

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE
Université Akli Mohand Oulhadj - Bouira



Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées
Département de physique

Mémoire pour l'obtention du diplôme de Master
Filière : Physique
Spécialité : Physique des Matériaux

Présenté par :
ADHIM YOUNES

Thème

**Amélioration de l'efficacité des cellules
solaires en silicium cristallin en optimisant
le dopage de la région de l'émetteur**

Evaluer par le jury composé de :

Mme S. MAHDID
M. D. MADI
Mme C. BOUDAOD
M. T. HAMMA

MAA
Prof
MAA
MCB

Encadreur
Co-encadreur
Examineur
Examineur

Année Universitaire 2020/2021

Remerciements

Avant tous, nous remercions ALLAH de nous avoir donné la force, la volonté et la patience qui nous ont permis de continuer le parcours scolaire de master malgré toutes les difficultés.

*Je tiens à exprimer mes vifs remerciements à mon encadreur Madame **Mahdid Saida** enseignant à la faculté des sciences et des sciences Appliquée pour son encadrement efficace, ses conseils précieux et pour les efforts qu'il a consenti tout au long de la réalisation de ce travail.*

*Je tiens à adresser mes remerciements à monsieur **MADI Djamal** pour avoir accepté aussi d'encadrer mon mémoire sans oublier ces conseils et son aide.*

*Je tiens également à remercier monsieur **HAMMA Issam** et Melle **BOUDAOUO Chahrazed** enseignants au département de Physique pour avoir aimablement accepté de prendre part au jury en tant qu'examineurs.*

Je tiens aussi à remercier tout les enseignants de département physique pour tous les conseils donnés tout le long de mes études.

Enfin, je suis particulièrement reconnaissante à mes parents, messœurs, mes frères surtout mon frère Hamid et toute ma famille qui n'ont ménagé aucun effort pour mesoutenir.

MERCI à toute personne ayant eu confiance en moi et en mes capacités un jour.

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités sur les cellules photovoltaïques	4
I.1 Introduction	5
I.2. Potentiel solaire	5
I.2.1. Potentiel extraterrestre solaire	6
I.2.2 Position du soleil	7
I.2.3 Géométrie d'orientation : collecteur- faisceau du soleil.....	8
I.2.4 Spectre solaire	9
I.2.5 Masse d'air	10
I.3 Semi-conducteur	10
I.3.1 Semi-conducteur intrinsèque	12
I.3.1.1 Différents types de dopage	13
I.3.2 Interaction photon semi-conducteur.....	16
I.4 La jonction PN	16
I.4.1 La jonction PN à l'équilibre.....	17
I.4.2 La jonction PN polarisée.....	18
I.4.3 La jonction PN sous éclairnement.....	19
I.5 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	19
I.5.1 L'effet photovoltaïque.....	20
I.6 Recombinaison des porteurs de charge dans le silicium.....	21
I.6.1 La recombinaison radiative.....	22
I.6.2 La recombinaison Auger.....	23
I.6.2 La recombinaison via les défauts.....	23

I.7	Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque.....	23
1.7.1	Caractéristique courant/tension.....	24
1.7.2	Courant de court-circuit I_{CC}	26
1.7.3	Tension de circuit ouvert V_{OC}	26
1.7.4	Facteur de forme	26
1.7.5	Le rendement	27
I.8	Les filières photovoltaïques	27
I.8.1	Cellules solaires à base de silicium cristallin	27
1.8.1.1	Silicium multi cristallin.....	29
1.8.1.2	Silicium monocristallin.....	29
I.8.2	Cellules photovoltaïques en couches minces	30
1.8.2.1	Cellules photovoltaïques à base de silicium amorphe.....	30
1.8.2.2	Cellules CIGS	31
1.8.2.3	Cellules CdTe.....	31
I.8.3	Cellules à haut rendement.....	32
1.8.3.1	Cellules photovoltaïques organiques.....	32
1.8.3.2	Cellules à multi jonctions.....	32
I.9	Conclusion.....	33
I.10	Références bibliographiques du chapitre I.....	34
	Chapitre II : L'état de l'art de silicium monocristallin et polycristalin.....	36
II.1	Introduction.....	37
II.2	Notions fondamentales sur le silicium monocristallin (mono-Si).....	37
II.3	Propriétés cristallographiques du mono-Si.....	37
II.3.1	Structure cristalline.....	38
II.3.2	Défauts dans le silicium.....	39
II.3.2.1	Défauts dans la maille cristalline.....	39
II.3.3	Impuretés métalliques.....	41

