvent réunies dans des modules solaires photovoltaïques ou panneaux solaires et ceci dépend de la puissance recherchée.

### I.4.1 L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque repose principalement sur trois grands principes dont l'action conjuguée de manière quasi-simultanée engendre la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique :

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

Dans un semi-conducteur exposé à un rayonnement lumineux, un photon d'énergie suffisante arrache un électron, créant au passage un « trou ». Normalement, l'électron trouve rapidement un trou pour se remplacer et l'énergie apportée par le photon est ainsi dissipée. Mais le principe d'une cellule photovoltaïque est de forcer les électrons et les trous à se diriger chacun vers une face opposée du matériau au lieu de se recombiner simplement en son sein. Ainsi, il apparaîtra une différence de potentiel et donc une tension entre les deux faces, comme dans une pile. Pour cela, on s'arrange pour créer un champ électrique permanent au moyen d'une jonction PN entre deux couches dopées respectivement P et N [5]. Un dispositif photovoltaïque doit donc être constitué essentiellement:

- d'un matériau absorbant dans la gamme du spectre solaire et possédant au moins une transition possible entre deux niveaux d'énergie.
- d'une structure de collecte, de résistance électrique la plus faible possible.

L'optimisation de ce dispositif passe par une gamme de fréquence absorbante la plus large possible, couvrant la partie la plus dense du spectre solaire, ainsi qu'une différence d'énergie entre deux niveaux de transition la plus petite qu'elle soit. Leur structure de bande (interdite et de conduction) fait des semi conducteurs le meilleur compromis pour la réalisation des cellules solaires. Il existe actuellement des cellules en Arséniure de Gallium pour les applications spatiales, en Silicium Cristallin pour les applications terrestres et en Silicium amorphe pour des cellules bas coût [6].

Une cellule solaire se compose d'un certain nombre de couches, généralement deux couches principales, l'une est constitué d'un semi conducteur de type N et l'autre de type P et inversement. C'est à la jonction ou interface métallurgique de ces deux couches que la cellule produit de l'électricité. Celle ci est un élément très important dans l'optoélectronique. Ces semi conducteurs sont des matériaux électroniques spéciaux, sensibles à la lumière, ayant deux propriétés principales pour produire l'électricité :

- ✓ Quand la lumière est absorbée, des électrons seront libérés dans le semi conducteur et contribuent au courant.
- ✓ Lorsque les deux semi conducteurs constituent une jonction, un champ électrique s'établit [3].

Les photons incidents créent des porteurs dans les zones n et p et dans la zone de charge d'espace. Les photoporteurs auront un comportement différent selon la région :

- Dans la zone n ou p, les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge d'espace sont "envoyés" par le champ électrique dans la zone p (pour les trous) ou dans la zone n (pour les électrons) où ils sont majoritaires. On aura un photocourant de diffusion.
- Dans la zone de charge d'espace, les paires électron/trou créées par les photons incidents sont dissociées par le champ électrique : les électrons vont aller vers la région n, les trous vers la région p. On aura un photocourant de génération.

Ces deux contributions s'ajoutent pour donner un photocourant résultant  $I_{ph}$ . C'est un courant de porteurs minoritaires. Il est proportionnel à l'intensité lumineuse [3]. Le courant délivré sur une charge par une cellule photovoltaïque éclairée s'écrit :

$$I = I_{obs} - I_{ph} \quad (1.4)$$

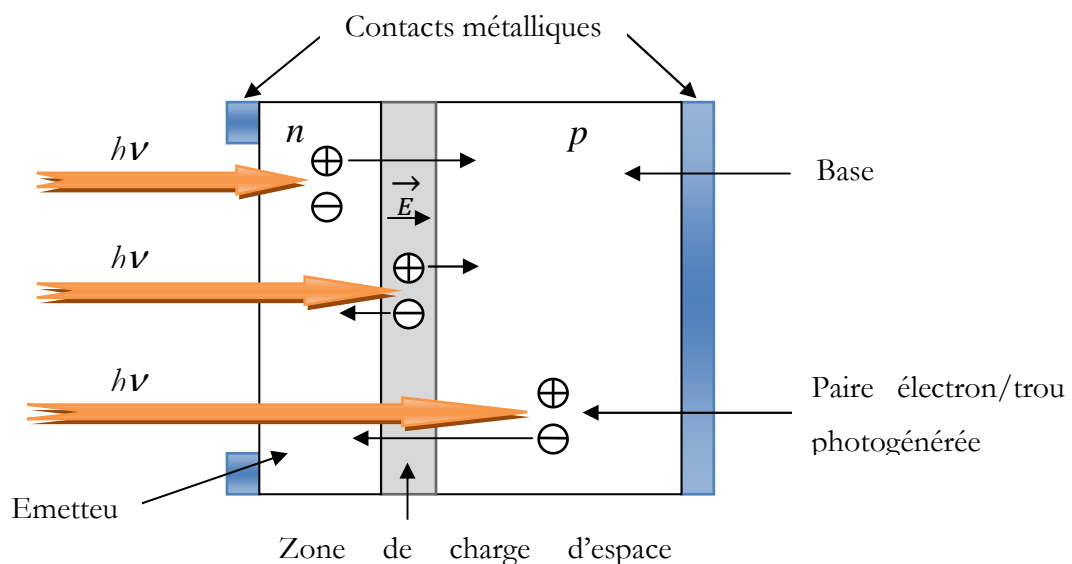
Le courant  $I_{obs}$  est donné par la relation suivante :

$$I_{obs} = I_0 \left( \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right) \quad (1.5)$$

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

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

La Figure I.3 est une illustration schématique des phénomènes de photo génération et de collecte de porteurs pour différentes longueurs d'onde.



**Figure I.3 : Schéma de la structure d'une cellule photovoltaïque en silicium**

On note que la longueur de diffusion des électrons photogénérés est plus grande que celle des trous. La base présente une épaisseur relativement grande ( $\sim 200-300 \mu\text{m}$ ) le plus souvent de type p et va fournir plus de porteurs. Afin de limiter les recombinaisons avec les porteurs majoritaires, elle est faiblement dopée (environ  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ). L'émetteur, de type n, est de faible épaisseur ( $\sim 0.5 \mu\text{m}$ ) et fortement dopé ( $>10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ) afin d'obtenir un champ électrique suffisant dans la ZCE ( $\sim 0.3 \mu\text{m}$ ). L'épaisseur de la cellule doit être choisie de manière à ce qu'un maximum de photons soit absorbé par le silicium, tout en tenant compte des contraintes de découpe du matériau [7].

La Figure I.4 illustre le mécanisme physique de production du courant photovoltaïque.

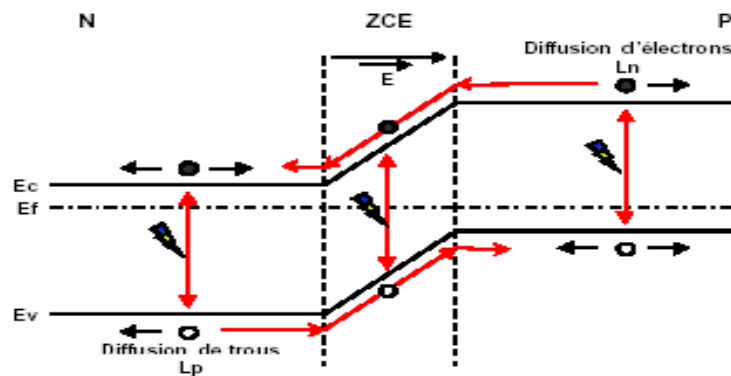
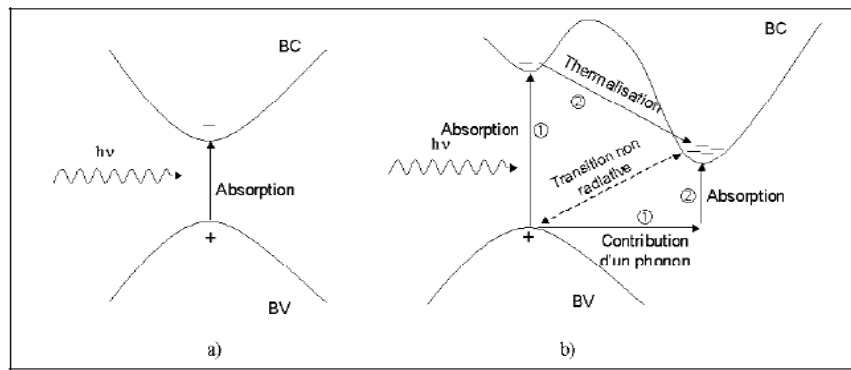


Figure I.4: Mécanisme physique de production du courant photovoltaïque.

## I.4.2 L'interaction photon/semiconducteur

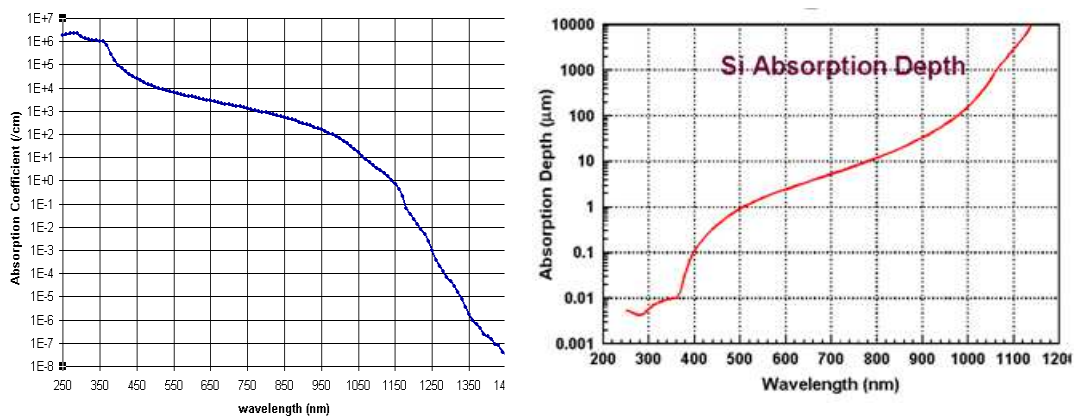
L'écart entre les bandes de valence et de conduction, ou *gap*, représente une caractéristique fondamentale des semi conducteurs. La Figure I.5 présente les différentes transitions possibles selon la nature du gap. Quand le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence coïncident dans l'espace des « k », il s'agit d'un gap direct. Les transitions inter bandes s'effectuent verticalement, et sont donc radiatives (Figure I.5.a). Ceci illustre le fonctionnement des semi conducteurs binaires, tels que le GaAs, beaucoup utilisés en optoélectronique.

Dans le cas du silicium, le gap est indirect : les transitions électroniques entre les extrema des bandes sont obliques, donc non radiatives puisqu'elles impliquent un changement du vecteur d'onde de l'électron. Les électrons du sommet de la bande de valence peuvent toutefois être directement excités vers le minimum relatif central de la bande de conduction grâce à un photon de plus grande énergie. Pour que la transition s'effectue dans le gap indirect, il faut qu'un photon soit au préalable absorbe (ou émis) par l'électron, afin que le vecteur d'onde de ce dernier corresponde au maximum de la bande de valence, pour absorber un photon (Figure I.5.b). Notons que la valeur du gap indirect du Silicium est de 1,12eV à 300K (ce qui correspond à une longueur d'onde de 1107nm), mais celle du premier gap direct vaut 3,4eV soit 365nm.



**Figure I.5 : Transitions interbandes d'électrons dans un semi conducteur.**  
**Le cas a) correspond à un semi conducteur à gap direct,**  
**le cas b) à gap indirect [4].**

L'interaction entre les photons et un semi conducteur se traduit par une caractéristique essentielle du matériau dans le domaine photovoltaïque : Le coefficient d'absorption traduit le nombre de photons absorbés par unité d'épaisseur du matériau en fonction de leur longueur d'onde. La Figure I.6 nous donne celui du Silicium. Nous constatons que pour des longueurs d'ondes inférieures à 365nm, la majorité des photons incidents est absorbée dans les 100 premiers Angström du matériau.



**Figure I.6 : Coefficient d'absorption du Silicium et profondeur de pénétration des photons en fonction de la longueur d'onde [4].**

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

L'interaction photon/électron au sein du semi conducteur se traduit finalement par la génération d'une paire électron-trou, qui modifie localement la conductivité du matériau. La cellule photovoltaïque se comportant comme un générateur, il s'agit à présent de séparer les deux types de porteurs pour éviter qu'ils ne se recombinent entre eux et de les collecter dans un circuit électrique extérieur.

L'absorption est caractérisée par le taux de génération optique, noté  $G$  il s'agit du taux de création de paires électron-trou (en  $\text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ ). Les porteurs minoritaires (électrons dans un matériau de type p et trous dans un matériau de type n) sont métastables et n'existeront, en moyenne, que pour un temps égal à la durée de vie  $\tau$  des porteurs minoritaires. Cette grandeur définit la durée de vie moyenne avant que les porteurs ne se recombinent et est liée à la longueur de diffusion  $L_D$  ainsi qu'au coefficient de diffusion  $D$  du matériau par la relation :

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

### I.4.3 jonction P-N

La formation d'une jonction réalisée par sur-dopage du Silicium représente le principe de base de la cellule solaire. La création d'une barrière de potentiel dans le semi conducteur permet de séparer les électrons et les trous qui sont générés par l'absorption de lumière dans le matériau. Lors de la formation de la jonction, les électrons diffusent vers la zone p et les trous vers la zone n (alignement du niveau de Fermi), afin de tendre vers un équilibre thermodynamique. Le dipôle, crée aux bords de la jonction, entraîne la formation d'un champ électrique qui s'oppose à l'équilibre, à tout déplacement de charges. La polarisation de la jonction en direct permet alors de diminuer la hauteur de la barrière de potentiel et donc l'intensité de champ électrique permettant le passage de porteurs. A l'opposé, une polarisation inverse augmentera la hauteur de barrière. Trois équations décrivant le transport de charges dans un semi conducteur ont été données par *Schockley* :

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

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

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

Tels que :



$\mu_{n,p}$  représente la mobilité des électrons et des trous respectivement,  
 $D_{n,p}$  représente le coefficient de diffusion des électrons et des trous respectivement,  
 $n$ : est la concentration d'électrons libres,  
 $p$ : est la concentration de trous libres.

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

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

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

$G_n, p$  est le taux de génération des électrons et des trous respectivement, et  $R_n, p$  est le taux de recombinaison des électrons et des trous respectivement.

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

$$\Delta \Psi = -\frac{e}{\epsilon} (Nd - Na + p - n) \quad (I.11)$$

Avec  $e, \epsilon, Nd$  et  $Na$  sont respectivement le potentiel électrostatique, la permittivité électrique, la densité de donneurs ionisés et la densité d'accepteurs ionisés.

#### I.4.4 Les différents rendements d'une cellule photovoltaïque

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

##### I.4.4.1 Rendement quantique externe

Le rendement quantique externe, noté EQE (ou RQE), appelé aussi IPCE (Incident Photons to Current conversion Efficiency), est le rendement d'électrons générés par photon incident. Il est donné en fonction de la longueur d'onde dans la figure I.17.

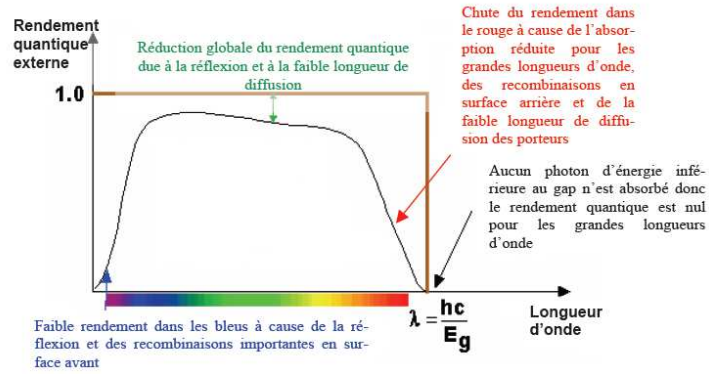


Figure I.7 : Rendement quantique externe d'une cellule photovoltaïque [4].

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

$$\frac{I_{cc}/S}{q} = \frac{J_{cc}}{q} \tag{I.12}$$

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

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

$$\frac{\phi_i/S}{E_{photon}} = \frac{E_e}{hc/\lambda} \tag{I.13}$$

$\phi_i$  est le flux énergétique incident en watt et  $E_e$  l'éclairement à la surface en  $w/cm^2$

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

Et donc :

$$EQE = \frac{1.24 J_{cc}(\lambda)}{\lambda E_e(\lambda)} \tag{I.14}$$

### I.4.4.2 Réponse spectrale

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

$$R_s(\lambda) = \frac{J_{cc}(\lambda)}{E_e(\lambda)}$$

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

$$EQE = R_s(\lambda) \frac{1.24}{\lambda} \quad (I.15)$$

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

### I.4.4.3 Rendement quantique interne

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

$$IQE = \frac{EQE(\lambda)}{1 - R(\lambda)} \quad (I.16)$$

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

$$\eta = \frac{P_{\max}}{\phi_i} = FF \frac{I_{cc} V_{co}}{\phi_i} = FF \frac{J_{cc} V_{co}}{\phi_i} \quad (I.17)$$

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

$$\eta = FF \frac{I_{cc} V_{co}}{\phi_i} \quad (I.18)$$

Ce Rendement maximal peut être optimisé en améliorant les trois termes se trouvant dans le numérateur de l'équation I.18

## I.4.5 Recombinaison des porteurs

### I.4.5.1 Recombinaison volumique

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

#### I.4.5.1.1 Recombinaison SRH

Ce type de recombinaison concerne les défauts cristallographiques et les impuretés métalliques (Cu, Fe, Au, Al,...) présents dans le matériau et reposant les recombinaisons assistés par les multi photons. Il est plus couramment appelé Shockly-Read-Hall. Des niveaux profonds d'énergie dans la bande interdite sont responsables de la chute de la durée de vie des porteurs de charge, en créant des centres de recombinaison. Ils sont caractérisés par leur densité de concentration et leur position énergétique Et dans la bande interdite, leur section efficace de capture des porteurs. Le taux de recombinaison RSH est en fonction du niveau d'injection.

#### I.4.5.1.2 Recombinaison Auger

Recombinaison Auger traduit la transmission de l'énergie de recombinaison d'une paire électron-trou à un autre électron qui se trouve exciter sur un niveau d'énergétique plus élevé. Ce mécanisme se manifeste lorsque la densité de concentration des porteurs libres dépasse certain seuil de densité de l'ordre de  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ .

#### I.4.5.1.3 Recombinaison radiative

Recombinaison radiative ou bande à bande correspond à la recombinaison radiative d'un électron de la bande de conduction avec un trou de la bande de valence, avec émission d'un photon d'énergie  $E_{ph}$ . Ce processus est le facteur dominant dans le semiconducteur à gap direct comme GaAs. Par contre, dans le silicium cristallin (à gap indirect), il est relativement rare. La recombinaison radiative est alors occultée par les deux mécanismes décrits précédemment.

### I.4.5.2 Recombinaison surfacique

L'état électronique de la surface est également critique sur les paramètres de la cellule. La rupture de continuité du réseau cristallin à la surface engendre la présence des liaisons non saturées ou liaisons pendantes, responsable d'une répartition quasi-continue d'états d'énergie dans la bande interdite. La qualité d'une surface est généralement donnée par la valeur de la vitesse de recombinaison de surface.

### I.4.6 Schéma électrique équivalent

L'équation (I.4) correspond à un cas idéal du fonctionnement de la cellule photovoltaïque. Pour tenir compte des limitations de la cellule et calculer le courant réellement délivré à la charge du circuit extérieur, on introduit un modèle comportant deux diodes, une résistance série et une résistance parallèle. Ce modèle est représenté par le schéma électrique donné sur la Figure I.8.

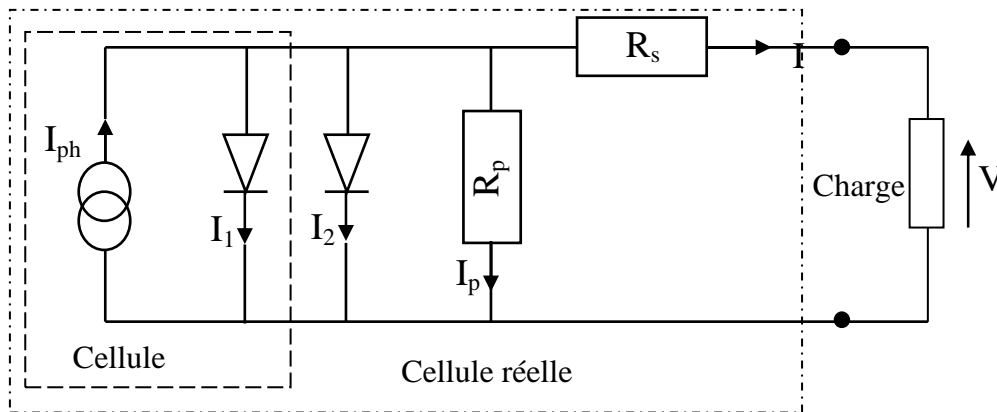


Figure I.8 : Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle. [3].

L'équation du courant devient :

$$I = I_1 + I_2 + I_p - I_{ph} \quad (I.19)$$

$$I = I_{01} \left( \exp\left(\frac{q(V-IR_s)}{n_1 kT}\right) - 1 \right) + I_{02} \left( \exp\left(\frac{q(V-IR_s)}{n_2 kT}\right) - 1 \right) + \frac{V-IR_s}{R_p} - I_{ph} \quad (I.20)$$

Le schéma électrique équivalent d'une cellule solaire est ainsi composé d'une source de courant et de deux diodes en parallèle. La source de courant modélise le courant photogénéré  $I_{ph}$ . La première diode (facteur d'idéalité  $n_1 \approx 1$ ) correspond au courant de diffusion dans la base et l'émetteur.  $I_{01}$  est le courant de saturation de ce phénomène.  $I_2$  est le courant de

génération/recombinaison ou d'effet tunnel dans la zone de charge d'espace, avec  $I_{02}$  le courant de saturation et  $n_2$  le facteur d'idéalité de la seconde diode ( $n_2 \approx 2$ ).

Afin de modéliser les courants de fuite existant dans la structure, la résistance parallèle  $R_p$  est ajoutée. Ces courants de fuite peuvent avoir lieu par exemple lorsque la diffusion des contacts métalliques à haute température perce l'émetteur. Elle peut aussi être due à un court-circuit sur les bords de la cellule. Cette valeur doit être la plus élevée possible. La résistance série  $R_s$  modélise la résistance interne de la cellule et elle est due à la résistivité des différentes couches de la cellule : émetteur, base et contacts métalliques (en particulier aux interfaces métal/semiconducteur). Afin de limiter son influence sur le courant de la cellule,  $R_s$  doit être minimisée en optimisant les contacts métal/semiconducteur et en diminuant la résistivité du matériau. Un compromis est à trouver entre cette dernière et la recombinaison des porteurs, un dopage trop élevé entraîne des recombinaisons trop importantes [8].

#### I.4.7 Caractéristiques électriques et paramètres de la cellule photovoltaïque

Afin d'obtenir un générateur électrique autonome, il faut que la diode soit polarisée en direct. L'effet photovoltaïque est à la fois une création d'un photocourant mais aussi d'une tension qui auto-polarise la diode en direct : on a une génération d'une puissance électrique.

En effet, en circuit ouvert, la photogénération de porteurs entraîne une augmentation du nombre d'électrons du côté n de la jonction et de trous du côté p. La séparation de ces charges induit un champ électrique opposé à celui déjà existant à la jonction. Un nouveau équilibre est obtenu pour lequel une tension existe entre les terminaux du circuit extérieur. C'est la tension de circuit ouvert  $V_{co}$ , pour laquelle le courant photogénéré et le courant d'obscurité se compensent exactement ( $I = 0$ ). C'est la tension maximale fournie par la cellule solaire, permettant d'évaluer le nombre de recombinaisons dans la structure (plus  $V_{oc}$  est faible, plus il y a de recombinaisons).  $V_{co}$  représente la tension en circuit ouvert c'est la tension aux bornes de la cellule en absence de tout courant, sans circuit de charge pour un éclairement fixe. Cette grandeur est donnée par la relation:

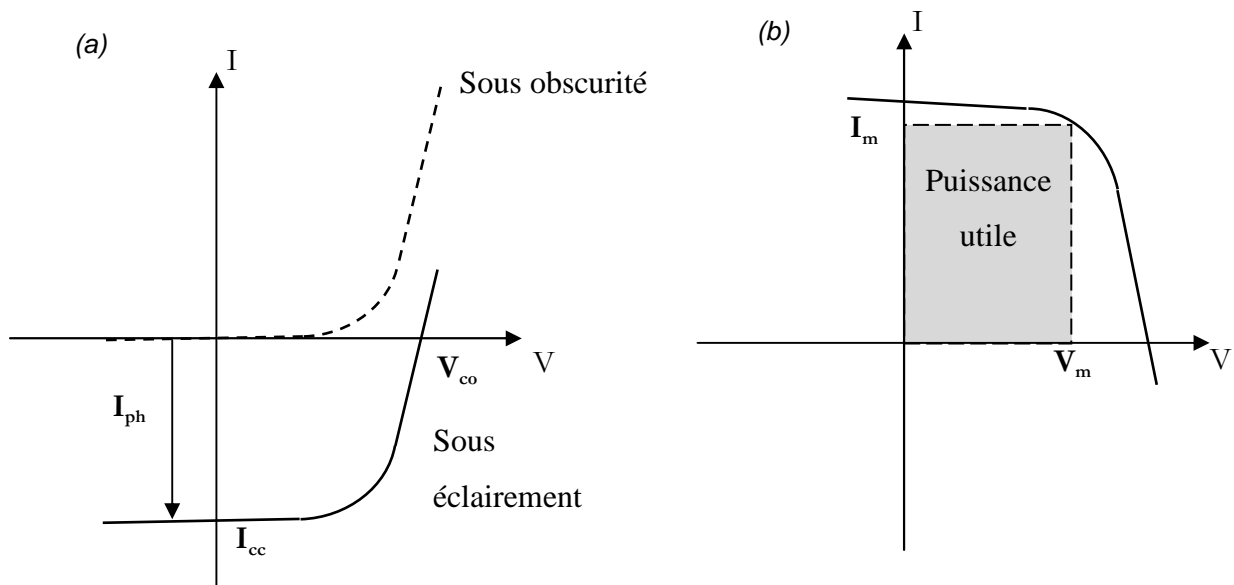
$$V_{co} = \frac{kT}{q} \log \left( 1 + \frac{I_{cc}}{I_0} \right) \quad (I.21)$$

Un autre paramètre important de la cellule est le courant de court-circuit  $I_{cc}$ . C'est le courant maximum que l'on peut extraire de la structure. Il correspond idéalement au courant photogénéré.

Ce courant dépend fortement du taux de génération optique  $G$  et de la longueur de diffusion  $L_D$  des porteurs (et donc des recombinaisons). Cette grandeur est donnée par l'équation analytique :

$$I_{cc} = I_{ph} - I_0 \exp \left[ \left( \frac{qR_s I_{cc}}{nkT} \right) - 1 \right] - \frac{R_s I_{cc}}{R_p} \quad (I.22)$$

La caractéristique  $I(V)$  d'une cellule solaire est la superposition d'un courant de diode sous obscurité et d'un courant photogénéré (voir Figure I.8.a). L'éclairage de la structure a pour effet de déplacer la courbe  $I(V)$  de la diode vers les courants inverses. Puisque la photodiode est considérée comme un générateur, la convention est d'inverser l'axe des courants, comme illustré par la Figure I.9.b. Notons que la cellule photovoltaïque n'impose ni le courant ni la tension de fonctionnement, seule la courbe  $I(V)$  est fixée. C'est la valeur de l'impédance de la charge aux bornes de la cellule qui va imposer le point de fonctionnement. Il est donc essentiel de choisir une charge telle que la puissance délivrée soit maximale. Le maximum de puissance disponible est défini par la tension  $V_m$  et le courant  $I_m$ .



**Figure I.9 :** (a) caractéristiques courant-tension de la cellule photovoltaïque sous éclairage et sous obscurité et (b) représentation conventionnelle de la courbe  $I(V)$ .

La qualité électrique de la cellule est déterminée par le facteur de forme  $FF$ , donné par l'équation suivante :

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{cc} V_{oc}} \quad (I.23)$$

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

Le rendement  $\eta$  est un autre paramètre important pour comparer les performances des photopiles. Il est défini par le rapport de la puissance fournie sur la puissance incidente  $P_{in}$  :

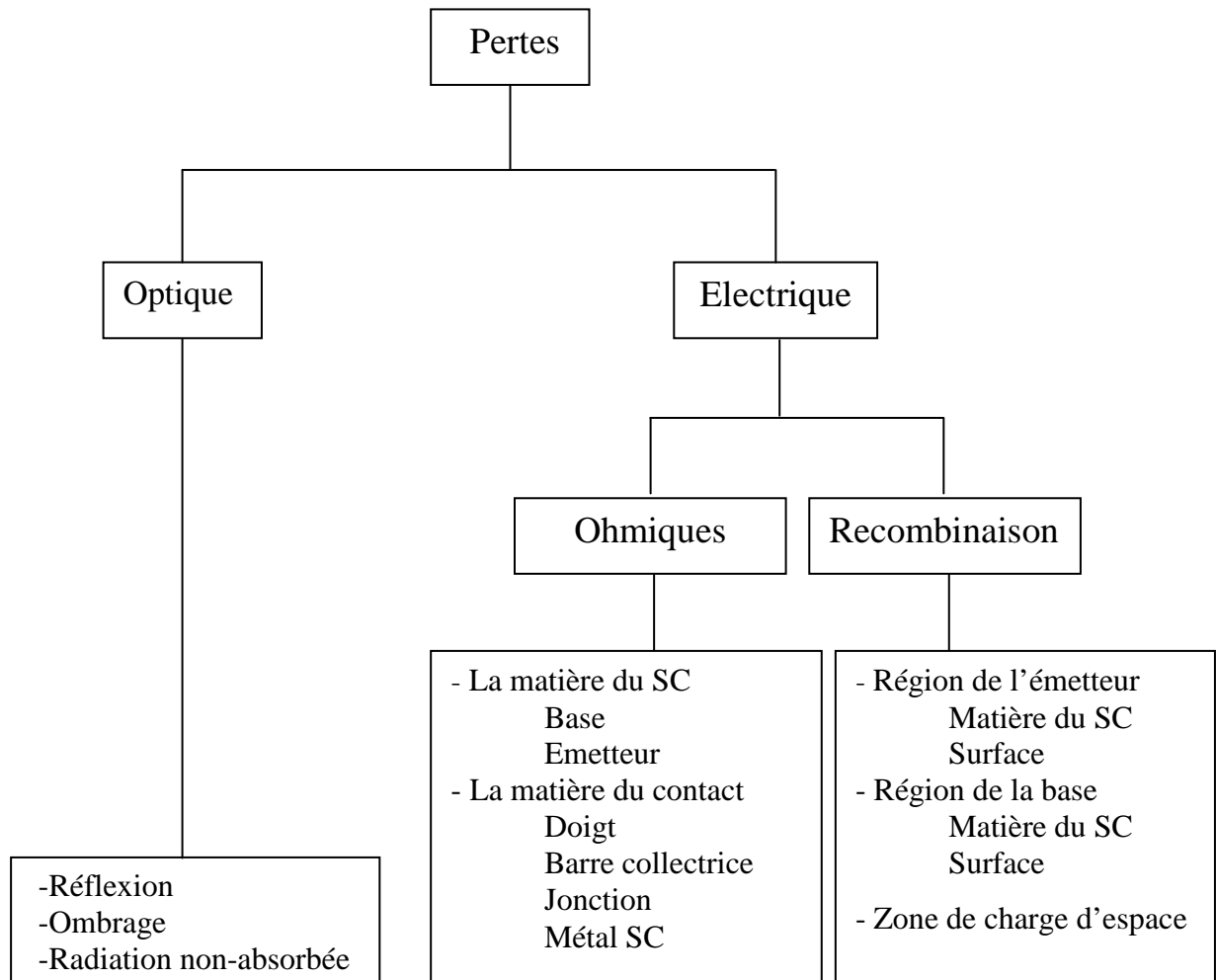
$$\eta = \frac{V_m I_m}{P_{in}} = \frac{FF \cdot V_{oc} I_{cc}}{P_{in}} \quad (I.24)$$

Pour comparer de manière objective le rendement des cellules solaires, la puissance incidente doit être prise comme identique, par convention sous AM1.5 et à 25°C. Afin de comparer la production photovoltaïque avec les autres sources d'énergie, la littérature utilise souvent l'unité Watt crête ( $W_c$  ou  $W_p$  en anglais peak Watt). Elle correspond à la puissance nominale d'une cellule ou d'un module photovoltaïque sous des conditions d'ensoleillement standard (AM1.5) [2].

#### I.4.8 Pertes physiques et technologiques

Depuis les années 80, la majorité des recherches du secteur photovoltaïque s'est concentrée à élever le niveau du rendement d'une façon optimale en se basant sur la réduction maximale des différentes pertes. Les considérations et les calculs suivants correspondent exclusivement aux cellules solaires au Silicium cristallin. La Figure I.10 donne une vue d'ensemble sur les différents mécanismes des pertes. Ceux-ci peuvent être divisés principalement en deux secteurs [4].





*Figure I.10 : Mécanismes de perte dans une cellule solaire.*

Les pertes optiques affectent le rayonnement solaire incident par réflexion et par ombrage de la lumière aussi bien que par une absorption incomplète des longueurs d'onde. Par contre, les pertes électriques ont un effet néfaste sur le courant et surtout, la tension d'une cellule solaire [7].

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

$$\eta = \frac{\int_0^{\lambda_g} P(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} P(\lambda) d\lambda} \cdot \frac{E_g \int_0^{\lambda_g} N(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\lambda_g} P(\lambda) d\lambda} \cdot \frac{qV_{oc}}{E_g} \cdot FF \cdot (1 - R) \cdot \frac{S - S_{m\acute{e}tal}}{S} \cdot \eta_{\alpha} \cdot \eta_{col} \quad (I.25)$$

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.4.8.1 Pertes physiques

- a) **Pertes par les photons de grande longueur d'onde**: tous les photons possédant une longueur d'onde supérieure à celle associée au gap du semiconducteur ( $\lambda > \lambda_g$ ) ne peuvent générer de paire électron/trou et ils sont donc perdus. Les mécanismes d'absorption assistée par photons permettent néanmoins de repousser la limite inférieure de l'énergie correspondant au gap du matériau (1.052 eV au lieu de 1.124 eV dans le cas d'une absorption assistée par un phonon dans le silicium). Sous un éclairement normal AM1.5, ces pertes sont évaluées à 23.5% dans le cas du silicium.
- b) **Pertes dues à l'énergie excédentaire des photons**: un photon absorbé 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 normal AM1.5, ces pertes sont évaluées à 33% de la puissance totale dans le cas du silicium.
- c) **Facteur de tension**: c'est le rapport de la tension maximale développée par la cellule ( $V_{oc}$ ) et par la tension de gap  $E_g/q$ . La tension aux bornes d'une cellule n'est qu'une fraction de la tension de gap à cause notamment de la chute de potentiel au niveau des contacts et de la jonction. Les meilleures valeurs obtenues de  $V_{oc}$  sont de l'ordre de 720mV
- d) **Facteur de forme FF**: les équations courant-tension sont régies par les équations de Boltzmann sous forme exponentielle ( $\exp[qV/kT]$ ). La courbe  $I(V)$  ne peut donc avoir une forme rectangulaire et, même dans le cas d'une cellule idéale, le facteur de forme ne peut dépasser 84%. Ce terme dépend fortement des paramètres technologiques modélisés par les résistances série et parallèle.

### I.4.8.2 Pertes technologiques

- a) **Réfectivité**: une partie de l'énergie incidente est réfléchié par la surface (non métallique) de la cellule. Le coefficient de réflexion R peut être optimisé par la mise en œuvre de traitements de surface adéquats et de couche antireflet.
- b) **Taux d'ombrage**: les contacts métalliques (de surface  $S_{metal}$ ) présents sur la face avant afin de collecter les porteurs entraînent des pertes de puissance puisqu'ils couvrent en partie la surface 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 série (largeur des doigts et du busbar de la grille de métallisation).

- c) **Rendement d'absorption** : à cause de l'épaisseur limitée de la cellule, une part non négligeable de photons, ayant néanmoins l'énergie requise, traverse l'épaisseur de la structure sans être absorbés. Des techniques de piégeage par réflexion sur la face arrière peuvent augmenter de manière significative l'absorption, particulièrement dans le cas des cellules en couches minces.
- d) **Rendement de collecte** : c'est le rapport entre le nombre de porteurs effectivement collectés et le nombre total de porteurs photogénérés. En effet, certains porteurs se recombinent dans le volume ou à la surface de la cellule. Ce phénomène dépend directement de la durée de vie  $\tau$  des porteurs minoritaires. Ces recombinaisons peuvent être réduites en mettant en œuvre différents traitements tels que la passivation, le gettering et autres.

Ces différents facteurs peuvent être optimisés à l'aide de procédés technologiques utilisés lors de la fabrication des cellules photovoltaïques [7].

#### I.4.9 Limitation des pertes

La recherche et les techniques actuelles ont permis de réduire, parfois significativement, les pertes de rendement. La Figure I.11 représente la coupe transversale d'une cellule photovoltaïque en silicium qui comprend les optimisations industrielles les plus courantes :

- a) **L'émetteur** : L'émetteur (dopage type N) est réalisé par dopage en surface d'un substrat de silicium de type P. En pratique, on réalise un émetteur de faible épaisseur mais fortement dopé. Ce fort dopage permet de limiter la résistance du contact metal/semiconducteur (créée par la connexion entre les contacts métalliques et l'émetteur) et de créer un champ électrique suffisant au niveau de la ZCE.
- b) **La texturisation de la surface** : La réflexion est à l'origine de pertes importantes pour la cellule. La texturisation est utilisée 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[8]. 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%.

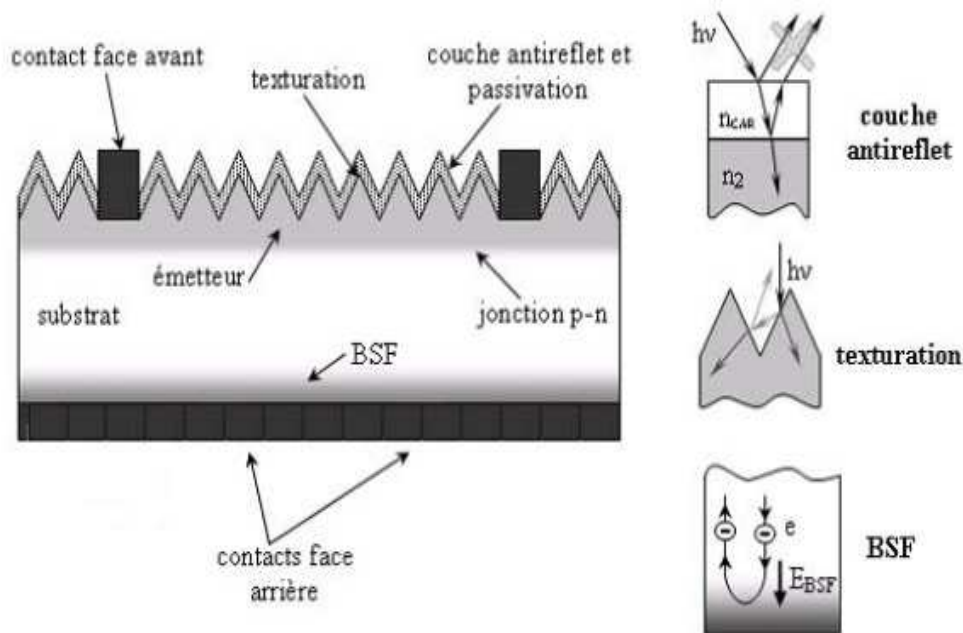


Figure 1.11 : Structure d'une cellule photovoltaïque en silicium [10].

- c) **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 entraînent une forte résistance série qui aura fondamentalement une répercussion sur le facteur de forme de la cellule et sur le courant récupéré [10].
- d) **La passivation :** Sur les surfaces de la cellule, le réseau cristallin s'interrompt brutalement. Certaines liaisons électroniques du silicium sont pendantes et deviennent des centres de recombinaisons pour les porteurs de charges. A ces liaisons s'ajoutent les impuretés présentes dans le réseau cristallin et les défauts du cristal (dislocations, ..). La passivation 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 [10] :

- **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, SiO<sub>2</sub> thermique,...). Les atomes de ce matériau comblent les liaisons pendantes et induisent une diminution de la valeur de  $D_{if}$  (densité d'états d'interface).

- **Passivation par effet de champ**

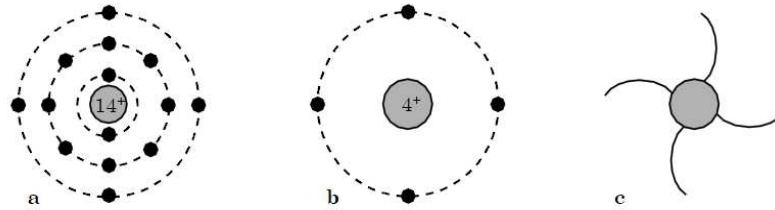
La présence de charges dans certains matériaux déposés (comme dans le nitrure de silicium déposé par plasma) entraîne l'existence d'un potentiel de surface et d'une courbure de bande au sein du silicium (on note  $Q_f$  la densité de charges fixes). Cette courbure réduit la concentration d'un des deux 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  $D_{if}$  et de grandes valeurs de  $Q_f$ . La passivation en volume se fait essentiellement par diffusion d'hydrogène, soit par hydrogénation du substrat, soit par un recuit haute température d'une couche hydrogénée déposée au préalable ( $SiN_x:H$ ).

## I.5 Les filières photovoltaïques

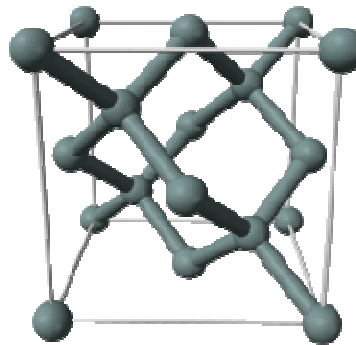
Aujourd'hui, le matériau silicium occupe une place prédominante au sein de l'industrie photovoltaïque grâce à ses nombreux avantages (disponible et facilement extrait à partir du sable). Il possède un oxyde naturel ( $SiO_2$ ) présentant d'excellentes propriétés isolantes et passivantes. Il peut se doper facilement (avec le phosphore ou le bore) et ses qualités photovoltaïques assurent un bon rendement de conversion ainsi qu'une versatilité des formes employées (silicium monocristallin, multicristallin, polycristallin ou amorphe). La différence entre ces matériaux réside dans leur régularité cristallographique; si le silicium monocristallin comporte des tailles de grains parfaitement ordonnés supérieures à 10 cm, elles sont comprises entre 1 mm et 10 cm pour le silicium multicristallin et entre 1  $\mu m$  et 1 nm pour le silicium polycristallin. Le silicium amorphe est quant à lui complètement désordonné.

Son seul véritable inconvénient est son gap indirect à 1,12 eV. Ceci entraîne une absorption du rayonnement plus faible qu'avec un matériau à gap direct. De plus, la largeur de bande interdite du silicium fait qu'il n'est pas le mieux adapté pour capter la part optimale du

spectre solaire [5]. La Figure I.12 représente l'atome de silicium et la Figure I.13 illustre la structure cristalline.



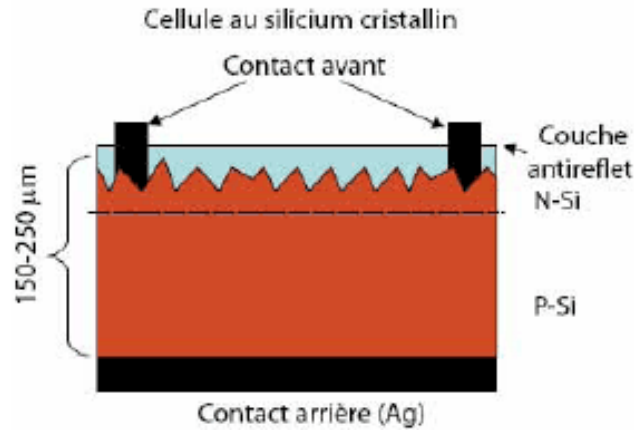
*Figure I.12: Représentation de l'atome de silicium faisant apparaître :*  
*a) les niveaux d'énergie et les électrons les occupants.*  
*b) le dernier niveau d'énergie.*  
*c) les quatre liaisons covalentes possibles [9].*



*Figure I.13: Représentation de la maille élémentaire de type diamant du silicium [5].*

### **I.5.1 Première génération : cellules solaires au silicium cristallin**

Elles sont réalisées à partir de la réduction de la silice provenant du quartz. Le silicium doit être pur à plus de 99%, ce qui nécessite des transformations lourdes : fusion, équarrissage. Il est obtenu sous forme de lingot après transformation puis scié de manière à obtenir des plaques d'une épaisseur de 200  $\mu\text{m}$  environ, Figure I.14. Les cellules à base de silicium cristallin permettent de donner un rendement de 12 à 20%. Elles sont robustes mais coûteuses, absorbent peu de lumière ainsi que la moitié des lingots est jetée lors de la réalisation des plaques.



*Figure I.14 : Cellule photovoltaïque au silicium cristallin[5]*

### I.5.1.1 Silicium multicristallin

Les techniques de production du silicium multicristallin sont beaucoup plus simples que celles du silicium monocristallin, et donc bien moins chères à mettre en œuvre. Néanmoins, la qualité de ce matériau est moins bonne à cause de la présence de joints de grains qui introduisent des zones fortement recombinantes et un taux assez élevé des impuretés métalliques et autres. Ces joints sont constitués par les surfaces adjacentes de grains d'orientations cristallographiques différentes (Figure I.15) et contiennent beaucoup de liaisons pendantes. Ils ont pour effet de réduire la durée de vie globale des porteurs. En outre, ces joints de grains bloquent le flux de porteurs et ils constituent une voie éventuelle d'un courant de fuite à travers la jonction.



*Figure I.15: Photo d'un substrat de silicium multicristallin (échelle :  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ ).*

On peut différencier deux types de défauts dans le silicium multicristallin : les défauts intra-granulaires similaires à ceux rencontrés dans le silicium monocristallin, et les défauts inter-granulaires.

- **Défauts intra-granulaires :**

Ils sont généralement dus aux impuretés, telles que le carbone ou l'oxygène, introduites essentiellement pendant la croissance du lingot. Leur influence sur les propriétés électroniques du silicium est cependant faible, bien qu'elles existent en concentration élevée. Elles peuvent toutefois devenir électroniquement actives en s'associant avec d'autres défauts. Si ces impuretés sont des métaux de transition, des niveaux d'énergie profonds sont introduits dans la bande interdite du semiconducteur, constituant des centres recombinants.

- **Défaut inter-granulaires :**

Ces défauts correspondent aux joints de grains et ils sont une source importante de recombinaisons dans le volume du matériau. Leur quantité dépend de la taille des grains, qui peut varier d'une méthode de production à une autre et qui est fonction de leur localisation au sein d'un même lingot, les grains périphériques sont en général plus petits que ceux situés au centre car ils sont soumis à plus de contraintes thermiques [7].

### I.5.1.2 Silicium monocristallin

Le silicium monocristallin de très haute pureté obtenu par des méthodes tel que le tirage CZ (Czochralski). Ce type de matériau (d'excellentes qualités électroniques) est très coûteux car il faut noter qu'en partant de 1Kg de silice, on n'obtient pas plus de 100g de silicium monocristallin pour une dépense énergétique de l'ordre du MWh. En plus, la moitié de ce cristal est perdue au cours de la découpe en tranches de 300 $\mu$ m d'épaisseur malgré les progrès technologiques. Avec un tel matériau, les rendements de conversion en laboratoire atteignent plus de 22% avec CZ (**Czochralski growth**) et 24.7% FZ (**float-zoning growth**) (procédé PERL).



*Figure I.16 : Cellule solaire au silicium monocristallin [5]*



## I.5.2 Deuxième génération : cellules en couches minces

### I.5.2.1 Cellules amorphe

Le silicium amorphe a une structure atomique désordonnée, non cristallisée, vitreuse, mais il possède un coefficient d'absorption de la lumière environ 1000 fois supérieur au silicium cristallin. Une fine couche de 0,3  $\mu\text{m}$  est donc suffisante pour absorber l'essentiel du spectre visible [2]. Lors de sa transformation, le silicium émet un gaz projeté sur une feuille de verre en présence d'hydrogène pour contrôler le dopage de types n et p. La technique utilisée est la vaporisation sous vide (Figure I.14). Le silicium amorphe reste relativement stable et peut produire de l'énergie même sous ensoleillement diffus et sous faible éclaircissement (et artificiel), il est fabriqué à un prix raisonnable. A côté de ces points avantageux, les modules en silicium amorphe ont une durée de vie plus courte par rapport aux modules en silicium cristallin (>10 ans contre >20 ans). En effet, leur taux de dégradation est presque trois fois supérieur à celui des panneaux en silicium cristallin, en particulier les premiers six mois de fonctionnement [4], et l'inconvénient majeur est son faible rendement en plein soleil.

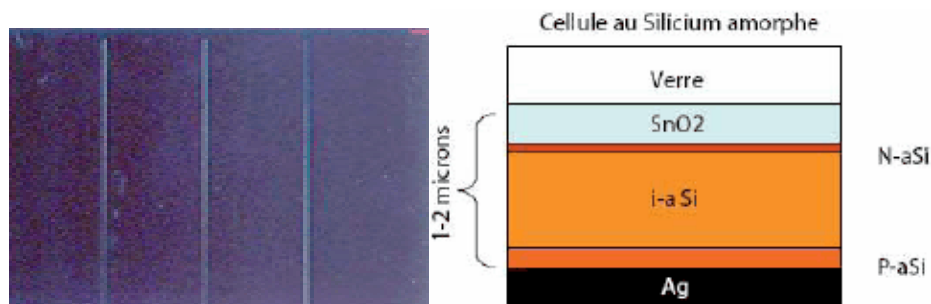


Figure I.17 : Cellule photovoltaïque au silicium amorphe [5]

### I.5.2.2 Cellules CIGS

Le matériau cuivre indium gallium sélénium est le semiconducteur utilisé. La cellule CIGS résultante est polycristalline à hétérojonction. Ces cellules peuvent être réalisées par impression ou par déposition sous vide (spray) qui s'avèrent être des procédés relativement économiques. Le substrat peut être flexible.

### I.5.2.3 Cellules CdTe

Le matériau cristallin est constitué de cadmium et de tellure. La cellule CdTe est à hétérojonction. Le coefficient d'absorption de ce matériau est relativement élevé, ce qui permet de réduire la quantité de matière première.

### I.5.3 Troisième génération : cellules à haut rendement

#### I.5.3.1 Cellules photovoltaïques organiques

Le semiconducteur utilisé est un polymère comme par exemple le polyacétylène. Des recherches sont en cours afin que toutes les couches de la cellule soit de nature polymère. L'objectif est de manipuler un seul type de matériau et donc une même technologie tout au long du processus de fabrication. Les avantages sont une forte absorption optique, des substrats variés ainsi que des techniques de dépôt assez simple. L'inconvénient est que la longévité de ces cellules n'est toujours pas maîtrisée.

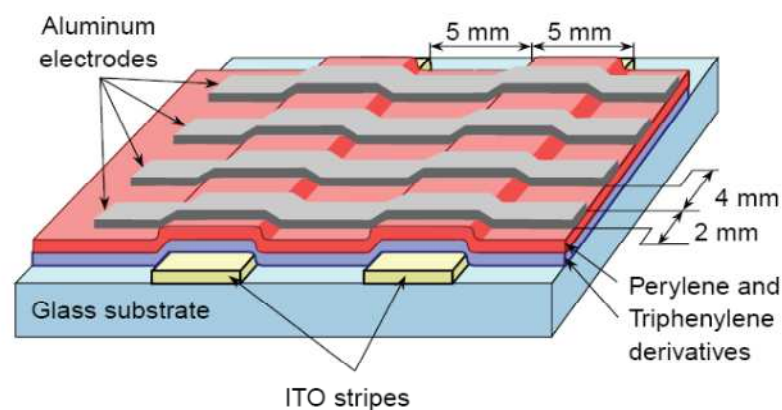


Figure I.18 : Schéma de principe d'une cellule organique[5]

#### I.5.3.2 Cellules à jonctions

Dans ces cellules, sont superposés différents types des cellules précédentes :

- **Cellules tandem** : deux couches de semiconducteurs (amorphe et semi-cristallin) qui absorbent dans des domaines spectraux proches, sont combinées, ce qui améliore le rendement par rapport aux cellules simples.
- **Cellules multi-jonctions** : deux ou trois semiconducteurs différents sont utilisés, un semiconducteur par couche. L'efficacité est de 40 %. Cependant, le coût de revient est de 40\$ par cm<sup>2</sup>. Ces technologies sont surtout employées dans l'espace. Le procédé de fabrication varie en fonction et à l'intérieur des générations. Les cellules à couches minces sont en voie de développement et diverses techniques servent à les produire. L'impression via certains procédés participe à leur industrialisation et doit faire ses preuves vis-à-vis des technologies concurrentes. De plus, dans le cas des cellules multicouches, le dépôt par impression de certaines d'entre elles peut être envisagé [5].

## **I.6 Conclusion**

Ce chapitre a permis de donner au lecteur les notions de base permettant la compréhension des phénomènes liés au sujet de thèse. Nous avons mis en évidence le principe de fonctionnement, le schéma électrique, la caractéristique  $I(V)$  et les différents rendements quantiques ainsi que les pertes physiques et technologiques de la cellule photovoltaïque et leurs limitations. Ensuite, nous avons cité de façon détaillée les filières photovoltaïques.

## I.7 Bibliographie

- [1] : Fatima Abdo « Croissance de couches minces de Silicium par épitaxie en phase liquide à base température pour applications photovoltaïques », thèse de doctorat, INSA de Lyon, 2007
- [2] : Rémi de Bettignies « Cellules photovoltaïques organiques dérivées de nouveaux systèmes conjugués », Thèse de doctorat, Université d'Angers, 2003.
- [3] : Benaïcha Mouna « Etude des matériaux Semi-conducteur III-V Application à la conversion photovoltaïque », Thèse de magister en physique, Université colonel Hadj Lakhdar Batna (Algerie), 2007.
- [4] : Honsberg C. and Bowdens « photovoltaics Devices Systems and Applications [CDROM]. Sydney, Australia. University of new southwales, 1998.
- [6] : Bruno Thuillier “ caractérisation structural des contacts ohmiques realises à partir d’encres métalliques sur cellules photovoltaïques en silicium multicristalin », These de doctorat. INSA de Lyon, 2001.
- [7] : Oleksiy Nichipopuk « Simulation, fabrication et analyse des cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités, thèses de doctorat. INSA de Lyon. 2005
- [8] : Jean-François Lelievre « Elaboration de SiNx :H par PECVD : optimisation des propriétés optiques, passivantes et structurale pour applications photovoltaïques », thèse de doctorat. INSA Lyon, 2001.
- [9]: Chapain D, M, Fuller C.S, Pearson G.L.A « News Silicon pn junction photocell for converting solar radiation into electrical power J.Appl.Phys, 1994. Vol.25, PP. 676-677
- [10] : PN Vinod , Bc Chakravarty, Mohan Lal, Ravikumar “SN Shigh, A novel method for the determination of the front contact resistance in large area screen printed silicon solar cells “ Semi cond Sci. Technal. 15(2000) 286.290
- [11]: P.N Vinod “ Application of power MOSS calculation to estimate the specific contact resistance of the Screen printed Silver ohmic contact of the large area silicon solar cells”, Mater Sci, Mater electron (2007) 18: 805-810
- [12] : Jean-Pierre Charles, Alain Maouad, Abdelatif Zerga “La jonction du Solaire à la Micro Electronique “ rev Energ. Ren Vol.3 (2000)(1-16)

Webographie :

- [5] : filières photovoltaïques/wikipedia.

## **Chapitre II : Technologies des cellules solaires à base de mc-si**

## II.1 Introduction

Nous avons montré précédemment les avantages d'exploitation du silicium, dans ce qui suit nous allons présenter le procédé conventionnel de fabrication des cellules photovoltaïques en silicium multicristallin qui est un compromis entre le coût de production et le rendement de conversion. Le processus de fabrication passe par cinq étapes principales :

- **Etape 1:** Elaboration du Silicium de grade solaire à partir du Silicium métallurgique, lui-même obtenu à partir du quartz.
- **Etape 2:** Cristallisation de ce Silicium solaire pour former des plaques.
- **Etape 3:** Transformation de ce Silicium cristallisé en composant actif pour devenir une cellule photovoltaïque.
- **Etape 4:** Assemblage des cellules photovoltaïques en module.
- **Etape 5:** Groupement de plusieurs modules pour réaliser un système photovoltaïque.

La figure ci-dessous présente l'enchaînement de ces étapes (Figure II.1) [1]:

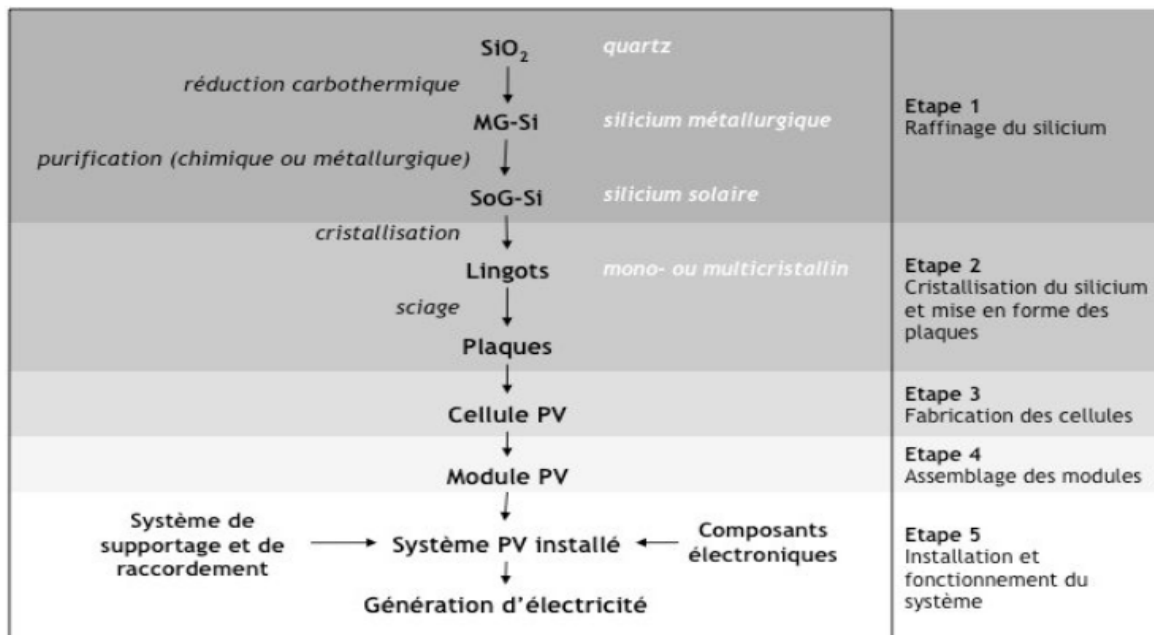
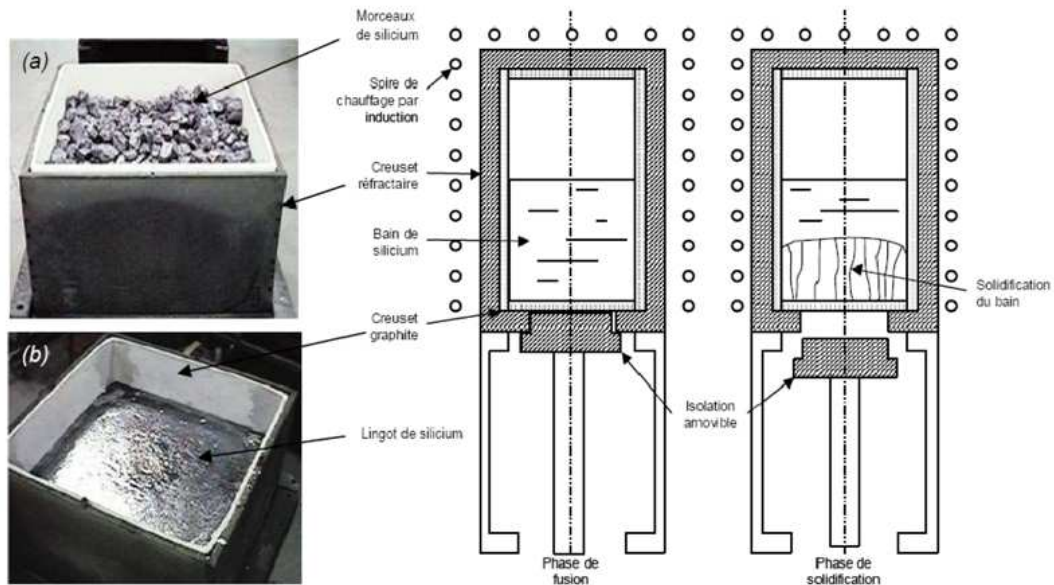


Figure II.1 : Enchaînement des étapes de fabrication des systèmes photovoltaïques

## II.2 Techniques de fabrication d'une cellule photovoltaïque conventionnelle en mc-Si

### II.2.1 Élaboration des lingots de Silicium Multicristallin

Il existe plusieurs procédés de production du silicium multicristallin, le procédé le plus utilisé est le POLIX développé par PHOTOWATT où le lingot est obtenu par cristallisation orientée dans un creuset fixe en graphite soumis à un écoulement de chaleur unidirectionnel.



**Figure II.2:** Schéma d'un four de croissance de lingot POLIX [2]. Les photos montrent le creuset avec (a) le matériau initial et (b) le lingot obtenu [3].

### II.2.2 Découpe

Le silicium se présente sous la forme de gros grains, allongés transversalement à la cellule. Cela accorde aux porteurs minoritaires une longueur de diffusion élevée. Ces lingots sont ensuite découpés en briques grâce à une scie à ruban, qui sont elles-mêmes sciées en plaques minces à l'aide d'une scie à fil.

### II.2.3 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, pour la formation des pyramides qui constituent des pièges pour le rayonnement incident, augmentant ainsi l'absorption.

## II.2.4 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<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, POCl<sub>3</sub> et P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Un verre de phosphore (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) se forme sur tout le pourtour de la plaque, à partir duquel le phosphore va diffuser sur une profondeur moyenne de 0.5 Ωm. On obtient donc une structure n<sup>+</sup>/p/n<sup>+</sup>. 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.2.5 Ouverture de la jonction

Les plaquettes sont superposées les unes sur les autres (~400 à la fois) et gravées latéralement par plasma ou laser. L'émetteur n'est ainsi plus en contact avec la face arrière de la cellule.

## II.2.6 Couche antireflet et passivation de la face avant

Le nitrure de silicium hydrogéné (SiN<sub>x</sub>:H) est ensuite déposé par PECVD afin de faire office de couche antireflet et de passivation. La couche de nitrure de silicium 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 pénètrent moins profondément dans l'émetteur. La technique PECVD permet d'obtenir des vitesses de dépôt relativement élevées à basse température (< 400°C).



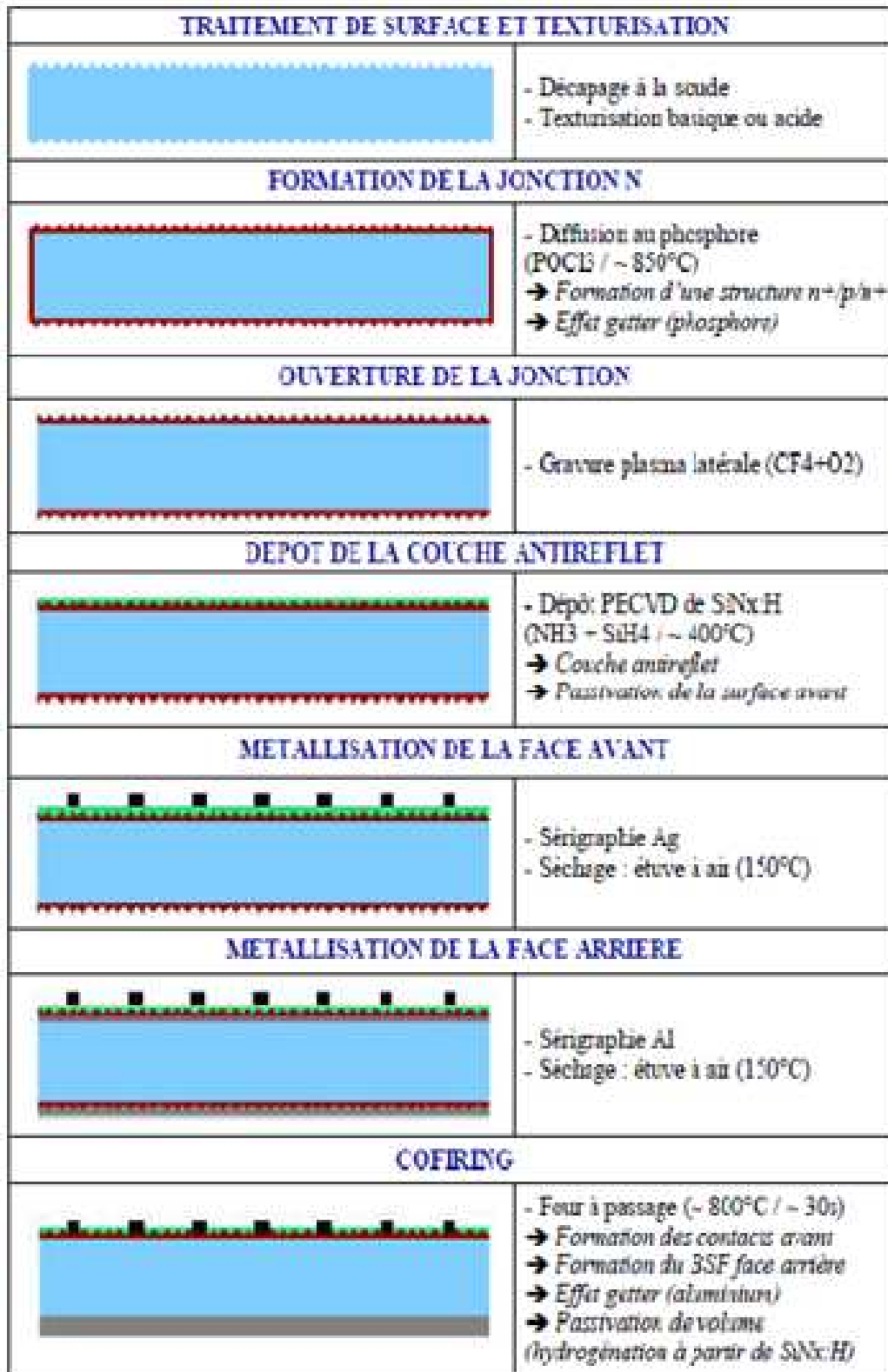


Figure II.3 : Schéma résume les différentes étapes de fabrication de cellules photovoltaïques industrielles en silicium multicristallin (les dimensions ne sont pas respectées) [4].