II.3.4 L'oxygène.....	42
II.4 Propriétés électriques du silicium monocristallin.....	42
II.5 Dopage du mono silicium.....	43
II.6 Propriétés optiques du silicium monocristallin.....	44
II.7 Propriétés du silicium poly cristallin.....	46
II.7.1 Généralités.....	46
II.7.2 Propriétés du silicium poly cristallin.....	46
II.7.2.1 Structure cristalline.....	46
II.7.3 Les défauts cristallins dans le silicium.....	47
II.7.3.1 Interaction des impuretés et défauts.....	47
II.7.3.2 Défauts natifs.....	49
II.7.3.3 Impuretés non métalliques (oxygène et carbone).....	49
II.7.3.4 Impuretés métalliques et leurs complexes.....	50
II.7.3.5 Activité électrique des défauts étendus.....	50
II.8 Effet des joints de grains sur les performances des cellules photovoltaïque.....	51
II.9 Propriétés optiques.....	52
II.10 Conclusion.....	54
II.11 Références bibliographiques du chapitre II.....	55
Chapitre III : Résultats et discussions.....	56
III.1 Introduction.....	57
III.2 Présentation du logiciel de simulation PC1D.....	57
III.2.1 Aperçu général du logiciel.....	57
III.2.2 L'environnement du logiciel PC1D.....	58
III.2.3 Fonctionnement du PC1D.....	59
III.2.4 Visualisation des résultats.....	60
III.3 Cellule photovoltaïque simulée et paramètres utilisés.....	60
III.3.1. Cellule photovoltaïque simulée.....	60

III.3.2 Paramètres de la structure simulée.....	62
III.4 Exploitation des résultats de la simulation.....	62
III.4.1 Effet de l'épaisseur de l'émetteur sur les grandeurs photovoltaïques.....	63
III.4.2 Effet du niveau de dopage de l'émetteur sur les grandeurs photovoltaïques.....	67
III.5 Conclusion.....	71
III.6 Références bibliographiques du chapitre III.....	72
Conclusion générale.....	73
Résumés du mémoire : Arabe, Anglais, Français.....	75
ملخص.....	75
Abstract.....	75
Résumé.....	75

Introduction générale

En raison du développement de l'industrie, du transport et des moyens de communication, une croissance de la consommation mondiale d'électricité a été observée pendant ces dernières décennies. Cependant, la plupart de l'énergie électrique est produite par combustion de ressources non renouvelables (carbone, pétrole, gaz, nucléaire) dont le délai d'épuisement est estimé à quelques décennies. De plus, ce type de production d'énergie est très polluant. En conséquence, le développement des sources d'énergies renouvelables est donc d'actualité.

Parmi les sources d'énergies renouvelables, on compte le vent, les flux marins et océaniques, la géothermie, le solaire photovoltaïque (PV), etc... Ce dernier est une source d'énergie très puissante. En effet, la puissance du rayonnement solaire au niveau du sol est d'environ 950 Watt/m^2 . Aussi, la quantité totale d'énergie solaire rejoue au niveau du sol pendant une semaine dépasse celle produite par les réserves mondiales de pétrole, de carbone, de gaz et d'uranium. Par ailleurs, dans le domaine PV, la conversion directe de l'énergie du rayonnement solaire en électricité est nécessaire. Elle s'effectue au moyen de cellules photovoltaïques.

Les recherches engagées dans le domaine PV s'orientent principalement suivant deux axes : le premier est d'augmenter le rendement de conversion photovoltaïque tandis que le second est de diminuer le coût de revient des cellules solaires. Pour cela, plusieurs types de matériaux sont au cœur de l'étude. Néanmoins, à ce jour, le matériau le plus commercialisé dans l'industrie photovoltaïque est le silicium cristallin. Ce dernier est connu pour son abondance sur la croûte terrestre, pour sa non toxicité et pour ses propriétés bien maîtrisées en micro-électronique.

Une cellule solaire se présente comme étant la jonction de deux régions : une de type N dopée en atomes donneurs, appelée émetteur, comme le phosphore et la deuxième de type P, nommée base, dopée en atomes accepteurs comme le bore. Ces deux régions sont séparées par une zone de charge d'espace (ZCE). La conversion s'effectue à travers l'exposition de la surface de l'émetteur au flux du rayonnement solaire. En conséquence,

la formation de l'émetteur constitue une étape cruciale dans la fabrication des cellules solaires en silicium cristallin. Plusieurs techniques sont utilisées dans l'industrie photovoltaïque et la plus connue est basée sur la diffusion du phosphore à partir d'une solution solide déposée sur la surface de la base p par la technique Spin-on. Malgré que cette technique soit reproductible, économique et simple, elle présente l'inconvénient majeur d'avoir une région fortement dopée à proximité de la surface qui induit une forte recombinaison des porteurs de charge minoritaire. Pour limiter cet effet, une optimisation du niveau de dopage en phosphore est nécessaire. Ainsi, notre recherche consiste à l'étude, à travers le logiciel de simulation PC1D, les effets de quelques paramètres liés à la région de l'émetteur, à savoir son épaisseur et son niveau de dopage, sur les performances des cellules solaires en silicium cristallin. De plus, nous étalons cette étude sur deux structures cristallines, en particulier le mono-silicium et le polysilicium. Les résultats obtenus seront comparés et bien expliqués.