### **II.2.7 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 150°C pendant un quart d'heure.

### **II.2.8 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°C pendant un quart d'heure.

### **II.2.9 Co-firing**

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

### **II.2.10 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 classées selon leurs performances.

## **II.3 Techniques de texturisation**

Différents procédés sont utilisés pour texturer la surface d'une cellule solaire à base de silicium. L'ensemble de ces procédés est représenté dans ce paragraphe.

### **II.3.1 Texturisation chimique ou humide (Wet texturisation)**

#### **II.3.1.1 Texturisation alcaline (basique)**

Une géométrie exemplaire est une surface constituée de pyramides tétraogonales inversées. Le faisceau incident perpendiculaire à la base des pyramides rencontre la surface des côtés des pyramides sous un angle, qui conduit à une deuxième réflexion vers le plan adjacent dans la pyramide, permettant une deuxième fois l'absorption de la lumière avant qu'elle ne ressorte vers l'air.

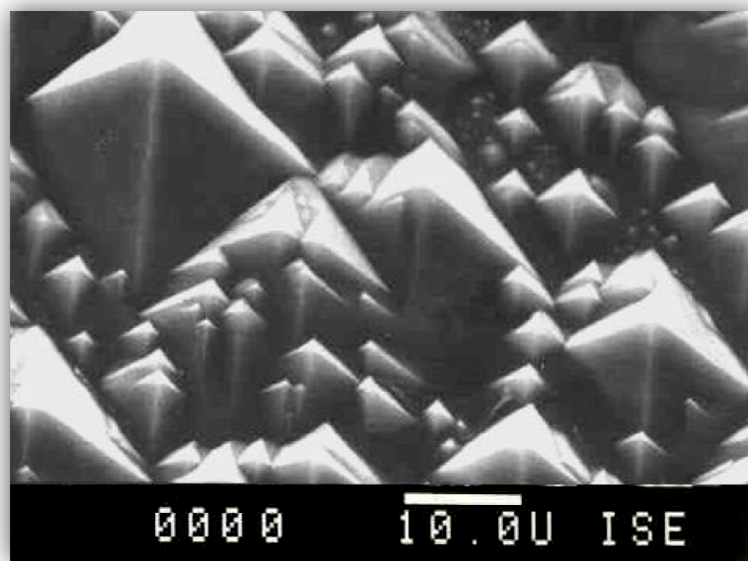
La méthode de texturisation de surface actuellement connue et employée à l'échelle industrielle consiste à utiliser à température élevée une solution aqueuse alcaline à base d'hydroxyde de

sodium NaOH ou de potassium KOH [5]. Cette dernière est basée sur la dissolution chimique du silicium avec formation d'oxyde suivie de celle d'un silicate décrite dans la réaction suivante [6] :



Ces solutions ont la propriété d'attaquer le silicium de façon anisotrope selon l'orientation cristallographique des grains situés en surface, et ainsi modifier la morphologie de surface du silicium [5]. La vitesse d'attaque est environ cent fois plus rapide sur les plans d'orientation cristallographique <100> que sur les plans <111> [5]. Il en résulte une texturisation de la surface sous forme de pyramides régulières situées sur les plans d'orientation cristallographique <100> qui piègent la lumière incidente, et que l'on désigne sous le terme de « macro-texturisation » [5].

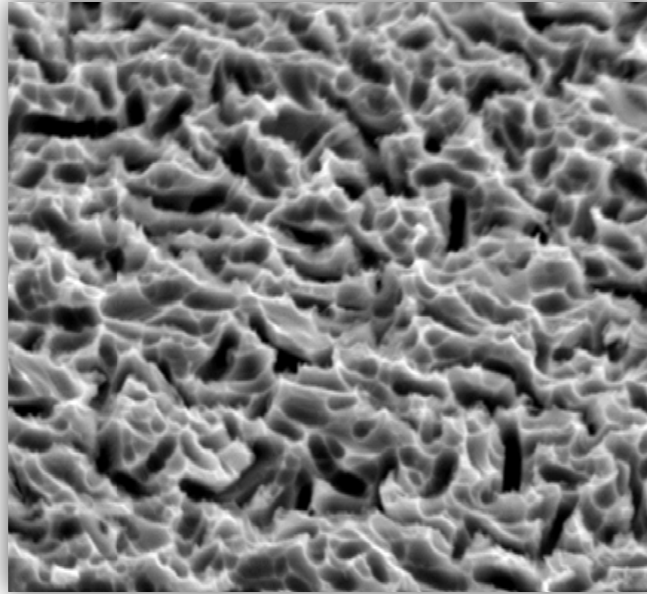
En ce qui concerne le silicium multicristallin, on estime que 20% seulement de la surface est constituée par des grains ayant cette orientation cristallographique, ce qui entraîne une efficacité moindre du traitement vis-à-vis de la réflectivité optique. Cette méthode n'est donc entièrement efficace que dans le cas particulier du silicium monocristallin avec une orientation cristallographique <100> qui est celle de la surface à traiter.



*Figure II.4 : Pyramides obtenus par une Texturisation basique en utilisant une solution de KOH [7]*

### II.3.1.2 Texturisation acide

Une technique plus adaptée est la texturisation acide (Figure II.5) qui présente l'avantage d'attaquer la surface de façon isotropique indépendamment de leur orientation cristallographique.



*Figure II.5 : Texturisation acide d'une surface de cellule solaire [8]*

L'attaque chimique de silicium en milieu acide fluoré HF conduit à la formation d'une micro texturisation [6].

La surface obtenue est caractérisée par la présence de trous d'un diamètre typique du dixième de micron [6].

La vitesse d'attaque est variée selon les proportions des différents acides et ils sont accélérés par la présence de défauts en surface (les dislocations).

Cependant, un contrôle rigoureux de la réaction est nécessaire engendrant une opération plus lente et moins reproductible que la texturisation basique [5].

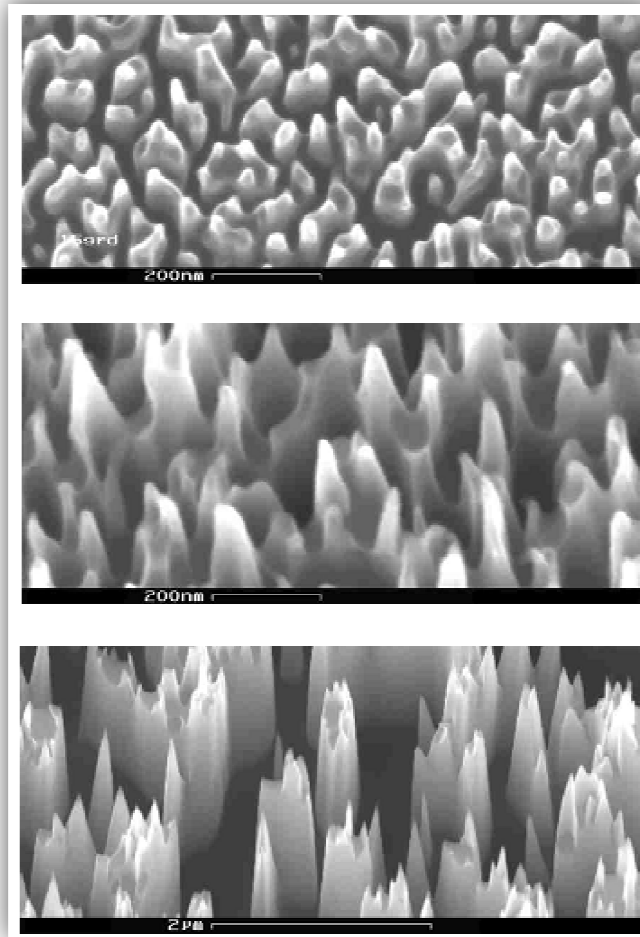
### **II.3.2 Texturisation par Plasma**

Un autre type de texturisation est la texturisation du silicium monocristallin du type n par Plasma au moyen d'un réacteur plasma  $CF_4$ , de type cylindrique. Cette technique a été étudiée pour des conditions optimales du procédé (paramètres du plasma et propreté de l'enceinte).

L'état de surface du silicium résultant de la réaction présente un aspect spongieux de couleur noir (black Silicon).

En effet la morphologie obtenue est constituée de pores (microcavités) qui piègent une très grande partie de la lumière incidente. Les propriétés optiques propres à ce matériau sont similaires à celles des surfaces texturisées par la technique humide (acide et base).

Cette technique peut convenir au procédé de fabrication des cellules photovoltaïques où l'étape de la texturisation de la surface a une grande importance dans l'amélioration des performances électriques et mécaniques.



*Figure II.6 : Texturisation par plasma après 1, 10 et 15 minutes [8].*

Le facteur du temps est très important pour la texturisation. Après une texturisation par plasma pour 1 minute, la surface est constituée de pics homogènes. Ensuite, il y a la formation des pics (monts) après 10 minutes. Après 15 minutes, les pics auront une taille de 7  $\mu\text{m}$ .

### II.3.3 Texturisation mécanique

Une autre technique est la texturisation mécanique par scie multi-fils. La production régulière de canaux alignés en forme de 'V' (ressemblant à la structure d'une surface orientée  $\langle 110 \rangle$  texturisée à la soude) abaisse de manière efficace la réflectivité à une valeur de 8.6 % [6].

Le problème de cette texturisation est qu'elle crée une quantité importante de défauts sur une grande profondeur près de la surface, ce qui nécessite de décaper chimiquement la surface plus en

profondeur. Plusieurs conséquences actuellement non résolues rendent ce traitement moins efficace du point de vue d'une application industrielle. Par conséquent, le besoin d'utiliser des plaquettes de plus grande épaisseur se présente ainsi que la dégradation de la structure géométrique idéale au cours du décapage et la fragilité des plaquettes résultant en une casse importante [6].

## II.4 Théorie de la diffusion thermique

La formation des jonctions  $n^+$  et  $p^+$  est obtenue par dopage. Le dopage dans les semiconducteurs est possible grâce à l'introduction d'atomes (impuretés) dans le cristal, possédant une valence différente de celle des éléments composant le semi-conducteur. Le dopage permet alors de contrôler la concentration de charges et donc la conductivité du semi-conducteur. Il existe différents moyens pour introduire des impuretés pour le dopage des matériaux semiconducteurs dont nous pouvons retenir [9] :

- l'implantation ionique.
- la croissance de couche par épitaxie.
- la diffusion thermique.

Dans le cadre de notre étude, nous nous intéressons à la diffusion thermique. Nous allons citer les procédés de diffusion et détailler les principales équations régissant la théorie de la diffusion thermique.

Dans le processus de diffusion, on utilise généralement, un foyer chauffé électriquement, où un tube en quartz est utilisé. Dans la technologie des cellules solaires photovoltaïques, la température de diffusion varie entre 800°C et 1200°C.

Les plaquettes en silicium à traiter sont déposées dans la partie à température constante du four sur un plateau en quartz. [10]

La Figure II.7 décrit le principe général d'un processus de diffusion usuel. Un liquide contenant les dopants est utilisé, ainsi que des gaz de transport (oxygène et azote). Au début, les plaquettes de silicium sont dopées avec du bore (dopage p) concentré aux alentours de  $10^{15}$  à  $10^{17}$   $\text{cm}^{-3}$ . Ensuite l'émetteur est formé avec un dopage de type n. Le phosphore est couramment utilisé.

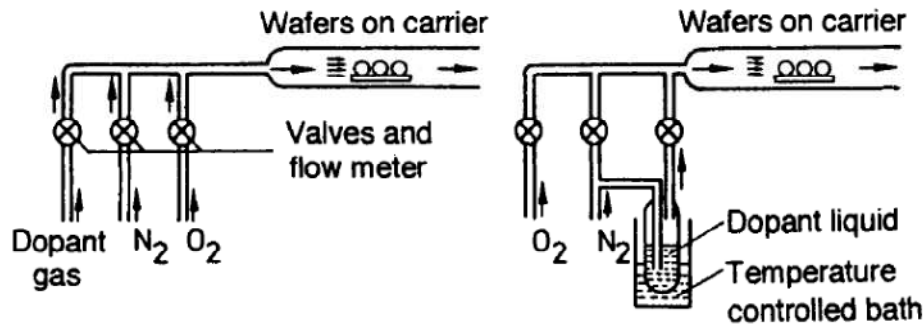
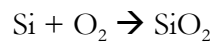


Figure II.7: Principe du processus de diffusion [10]

Le processus de diffusion à partir d'un gaz est utilisé presque exclusivement, par lequel le phosphore est introduit sous forme de phosphine ( $\text{PH}_3$ ) ou d'oxychlorure de phosphore ( $\text{POCl}_3$ ). Ce dernier est introduit en présence d'un gaz de transport neutre (l'azote).

Aux hautes températures (environ  $800^\circ\text{C}$ ), les gaz dopants réagissent avec la surface du silicium où l'oxygène est rajouté suivant la réaction : [10]



L'oxyde de silicium est formé à la surface, ensuite (dans le cas du PH), la réaction suivante est établie :



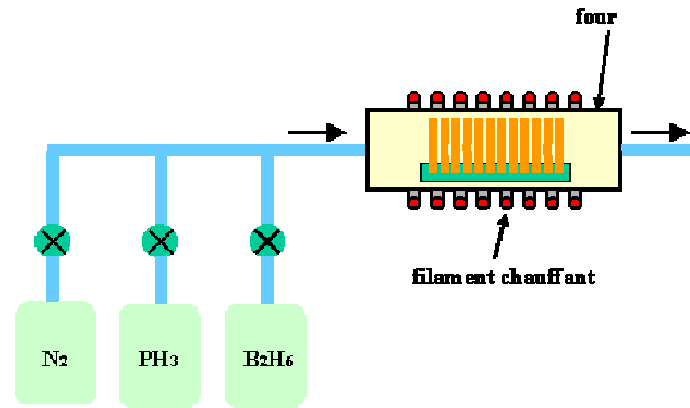
Le  $\text{P}_2\text{O}_5$  formé se combine avec l'oxyde de silicium pour former un verre de phosphore « phosphorus silicate glass » liquide, qui devient par la suite la source dopante.

Dans le cas de l'utilisation du  $\text{POCl}_3$ , le processus est similaire, où un « phosphorus pentoxide »  $\text{P}_2\text{O}_5$  est aussi créé, ainsi que la chlorite.

## II.4.1 Procédés de diffusion

### II.4.1.1 A partir de sources gazeuses

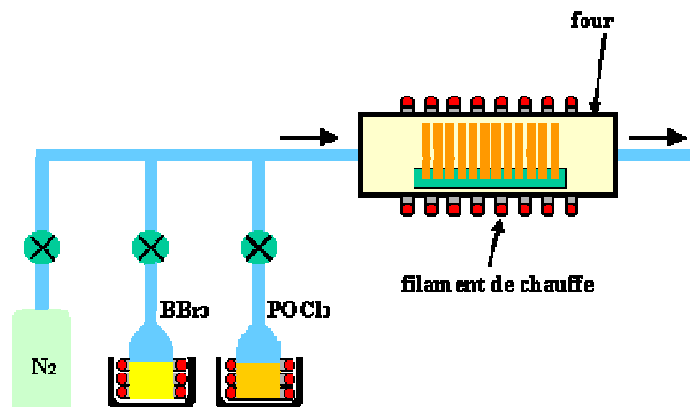
Les sources gazeuses sont les gaz tels que l'Arsine:  $\text{AsH}_3$ , la phosphine:  $\text{PH}_3$  ou le diborane : $\text{B}_2\text{H}_6$  (voir la figure II.8). Notons qu'une circulation en permanence d'un gaz neutre (azote), permet d'éviter toute pollution par des éléments venant de l'atmosphère ambiante. Cet azote doit être très pur aussi afin de ne pas polluer le four.



*Figure II.8 : Diffusion dans un four à partir de sources gazeuses.  
Les gaz dopants sont entraînés par un gaz porteur neutre, tel que l'azote [11].*

#### II.4.1.2 A partir de sources liquides

Bien qu'a priori, les gaz de dopage soient simples à mettre en œuvre, ils sont par contre très dangereux pour l'homme à même quelques ppm de concentration. On préfère donc, utiliser des sources liquides (voir la figure II.9), telles que  $POCl_3$  ou  $BBr_3$  qui sont liquides à température ambiante mais facilement vaporisées pour être introduites dans les fours de diffusion.

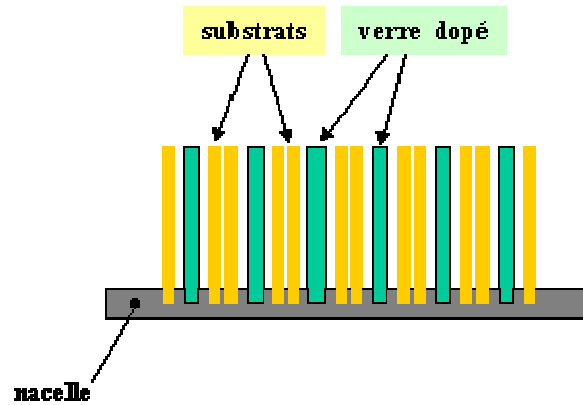


*Figure II.9: Diffusion à partir de sources liquides.  
Les ballons contenant les liquides sont chauffés pour vaporiser le liquide afin de le faire pénétrer dans le four [11].*

#### II.4.1.3 A partir de sources solides

On peut aussi utiliser des sources solides (figure II.10), tels que les verres contenant les dopants : nitrure de bore ou verre dopé au phosphore.





*Figure II.10 : Procédé de dopage à partir de sources solides. Les plaquettes de verre dopé permettent de réaliser un dépôt sur les substrats montés sur une nacelle (ou porte substrats) [11].*

## II.4.2 Équations de la diffusion

Lorsque la température est élevée, et qu'une non-uniformité des variables thermodynamiques est créée (par exemple une variation de la concentration en impuretés dans le matériau), un transport de matière (par exemple des impuretés) s'effectue dans le matériau afin de rétablir l'équilibre thermodynamique. Deux conditions sont donc nécessaires pour obtenir la diffusion, d'une part, une non uniformité de la concentration en impuretés, d'autre part une énergie thermique qui permettra aux impuretés de migrer afin de rétablir l'équilibre en concentration. Afin de modéliser la diffusion, différentes équations d'origine thermodynamique ont été mises au point. Elles traduisent la diffusion à l'échelle macroscopique.

### II.4.2.1 Équations de Fick

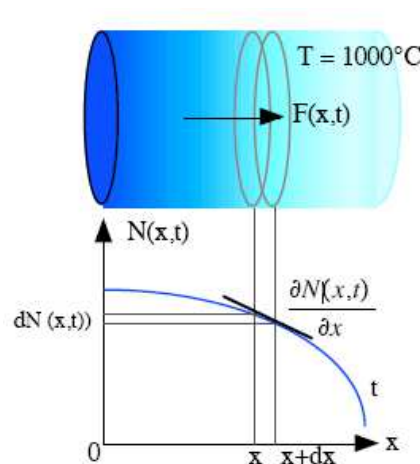
Dans le cas le plus simple, on suppose que l'espèce diffusante n'est soumise qu'au gradient de concentration. Il est possible de montrer par la thermodynamique des processus irréversibles que la force motrice est proportionnelle au gradient de l'entropie partielle de mélange. Une série de calculs mène à l'équation traduisant la première loi de Fick. Le flux d'impuretés  $\vec{j}$  est proportionnel au gradient de concentration en impuretés :

$$\vec{j} = -D\vec{\nabla}(N) \quad (II.1)$$

Où  $\vec{j}$  est le flux d'impuretés en  $\text{cm}^2.\text{s}^{-1}$  [9],  $N$  la concentration en impuretés en  $\text{cm}^{-3}$   $D$  le coefficient de diffusion en  $\text{cm}^2.\text{s}^{-1}$ . Le signe  $-$  traduit le fait que les impuretés se déplacent des zones à forte concentration vers les zones à faible concentration.

Dans le cas général (matériau non isotrope ou subissant une déformation), le flux est une grandeur vectorielle ; le coefficient de diffusion est donc un tenseur. Le silicium est un matériau isotrope (structure cristalline) et s'il n'est pas soumis à des contraintes, il est possible de simplifier la première loi de Fick en une équation à une dimension, le coefficient de diffusion devenant alors un scalaire :

$$J = -D \frac{\partial N}{\partial x} \quad (II.2)$$



**Figure II.11: Schématisation d'une surface de silicium traversée par un flux de dopants [12].**

**La densité de flux des atomes dopants qui traversent cette surface est proportionnelle à leur gradient de concentration.**

- **Flux Généralisés : termes d'entraînement**

Dans la première loi de Fick, il est considéré que l'impureté est seulement soumise au gradient de concentration dans le matériau. Cependant, il peut exister d'autres forces motrices (champ de contraintes, champ électrique...) pouvant entraîner le transport des impuretés. L'impureté acquiert alors une vitesse stationnaire de déplacement dans le matériau. Un deuxième terme est donc ajouté à la première loi de Fick dans le cas d'un matériau isotrope :

$$J = -D \frac{\partial N}{\partial x} + uN \quad (II.3)$$

Où  $u$  ( $cm.s^{-1}$ ) est la vitesse stationnaire moyenne de l'impureté.

Le premier terme (terme Fickien) traduit alors la contribution du gradient de concentration alors que le second (terme d'entraînement) traduit celle de toutes les autres forces motrices. Afin de modéliser le flux des impuretés, il est donc important d'identifier toutes les forces motrices qui

interviennent. On retiendra que dans le cas où l'entraînement est seulement dû à un champ électrique, l'équation (II.3) devient :

$$J = -D \frac{\partial N}{\partial x} + \mu EN \quad (II.4)$$

Où  $\mu$  est la mobilité ( $m^2.V^{-1}.s^{-1}$ ),  $E$  le champ électrique ( $V.m^{-1}$ ). Le signe dépend de la charge portée par l'impureté.

#### II.4.2.2 Deuxième Loi de Fick

Cette loi permet de décrire l'évolution temporelle de la concentration en impuretés dans le matériau. Si l'on suppose que le système est conservatif, c'est-à-dire qu'il n'y a ni perte ni formation d'atomes de l'impureté diffusante, on peut alors établir le bilan de matière suivant :

$$\frac{\partial N}{\partial t} = -\frac{\partial J}{\partial x} \quad (II.5)$$

En remplaçant l'équation équation II.2 dans II.5, on a :

$$\frac{\partial N}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} (-D \frac{\partial N}{\partial x}) = D \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} \quad (II.6)$$

Dans le cas où l'impureté est soumise à plusieurs forces, la deuxième loi de Fick devient :

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} - u \frac{\partial N}{\partial x} - N \frac{\partial u}{\partial x} \quad (II.7)$$

On considère un volume élémentaire  $dV$  de silicium d'épaisseur  $dx$  et de section  $S$  ( $S = 1$  unité) qui voit circuler en  $x$  une densité de flux  $F(x) = J(x)$  d'atomes dopants (Fig. II.12). A un instant  $t$  on dénombre  $N \cdot dx$  atomes de dopant qui vont se fixer dans le volume élémentaire. Durant un temps  $dt$ , on définit une vitesse d'accumulation du dopant  $\frac{\partial N}{\partial t} \cdot dx$  et qui entraîne une modification de flux dans  $(x+dx)$ .

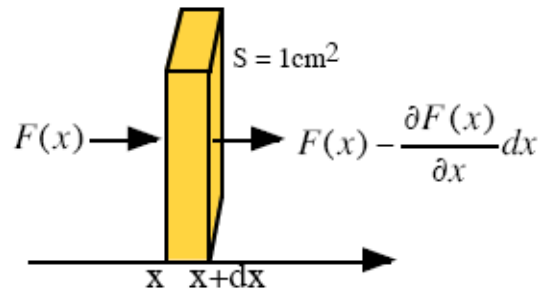


Figure II.12 : Schématisation d'un volume élémentaire de silicium traversé par un flux de dopant [12].

### II.4.2.3 Résolution des équations de Fick

A partir des lois de Fick, il est possible de connaître la variation de la concentration en impuretés en fonction du temps et de l'espace, aussi appelé profil de concentration ou de dopage. Pour trouver une solution unique, il faut établir une condition initiale et deux conditions aux limites. Dans la plupart des cas, il faut faire appel à une résolution numérique. Il existe cependant quelques cas dont la résolution de ces équations reste simple [9].

#### II.4.2.3.1 Diffusion à partir d'une source infinie

La source en impuretés étant infinie, la concentration en impuretés à la surface du substrat est donc constante. Elle sera égale à la solubilité limite de l'impureté à la température de travail, dans le silicium. Ce type de diffusion est appelé pré-dépôt.

Afin de connaître le profil de diffusion, il est nécessaire de résoudre la deuxième équation de Fick. Les conditions aux limites sont :

- La concentration en surface ( $N_s$ ) est constante, ce qui signifie que l'on néglige le régime transitoire où  $N_s$  passe de 0 à sa valeur d'équilibre, soit :

$$N(0, t) = N_s \quad (II.8)$$

- La concentration à grande distance est nulle pendant toute la diffusion soit :

$$N(\infty, t) = 0 \quad (II.9)$$

La condition initiale est :

- La concentration en tout point du matériau est nulle à l'instant initial :

$$N(x, 0) = 0 \quad (II.10)$$

La résolution de la deuxième loi de Fick à partir de ces conditions (équations II.8 à II.10) donne un profil de concentration qui suit alors la fonction erreur complémentaire :

$$N(x, t) = Ns \operatorname{erfc} \left( \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad (II.11)$$

Le terme  $2\sqrt{Dt}$ , homogène à une distance, est appelé profondeur de diffusion de l'impureté. Elle contient environ 90% de la dose totale ayant diffusé dans le substrat.

#### II.4.2.3.2 Diffusion à partir d'une source constante

Dans ce cas, une couche mince d'impuretés diffusantes est déjà présente dans le substrat à l'instant initial. Puis, ces impuretés diffusent dans le substrat. Cette étape est appelée redistribution. La quantité totale d'impuretés  $Q$  est constante et peut s'écrire :

$$Q = \int_0^{\infty} N(x) dx \quad (II.12)$$

La quantité  $Q$  ( $cm^{-3}$ ) peut correspondre à la quantité que l'on aurait déposée par pré-dépôt pendant un temps  $tp$ . La concentration initiale en dopant prendra donc la forme :

$$N(x) = Ns \operatorname{erfc} \left( \frac{x}{2\sqrt{Dtp}} \right) \quad (II.13)$$

L'intégrale II.12 permet donc de déduire la quantité  $Q$  de dopants introduite :

$$Q = \frac{2}{\sqrt{\pi}} Ns \sqrt{Dtp} \quad (II.14)$$

Nous pouvons maintenant calculer le profil de dopage obtenu durant la redistribution, en résolvant la deuxième loi de Fick.

La condition initiale est :

- A  $t=0$ , le profil de concentration correspond à celui obtenu pendant le pré-dépôt :

$$N(x, 0) = \operatorname{erfc} \left( -\frac{x}{2\sqrt{Dt_p}} \right) \tag{II.15}$$

Et les conditions aux limites sont :

- La concentration à grande distance est nulle pendant toute la diffusion, soit :

$$N(\infty, t) = 0 \tag{II.16}$$

- Le gradient de concentration est nul en surface :

$$\left| \frac{\partial N}{\partial x} \right| = 0 \tag{II.17}$$

D'après ces conditions, il est possible de déduire le profil de concentration, qui varie suivant une gaussienne à l'intérieur du substrat :

$$N(x, t) = \frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right) \tag{II.18}$$

Le pré-dépôt et la redistribution sont les deux étapes clés de la diffusion. En contrôlant le couple temps/température, il est possible de contrôler le profil de dopage [13].

La Figure II.13 représente le profil théorique de diffusion du phosphore dans le silicium.

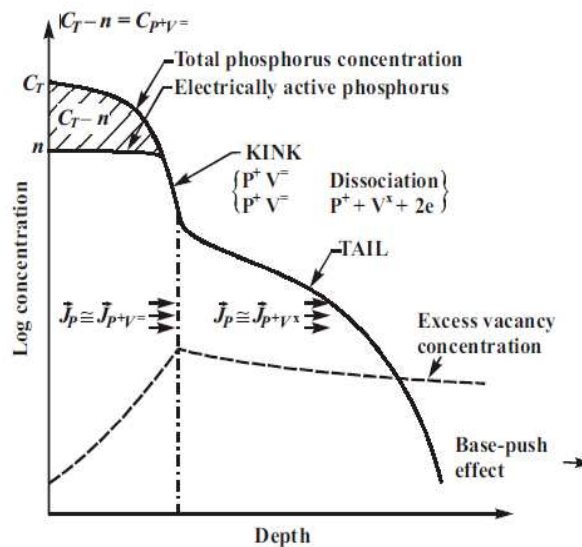


Figure II.13 : profil de diffusion du phosphore dans le silicium [14].

Ce profil est partagé en trois régions distinctes :

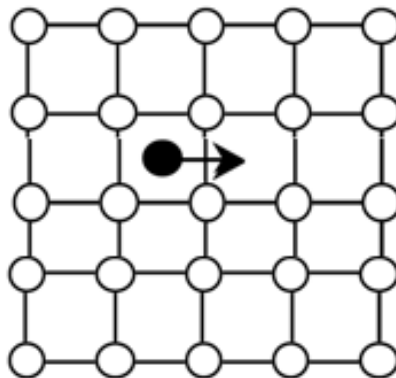
- La région de forte concentration où la totalité de la concentration du phosphore dépasse la concentration des porteurs libres.
- La région « KINK ».
- La région arrière caractérisant l'augmentation de la diffusivité.

### II.4.3 Mécanismes de diffusion à l'échelle atomique

Les phénomènes de diffusion des impuretés peuvent être appréhendés en observant le comportement de celles-ci à l'échelle microscopique. Selon la nature de l'impureté, il existe différents mécanismes de diffusion. Dans tous les cas, l'impureté va effectuer une série de sauts d'un site à l'autre.

#### II.4.3.1 Mécanisme interstitiel

Dans ce cas, l'impureté saute de proche en proche, de site interstitiel en site interstitiel (Figure II.14). L'impureté parcourt alors des distances importantes, ce qui se traduit par des coefficients de diffusion très élevés. Notons dans ce cas que des interactions peuvent apparaître entre les espèces diffusantes et d'autres impuretés. Ces interactions entraînent la formation de complexes, qui vont ralentir la diffusion de l'interstitiel et donc diminuer le coefficient de diffusion.



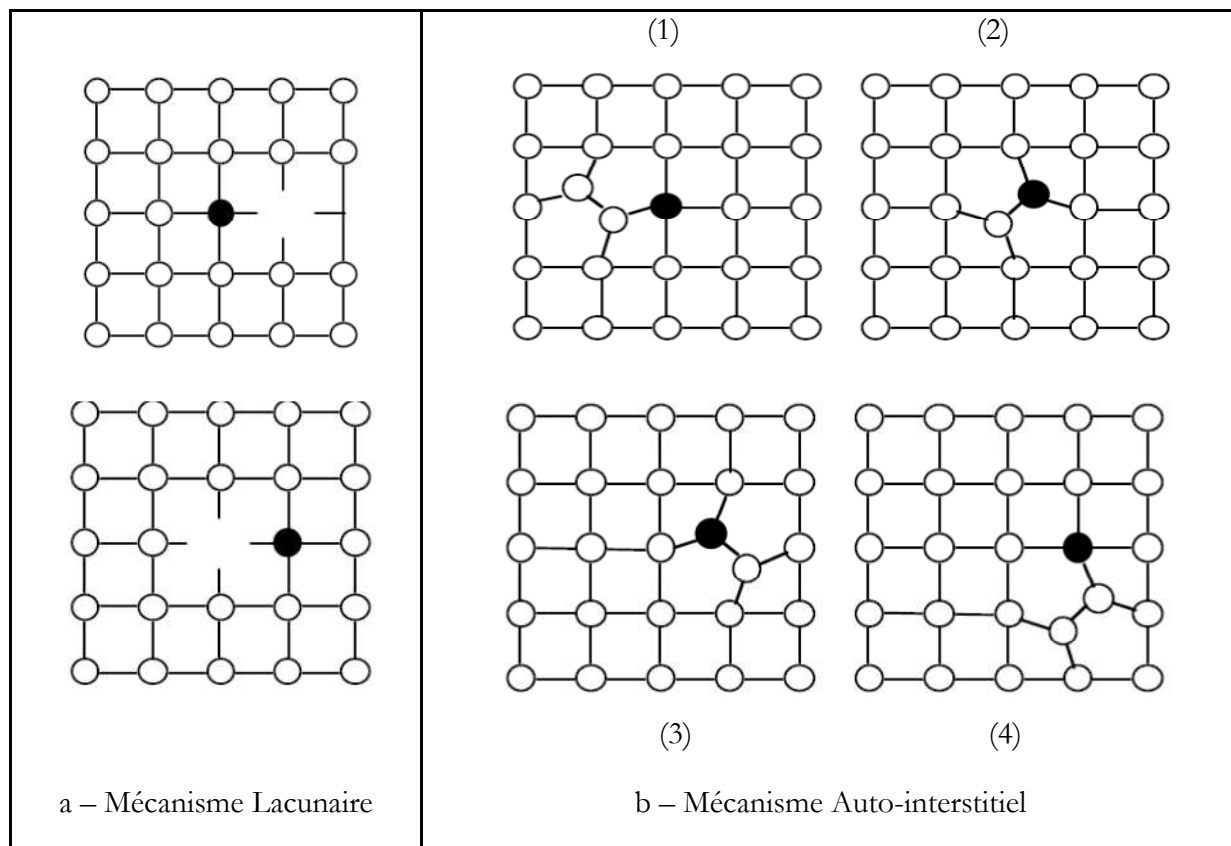
*Figure II.14 : Mécanismes de diffusion interstitielle [15].*

#### II.4.3.2 Mécanisme substitutionnel

Dans ce cas, les impuretés occupent des sites du réseau cristallin (Figure II.15). La diffusion par substitution est donc seulement possible s'il existe des défauts dans le réseau du cristal, lacunes ou auto-interstitiels. La diffusion via des lacunes s'effectue lorsqu'une lacune arrive au voisinage de l'impureté, cette dernière peut prendre alors la place de la lacune (Figure II.15-a).

C'est grâce à un surnombre d'atomes dans le réseau cristallin que l'impureté va diffuser via des auto-interstitiels. La Figure II.15-b décrit le déplacement de l'impureté à travers les auto-interstitiels.

1. Deux atomes du réseau se partagent le même site. L'impureté se trouve alors au voisinage de ces atomes.
2. L'impureté prend alors la place d'un des deux atomes et se retrouve alors en site interstitiel.
3. L'impureté diffuse dans le réseau tout en restant liée.
4. L'impureté se retrouve de nouveau sur un site du réseau.



**Figure II.15 : Mécanismes de diffusion substitutionnelle [15].**

#### II.4.3.3 Coefficient de diffusion

Ces différents mécanismes peuvent expliquer les changements du coefficient de diffusion selon la nature de l'impureté. Il peut donc y avoir des variations de plusieurs ordres de grandeurs du coefficient de diffusion. En effet, selon le mécanisme de diffusion, les conditions de diffusion de l'atome vont être plus ou moins simples. En effet, dans le cas d'une impureté interstitielle, la probabilité que l'impureté trouve un site vacant à son voisinage est égale à un. Par contre, dans le cas d'une impureté substitutionnelle, il faut, d'une part qu'un défaut ponctuel soit présent au voisinage de l'impureté et d'autre part, que le défaut échange son site avec l'impureté. Ceci rend le



mécanisme par substitution plus complexe et donc plus lent, d'où des valeurs du coefficient de diffusion plus faibles. De plus, les énergies d'activation varient selon le nombre de liaisons à rompre. Enfin, la diffusion d'une impureté diffère selon le matériau dans lequel elle se produit, la Figure II.16 décrit ainsi les coefficients de diffusion des impuretés dans le silicium.

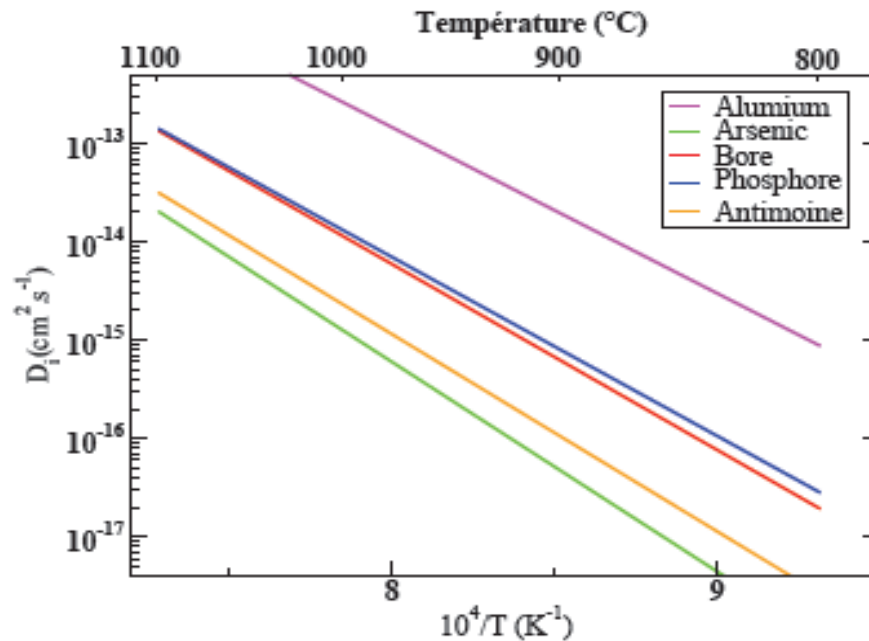


Figure II.16 : Profil des coefficients de diffusion intrinsèque des principaux dopants [16].

Enfin, le tableau II.1 donne les équations permettant de déterminer le coefficient de diffusion de différents dopants dans le silicium, en fonction de la température.

Tableau II.1 : Valeurs de  $D_i$  selon plusieurs références pour différents dopants (d'après [16])

Dopants	$D_i \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
B	$7.87 \exp\left(-\frac{3.75 \text{ eV}}{k T}\right)$
As	$68.6 \exp\left(-\frac{4.23 \text{ eV}}{k T}\right)$
P	$2.53 \exp\left(-\frac{3.61 \text{ eV}}{k T}\right)$
Sb	$12.9 \exp\left(-\frac{3.98 \text{ eV}}{k T}\right)$
Al	$4.73 \exp\left(-\frac{3.35 \text{ eV}}{k T}\right)$

Où  $D_{i0}$  est considéré comme une constante et est appelé le facteur de fréquence ou le facteur d'entropie car il est relié à la fréquence de saut atomique du dopant.  $D_i$  peut se mettre sous la forme d'une relation d'Arrhenius :

$$D_i = D_{i0} \exp\left(-\frac{Q_A}{kT}\right) \quad (II.19)$$

$Q_A$  : s'appelle l'énergie d'activation de diffusion qui est une grandeur caractérisant le degré de difficulté de la diffusion d'une impureté.

## II.5 Élaborations des différentes techniques de dépôt de la couche antireflet

Pour augmenter le rendement de la conversion photovoltaïque, il faut optimiser l'absorption du flux solaire tout en réduisant les pertes optiques par réflexion ou par transmission. Le moyen de réduire le taux de réflexion couramment utilisé est d'ajouter en surface un film antireflet qui diminue le renvoi de rayons lumineux vers l'atmosphère, et donc d'absorber une plus grande partie du flux lumineux. Le principe sur lequel repose le dépôt d'une couche antireflet est d'adapter l'indice de réfraction de la couche de manière à produire des interférences destructives à une certaine longueur d'onde selon l'épaisseur de la couche [3]. Le matériau utilisé comme couche antireflet doit être non absorbant. Généralement les matériaux utilisés sont les oxydes de silicium  $\text{SiO}_2$ , de titane  $\text{TiO}_2$ , de tantale  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ , le nitrure de silicium  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , le sulfure de zinc  $\text{ZnS}$  et le fluore de magnésium  $\text{MgF}_2$ , ainsi que d'autres matériaux.

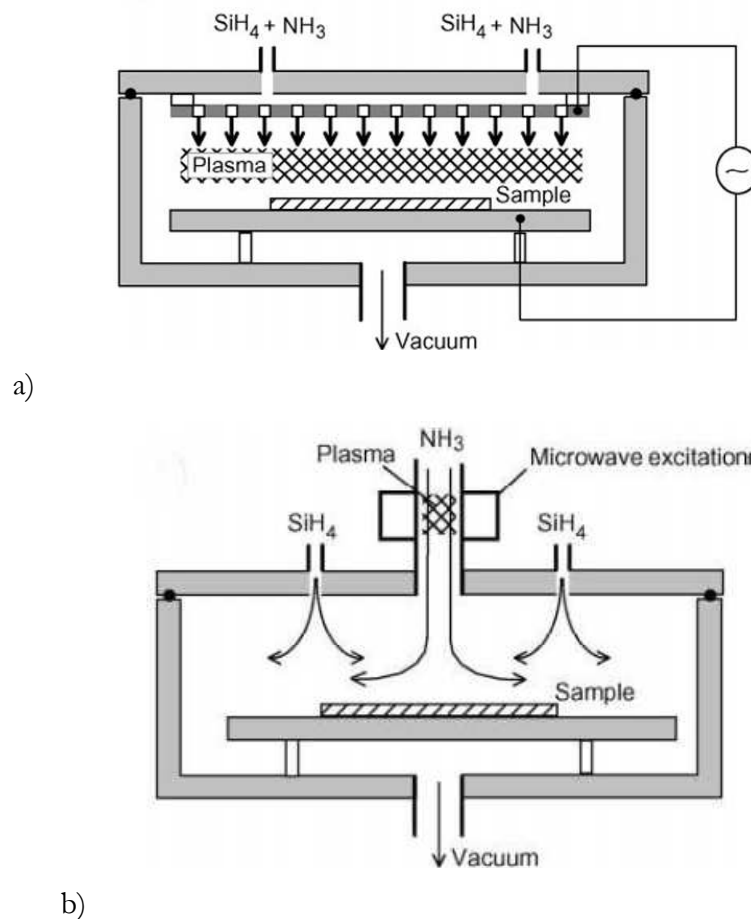
Les indices de ces matériaux sont donnés dans le tableau ci-dessous (Tableau II.2) [17] :

**Tableau II.2 : Valeurs moyennes de l'indice de réfraction des différents matériaux utilisés comme couche anti-reflet [17].**

Matériau	Indice de réfraction (n)
SiO	1.8 – 1.9
$\text{SiO}_2$	1.4 – 1.5
$\text{Si}_3\text{N}_4$	1.9
$\text{TiO}_2$	2.4 – 2.8
$\text{Ta}_2\text{O}_5$	2.1 – 2.3
ZnS	2.3 – 2.4
$\text{MgF}_2$	1.3 – 1.4
$\text{Al}_2\text{O}_3$	1.8 – 1.9

Les propriétés physico-chimiques, optiques et électriques du nitrure de silicium hydrogéné et d'oxynitrure de silicium dépendent fortement de la technique et des paramètres de dépôt. Dans le domaine photovoltaïque, la technique la plus répandue pour élaborer des couches minces de nitrure et d'oxynitrure de silicium est le dépôt chimique en phase vapeur (CVD – Chemical Vapor Deposition), et plus particulièrement la CVD assistée par plasma (PECVD). En effet, cette dernière permet de réaliser des dépôts à basse température ( $< 400^{\circ}\text{C}$ ), et ainsi de limiter le budget thermique, tout en garantissant des propriétés optiques et passivantes de qualité [18]. Nous allons la présenter en détail.

Il existe fondamentalement deux types de réacteurs PECVD (Figure II.17). Dans la première configuration, l'échantillon est directement en contact avec le plasma, c'est le réacteur de type direct le plus répandu dans l'industrie. Dans le deuxième type de réacteur, l'excitation des espèces gazeuses par le plasma se produit en amont de la chambre de dépôt, c'est le réacteur de type remote ou en post-décharge [18].



**Figure II.17 : (a) Réacteur PECVD de type direct et (b) réacteur PECVD de type remote [18].**

Pour le réacteur de type direct, tous les gaz précurseurs sont excités par le champ électromagnétique. Le réacteur se compose d'au moins deux électrodes parallèles (l'électrode inférieure supportant l'échantillon) entre lesquelles se développe le plasma. L'échantillon est chauffé par son support, en général en graphite. Le champ électromagnétique peut être à basse (entre 10 et 500 kHz) ou haute fréquence (13.56 MHz). A basse fréquence, les électrons et les ions suivent les oscillations du champ électromagnétique. A haute fréquence, les ions, en raison de leur masse, sont pratiquement insensibles aux oscillations du champ et seuls les électrons sont en mouvement. Le seuil généralement admis entre les deux domaines de fréquence se situe autour de 4 MHz. La fréquence d'excitation du plasma a un rôle important pour la qualité de la couche déposée. A basse fréquence, le bombardement ionique va entraîner un fort endommagement de la surface, pouvant entraîner une détérioration de la qualité de passivation de surface. De plus, il semblerait que ce type de dépôt ne soit pas tableau rayonnement ultraviolet [26].

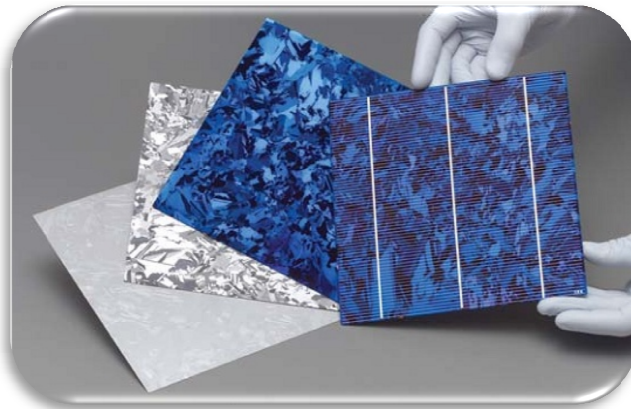
A haute fréquence par contre, l'énergie cinétique des ions est plus faible et les dépôts réalisés présentent de meilleures propriétés de passivation et de stabilité aux ultraviolets. Pour autant, les réacteurs basses fréquences ne sont pas à écarter puisqu'il semblerait que l'hydrogénation du substrat de silicium soit plus efficace [19]. L'hydrogénation liée au bombardement ionique favoriserait ainsi le stockage d'hydrogène à la surface de silicium au niveau de pièges induits par le plasma. Cet effet serait surtout très bénéfique dans le cas de substrats de silicium de qualité moyenne tel que le silicium multicristallin.

Dans le cas d'un réacteur PECVD post-décharge, l'échantillon est séparé du lieu de génération du plasma. L'excitation du plasma est généralement réalisée à partir de micro-ondes (le plus souvent à une fréquence de 2.45 GHz). Le plasma est créé à l'extérieur de la zone de dépôt et les espèces réactives sont ensuite canalisées vers l'échantillon. Du fait de sa forte réactivité, il n'est généralement pas nécessaire d'exciter le silane qui sera introduit directement à proximité de l'échantillon par une arrivée de gaz indépendante. Cette méthode permet d'éviter la dégradation de l'échantillon liée au bombardement ionique. La densité du plasma est également plus importante et entraîne des vitesses de dépôt plus élevées que dans les réacteurs de type direct [20].

## II.6 Les techniques de métallisation

Les contacts métalliques de l'émetteur et du substrat servent à collecter le courant de porteurs photogénérés. 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 et une forte valeur de celle-ci augmente la résistance série de la cellule et baisse le facteur de forme ainsi que le rendement.

Dans la technologie de réalisation des cellules solaires, la métallisation est l'étape principale après celles de la formation de la jonction et du dépôt de la couche antireflet. Elle permet d'établir la liaison entre la structure et le circuit extérieur lors de l'assemblage des photopiles dans un cadre rigide ou encapsulation. Un soin particulier est apporté à la définition de la géométrie de la grille collectrice ainsi qu'au traitement thermique après métallisation. [21]



*Figure II.18 : Plaques de silicium de 200 mm x 200 mm [22].*

Différents procédés sont utilisés pour réaliser les contacts. Dans le cadre des cellules photovoltaïques industrielles au silicium multicristallin, les contacts sont généralement réalisés par sérigraphie. Pour les cellules photovoltaïques à haut rendement, la photolithographie ou l'évaporation sous vide sont utilisées parfois [23].

### II.6.1 La Photolithographie

La technique mise en œuvre se nomme la lithographie qui littéralement signifie « écriture sur pierre ». Son origine remonte à une ancienne méthode d'impression en noir et blanc à partir d'une pierre calcaire sur laquelle est reporté un motif (à l'envers) à l'aide d'une encre, motif qui sera ensuite transféré par contact sur le support à imprimer. Un procédé de ce type a été appliqué à la fabrication de semi-conducteurs, c'est la *photolithographie* [24].

Cette opération consiste à déposer une résine photosensible en film mince, uniforme, et fortement adhérente. Ces résines sont des composés organiques dont la solubilité est affectée par le rayonnement *UV*. Il existe deux types de résines :

- **Les résines négatives** : pour lesquelles le rayonnement ultraviolet entraîne une polymérisation des zones exposées, conférant ainsi à ces zones une tenue particulière au solvant de révélation alors que les parties non insolées disparaissent sélectivement dans ce solvant.
- **Les résines positives** pour lesquelles le rayonnement ultraviolet *UV* entraîne une rupture des macromolécules, d'où une solubilité accrue des zones exposées dans le révélateur.

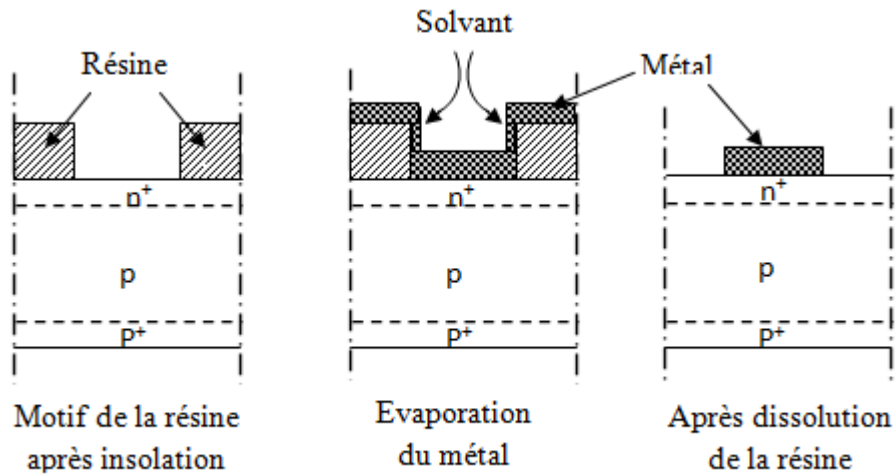
L'opération de dépôt de la résine photosensible, opération appelée également laquage, s'effectue par centrifugation au moyen d'une tournette composée d'un système permettant la mise en rotation à grande vitesse de la plaque à résiner. Cette dernière est maintenue par aspiration à vide sur un support solidaire du plateau en rotation. L'épaisseur finale de la couche de résine est principalement fonction de la quantité de résine déposée sur l'échantillon, de sa viscosité, et des conditions de rotation (accélération, vitesse, temps).

La résine photosensible, visqueuse après son étalement sur l'échantillon, est alors durcie sur une plaque chauffante ou dans un four, de façon à éliminer toutes les traces de solvant avant son insolation. Pour l'alignement et l'insolation de motifs d'un masque sur la plaque, on utilise un aligneur à UV permettant le masquage par contact [25].

#### ✓ Dépôt des contacts

- Nettoyage de la surface en trois étapes (HF, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>+ H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HF).
- Dépôt des contacts avant sur l'émetteur par lithographie et évaporation du métal (lift-off).
- Après dépôt des contacts, nous enlevons la résine avec de l'acétone de qualité microélectronique.
- Recuit à 400°C sous H<sub>2</sub> pendant 5min.
- Nettoyage de la face arrière avec solution de HF/HNO<sub>3</sub> pour enlever toutes traces éventuelles de dopants n<sup>+</sup> (nous protégeons la surface avant avec de la cire).
- Elimination de la cire avec deux bains de trichloréthylène bouillant.
- Dépôt du contact face arrière pleine plaque en aluminium par évaporation sous vide.

- Dépôt sur la face avant d'une couche de nitrure de silicium (SiN) par PECVD servant à la fois de couche antireflet et de couche de passivation. Ce dépôt s'effectue à 400°C et fait office de recuit pour les contacts. [26]



*Figure II.19 : Le principe de la technique de « lift-off » [27]*

## II.6.2 L'évaporation sous vide

L'évaporation sous vide est une technique de dépôt de couche mince (généralement métallique), utilisé notamment dans la fabrication microélectronique. Le matériel à déposer est évaporé sous vide dans une enceinte hermétique, le vide permettant aux particules d'atteindre directement le support où elles se recondensent à l'état solide [28].

L'évaporation sous vide repose sur deux processus élémentaires : l'évaporation d'une source chauffée et la condensation à l'état solide de la matière évaporée sur le substrat. L'eau liquide est évaporée et se recondense sur le couvercle qui est l'équivalent de la cible du dépôt. La figure suivante représente un schéma du dispositif à évaporation sous vide.

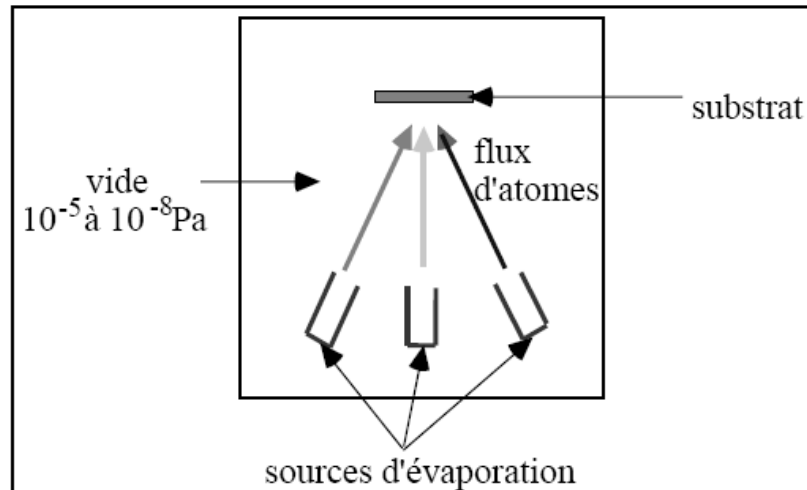


Figure II.20 : Schéma d'un dispositif à évaporation sous vide [29].

Tous les systèmes d'évaporation sont équipés d'une chambre dans laquelle sont placées la source et la cible du dépôt, d'une pompe pour faire le vide et d'une source d'énergie pour l'évaporation. Ils existent différentes sources d'énergie :

- Dans la méthode *thermique*, le matériel à déposer est placé dans un creuset qui est chauffé radialement par un filament électrique ; il est possible aussi que le filament lui-même soit la source.
- Dans la méthode par *faisceau d'électrons*, la source est chauffée par un faisceau d'électrons d'une énergie allant jusqu'à 15 keV.
- Par *évaporation flash*, la matière à déposer est sous forme d'un fil qui est continuellement dévidé et évaporé par contact avec une barre de céramique très chaude.
- Dans certains systèmes, le support est monté sur un plateau qui tourne pendant le dépôt afin d'améliorer la régularité du dépôt et de limiter l'effet d'ombrage.

### II.6.3 La Sérigraphie

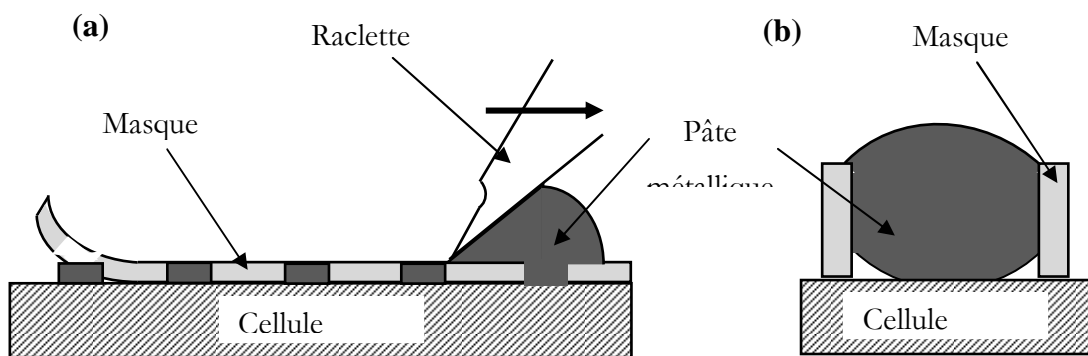
Méthode d'impression dérivée du pochoir et qui consiste à faire passer les encres sur un support à travers un tissu qui est verni à certains endroits et perméable à d'autres. A l'origine connue sous le nom de trame de soie en raison de ses formes imprimantes fabriquées à base de soie, la sérigraphie est devenue un procédé de première importance dans la production de nombreux articles manufacturés, tels que les panneaux décoratifs, les circuits imprimés, les conteneurs en plastique et les vêtements à motifs.

Les pochoirs utilisés pour la sérigraphie commerciale sont généralement fabriqués à l'aide de procédés photomécaniques. Une fine trame de tissu synthétique ou de métal est tendue sur un cadre rectangulaire, puis une couche photopolymère est appliquée sur la totalité de la surface.



L'exposition du photopolymère à travers un film positif provoque alors son durcissement dans les zones qui ne sont pas destinées à l'impression. La partie non exposée est ensuite nettoyée pour créer les zones ouvertes du pochoir. Le cadre est alors pressé dans l'imprimante contre la surface à imprimer, et l'encre passe en force à travers les zones ouvertes du pochoir à l'aide d'une raclette en caoutchouc.

La méthode de dépôt par sérigraphie consiste en l'application d'une pâte sur un substrat, la cellule, au travers d'un masque. Cet écran sérigraphique, ou pochoir, est le négatif du motif à reproduire (Figure II.21a). Un traitement thermique à suivre va permettre la solidification de la pâte, sa densification et sa solidarisation à la cellule. C'est lors de cette étape que le contact, en face avant comme en face arrière, est réalisé par la diffusion des éléments métalliques de la pâte dans le semiconducteur. Ces éléments métalliques constitutifs sont l'argent pour la pâte de la face avant (type n) et un mélange argent et aluminium pour la face arrière (type p)[30].



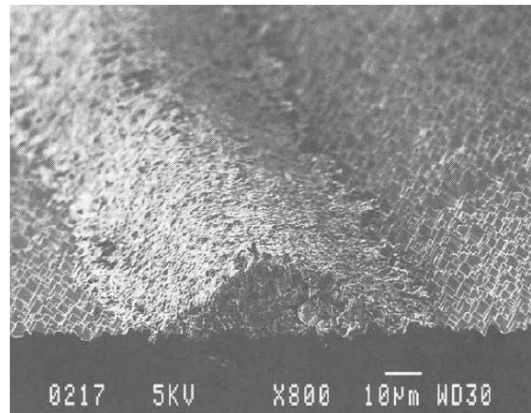
**Figure II.21 : (a) Opération de sérigraphie des contacts, (b) Occupation du masque par la pâte.**

Pour un gain de productivité, les contacts métalliques avant et arrière déposés subissent un traitement thermique commun. En conséquence, la manipulation des cellules sur la chaîne de production exige le déroulement des étapes préalables suivantes :

- Sérigraphie du schéma de la grille avant sur la couche antireflet.
- Séchage par étuve à air : 150°C pendant ¼ d'heure environ.
- Sérigraphie du schéma de grille arrière.
- Séchage par étuve à air- même température, même durée.
- Co-firing des pâtes dans un four à passage doté de lampes IR

Ce dernier traitement thermique a pour but la formation du contact ohmique. Lors de cette opération le contact va subir un frittage dont la conséquence est la diminution de sa résistance de couche. Dans le même temps, les particules métalliques devront diffuser en direction du silicium :

en face avant pour le surdosage, en face arrière pour percer la jonction  $n^+p$  résultante de la diffusion du phosphore.



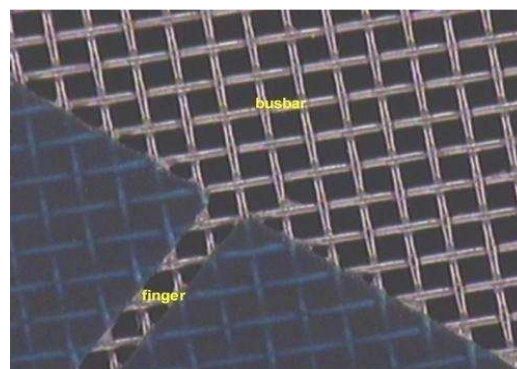
**Figure II.22 : Doigt de contact par sérigraphie; les pyramides de texture sont également évidentes [31].**

*Les écrans et les pâtes sont les éléments essentiels de cette technologie.*

### II.6.3.1 Écrans :

Les écrans sont les tissus serrés des fils d'acier inoxydable synthétique où étirés sur une armature en aluminium, comme est illustré sur la figure II.23. L'écran est couvert d'émulsion photosensible, qui est traitée avec des techniques photographiques de telle manière qu'elle soit enlevée des régions où l'impression est désirée.

Pour une bonne impression et des couches épaisses, comme le nécessite le contact avant d'une cellule solaire, les fils doivent être très minces et étroitement espacés. D'autre part, l'ouverture du réticule doit être plusieurs fois plus grande que la plus grande particule contenue dans la pâte à imprimer. Les écrans pour la production de cellule solaire comportent typiquement 325 fils par pouce, diamètre de fil autour 10  $\mu\text{m}$ , l'ouverture de maille autour du 30  $\mu\text{m}$ , correspondant à presque 50% d'ouverture de la surface, c.-à-d., non arrêtee par les fils et une épaisseur totale (fils tissés plus l'émulsion) de l'environ 100  $\mu\text{m}$ . [31]



**Figure II.23 : Un écran pour transférer le modèle de contact avant à une cellule solaire [32]**

### II.6.3.2 Pâte de sérigraphie

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

- Une fritte de verre
- Le métal actif
- Les liants [30].

**La fritte de verre**, 5 à 10% du poids. Les oxydes comme le  $\text{SiO}_2$  sont les éléments principaux de la fritte au verre. A ceux viennent s'ajouter  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (face arrière),  $\text{B}_2\text{O}_3$  et ceux dits fondants  $\text{ZnO}$  (face avant) dans notre cas.

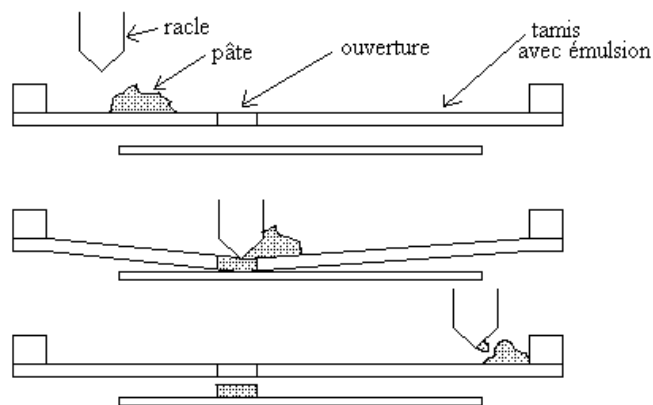
**La matière de remplissage** est constituée de grains très fin de métaux dont les dimensions peuvent aller jusqu'à  $0.5\mu\text{m}$ . Les métaux ici utilisés sont l'argent pour la pâte de type n de la face avant et l'argent plus l'aluminium en face arrière. C'est une poudre d'argent composée de cristallites d'une taille de quelques dixièmes de microns. Pour le contact p, l'aluminium est également présent. Ceci s'élève de 60 à 80% du poids de la pâte.

**Les liants** sont des composés hydrocarbonés permettant la cohésion des éléments pulvérulents et d'assurer une viscosité adéquate de la pâte. La composition de la pâte est extrêmement importante pour la réussite de la séquence technologique de la métallisation et elle est fortement liée au traitement thermique [30]. Une telle pâte doit présenter les propriétés suivantes afin de minimiser les pertes électriques et optiques :

- Faibles résistances de contact avec le silicium et interne de la pâte.
- Adhérence adéquate à la surface du silicium.
- Possibilité de pouvoir percer une couche antireflet et/ou de passivation pour obtenir un contact métal/semiconducteur.
- Qualité d'impression optimale avec un rapport hauteur /largeur élevé (faible changement de viscosité de la pâte à la traversée du maillage)
- Bonne soudabilité pour monter les cellules en module [33].

### II.6.3.3 Impression

La Figure II.24 illustre le processus d'imprimer une pâte par l'émulsion modelée sur un écran. L'écran et le substrat ne sont pas en contact, mais une distance les sépare appelé « snap-off ». Après avoir déposé la pâte, une pression est appliquée à la racle, qui peut être faite de métal ou de caoutchouc: ceci met l'écran en contact avec la plaquette. La racle est alors déplacée d'un côté de l'écran à l'opposé, traînant et serrant la pâte devant elle. Quand une ouverture est atteinte, la pâte la remplit et colle à la plaquette, et elle reste là après que la racle ait passé et l'écran s'est élastiquement retiré [31].



*Figure II.24 : Illustrations des étapes d'impression (mouvement de la racle)*

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

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

### II.6.3.4 Etuvage de la pâte

Cette opération consiste à évaporer les solvants présents dans la pâte grâce à un chauffage modéré à une température de 200°C pendant une durée de (20-30 min). Elle doit être effectuée très rapidement pour éviter l'étalement de la pâte de sorte que la plaquette puisse être manœuvrée sans que le modèle imprimé soit endommagé. Malheureusement, ceci ne peut pas être évité car le chauffage brusque formerait une croûte sur la surface de celle-ci [31-33].

### II.6.3.5 Délaitage de la pâte

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

### II.6.3.6 Cuisson des contacts

La cuisson est une opération de frittage. La pâte se densifie, diffuse au travers de la couche antireflet en face avant (méthode du « fire-through »), et se solidarise à la cellule (effet de soldering). Cette phase est accomplie à une température élevée dépassant le seuil de 800°C et pendant une durée de 10-15 minutes, sous une atmosphère d'azote [33].

## II.7 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de connaître l'enchaînement des étapes de fabrication des systèmes photovoltaïques, et les techniques de fabrication d'une cellule photovoltaïque conventionnelle à base de silicium multicristallin ainsi que les détails de la texturisation de la surface, la diffusion thermique et les lois de Fick, les techniques de dépôt de la couche anti-reflet et en fin, les techniques de métallisations en particulier la sérigraphie.

## II.8 Bibliographie

- [3] : Ehretég « caractérisation du Silicium multi-cristallin élaboré en creuset froid inductif : influence des paramètres et de traitement thermiques ultérieurs sur les propriétés électroniques du matériau » Thèse Lyon: INSA, 1986, 192p.
- [4] : Ouddah Moorad « Etude de Silicium poreux destiné aux cellules solaires » mémoire de magister, Université Mantouri Constantine, Mai 2009.
- [6] : M. Madani « Réalisation couches antireflet dans les cellules solaires à couches minces » Mémoire de Magister, UAB Tlemcen, 2006.
- [7] : Olivier Schultz “high Efficiency MultiCrystalline Silicon Solar Cells” Fraunhofer. Institut für solare energies system – Freiburg, 2005
- [8]: N.Salhi, N.Afraou “Chimie de Silicium: Nettoyage et texturisation » Exposé dans le cadre des séminaires du module MPEM03 assuré par Dr A. Zerga, UAB Tlemcen, 2009.
- [9]: S.M. « Semiconductor devices physics and technology » Wiley, 2002.
- [10]: A. Goetzberger, J. Knoblock, B.Vob, “Crystalline Silicon Solar Cells” JOHN WILEY ANSSONS.
- [11]: O. Bonnaud, « Module pédagogique d’initialisation à la micro-électronique » disponible sur [www.microelectronique.univ.rennes1.fr/index21.html](http://www.microelectronique.univ.rennes1.fr/index21.html)
- [12] : P. Roux « Diffusion des impuretés dans le Silicium », 2005. Disponible sur <http://rouxphi3perso.cegetel.net>
- [13] : Barbara Bazer-bachi « Développement et mise au point d’un procédé innovant de diffusion des dopants N et P pour la fabrication de cellules photovoltaïques silicium » Thèse de doctorat INSA, 2010. Numéro d’ordre :2010-ISAL-0025
- [14] : Scotten W. Jones « Diffusion in Silicon » Icknowledge LLC, Avril 2008.
- [15]: D. Mathiot: “Dopage et diffusion dans le Silicium” cours.
- [16] : F. Boucard « Modélisation de la diffusion des dopants dans le silicium pour la réalisation de jonctions fines » Thèse de doctorat ; Université LOUIS PASTEUR – Strasbourg I, 2003.
- [17] : Martin A. Green « Solar Cells : Operating Principles technology and System Application”. 1992.
- [18]: Aberle Ag “ Overview on surface passivation of crystalline silicon solar cells” Solar Energy Mat. Sol. Cells, 2001. Vol. 65, PP.239-248.

- [19]: Julien Dupuis “Elaboration et Caractérisation de couches de SiO<sub>x</sub>Ny:H et SiNx:H, Réalisées par méthode PEC4D: application a la face arrière des cellules photovoltaïques en Silicium. 2009-ISAL-0085, 2009.
- [20]: F.Rebiba, E.Tomasellaa, S.Aidab, M.Dubois, E.Bechec, J.P.Gastond, J.CELLIERA, M.Jacqueta « Propriétés optiques et électriques de couches minces d’oxynitride de silicium déposées par pulvérisation cathodique M.fureactive »
- [21]: A.Mouhoub, Rev. Energ. Ren vol 4(2001) 11-22/ 4D’TS.
- [23]: Oleksiy Nichib Ruk “Simulation, fabrication et analyse de cellule photovoltaïques a contacts arrières inter-digites” Thèse de doctorat INSA de Lyon. 2005
- [25]: Pascal Chevalier. L’Atelier de recherche pédagogique de l’EUDIL.
- [26]: Fatima Abdo « Croissance de couches minces de silicium par épitaxie en phase liquide a basse température pour application photovoltaïques » Thèse de doctorat. INSA de Lyon, 2007
- [27]: Adolf Geotzberger, Joachin Kndoloch, Bennahar Dvoss. « Crystalline silicon solar cells » PP157, wiley, 1997.
- [29]: Stéphane Andrieu « Introduction aux couches minces et aux reseaux ». Ecole Franco-Roumaine, CNRS Université H.Poincare, Nancy-Roumanie.2003
- [30]: Bruno Thuillier « Caractérisation, structurale des contacts ohmiques réalisés a partir d’encres métalliques sur cellules photovoltaïques en silicium multi-cristallin ». Thèse de doctorat INSA de Lyon, 2001.
- [31]: Antonio Luque, Steven Hegedus « Handbook of photovoltaic science and engineering », Wiley, 2003.
- [32]: Christian Honsberg and Stuart Bowden “Photovoltaics” CDROM by National Science (Foundation/NSF).
- [33]: A. Zerga “Caractérisation, modélisation et simulation numérique des cellules photovoltaïques à base de Silicium poly-cristallin en couche mince déposé par « RT-CVD ». Thèse de doctorat UAB Tlemcen, 2005.

## Webographie

- [1]: [http://www.photovoltaique.info/IMG/pdf/PV-Fab\\_tnvt\\_final\\_26082009.pdf](http://www.photovoltaique.info/IMG/pdf/PV-Fab_tnvt_final_26082009.pdf)
- [2]: <http://membres.lyces.fr/energisoltp/ principe.htm> photowatt\_technologies2007
- [5]: [https://data.cpo.org/publication\\_server/pdf-docomnent](https://data.cpo.org/publication_server/pdf-docomnent)  
PN=EPO773590%200773590 & IDOCLD=716645 & iepath=pdf.
- [22]: la filière photovoltaïque/CLEFS CEA-N50/51-HIVER 2004-2005
- [28]: Evaporation dans vide/wikipedia

## **Chapitre III : Simulation de la cellule conventionnelle à émetteur homogène**



### III.1 Introduction

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

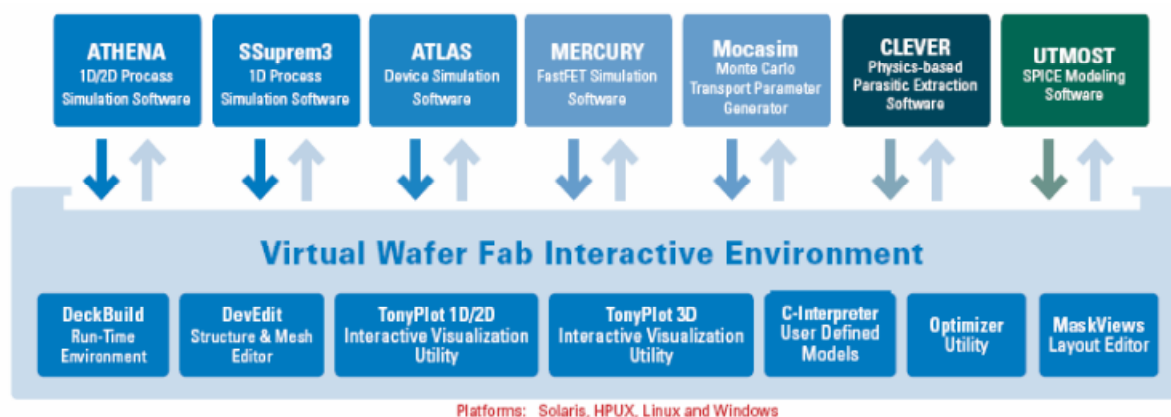
L'objectif de ce chapitre en premier lieu est la description du logiciel de simulation SILVACO et sa mise en œuvre dans le cadre de notre travail. Ensuite, nous proposons un modèle de simulation de la diffusion du phosphore dans le silicium cristallin en utilisant le module ATHENA/SILVACO. En s'appuyant principalement sur l'effet du changement des différents paramètres de la diffusion du phosphore dans le silicium, nous verrons l'effet de cette variation sur les performances d'une cellule solaire.

Dans une deuxième partie, nous décrivons la structure de la cellule solaire conventionnelle à simuler et nous faisons une étude de simulation à deux dimensions effectuées sous ATLAS/SILVACO en exposant les résultats obtenus par simulation numérique.

### III.2 Présentation du package des programmes SILVACO

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

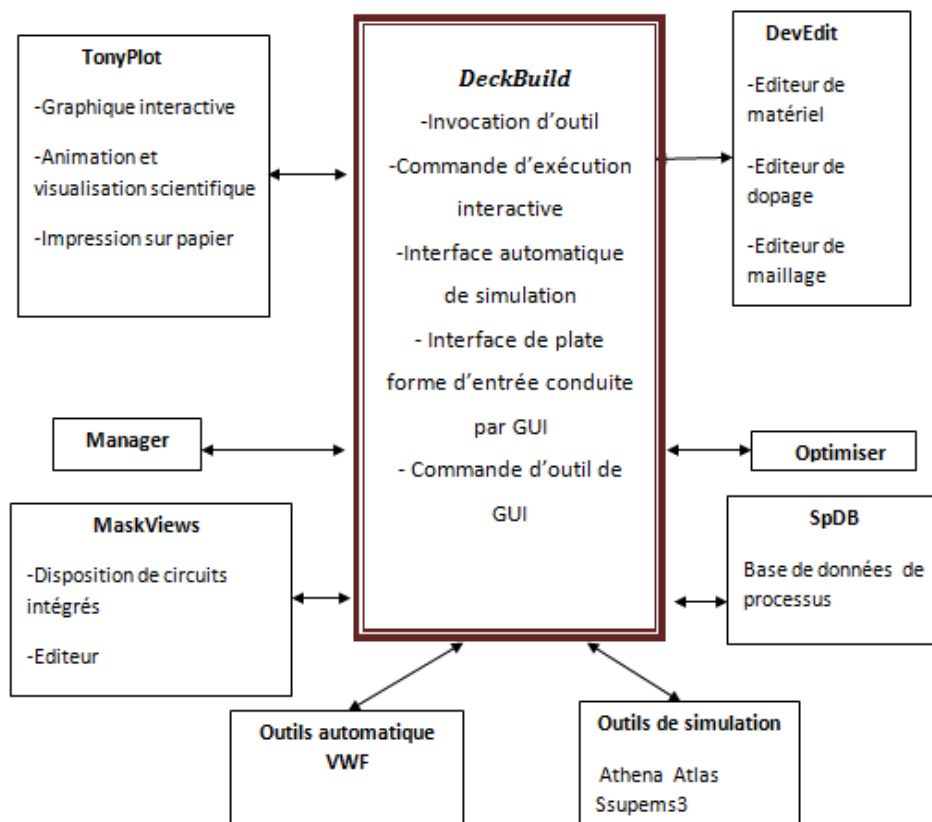
SILVACO présente un ensemble d'outils de simulation interactifs permettant la conception et l'analyse de la plus part des dispositifs à semi-conducteur VWF (Virtual Wafer Fabrication) [1].



*Figure III.1 : l'environnement de VWF [2].*

Les composants de base de VWF sont :

- 1) **Les outils de simulation** (VWF CORE TOOLS). Ces outils simulent soit leurs processus de fabrication ou soit leurs comportements électriques. Les outils de simulation sont ATHENA, ATLAS et SDUPEM3.
- 2) **LES outils interactifs** (VWF INTERACTIVE TOOLS). Ces outils sont désignés pour être utilisés en mode interactif dans la construction d'un seul fichier d'entrée. En étant basé sur une interface utilisateur qui est graphique (Graphical User Interface, GUI). Ainsi le travail de construction du fichier d'entrée devient plus efficace. Les outils interactifs peuvent être utilisés soit en relation avec un ensemble de fichiers, ou comme des composants intégrés dans l'environnement des outils d'automatisation.
- 3) **Les outils d'automatisation** (VWF AUTOMATION TOOLS). Ces outils permettent à l'utilisateur d'exécuter sur une grande échelle des études expérimentales afin de créer des résultats pour l'analyse statique suivante. Les outils automatiques se servent de la technologie de base de données réparties et des méthodes de logiciels de développement d'interprocessus.



*Figure III.2 : Organigramme de la structure VWF [1].*

### III.2.1 Les outils de simulation

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

### III.2.2 Les outils interactifs

- **DECKBUILD** : environnement où est défini le programme de simulation. Il offre une aide qui permet d'éviter l'apprentissage d'une syntaxe de commande généralement très complexe. Il permet aussi une exécution automatique et très pratique des programmes et des sauvegardes systématiques des intermédiaires d'exécution.
- **TONYPLOT** : environnement où sont visualisés les résultats des simulations (structure du composant, caractéristiques électriques...).
- **DEVEDIT** : environnement où est destinée la structure. On peut créer des nouvelles structures ou même modifier des structures existantes. On peut aussi définir des maillages ou raffiner le maillage existant.
- **MASKVIEWS** : outil de dessin des masques (éditeur de layout).
- **OPTIMISER** : optimiser les paramètres de la structure de façon à obtenir en final la valeur du paramètre que nous lui avons définie au paravent.
- **MANAGER** : outil de gestion des fichiers utilisés et créés par VWF.
- **SPDB** : (Semiconductor Process Data Base), c'est un produit séparé, il n'est pas un outil interactif, mais il peut être utilisé avec DeckBuild. Il a été conçu pour stocker un grand nombre de profils de dopage mesurés expérimentalement ainsi que les données qui décrivent les conditions des expériences [1].

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

### III.3 Présentation d'ATHENA

C'est un simulateur de procédés qui permet de modéliser les différentes étapes de la fabrication des composants électroniques. Il est aussi bien adapté aux technologies actuellement en production qu'à celles futures grâce à une base de données de modèles et des programmes régulièrement remis à jour afin d'être le plus prédictif possible.

En ce qui nous concerne, nous avons opté pour Athena de Silvaco®, vu sa disponibilité au niveau de l'URMER. Il été exploité pour la simulation de la diffusion thermique du phosphore dans le silicium cristallin qui nous intéresse.

#### III.3.1 Modèle de diffusion dans ATHENA

La diffusion des impuretés n'est possible qu'en mettant en jeu les défauts ponctuels structuraux du silicium. Il existe de nombreux modèles sur ce sujet [6], chacun ayant plus ou moins axé son développement sur la physique du problème.

Le modèle de diffusion dans ATHENA décrit comment les profils de diffusion des dopants sont redistribués après un traitement thermique dû au gradient de concentration et aux champs électriques internes.

La diffusion des dopants dans ATHENA, repose sur un grand nombre de modèles spécifiques. Les trois principaux sont les suivants :

- Le modèle de diffusion de Fermi (The Fermi diffusion model).
- Le modèle de diffusion bidimensionnelle (The two dimensional diffusion model).
- Le modèle de diffusion complet (The fully coupled diffusion model).

Le modèle intégré dans ATHENA est l'extension naturelle de chacun de ces trois modèles, dans le sens où le modèle de Fermi est inclus dans le modèle bidimensionnel, qui est à son tour inclus dans le modèle de diffusion complet. Les deux principales différences significatives entre eux sont la façon dont les défauts ponctuels sont présentés et traités tout au long de la simulation et comment la diffusivité des dopants est formulée.

Les trois modèles sont réunis autour de l'idée qu'aucun dopant ne peut diffuser seul, il doit mettre en jeu un défaut ponctuel (lacune ou interstice), et diffuser selon la paire dopant-défaut.

Cependant, on doit savoir que l'interface gaz/solide et solide/solide ont été strictement modélisés dans ATHENA.

La définition mathématique d'un modèle de diffusion doit prendre en considération, pour chaque impureté :

- L'équation de diffusion.
- Un ou plusieurs termes du flux.
- Des conditions initiales et aux frontières.

Dans le cas de la diffusion dans les semi-conducteurs, nous avons besoin d'un ensemble d'équations pour chaque dopant présent et pour chaque type de défauts ponctuels. L'équation de continuité des dopants est en fait la même pour les paires dopants-défauts.

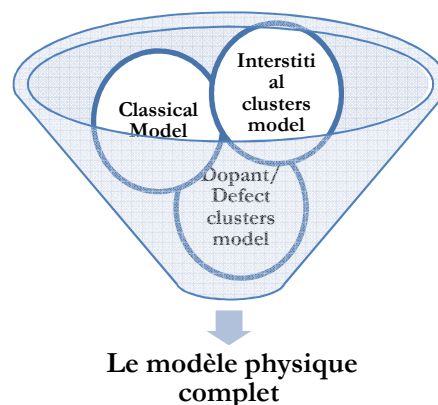
### III.3.2 Modèle de diffusion avancée (Advanced Diffusion Models)

Le nouveau modèle de la diffusion des dopants dans ATHENA est nommé PLS (voir Fig. III.3). Il est développé en collaboration avec CNRS-Phase (Strasbourg, France), CEA-LETI (Grenoble, France) et SILVACO®. Il est mis à jour avec les modèles physiques actuels et contiens seulement les paramètres physiques. Il consiste trois parties :

- Le modèle de diffusion classique (classical dopant diffusion (CDD) model) ;
- Le modèle des clusters interstitiels (interstitials clusters (IC) model) ;
- Et le modèle des clusters dopants-défauts (the model of mixed dopant-defect clustering (DDC)).

Ce modèle est différent du modèle de diffusion complet, et il comporte les points importants suivants :

- La diffusion des dopants est assistée par les lacunes et les auto-interstitiels. Ces défauts ponctuels existent suivant différents états de charges et leur concentration dépend de la position du niveau de Fermi.



*Figure III.3: Principe du modèle de diffusion PLS de Athena [3]*

- Les lacunes et auto-interstices ont de fortes énergies d'attraction avec les atomes des dopants et par conséquent, ils diffusent ensemble. Dans le modèle PLS, à haute concentration des dopants, la concentration de ces paires n'est considérée comme négligeable en respectant les dopants substitutionnels actifs.
- Le flux de chaque espèce diffusante (paires dopant-défaut et défauts libres) inclus le terme « drift » causé par l'action du champ électrique induit, dû au gradient des dopants.
- Les lacunes et auto-interstices ne sont considérés en équilibre local mais, peuvent être annulé par la recombinaison bi-moléculaire.

### III.4 Présentation d'ATLAS

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

#### III.4.1 Fichiers d'entrées et sorties d'Atlas

Dans le schéma de la figure III.4 nous voyons les types d'informations qui circulent en entrée et en sortie d'Atlas.

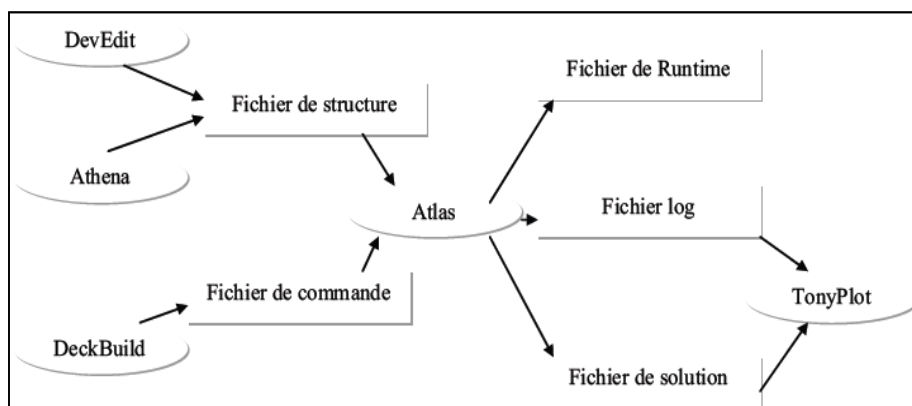
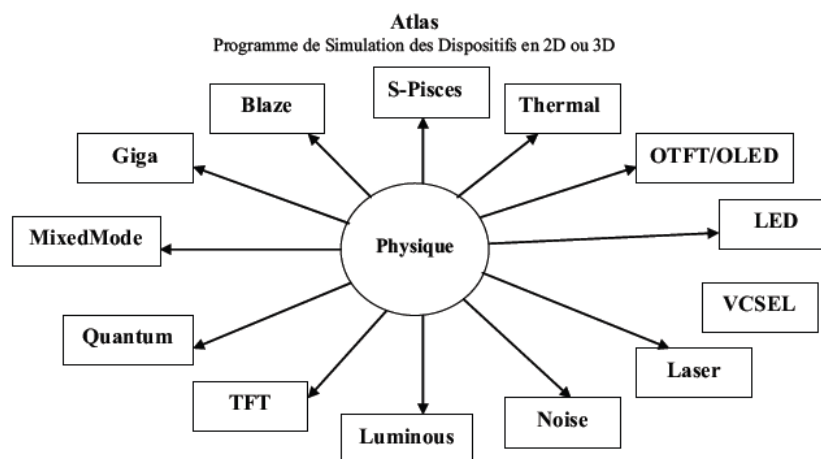


Figure III.4 : Fichiers d'entrées et sorties d'Atlas [4].

La plupart des simulations réalisées par Atlas utilisent deux fichiers d'entrée. Le premier fichier est un fichier script contenant les commandes pour qu'ATLAS s'exécute (représenté par Fichier de commande). Le second fichier est un Fichier de structure qui définit la structure qui va être simulée. A la sortie d'Atlas, nous avons trois types de fichiers. Le premier de ces fichiers est la sortie « Runtime » qui donne la progression, les erreurs et les messages d'avertissements pendant la simulation. Le deuxième type de fichier est le fichier log qui stocke toutes les valeurs de tensions et des courants provenant de l'analyse du dispositif simulé (c'est le fichier du comportement électrique). Le troisième fichier de sortie est le Fichier de solution, ce fichier stocke les données 2D ou 3D concernant les valeurs des variables solutions dans le dispositif en un point donné (c'est le fichier physique, il contient la structure dans un état particulier). Les deux derniers fichiers sont traités par l'outil de visualisation TonyPlot.

### III.4.2 Les composants d'Atlas

Dans la figure III.5 nous voyons représentés les composants qui constituent le simulateur Atlas. Comme nous remarquons le cœur est la Physique qui contient le modèle mathématique qui fonctionne dans les dispositifs à base de semi-conducteurs.



*Figure III.5 : Les composants (ou les modules) d'Atlas [4]*

Ainsi les composants développés autour sont :

- **S-Pisces** : programme de simulation des dispositifs 2D ou 3D, il modélise les caractéristiques électriques des dispositifs à base de silicium en incluant de technologies comme MOS (Metal Oxide Semiconductor), bipolaire, SOI (Silicon On Insulator), EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read Only Memory) et dispositifs de

puissance. S-Pisces calcule les distributions internes des paramètres physiques et prévoit le comportement électrique des dispositifs à l'état d'équilibre, transitoire ou dans les conditions de courant alternatif de petit signal.

- **Blaze** : simulateur des dispositifs 2D ou 3D pour les matériaux III-V, II-VI et des dispositifs avec la structure de bande dépendante de la position (c.-a-d. hétérojonctions). Blaze explique les effets de la structure de bande dépendante de la position par des modifications des équations de transport de charge. Blaze est applicable à une large gamme des dispositifs comprenant :

HBT (Heterojonction Bipolar Transistor), HEMT (High Electron Mobility Transistor), LED (Light Emitting Diode), détecteurs photoélectriques hétérojonction (piles solaires) et diodes d'hétérojonction.

- **Giga** : prolonge Atlas pour expliquer l'écoulement de la chaleur de treillis et les environnements thermiques généraux. Giga met en application le modèle rigoureux thermodynamique de Wachutka du chauffage de treillis, qui explique le chauffage de Joule, le chauffage, et le refroidissement du à la génération de porteur et à la recombinaison, et des effets Peltier et Thomson. Giga explique la dépendance des paramètres du matériau et de transport en fonction de la température de treillis.
- **MixedMode** : simulateur des circuits qui peut inclure des éléments simulés en utilisant la simulation de dispositif (2D ou 3D) et des modèles compacts des circuits. MixedMode emploie des algorithmes numériques avancés qui sont efficaces et robustes pour des simulations en courant continu (c.c.), régime transitoire, de petit signal de courant alternatif (c.a.) et de l'analyse de réseau de petits signaux. MixedMode est typiquement employé pour simuler des circuits qui contiennent des dispositifs semi-conducteurs modélisés compacts et précis qui n'existent pas ou pour simuler des circuits ou les dispositifs qui jouent un rôle critique doivent être modélisés exactement. Les modèles compacts disponibles et utilisés en général sont de type SPICE. La logique de programmation pour spécifier les circuits est de type SPICE.
- **Quantum** : simule divers effets d'emprisonnement mécanique de quantum.



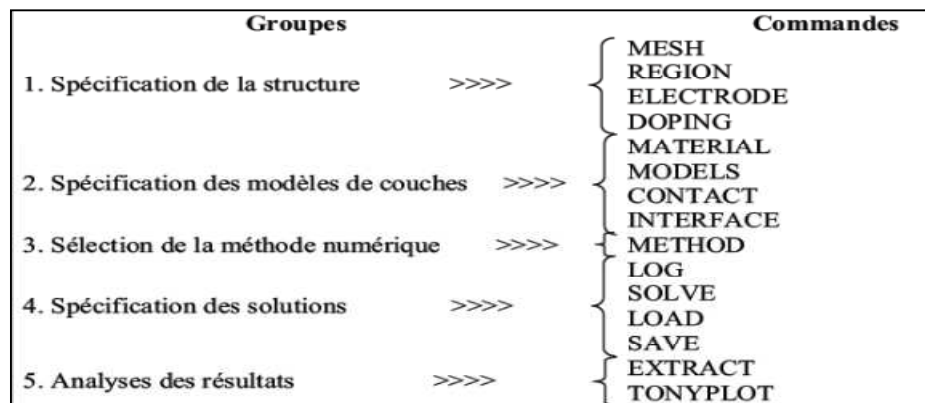
- TFT : simule les systèmes des matériaux désordonnés, il ne contient pas de modèles de matériaux donc il faut combiner S-Pisces ou Blaze avec TFT pour simuler ces systèmes de matériaux. TFT nous permet de définir une distribution d'énergie des états de défauts dans le gap du matériau semi-conducteur.
- Luminous : trace des rayons et programme tout usage d'absorption de la lumière. Luminous calcul les profils d'intensités optiques dans les dispositifs semi-conducteurs, et convertit ces profils dans des taux de photo génération. Ceci nous permet de simuler des réponses électroniques à des signaux optiques pour une large gamme de détecteurs optiques.
- Noise : simuler le bruit des petits signaux produit par les dispositifs. Le bruit électronique a comme conséquence une dégradation inévitable des performances d'un circuit. Il est important de comprendre les propriétés du bruit pour réduire au minimum son effet.
- Laser : effectue une simulation couplée électrique et optique des lasers à base des semi-conducteurs.
- VCSEL : (Vertical Cavity Surface Emitting Lasers) effectue la simulation électrique, thermique et optique des lasers d'émission surfacique de cavité verticale en utilisant des méthodes entièrement numériques précises, robustes et fiables et des mailles non uniformes.
- LED : fournit des possibilités générales pour la simulation des dispositifs de diode électroluminescente.
- OTFT/OLED : OTFT simule les caractéristiques des dispositifs réalisés en matériaux organiques (caractéristiques électriques et optiques en courant continu ou transitoire de ceux-ci). OLED simule des densités d'excitation singulière et triplet.
- Thermal : résout l'équation de la chaleur à l'équilibre thermodynamique pour trouver la distribution de la température à l'équilibre en structures 3D planaires et non planaires. Le fonctionnement d'un dispositif à semi-conducteur est modélisé dans Atlas par un ensemble couplé de jusqu'à six équations différentielles partielles (EDP). Dans notre modélisation nous avons utilisé trois EDP couplées (l'équation de Poisson et les équations de continuités des trous et des électrons).

Atlas produit des solutions numériques en calculant les valeurs des inconnues sur un maillage des points dans le dispositif. Une procédure interne de discrétisation convertit le modèle original

continu en un système algébrique non linéaire discret qui a un comportement approximativement identique. L'ensemble des EDP, le maillage et la procédure de discrétisation déterminent le problème algébrique discret à résoudre.

### III.4.3 Logique de programmation

Après la présentation de la chaîne progicielle TCAD de SILVACO, sa composition interne et le fonctionnement d'Atlas nous allons maintenant présenter l'ordre des commandes propres à la logique de programmation d'Atlas. Ainsi il existe cinq groupes de commandes, ces groupes doivent être organisés correctement (voir figure III.6). Si l'ordre n'est pas respecté, un message d'erreur apparaît et le programme ne s'exécute pas d'une façon correcte [5].



**Figure III.6** Ordre des groupes des commandes dans un programme Atlas (les commandes fondamentales afférentes) [5].

Les commandes fondamentales sont :

- *MESH* : cette commande produit un maillage ou lit un maillage qui a été défini auparavant. L'élément de maille utilisé est le triangle.
- *REGION* : indique l'endroit des matériaux dans une maille précédemment définie. Chaque triangle doit être défini comme matériel.
- *ELECTRODE* : indique l'endroit et les noms des électrodes dans une maille précédemment définie.
- *DOPING* : indique analytiquement des profils de dopage ou prend de tels profils déjà prédéfinis dans les fichiers dédiés.
- *MATERIAL* : associe des paramètres physiques aux matériaux dans la maille. (Il faut faire attention parce que le logiciel a des paramètres de matériau définis par défaut pour les semi-conducteurs standards).

- *MODELS* : indique les carreaux constitutifs du modèle, ils indiquent les inclusions de différents mécanismes physiques, de modèles ou des autres paramètres comme par exemple la température globale pour la simulation.
- *CONTACT* : indique les attributs physiques d'une électrode.
- *INTERFACE*: indique les paramètres d'interface aux frontières de semi-conducteur/isolant. Tous les paramètres s'appliquent seulement aux nœuds de frontière exceptés là où ils sont déjà indiqués.
- *METHOD*: place les méthodes numériques à employer pour résoudre les équations et les paramètres liés à ces algorithmes.
- *LOG* : permet la sauvegarde dans un fichier de toutes les caractéristiques finales de simulation (ouvre un fichier de type log (log en minuscule veut dire le type de fichier, LOG en majuscule veut dire la commande dans le programme)). N'importe quel type de donnée qu'elle soit C.C., transitoire ou C.A., générée par la commande SOLVE et sauvée après la commande LOG (donc les informations sauvées sont de type électrique et elles sont, par exemple, en fonction de la tension de polarisation ou de la source de lumière). N'importe quel paramètre spécifié par la commande PROBE est stocké dans le fichier de type log. Si dans le programme il y a plusieurs commandes LOG, chaque fois le fichier log (qui a été ouvert avant) est fermé et un nouveau fichier log est ouvert.
- *SOLVE* : ordonne à l'Atlas d'exécuter une solution pour un ou plusieurs points de polarisation.
- *LOAD* : charge des solutions précédentes à partir de fichiers en tant que conjectures initiales à d'autres points de polarisation.
- *SAVE* : sauve toutes les informations d'un point nœud du maillage dans un fichier de sortie (les fichiers de sortie sont de type structure). Les informations sauvées correspondent à un état électrique bien précis.
- *EXTRACT* : les commandes de ce type sont utilisées pour extraire les valeurs bien précises des paramètres des deux types des fichiers log ou structure.
- *TONYPLOT* : démarre le programme TonyPlot de post processus graphique des données.

Une autre commande importante est BEAM, sa position est au niveau 4 des groupes de commande. BEAM indique un signal d'entrée optique sous forme d'un faisceau de lumière (mono ou multi-spectrale) collimatée. Le faisceau ainsi déclaré est allumé et utilisé par la

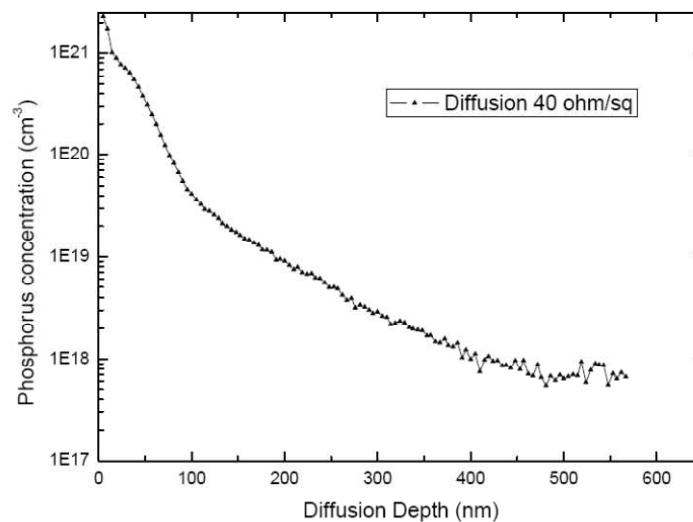
commande SOLVE, dans ce cas le module Luminous est activé. Donc BEAM est utilisé pour simuler des courants sous lumière ou des réponses spectrales.

### III.5 Simulation de la diffusion du phosphore dans le silicium sous ATHENA

Avant d'aborder la simulation de la diffusion du phosphore dans le silicium, on présente d'abord le profil expérimental.

#### III.5.1 Profil expérimental de la diffusion du phosphore dans le silicium

Nous avons pris comme exemple un profil de diffusion du phosphore dans le silicium à 40 ohm/carré, réalisé par la technique SIMS et tracé sous Origin® qui est utilisé dans l'industrie. On note que la diffusion du phosphore dans le silicium (Figure III.7) est dominée principalement par le mécanisme de diffusion lacunaire (vacancy).



**Figure III.7 : Profil SIMS de diffusion expérimental du phosphore dans le silicium [6].**

Le profil expérimental de la diffusion du phosphore dans le silicium est divisé en deux parties selon les étapes de diffusion : pré-dépôt et drive-in. Analytiquement, le premier profil suit une fonction erreur complémentaire et le deuxième une fonction gaussienne.

En effet, le phosphore, vu son volume atomique diffuse plus rapidement que d'autres dopants dans le silicium. Sur la figure ci-dessus, le profil se divise clairement en trois régions distinctes : La région de fort dopage, la région du dopage faible et la région appelée « kink » ou région transitoire.

### III.5.2 Résultats de simulation et discussions.

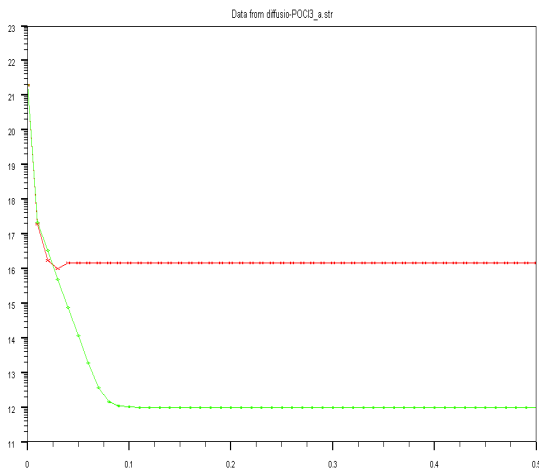
Avec cette simulation, on a essayé de fixer deux paramètres et varier le troisième pour voir son influence sur le profil de diffusion.

#### III.5.2.1 Effet de la température sur la diffusion

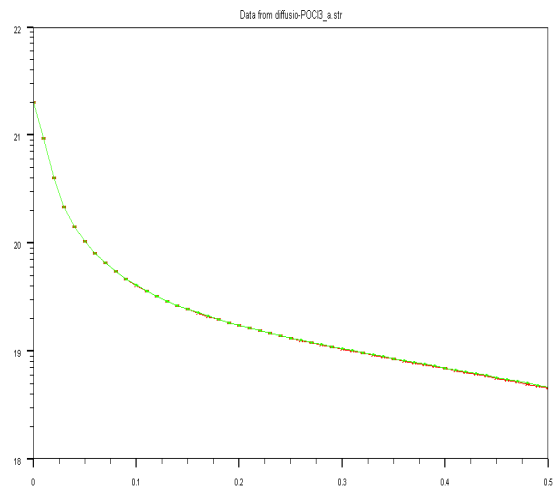
On a utilisé le modèle de diffusion PLS en prenant les paramètres suivants :

- Concentration initiale du bore :  $1.5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$
- Concentration du phosphore :  $2 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$

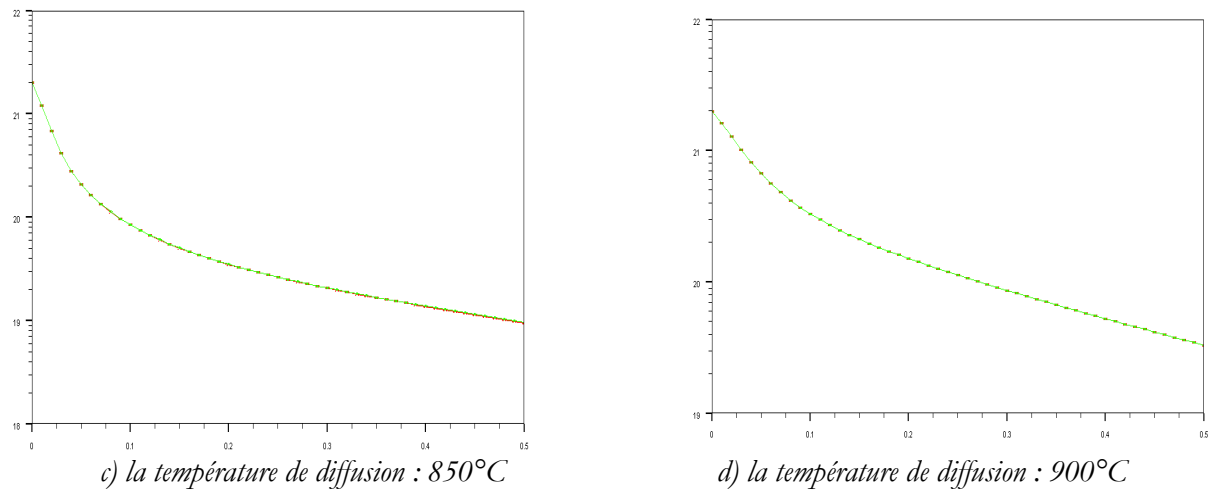
Nous avons donc fixé en premier lieu la durée du temps égale à 1 heure, nous avons considéré quatre valeurs de température de diffusion  $T=800^\circ\text{C}$ ,  $T=825^\circ\text{C}$ ,  $T=850^\circ\text{C}$  et finalement  $T=900^\circ\text{C}$ . Nous relevons les profils de diffusion en fonctions de la profondeur de l'émetteur dans la Figure III.8



a) la température de diffusion :  $800^\circ\text{C}$

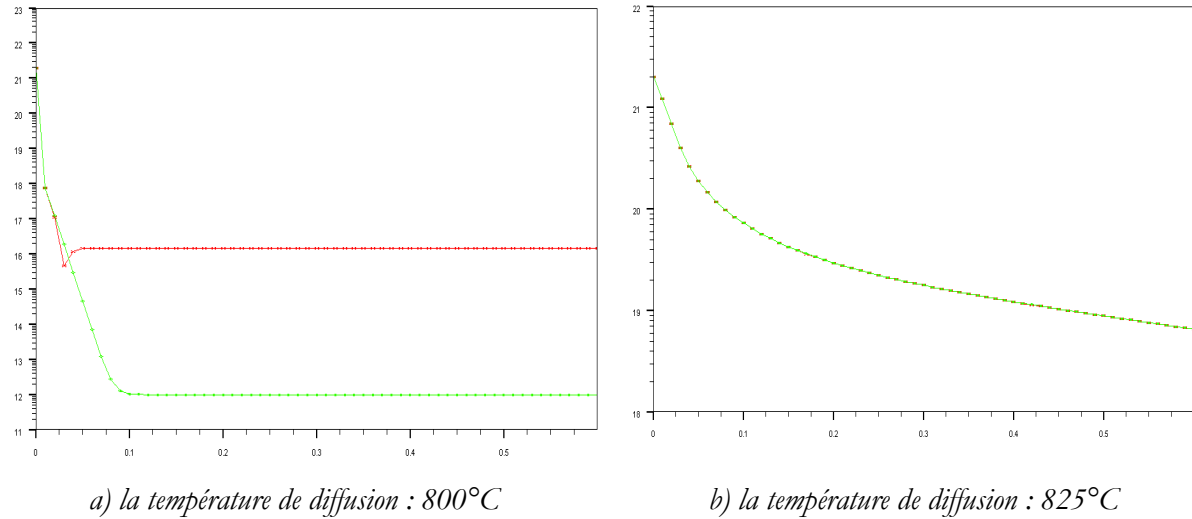


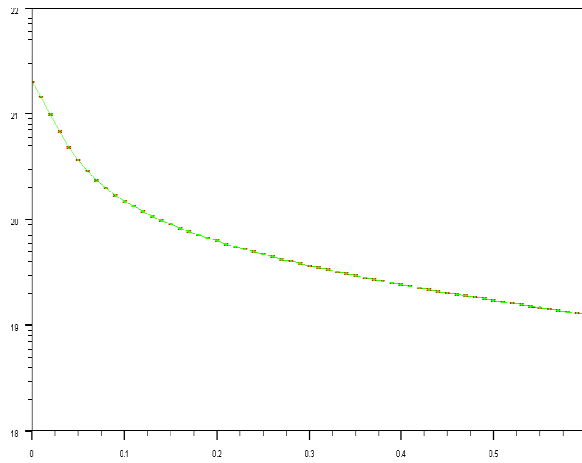
b) la température de diffusion :  $825^\circ\text{C}$



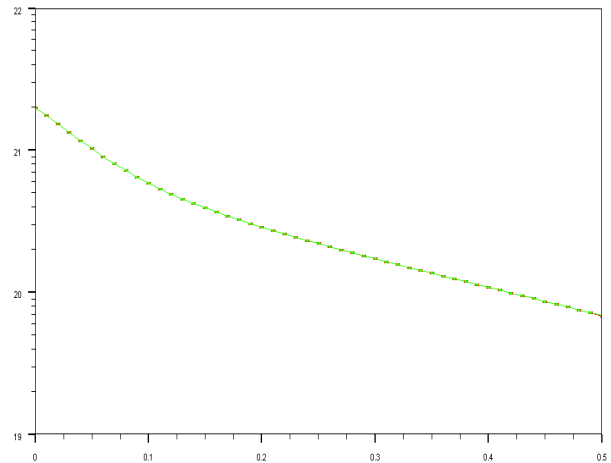
**Figure III.8 : Profil de diffusion du phosphore dans le silicium multicristallin avec différentes températures à un temps de diffusion de 1h (concentration en fonction de la profondeur de l'émetteur).**

Maintenant, nous considérons une durée de temps égale à 2 heures et nous reportons les profils obtenus dans la Figure III.9 et ceci pour les mêmes valeurs de température de diffusion citées précédemment :





c) la température de diffusion : 850°C

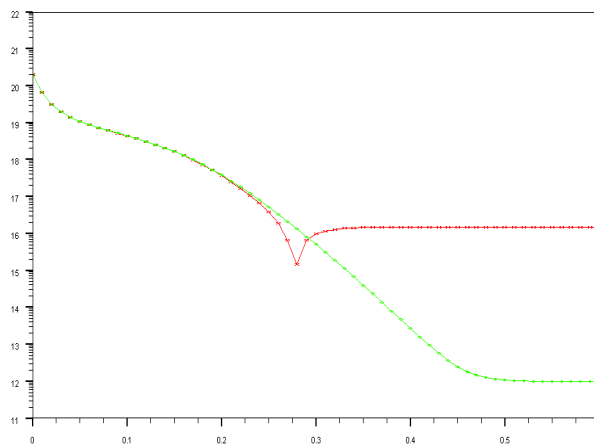


d) la température de diffusion : 900°C

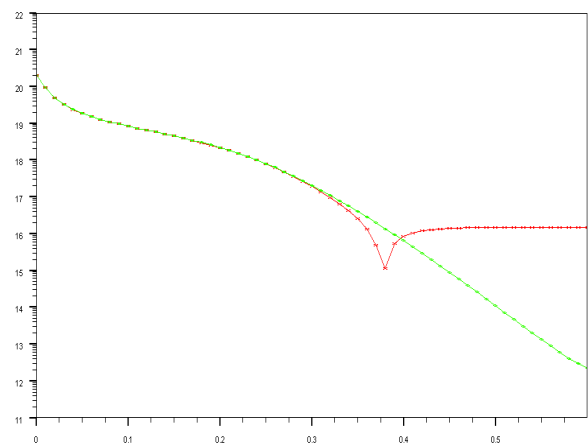
**Figure III.9: Profil de diffusion du phosphore dans le silicium multicristallin avec différentes températures à un temps de diffusion de 2h (concentration en fonction de la profondeur de l'émetteur).**

### III.5.2.2 Effet de la concentration sur la diffusion

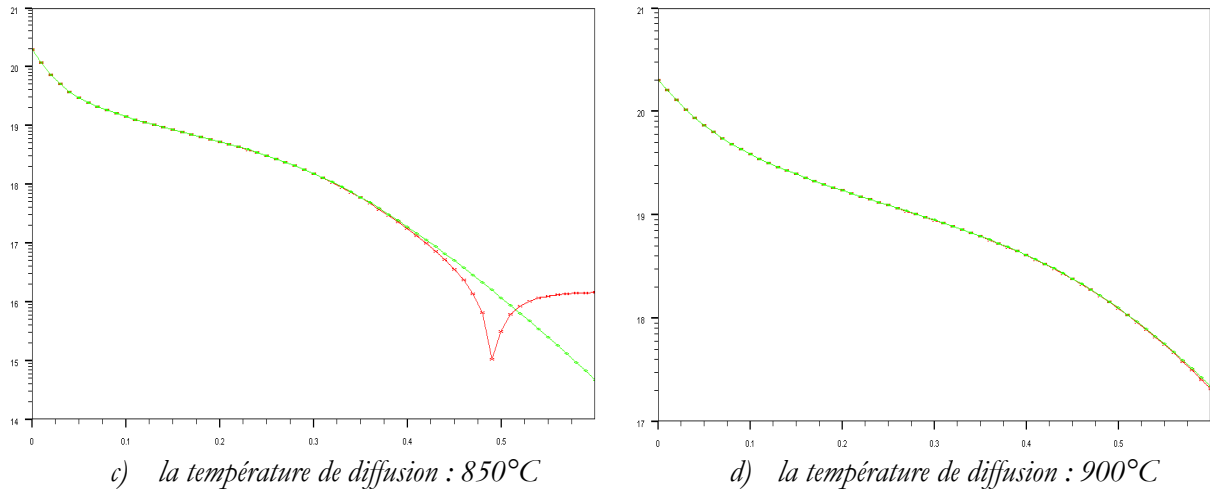
Dans ce qui suit, nous allons étudier l'influence de la concentration du phosphore en fonction de la profondeur de l'émetteur et ceci en la changeant à  $2 \times 10^{20} \text{at}/\text{Cm}^3$  et en gardant toujours le temps de diffusion égale à 1 heure. Les profils de diffusion seront donnés dans la figure III.10 pour les mêmes températures utilisées précédemment.



a) la température de diffusion : 800°C



b) la température de diffusion : 825°C

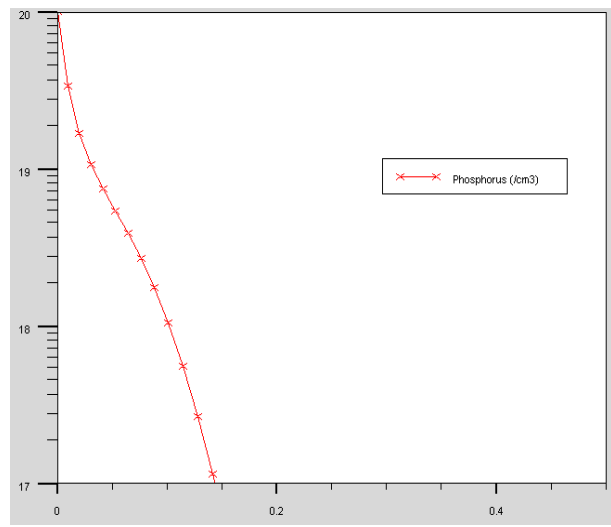


**Figure III.10 : Profil de diffusion du phosphore dans le silicium multicristallin avec différentes températures à un temps de diffusion de 1h et concentration de  $2 \times 10^{20}$  at.  $\text{Cm}^{-3}$  (concentration en fonction de la profondeur de l'émetteur).**

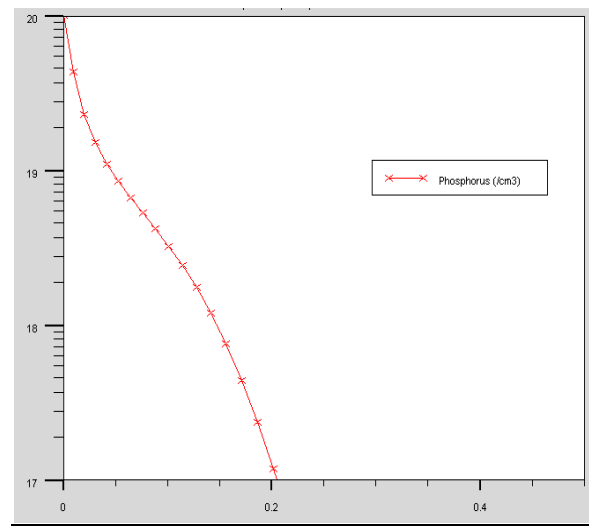
### III.5.2.3 Effet du temps sur la diffusion

Dans ce qui suit, nous allons étudier l'influence de la concentration du phosphore en fonction de la profondeur de l'émetteur et ceci en la changeant à  $2 \times 10^{20}$  at/cm<sup>3</sup> et en gardant toujours le temps de diffusion égale à 1 heure. Les profils de diffusion seront donnés dans la figure III.10 pour les mêmes températures utilisées précédemment.

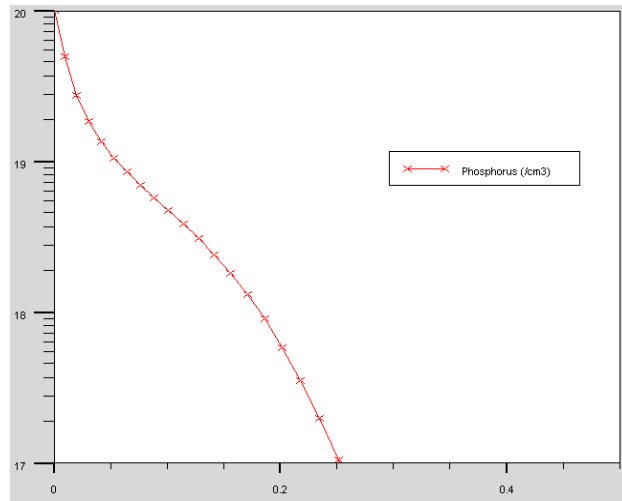


**Pour une diffusion à  $T=800^{\circ}\text{C}$** 

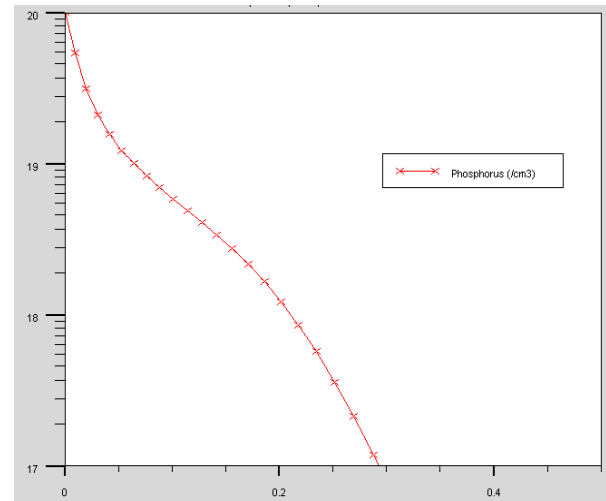
a) temps de diffusion : 1h



b) temps de diffusion : 2h

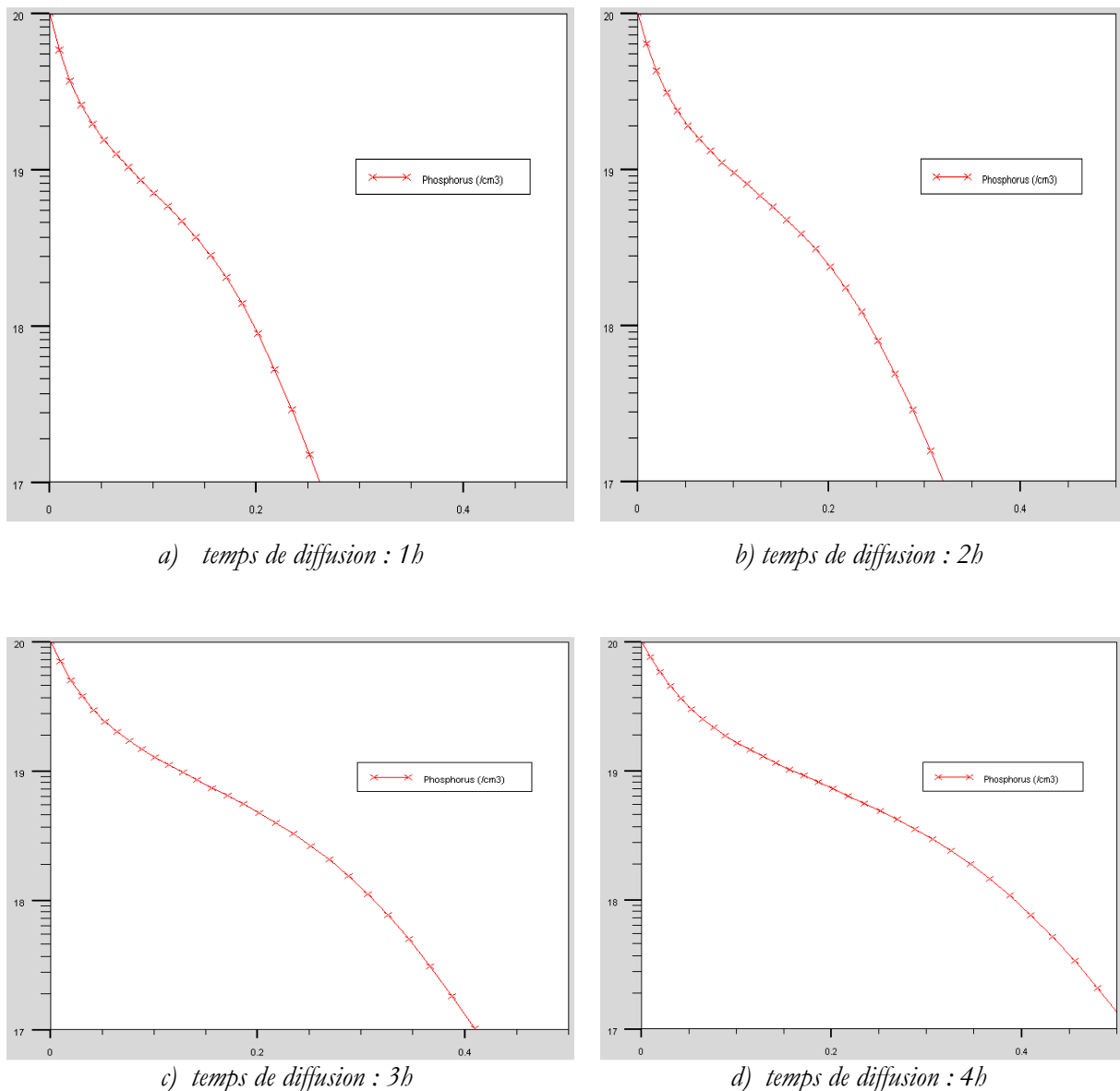


c) temps de diffusion : 3h



d) temps de diffusion : 4h

**Figure III.11 : Profil de diffusion du phosphore dans le silicium multicristallin avec différents temps à une température de diffusion de  $800^{\circ}\text{C}$  et concentration de  $2 \times 10^{20} \text{ at. Cm}^{-3}$  (concentration en fonction de la profondeur de l'émetteur).**

**Pour une diffusion à T=850°C**

**Figure III.12 : Profil de diffusion du phosphore dans le silicium multicristallin pour différents temps, à une température de diffusion de 850°C et concentration de  $2 \times 10^{20}$  at.  $\text{Cm}^{-3}$  (concentration en fonction de la profondeur de l'émetteur).**

Nous pouvons remarquer facilement la grande influence des paramètres temps et température de diffusion ainsi la concentration du dopant sur les profils de diffusion. Le contrôle de ces paramètres est primordial dans la fabrication du dispositif.

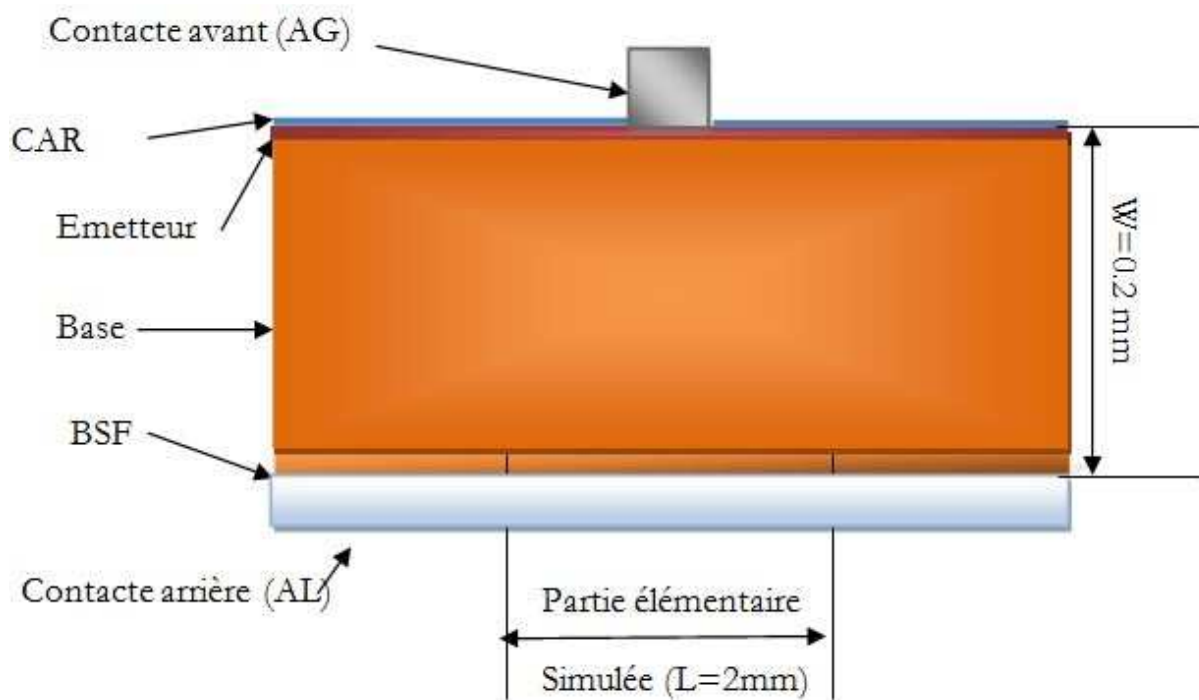
D'après les profils obtenus, c'est clair que la distribution du phosphore dans le silicium est partagée en deux parties, la première représente une fonction d'erreur complémentaire (erfc) et la deuxième une gaussienne.

On note aussi que plus la concentration est forte plus la distribution du phosphore est difficile, car les atomes entre en collisions.

On a superposé le profil expérimental et le profil simulé, on a trouvé que la température de diffusion correspondante est  $850^{\circ}\text{C}$  et le temps est 1 heure. Ce profil était très proche de celui de l'expérimental. Ceci nous a permis de déduire la profondeur de l'émetteur de la première partie du profil (prés-dépôt) qui est de  $0.2\mu\text{m}$  et de la deuxième partie (redistribution) qui correspond à  $0.3\mu\text{m}$ .

### III.6 Simulation de la cellule conventionnelle à base de mc-Si

Le schéma de la figure ci-dessous représente une coupe d'une cellule solaire conventionnelle considérée dans cette étude.



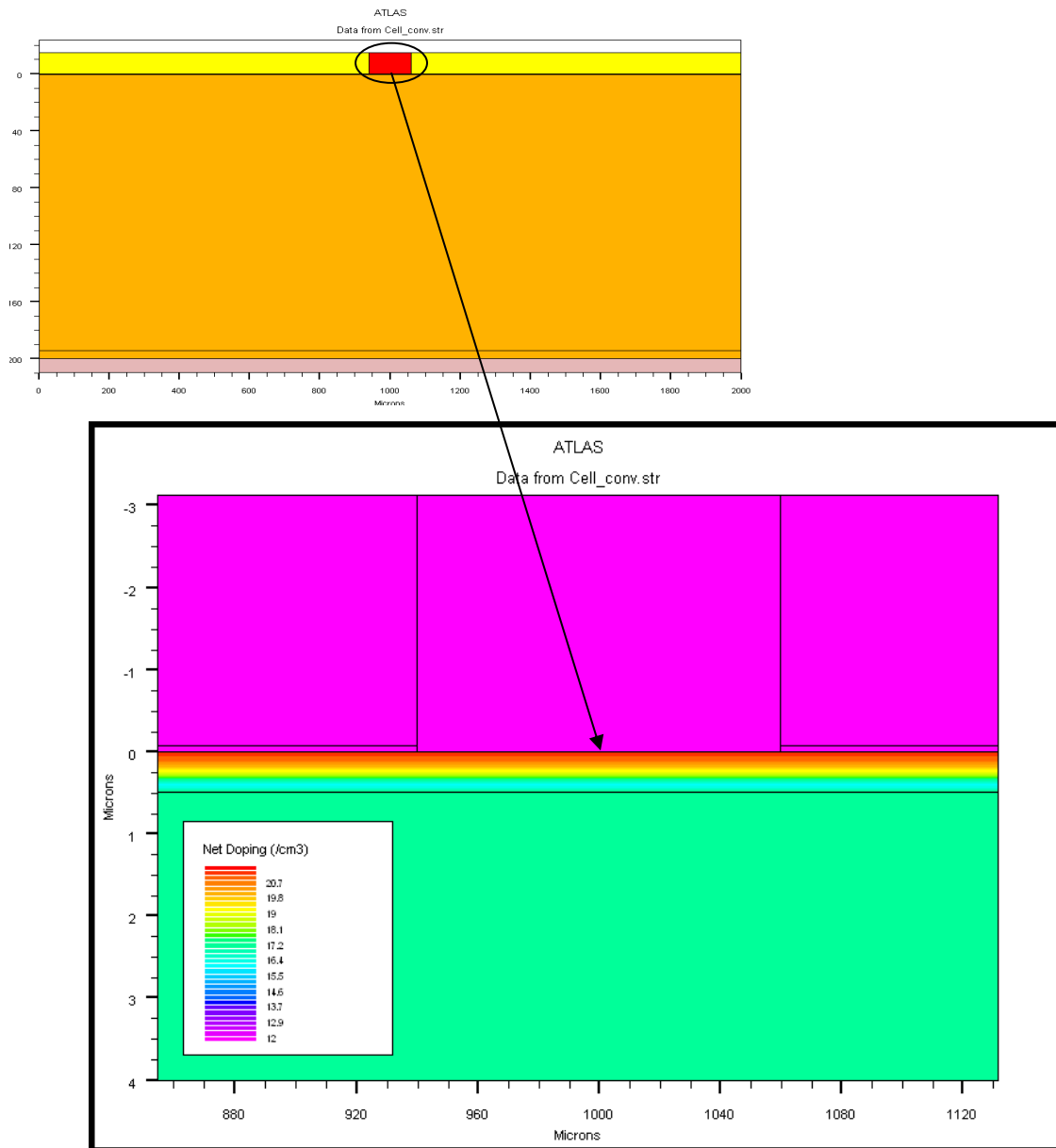
*Figure III.13 : Structure de la cellule solaire conventionnelle à simuler.*

Nous avons injecté dans le module ATLAS les résultats de diffusion obtenus dans le module ATHENA. Les paramètres de simulation numérique avec Atlas-SILVACO sont résumés dans le tableau ci-dessous :

**Tableau III.1 : Paramètres de la structure simulée (cellule conventionnelle).**

Epaisseur de la cellule	W=200 $\mu$ m
Largeur de la cellule	L=2000 $\mu$ m
Epaisseur de l'émetteur	0.5 $\mu$ m
Dopage de l'émetteur	2 $\times$ 10 <sup>21</sup> cm <sup>-3</sup>
Profil du dopage	Erfc+gauss
Epaisseur de la base	194.5 $\mu$ m
Dopage de la base	1.5 $\times$ 10 <sup>17</sup> cm <sup>-3</sup>
Profil du dopage p	uniforme
Epaisseur de la BSF	5 $\mu$ m
Dopage de la BSF	5 $\times$ 10 <sup>19</sup> cm <sup>-3</sup>
Epaisseur de la couche antireflet SiN	75nm
Indice de réfraction	2.05
Epaisseur du contacte avant(AG)	15 $\mu$ m
Largeur du doigt	120 $\mu$ m
Epaisseur du contacte arrière(AL)	10 $\mu$ m
Largeur du contacte arrière(AL)	2000 $\mu$ m
Vitesse de recombinaison en face avant	10 <sup>3</sup> cm/s
Vitesse de recombinaison en face arrière	10 <sup>5</sup> cm/s
Modèle utilisé	Models srh auger conmob fldmob

Nous avons exécuté un fichier de simulation d'une cellule solaire conventionnelle à base de silicium cristallin avec la structure matérielle suivante :



**Figure III.14 : Structure matérielle d'une cellule solaire conventionnelle (en haut) et vue rapprochée de l'émetteur (en bas).**

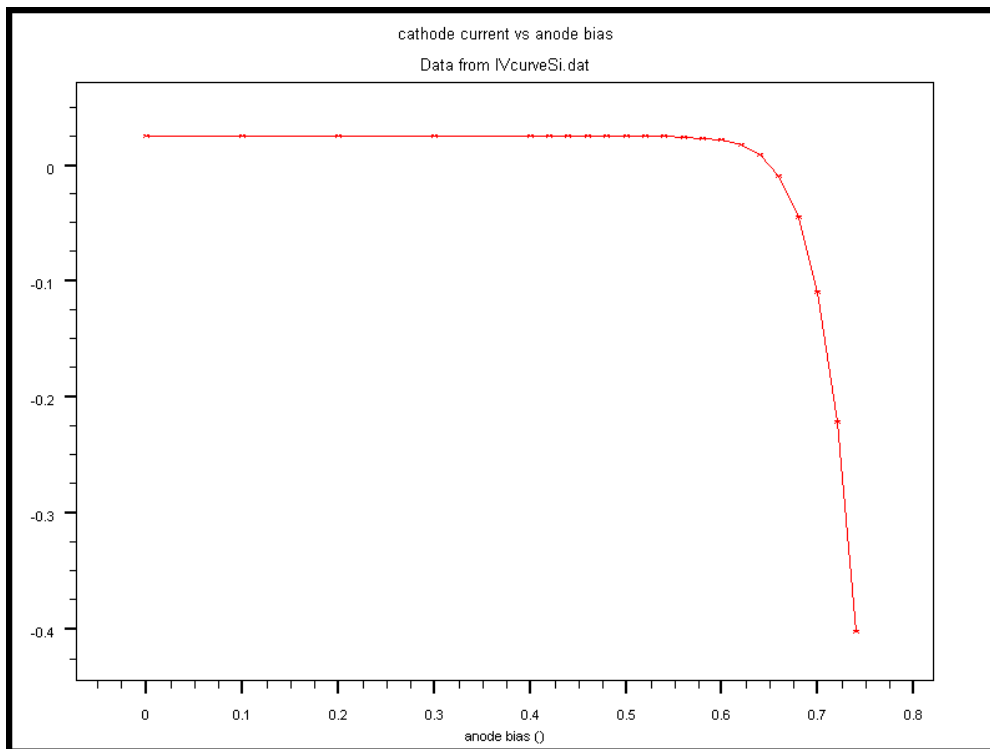
Pour ce qui concerne la méthode numérique incluse dans le programme de simulation, nous avons utilisé la méthode Newton intégrée dans la bibliothèque de Silvaco, qui est une méthode de résolution numérique de la totalité du système d'équations en un seul bloc. Elle est utilisée dans les cas de la convergence quadratique afin d'améliorer la vitesse de simulation. On a pris la durée de vie égale à  $10\mu\text{s}$  pour les électrons et pour les trous, ce qui correspond au silicium multicristallin. Cependant, la vitesse des porteurs de la surface avant est égale à  $10^3\text{cm}^2/\text{S}$  tandis que la vitesse des porteurs de la surface arrière est prise égale à  $10^5\text{cm}^2/\text{S}$ . Ce programme nous

donne directement après exécution les résultats concernant les paramètres de cette cellule (Tableau. III.2) à savoir :

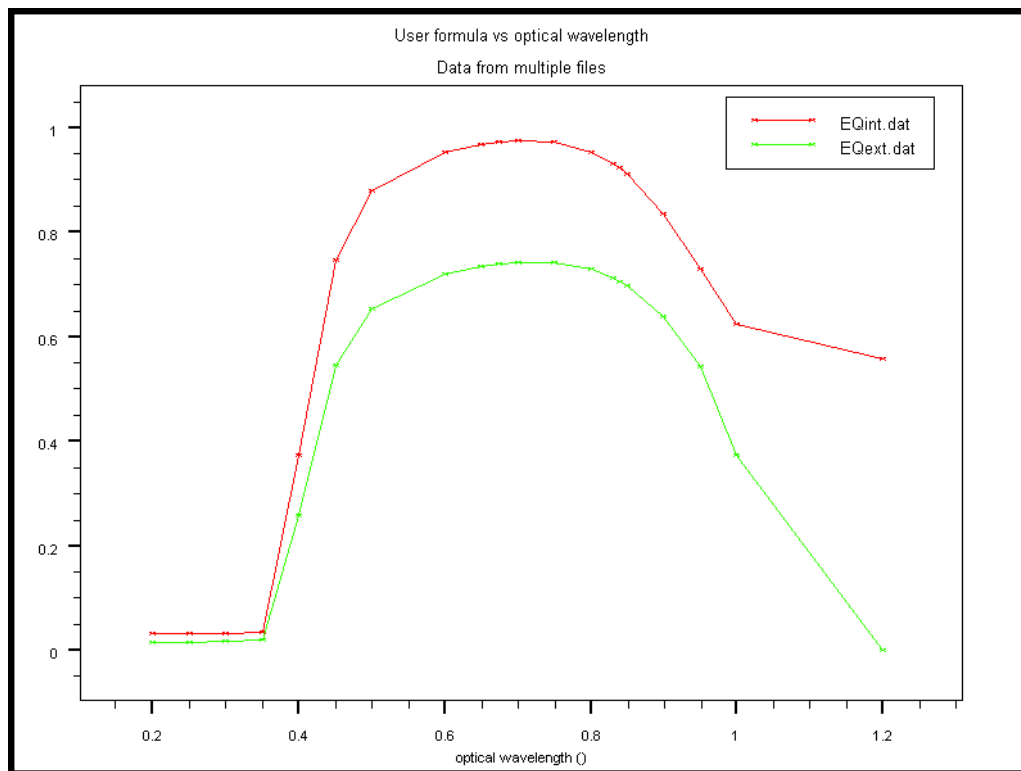
**Tableau III.2 : Paramètres calculés pour une cellule solaire conventionnelle.**

Paramètres	Cellule solaire conventionnelle	Unités
I <sub>cc</sub>	25.32	mA/Cm <sup>2</sup>
V <sub>oc</sub>	0.64	V
I <sub>max</sub>	24.54	mA/ Cm <sup>2</sup>
V <sub>max</sub>	0.56	V
P <sub>max</sub>	0.01374	W/ Cm <sup>2</sup>
FF	0.83	
η	13.74	%

La figure (III.15) illustre la caractéristique I(V) et la figure (III.16) représente le rendement quantique interne et externe.



**Figure III.15 : Caractéristique I(V) de la cellule solaire conventionnelle.**



*Figure III.16 : Rendement quantique interne (rouge), externe (vert) en fonction de la longueur d'onde.*

Le rendement quantique est presque nul dans le domaine U-V à cause des recombinaisons Auger qui ont masqué l'effet d'absorption.

### III.7 Conclusion

Ce chapitre a mis en évidence la compréhension du phénomène de la diffusion du phosphore dans le silicium cristallin, sachant que le modèle qu'on a adopté dans ce travail, est un modèle qui traite les équations classiques de la diffusion.

La simulation a montré que le profil final de dopant ayant diffusé dans le silicium est fortement conditionné par les paramètres reliés à la surface. En effet, on a obtenu des profils très différents lorsque la concentration de surface est moyenne ou forte. Deux effets importants doivent impérativement être pris en compte dans les semiconducteurs.

En présence d'un gradient de dopant, le premier est la température et le second est le temps de diffusion.

Le profil de diffusion du phosphore dans le silicium présente une allure appelée : « kink-and-tail profiles » et qui est due à l'interaction entre les défauts ponctuels intrinsèques avec les différents états de charges. Il a été remarqué qu'à la fin du profil de diffusion, il correspond à une dissociation des paires dopants-lacunes et que dans la région à basse concentration des dopants, il est dû à l'interaction avec les auto-interstitiels gouvernant la diffusion afin de rétablir la limite de l'équilibre local. En outre, à une concentration de phosphore supérieure à la solubilité limite, il a été observé que la diffusion est ralentie par la formation des amas de dopants (clusters).

En effet, la concentration des dopants en surface est un facteur primordial, la diminution de sa valeur influe la collecte du courant de l'émetteur ainsi que la capacité de passivation, qui dépend à son tour de la longueur de diffusion des porteurs minoritaires et du niveau de dopage.

Cependant, la diffusion du phosphore dans notre cas est reliée à la formation de l'émetteur dans la cellule solaire, où la simulation a montré que le profil de diffusion est divisé en deux parties : la première a une allure d'une erfc et la deuxième une gaussienne.

Cette étude nous a dirigés vers une simulation d'une cellule solaire conventionnelle en premier lieu et d'une cellule à émetteur sélectif, prochainement dans le chapitre suivant en injectant les résultats de diffusion obtenus.



### III.8 Bibliographie

- [1] Dib Wassila « Modélisation des structures photovoltaïques : Aspects fondamentaux et appliqués », thèse de doctorat physique, UABT , 2010.
- [2] Baldamero Garcia jr. « Indium gallium nitride multijonction solar celle simulation using SILVACO/ATLAS » thèse de doctorat, Naval Postgraduation School, Monterey, California, 2007.
- [3] ATHENA/SILVACO « user's manual » Avril 2008.
- [4] Razvannegru « Conception et modélisation de pixels de photo détection », thèse de doctorat, 2008.
- [5] ATLAS/SILVACO « user's manual » Avril 2008.
- [6] Ghembaza Houcine « Optimisation du profil de distribution du phosphore dans les cellules solaires à base de silicium cristallin », mémoire de magister en physique, UABT, 2010.

## **Chapitre IV : Simulation de la cellule à émetteur sélectif**

## IV.1 Introduction

Il existe deux limites à l'obtention de hauts rendements. Elles apparaissent dans le cas de structures où l'émetteur est diffusé de façon homogène : dans le cas où les contacts sont déposés par sérigraphie, un émetteur faiblement dopé en surface compatible avec une passivation de surface efficace entraîne non seulement une forte augmentation de la résistance de contact, mais surtout un risque de court-circuit lors du recuit des contacts. Pour réduire les pertes par recombinaisons dans l'émetteur, tout en ayant une faible résistivité de contacts, il est possible d'introduire un dopage sélectif en face avant.

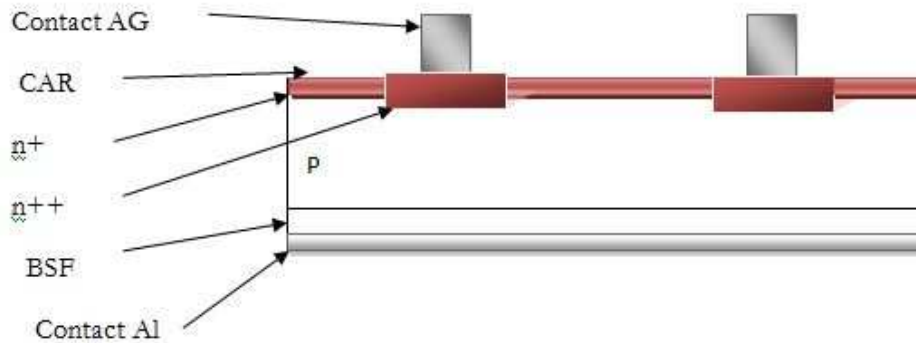
Dans ce chapitre, nous allons faire une étude de la formation d'émetteurs sélectifs, en se basant sur la simulation avec le module ATLAS/SILVACO. Par la suite une comparaison sera effectuée avec une structure à émetteur homogène. Mais en premier lieu, nous allons définir et mettre au point les différentes études antérieures.

## IV.2 Etat de l'art des émetteurs sélectifs

Un émetteur sélectif (Fig. IV.1) est une structure qui présente un différentiel de dopage : une partie fortement dopée recevra les contacts pour assurer une résistance de contact la plus faible possible, alors que la région entre les contacts métallique consiste en un émetteur faiblement dopé en surface, pour permettre une bonne passivation. De cette manière, il n'y a pas de compromis à faire sur les propriétés de l'émetteur homogène, qui doit être assez dopé pour obtenir un bon contact métal-semiconducteur, mais sans exagération afin que ses propriétés ne soient pas dégradées et pour pouvoir passiver efficacement sa surface.

Les avantages des émetteurs sélectifs peuvent être résumés comme suit :

- 1) Un bon rendement de collecte dans les régions faiblement dopées (pas de couche morte).
- 2) Une passivation efficace entre les contacts, due à une faible concentration de dopage en surface.
- 3) Une faible résistance de contact (les contacts sont déposés sur la partie fortement dopée de l'émetteur sélectif).
- 4) Une étape de recuit de contact moins critique grâce au fait que la partie de l'émetteur qui est situé au-dessous des contacts est plus profonde.
- 5) Une diminution du courant de saturation, résultant d'une amélioration directe de la tension de circuit ouvert et du courant de court-circuit.



**Figure IV.1 Représentation schématique d'une structure à émetteur sélectif.**

Les procédés utilisés habituellement pour réaliser une telle structure pour les cellules à haut rendement sont assez complexes, incluant des étapes de dépôt de résines photosensibles par spin-on et deux étapes de diffusion ; procédés pour la plus part inspirés de la micro-électronique. Pour l'industrie, la réduction des nombres d'étapes devienne indispensable afin de minimiser le coût.

Nous présentons les procédés industrialisables pour réaliser les émetteurs sélectifs :

1) Décapage de l'émetteur :

Le procédé consiste à diffuser un émetteur fortement dopé. Ensuite, nous décapons cet émetteur soit chimiquement (gravure humide en utilisant les acides), soit par gravure assistée par plasma après le dépôt des contacts sérigraphiés.

2) Diffusion à partir de deux sources dopantes :

Il s'agit de déposer deux sources dopantes présentant des concentrations différentes.

3) Dopant à partir d'une pâte de sérigraphie

4) Dopage par laser

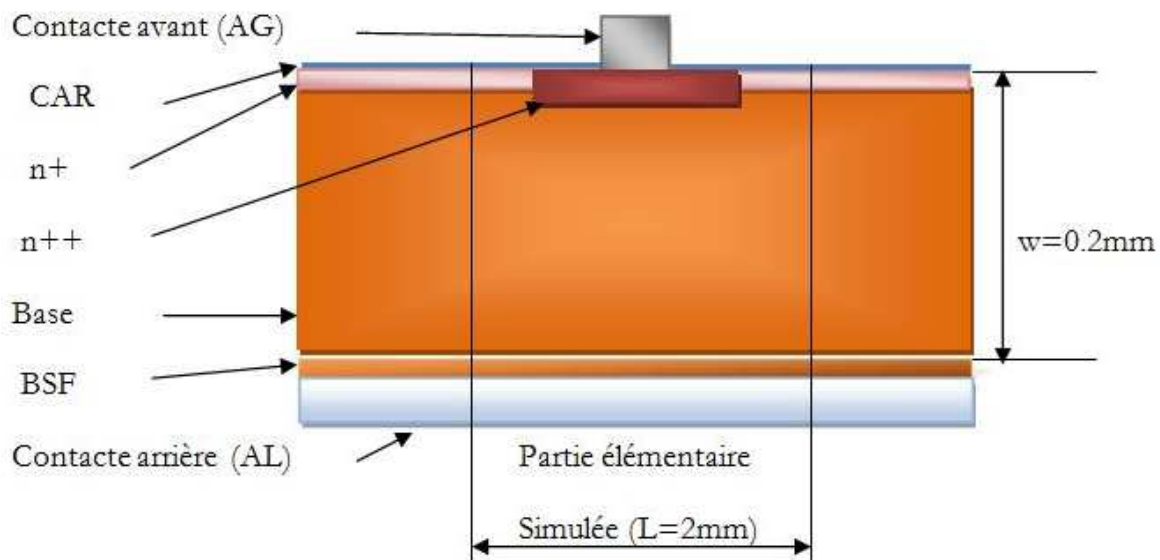
Notons que c'est en 1989 qu'une des premières publications sur le sujet des émetteurs sélectifs réalisés en RTP par recuit thermique rapide (Rapid Thermal Process) est présentée [1]. En 1991, IMEC [2] publie un procédé entièrement fondé sur la sérigraphie pour améliorer la réponse spectrale dans le bleu. En 1997, Horzel et all [3, 4] proposent une méthode beaucoup plus élégante pour réaliser le différentiel de dopage. Il suffit alors de déposer une pâte de sérigraphie dopée au phosphore suivant le motif des doigts et pendant la diffusion en four à tube, le phosphore dépose entre les doigts via une phase gazeuse, avec une concentration de surface beaucoup plus faible que sous les doigts. Ce procédé a permis à IMEC l'année suivante d'atteindre 17.9% de rendement sur 100 cm<sup>2</sup> (silicium CZ). En 1998, D. Merier [5] présente une

structure intéressante réalisée par sérigraphie. Cette fois, la base de la cellule est un silicium de type n. A la même période, D. Ruby [6] propose aussi un décapage de l'émetteur par la voie sèche, c'est-à-dire par plasma RIE (Reactive Ion Etching).

En 2006, Zerga et al [7] présente un nouveau procédé par gravure chimique (etch-back) des émetteurs fortement dopés après sérigraphie d'une pâte polymérique anti-acide. L'émetteur sélectif était de  $40\Omega/\square$  sous les contacts et  $80\Omega/\square$  sous le nitrure. Le procédé a été exploité par la suite par Brendel de l'Université de Konstanz. En 2008, le procédé a été intégré dans la fabrication des cellules solaires au silicium cristallin chez le groupe allemand : Centrotherm. Il est à noter que cette technologie est incluse dans le procédé pour lequel l'Algérie a opté avec Centrotherm. Actuellement, avec un émetteur sélectif dopé par laser, le rendement de conversion atteint 19.2% pour une cellule solaire à base de silicium multicristallin de  $100\text{ cm}^2$ [8].

### IV.3 Simulation de la structure à émetteur sélectif sous ATLAS/SILVACO

Une structure similaire à cellule conventionnelle a été simulée, avec une différence au niveau de l'émetteur. Celui-ci est faiblement dopé entre les contacts mais fortement dopé en-dessous (Figure. IV.2).



*Figure IV.2 : Structure de la cellule solaire à émetteur sélectif.*

Les données injectées dans ce programme concernant l'émetteur sont les suivantes :

- Profondeur de jonction n++ :  $0.5\ \mu\text{m}$
- Dopage de l'émetteur n++ : phosphore avec une concentration de  $2 \times 10^{21}\ \text{cm}^{-3}$

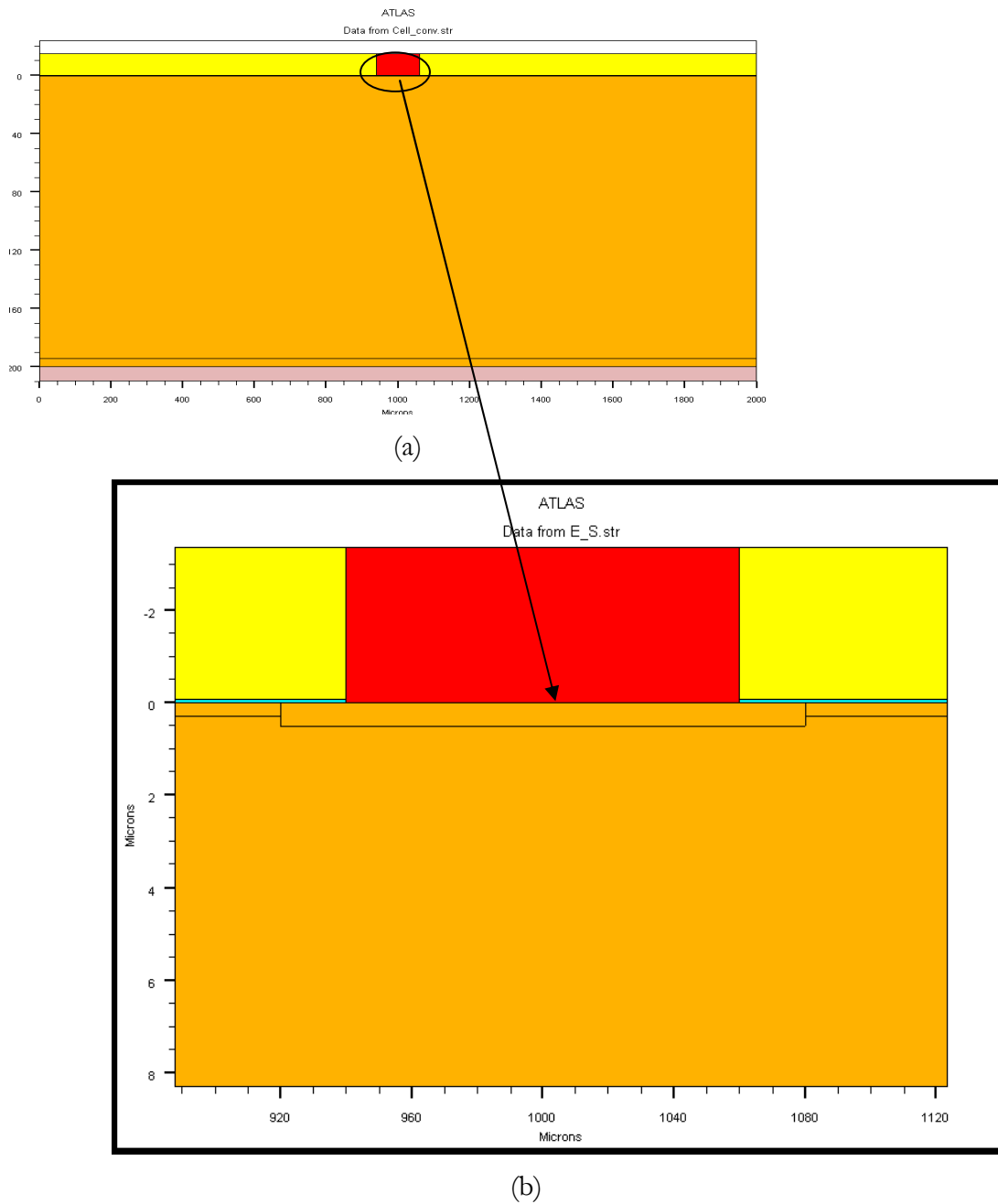
- Profil de diffusion n++ : une partie : erfc (fonction erreur complémentaire) et l'autre partie : gauss (fonction gaussienne)
- Profondeur de jonction n+ : 0.3  $\mu\text{m}$
- Dopage de l'émetteur n+ : phosphore avec une concentration de  $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$
- Profil de diffusion n+ : gauss

Le reste des caractéristiques sont les caractéristiques usuelles pour une cellule solaire conventionnelle.

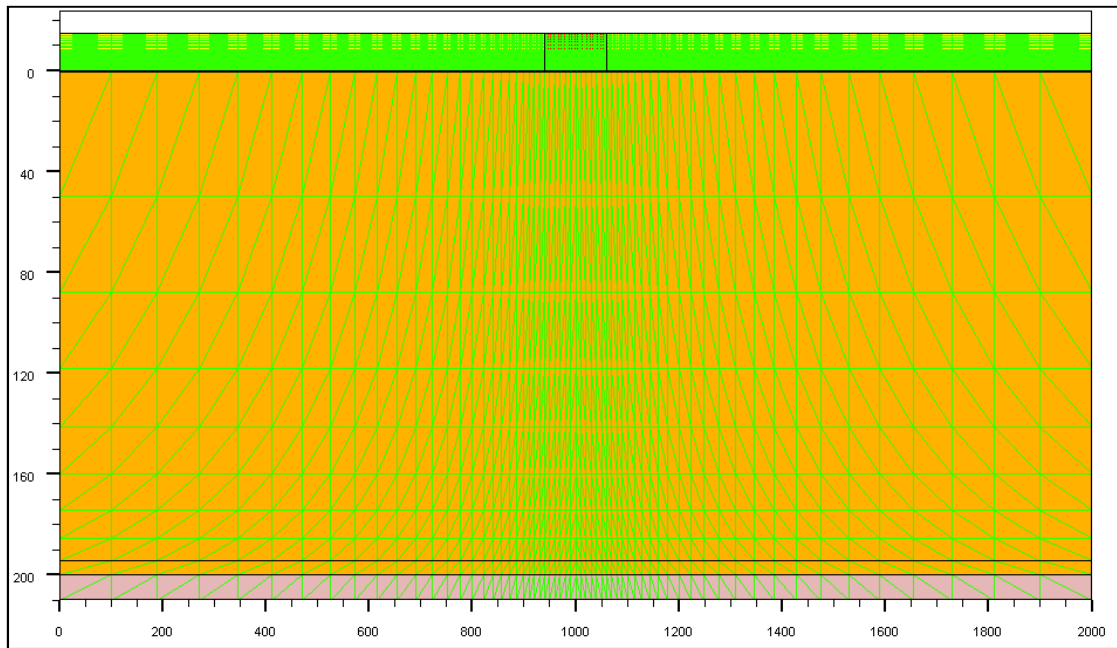
Les modèles physiques sont spécifiés en utilisant les commandes nécessaires. Ils incluent : la mobilité, les recombinaisons Auger et SRH

Pour ce qui concerne la méthode numérique incluse dans le programme de simulation, nous avons utilisé la méthode Newton intégrée dans Silvaco, qui est une méthode de résolution numérique de la totalité du système d'équations en un seul bloc, et qui est utilisée dans les cas de la convergence quadratique. Elle est utilisée aussi pour améliorer la vitesse de simulation.

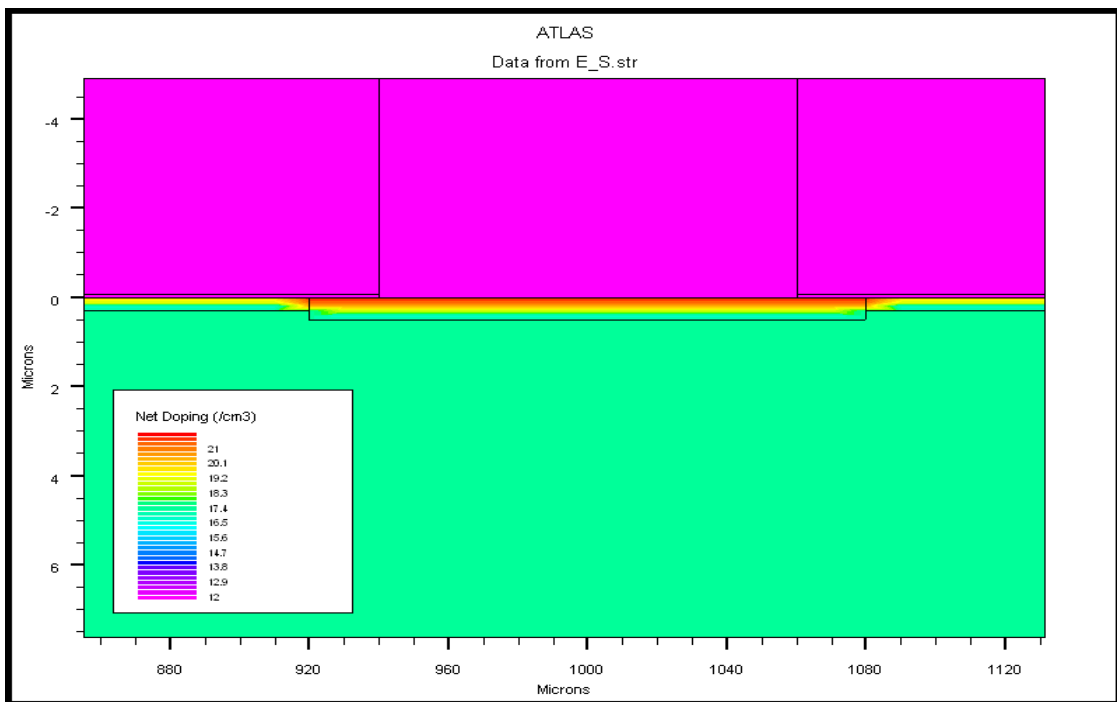
Ce programme nous donne directement après exécution les résultats suivants. La figure IV.3(a) présente la structure matricielle de la cellule solaire à émetteur sélectif. La figure IV.3(b) montre l'agrandissement de l'émetteur. La figure IV.3(c) présente le maillage de la structure et la figure IV.3(d) illustre les différentes zones de dopage.



*Figure IV.3 : a) Structure matérielle de la cellule solaire à émetteur sélectif ; b) Vue rapprochée de l'émetteur.*



(c)



(d)

**Figure IV-3 : c) illustration du maillage ; d) le détail du dopage de l'émetteur.**

La figure IV.4 représente la caractéristique I(V), Le graphe représenté reflète parfaitement les modèles, théorique et expérimental. La figure IV.5 représente le rendement quantique interne et externe.



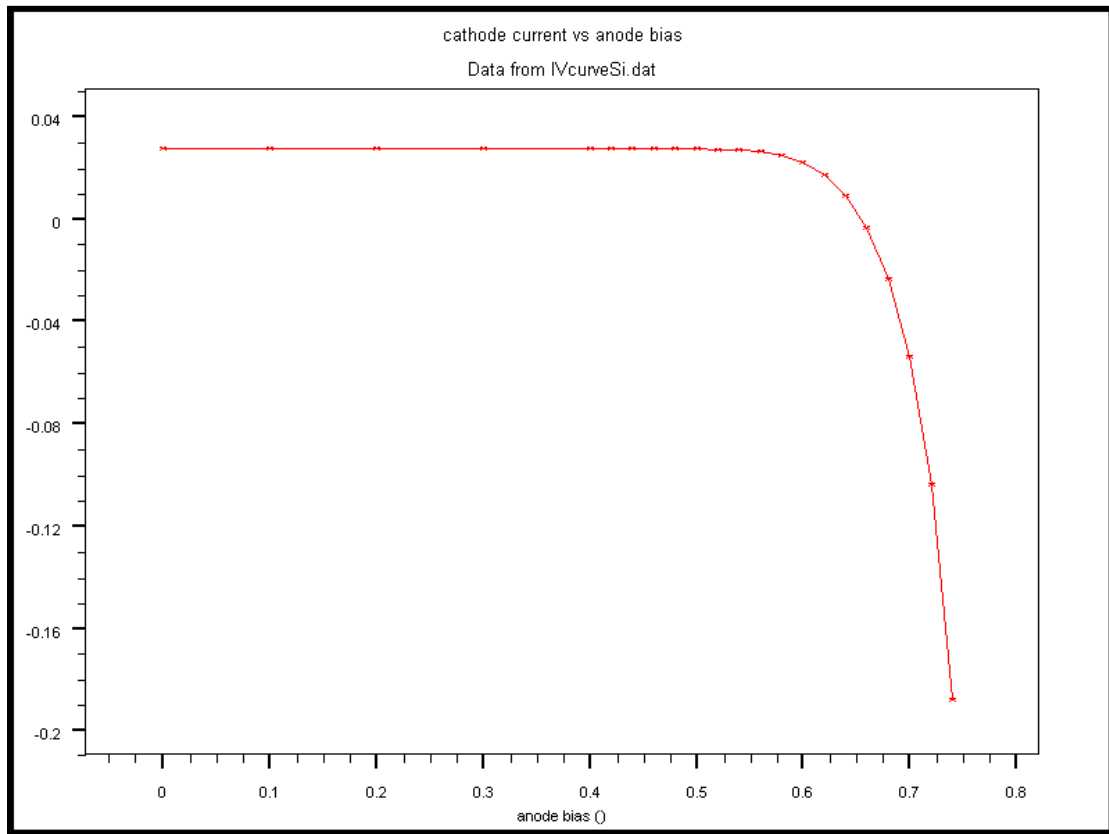


Figure IV.4 : Caractéristique  $I(V)$  de la cellule solaire à émetteur sélectif.

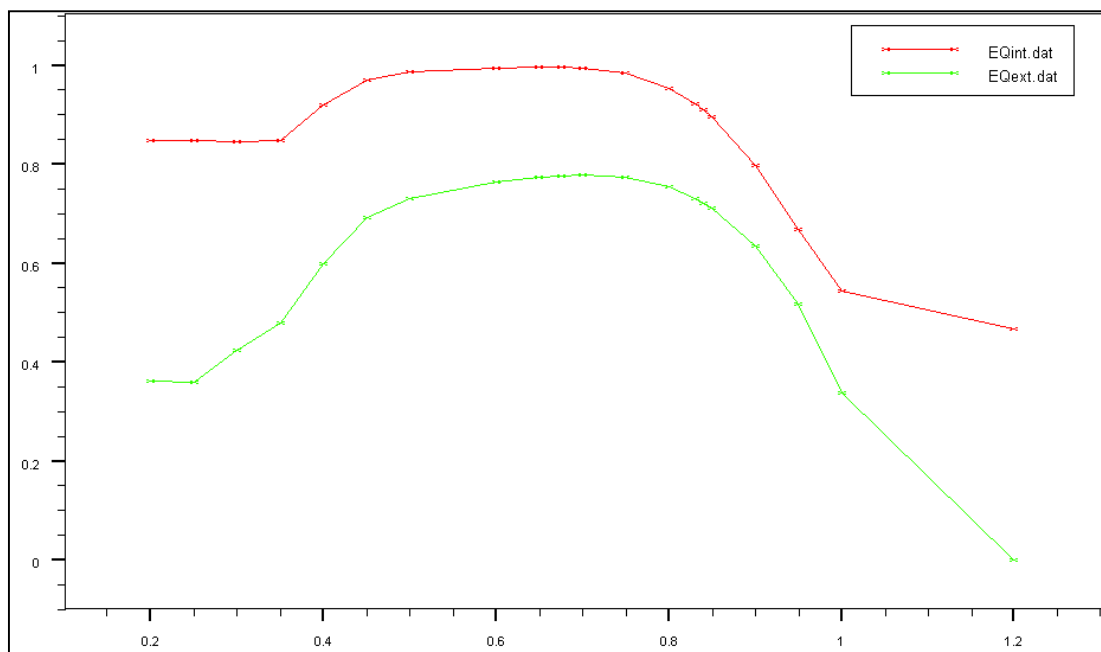


Figure IV.5 : Rendement quantique interne (rouge), rendement quantique externe (vert).

Le tableau IV.1 résume les résultats trouvés :

**Tableau IV.1 : Paramètres calculés pour une cellule solaire à émetteur sélectif.**

Paramètres	Cellule solaire à émetteur sélectif	Unités
I <sub>cc</sub>	27.35	mA/Cm <sup>2</sup>
V <sub>oc</sub>	0.65	V
I <sub>max</sub>	26.07	mA/ Cm <sup>2</sup>
V <sub>max</sub>	0.56	V
P <sub>max</sub>	0.01460	W/ Cm <sup>2</sup>
FF	0.81	
η	14.6	%

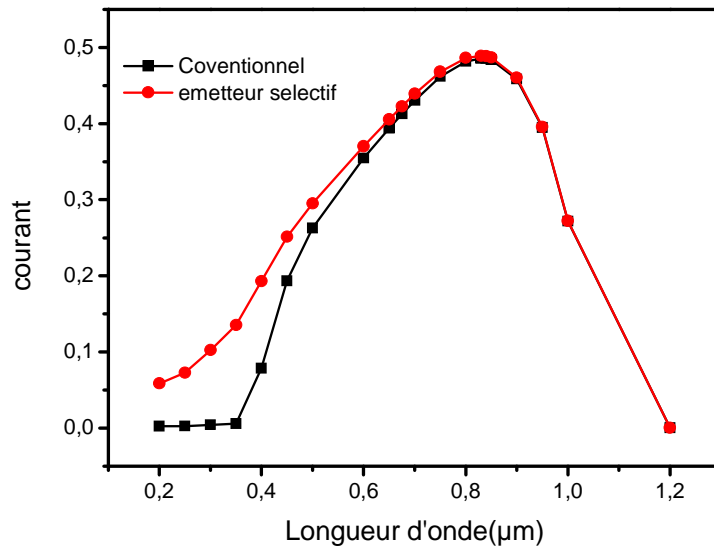
#### IV.4 Comparaison des deux structures (émetteur sélectif et conventionnel)

Les résultats obtenus dans le tableau IV.2 montre une amélioration du rendement de conversion de **0.86%**.

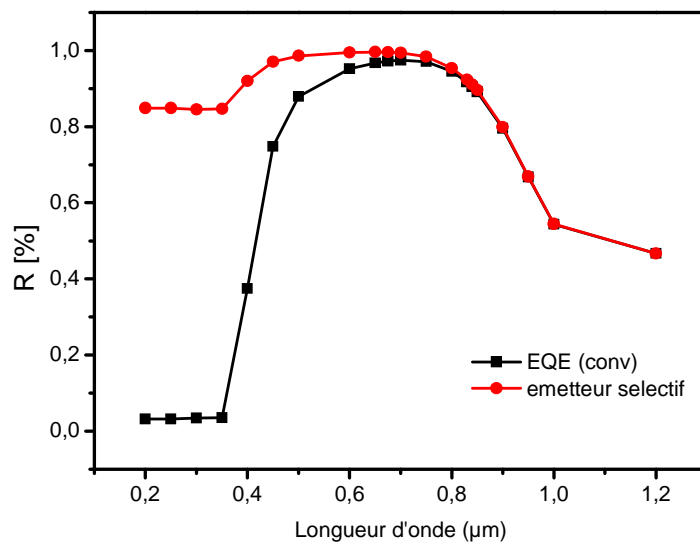
**Tableau IV.2 : Paramètres des deux structures**

paramètres	Emetteur homogène	Emetteur sélectif
ICC [mA/cm <sup>2</sup> ]	25.32	27.35
VOC [V]	0.64	0.65
I <sub>max</sub> [mA/cm <sup>2</sup> ]	24.54	26.07
V <sub>max</sub> [V]	0.56	0.56
P <sub>max</sub> [W]	0.01374	0.01460
FF	0.83	0.81
η [%]	13.74	14.6

Nous avons relevé aussi la réponse spectrale des deux structures (Figure IV.6) ainsi que le rendement quantique interne (IQE) (Figure IV.7).



*Figure IV.6 : Réponse spectrale : structure à émetteur sélectif (rouge), conventionnelle (noire).*



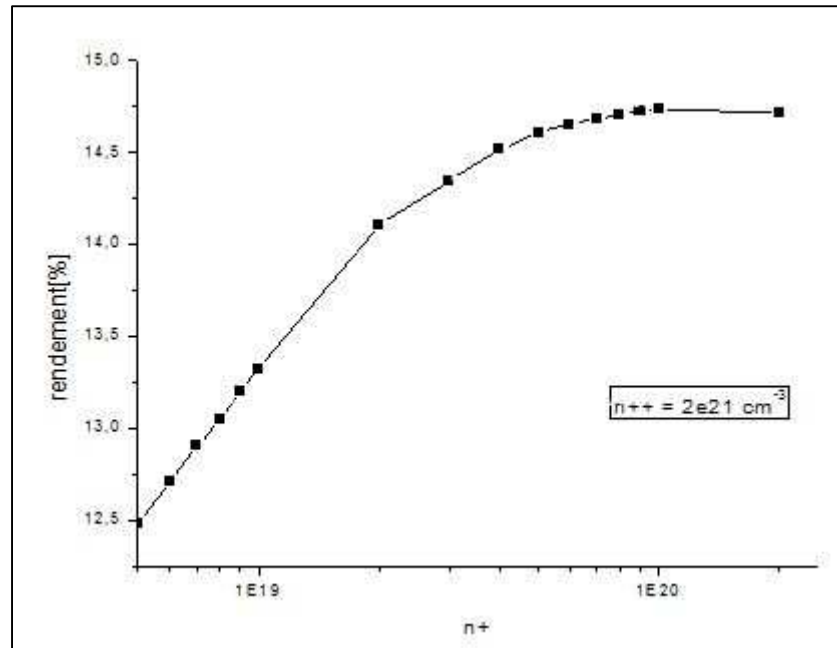
*Figure IV.7 : Rendement quantique interne : structure à émetteur sélectif (rouge), conventionnelle (noire).*

Selon les graphes obtenus, on peut dire que le gain est illustré dans le domaine UV-visible du spectre solaire. Cela est dû à la passivation de la surface par la couche antireflet SiN :H.

## IV.5 Optimisation de la structure à émetteur sélectif

### ➤ Influence du dopage de l'émetteur

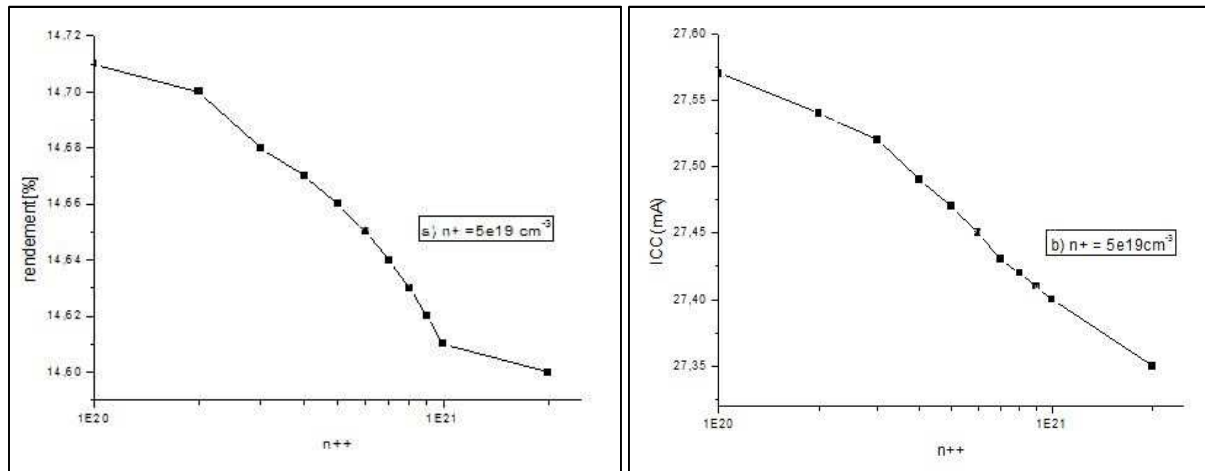
On a fait l'optimisation en variant la concentration de l'émetteur situé sous la couche antireflet et en fixant le dopage de l'émetteur fortement dopé situé sous les contacts à la limite de solubilité  $2 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ .



*Figure IV.8 : Variation du rendement en fonction de la concentration de l'émetteur faiblement dopé*

D'après la courbe de variation donnée dans la figure IV.8, le rendement augmente fortement avec la concentration des dopants en surface. Ensuite, un régime de saturation est établi où le rendement est maximal pour une concentration de l'émetteur égale  $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ . On peut conclure que la surface est passivée. Par contre, le rendement est dégradé lorsque les forts dopages sont atteints à cause des recombinaisons Auger. Aux faibles dopages, le rendement est faible car le champ est insuffisant pour créer les paires électron/trou.

Dans la figure IV.9, on reporte les résultats obtenus par simulation concernant la variation du rendement en fonction de la concentration pour un émetteur fortement dopé.

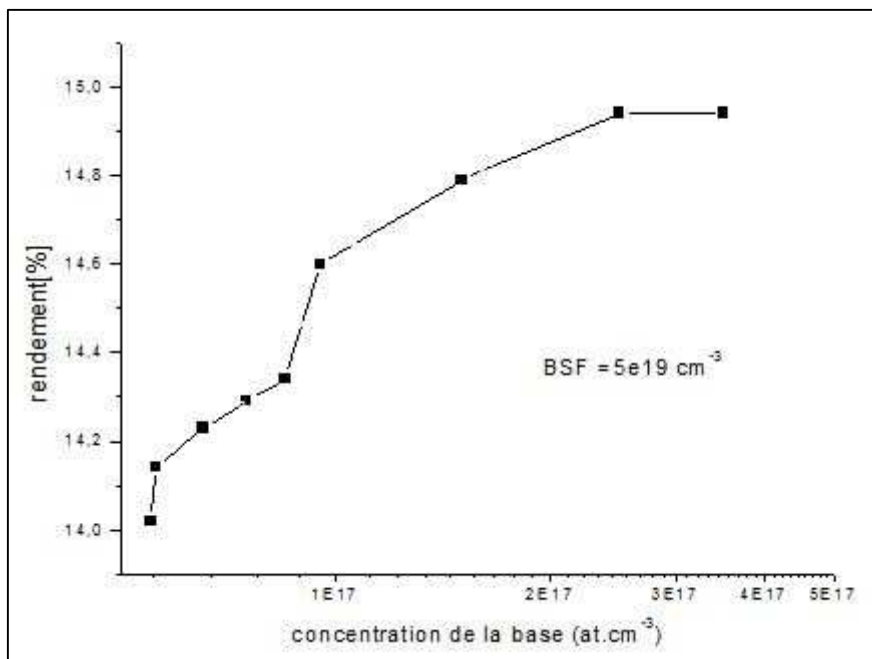


**Figure IV.9 :** a) Variation du rendement en fonction de la concentration de l'émetteur fortement dopé  
 b) Variation du courant court-circuit en fonction de l'émetteur fortement dopé

Selon la Figure IV.9(a): la courbe est inversement proportionnelle au dopage. Plus le dopage augmente, plus le rendement se dégrade. Cette dégradation peut être expliquée par les recombinaisons Auger qui interviennent intrinsèquement dans les forts dopages. Avec un dopage de  $10^{20} \text{ cm}^{-3}$ , le rendement est maximal à 14.71%. On remarque bien d'après la Figure IV.9(b) que l'augmentation du rendement est due à l'augmentation du courant de court-circuit. Par contre la tension en circuit-ouvert est restée quasiment stable.

On fait aussi l'optimisation du dopage de la base en fixant la concentration du champ de surface arrière localisée BSF à  $5.10^{19} \text{ cm}^{-3}$ .

➤ **Influence du dopage de la base**

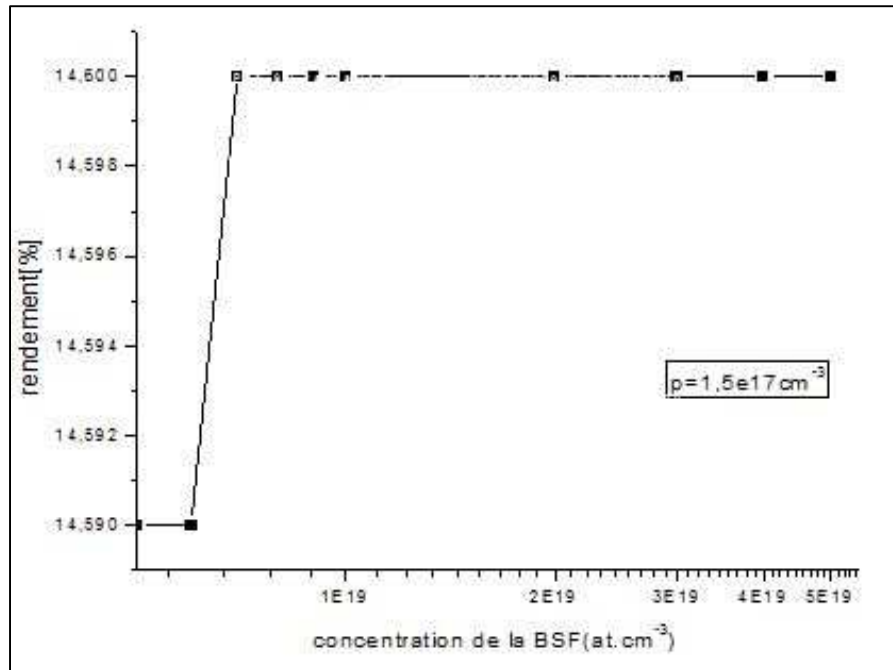


**Figure IV.10:** Variation du rendement en fonction de la concentration de la base.

Lorsqu'on augmente le dopage du substrat, le rendement croit grâce à l'augmentation de la mobilité des électrons et de la durée de vie des porteurs de charges.

Cette fois-ci, on fait l'étude de l'influence de la concentration du BSF.

➤ **Influence du dopage du BSF**



*Figure IV.11 : Variation du rendement en fonction de la concentration de la BSF.*

L'augmentation du niveau du dopage du BSF donne une amélioration importante du rendement. La recombinaison dans le BSF est très faible étant donné son emplacement sur la face arrière de la cellule. Un BSF fortement dopé permet de réduire la recombinaison au niveau du contact métal semiconducteur. Ceci est dû à la création de la barrière de potentiel causé par la différence du dopage entre le BSF et la base.

➤ **Effet de la couche anti reflet**

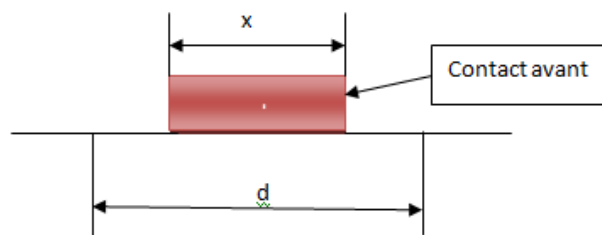
**Tableau IV.3 : Résultats avec une couche SiN<sub>x</sub>:H et double couches, une SiN<sub>x</sub>:H l'autre SiO<sub>2</sub>.**

Paramètres	couche SiN <sub>x</sub> :H	Une couche SiN et autre SiO <sub>2</sub>
ICC ([mA/cm <sup>2</sup> ])	27.35	27.81
VCO ([V])	0.65	0.65
<b>η</b> [%]	14.6	14.85

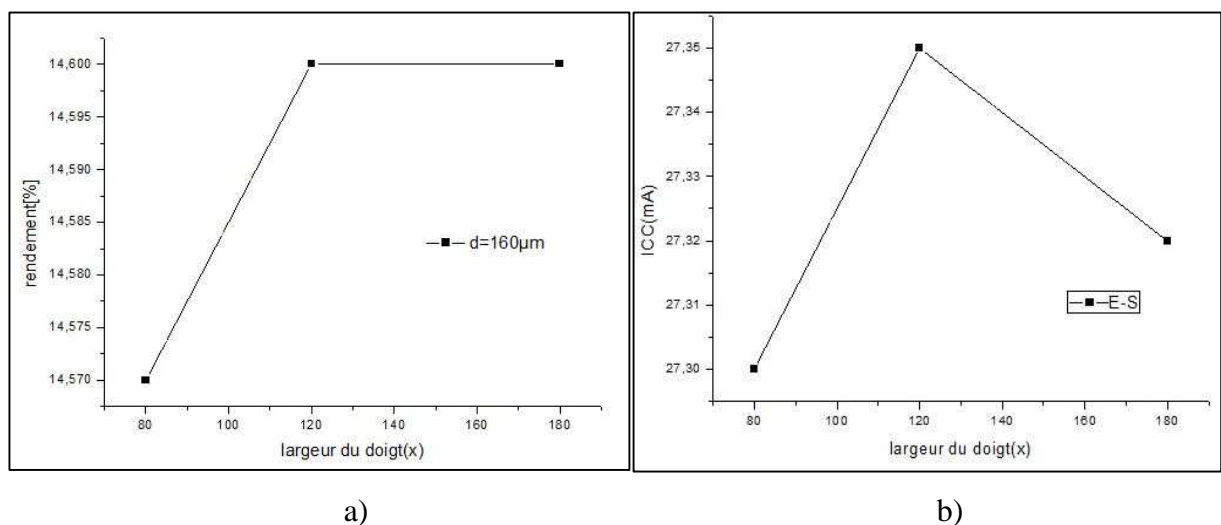
D'après les résultats obtenus, on remarque bien qu'une couche fine d'oxyde de silicium permet d'améliorer le courant court-circuit et le rendement car il a un indice de réfraction inférieur (1.46) que celui du nitrure de silicium (2.05). Ceci permet d'améliorer la passivation et la réflectivité de la face avant en diminuant la vitesse de recombinaison.

➤ **Effet de la largeur des doigts**

La figure (IV.12) représente l'illustration des largeurs du doigt et de la zone fortement dopée notées respectivement ( $x$ ) et ( $d$ ) pour une structure à émetteur sélectif. Nous représentons en figure (IV.13) les graphes d'optimisation de la largeur des doigts. Nous illustrons en figure IV.13(a) la variation du rendement. A partir de cette courbe, le rendement augmente jusqu'à une largeur de  $120\mu\text{m}$ . Au-delà de cette dernière il deviendra constant. La figure IV.13(b) représente la variation du courant court-circuit. Au point de  $x=120\mu\text{m}$ , la courbe fait apparaître un pic de  $27,35\text{mA}$ . Le courant diminue au-delà de cette valeur. Cette diminution est due à l'augmentation du taux d'ombre qui influe négativement sur les performances de la cellule.

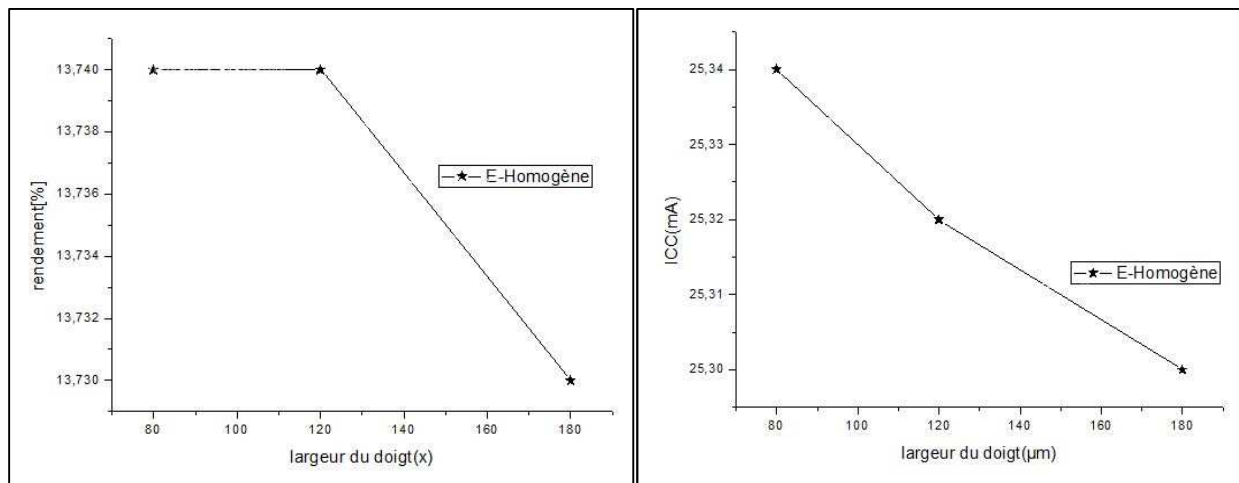


**Figure IV.12 : Largeur du doigt ( $x$ ) et la largeur de la zone fortement dopée ( $d$ )**



**Figure IV.13 : a) Variation du rendement en fonction de la largeur du doigt pour une structure à émetteur sélectif.**  
**b) Variation du courant court-circuit en fonction de la largeur du doigt.**

En revanche, pour une structure homogène, le rendement reste constant jusqu'à  $x=120\mu\text{m}$ , où il diminuera pour des valeurs supérieures (figure IV.14.a)). Pour le courant court-circuit représenté sur la figure IV.14(b), la variation est inversement proportionnelle à la largeur du doigt. En effet, plus on augmente cette dernière et plus le courant diminue avec un point de flexion de la pente au niveau  $x=120\mu\text{m}$ .



a)

b)

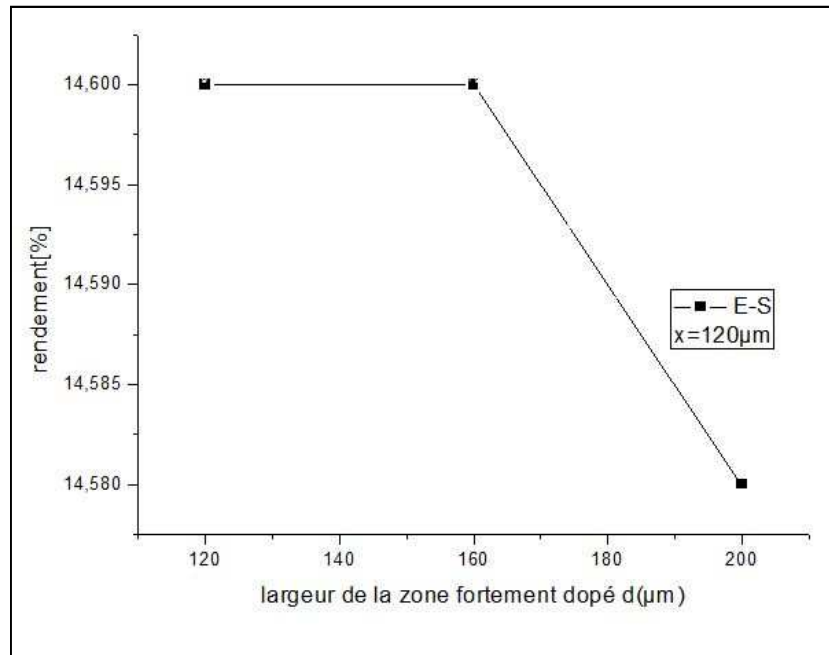
**Figure IV.14 :a) Variation du rendement en fonction de la largeur du doigt pour une structure à émetteur homogène.**

**b) Variation du courant court-circuit en fonction de la largeur du doigt.**

#### ➤ Effet de la zone fortement dopée de l'émetteur

Nous représentons l'effet de la variation de la largeur de la zone fortement dopée sur le rendement (figure IV.15). Nous remarquons que le rendement reste constant jusqu'à une largeur  $d=160\mu\text{m}$ . Au-delà de celle-ci, le rendement diminue brusquement. La cause réside dans l'augmentation de la zone fortement dopée où les recombinaisons Auger interviennent.





*Figure IV.15 : Variation du rendement en fonction de la largeur de la zone fortement dopée.*

## IV.6 Conclusion

La simulation avec SILVACO a été efficace et bénéfique. Elle nous a permis d'obtenir et de prédire de bons résultats concernant les émetteurs sélectifs.

On a pu avoir une amélioration au niveau du rendement de conversion avec 1.11% et une amélioration du rendement quantique dans le domaine UV ainsi que dans le domaine du visible. Cette amélioration est due à la passivation de surface en premier lieu car la diminution de la concentration du phosphore en surface permet à l'hydrogène de pénétrer plus facilement dans le matériau sans être piégé au niveau des atomes de phosphore.

On peut ajouter que la forte concentration du phosphore sous les contacts joue un double rôle, d'un côté une bonne collecte du courant et d'un autre côté une diminution de sa résistance.

On déduit que le rôle de l'émetteur est très important dans la fabrication de la cellule solaire, pour cela une bonne optimisation de l'épaisseur et du dopage est nécessaire.

L'optimisation de la largeur du doigt, dans le cas d'émetteurs sélectifs, donne un point critique à  $120 \mu\text{m}$ . En ce qui concerne la largeur de la zone fortement dopée, la largeur critique est de  $160 \mu\text{m}$ .

## IV.7 Bibliographie

- [1] Somberg H.: « Efficient semicrystalline solar cells using rapid thermal processing for emitter tailoring », 9<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference (1989), pp.380-382.
- [2] Szlufcik J., Elgamel M., Nijs J., and Mertens R.: « Simple integral screen printing process for selective emitter polycrystalline silicon solar cells ». *Appl.phys.lett.*59, 13 (1991), pp. 1583-1584.
- [3] Horsel J., Szlufcik J., Honore M., Nijs J., and Mertens R.: « Novel Method to form selective emitters in one diffusion step without etching or masking », 14<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference (1997), pp.61-64.
- [4] Szlufcik J., Duerinckx F., Kerschaver E., V. Einhaus R., Ziebakowski A., Vazsony E., Clercq K. D., Horzel J., Frisson L., Nijs J. and Mertens R.: « Simplified industrial type process for high efficiency crystalline silicon solar cells », 14<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference (1997), Vol.1, pp.380-383.
- [5] Meier D. L., Davis H. P., Shibata A., Abe T., Knoshita K., Bishop C. Mahajan N.S., Rohatgi A., Doshi P. and Finnegan M.: « Self-doping contacts and associated silicon solar cells structures », 2<sup>nd</sup> world conference and exhibition on Photovoltaic Solar Energy conversion (1998), vol. 2, pp. 1494.
- [6] Ruby D. S., Fleddermann C.B., Roy M. and Narayann S.: « Self-aligned selective emitter plasma-etch back and passivation for screen-printed silicon solar cells ». *Solar Energy Material and Solar Cells* 48 (1997), pp. 255-260.
- [7] A. Zerga, A. Slaoui, J.C. Muller, B. Bazer-Bachi, D. Ballutaud, N. Lê Quang and G. Goer “Selective emitter formation for large-scale industrially mc-Si solar cells by Hydrogen plasma and wet etching” *Proceeding of the 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Dresden-Germany, 4-8 September (2006)*, pp. 865-869
- [8] Eunjoon Lee, Hyunwoo Lee, Junyoung Choi, Dongjun Oh, Jimyung Shim, Kyungyeun Cho, Jisun Kim, Soohong Lee, Brett Hallam, Stuart R. Wenham, Haeseok Lee “Improved LDSE processing for the avoidance of overplating yielding 19.2% efficiency on commercial grade crystalline Si solar cell”, *Solar Energy Materials & Solar Cells* 95 (2011) 3592–3595

## **Conclusion Générale**

Au cours de ce travail, nous avons pu mettre en évidence l'influence de la concentration de la surface de l'émetteur sur les propriétés de transport dans le silicium, ainsi que sur la densité d'états d'interface et par conséquent sur la qualité de passivation de la surface. Le courant de court-circuit et la tension de circuit ouvert dépendent des calculs de courant de saturation. Ces calculs montrent l'importance de la concentration de dopage ainsi que la vitesse de recombinaisons des porteurs en surface. Pour toutes ces raisons liées aux fortes concentrations de dopage dans l'émetteur et à la réduction des valeurs du courant de saturation, l'utilisation d'une structure à émetteur sélectif se justifie.

A travers la simulation avec le module ATHENA / SILVACO, nous avons pu étudier le phénomène de la diffusion du phosphore dans le silicium. Egalement, nous avons pu sélectionner les paramètres les plus influençant. Les profils tracés mettent clairement en évidence les effets de la température et du temps en présence d'un gradient de dopant. Cependant, la diffusion du phosphore dans notre cas est liée à la formation de l'émetteur dans la cellule solaire à émetteur sélectif. Nous avons pu conclure qu'une bonne diffusion donne un bon rendement.

Dans une deuxième partie, nous avons fait une simulation avec le module ATLAS/SILVACO en intégrant les résultats obtenus dans le module ATHENA. Cette simulation nous a permis d'étudier la structure dotée d'émetteur sélectif et la comparer avec la structure dotée de l'émetteur homogène 'conventionnel'. Nous avons obtenu des résultats satisfaisants. En effet, nous sommes arrivés à déterminer un rendement aussi élevé que celui des cellules solaires conventionnelles avec un gain de 1.11%. Notons que l'amélioration a été dans le domaine UV ainsi que dans une partie du domaine visible à cause de la passivation de la surface, où l'hydrogène pénètre facilement dans le silicium sans être piégé par les atomes du phosphore. Ceci permet de combler les défauts cristallins qui sont responsables sur les recombinaisons. La surface est passivée dans notre travail par un dépôt de couche antireflet  $\text{SiN}_x\text{:H}$  qui a d'excellentes propriétés optiques et électriques, ce qui a influé positivement sur le rendement.

Au niveau industriel, l'avantage d'une structure à émetteur sélectif, hormis celui d'améliorer le rendement de conversion, est d'offrir une tolérance supplémentaire lors de la fabrication de la cellule à deux niveaux : lors de la diffusion de l'émetteur, et lors du recuit des contacts. Dans ces deux cas, la partie fortement dopée de l'émetteur évite tout risque de shunt de la jonction alors qu'un émetteur homogène doit composer entre une faible résistivité de contact et une passivation de surface.

Comme perspectives, nous pouvons améliorer encore davantage les performances d'une telle structure en cherchant d'autres techniques de fabrication et de métallisation tout en essayant de combiner entre les matériaux pour réaliser des contacts plus performants avec un coût raisonnable.

## Résumé

L'électricité photovoltaïque est obtenue par la transformation directe de la lumière du soleil en électricité, au moyen de cellules photovoltaïques. Cette énergie fortement utilisée de nos jours reste un sujet d'actualité. En effet, de nombreuses recherches sont lancées dans ce sens afin mieux exploiter les ressources naturelles. Néanmoins, il existe de pertes d'énergie technologiques et physiques qui minimisent le rendement de conversion. L'objectif de notre étude, est d'optimiser les émetteurs sélectifs des cellules solaires à base de silicium multicristallin mc-Si en utilisant le logiciel SILVACO. Une structure où l'émetteur est fortement dopé sous les contacts ohmiques a été réalisé, pour avoir une bonne qualité contact/semiconducteur, alors qu'entre les contacts l'émetteur a été faiblement dopé afin de passiver la surface par le dépôt de la couche anti reflet  $\text{SiN}_x\text{:H}$ . L'émetteur simulé a été dopé par  $\text{POCl}_3$  ( $40\Omega/\square$ ). Les avantages d'une telle structure ont pu être observés sur les courbes du rendement quantique interne où le gain est bien illustré dans la partie UV-Visible du spectre solaire. Le gain du rendement de conversion a donné 1.11% par rapport à celui d'une cellule conventionnelle.

**Mots clés :** Cellule solaire, silicium, Emetteur sélectif, Diffusion  $\text{POCl}_3$ , Passivation

## Abstract

Photovoltaic electricity is obtained by the direct conversion of sun light into electricity using photovoltaic cells. This highly used energy is a topic of much discussion nowadays. Indeed, much research is undertaken in this direction to make better use of natural resources. However, there are energy losses that minimize physical and technological conversion efficiency. The aim of our study is to optimize the selective emitter solar cells based on multicrystalline mc-Si using the Silvaco software package. A structure in which the emitter is heavily doped in the ohmic contacts was made to have a good quality of contact /semiconductor while between contacts the emitter was lightly doped to make the surface passive by depositing an antireflection  $\text{SiN}_x\text{:H}$  layer. The simulated emitter was doped by  $\text{POCl}_3$  ( $40\Omega/\square$ ). The advantages of such a structure could be observed on the curves of the internal quantum efficiency where the gain is evident in the UV-visible solar spectrum and the gain of the conversion efficiency has been 1.11% compared to a conventional cell.

**Keywords:** Solar Cell, Silicon, Selective Emitter,  $\text{POCl}_3$  Diffusion, Passivation

## ملخص

تم الحصول على الكهرباء الضوئية التي تحول ضوء الشمس مباشرة إلى كهرباء باستخدام الخلايا الكهروضوئية. هذه الطاقة المستخدمة اليوم تشكل موضوع ساخن. في الواقع، تجرى الكثير من الأبحاث في هذا الاتجاه لإستخدام أفضل للموارد الطبيعية. ومع ذلك، هنا كخسائر التي تقلل من الطاقة المادية والتكنولوجية لكفاءة التحويل. الهدف من دراستنا هو تحسين الخلايا الشمسية الانتقائية mc-Si باستخدام برنامج Silvaco. ومن خلال بنية لباعث انتقائي بشدة في الاتصالات أومية ليكون الاتصال ذو نوعية جيدة / أشباه الموصلات. بينما كان بين الاتصالات الباعث خفيف لإيقاف فاعلية السطح من خلال إيداع طبقة ضد انعكاسية من  $\text{SiN}_x\text{:H}$ . وكان الإرسال بواسطة مخدر محاكاة  $\text{POCl}_3$  ( $40\Omega/\square$ ). ويمكن ملاحظة مزايا مثل هذه البنية على الطريق لكفاءة الكم الداخلية إذ كسبنا مرثيا في الطيف المرئي للأشعة الشمسية فوق البنفسجية فكانت الزيادة في كفاءة التحويل ب 1.11%. مقارنة مع الخلية التقليدية.

**الكلمات المفتاحية:** الخلايا الشمسية، السليسيوم، باعث انتقائي، ناشر  $\text{POCl}_3$ ، التخميل