Le travail présenté dans ce mémoire, porté sur l'amélioration de l'efficacité des cellules solaires en silicium cristallin en optimisant le dopage de la région de l'émetteur, se subdivise en trois chapitres :

- Dans le premier chapitre, des notions générales sur la conversion photovoltaïque seront présentés. De plus, les effets des conditions de fonctionnement, sur la réponse de la cellule solaire, sur les différentes spécifications électriques du générateur photovoltaïque et les principales filières technologiques seront exposés.
- Le deuxième chapitre présentera l'état de l'art du silicium mono-cristallin et polycristallin, à savoir, l'état cristallin et ses propriétés cristallographiques, optiques et électriques.
- Le dernier chapitre est consacré à la simulation numérique, à l'aide du logiciel PC1D, du fonctionnement des cellules solaires en mono-silicium et en polysilicium dans l'intérêt d'étudier l'effet des paramètres de la région de l'émetteur sur la caractéristique courant-tension. De plus, le dépouillement des résultats obtenus permettra d'optimiser les conditions de formation des émetteurs pour l'obtention des rendements photovoltaïques élevés.

Finalement, nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale et des recommandations sous formes de perspectives pour de futurs travaux de recherche dans le domaine PV.

Chapitre I

Généralités sur les cellules photovoltaïques

I.1 Introduction

Le soleil est la source d'énergie la plus prometteuse et la plus puissante comparé aux autres sources d'énergies renouvelables. L'électricité photovoltaïque est obtenue par transformation directe de la lumière solaire en électricité au moyen de cellules photovoltaïques. Cette conversion d'énergie est régit par des notions complexes liées aux propriétés de la cellule solaire utilisée et les conditions météorologiques qui gouvernent le flux du soleil arrivant sur la cellule.

Dans ce chapitre, on rappellera quelques concepts de bases indispensables pour la compréhension du phénomène de conversion PV. Ainsi, nous aborderons en premier lieu quelques notions sur la source d'énergie photovoltaïque suivie d'une description d'une cellule solaire. Ensuite, nous exposerons quelques aspects fondamentaux des semi-conducteurs, la formation de la jonction P-N et les grandeurs photovoltaïques extraites à partir de la caractéristique courant-tension (C-V). Aussi, une brève description des différentes filières technologiques existantes dans le domaine PV ainsi que les avantages et les inconvénients de la filière photovoltaïque feront l'objet de ce présent chapitre.

I.2. Potentiel solaire

Les conditions résidantes au cœur du soleil favorisent l'interaction des différents atomes D'hydrogène qui subissent une réaction de fusion thermonucléaire. Le résultat de ce Processus, lorsqu'il se répète, est la fusion de quatre noyaux d'hydrogène en un noyau D'hélium avec émission d'énergie sous forme de rayonnements X et gamma. Chaque seconde, 564 millions de tonnes d'hydrogène se transforment en 560 millions.

Des tonnes d'hélium, cette différence de 4 millions de tonnes par seconde correspond à la différence d'énergie de liaison entre les protons d'hydrogène et ceux d'hélium donnant une énergie sous forme de rayonnement estimée à $3.7 \cdot 10^{26}$ J/s.

L'énergie solaire est la seule source d'énergie externe à la terre. Elle présente les propriétés suivantes :

- Elle est universelle, sa densité de puissance maximale est de 1kW/m^2 à midi sous un ciel bleu sur toute la planète.

- Elle est abondante. Notre planète reçoit plus de 10^4 fois l'énergie que l'humanité consomme.
- Elle est intermittente et variable à cause de l'alternance du jour et de la nuit, des variations saisonnières et quotidiennes de l'ensoleillement.
- L'énergie reçue par une surface donnée n'est pas récupérable en totalité ceci est dû aux pertes d'énergie sous formes conductrice, convective ou rayonnante.
- Elle est propre [1].

I.2.1. Potentiel extraterrestre solaire

Le spectre solaire est la décomposition du rayonnement solaire en longueurs d'onde ou "Couleurs". La lumière solaire est en effet composée de toutes sortes de rayonnement de couleurs différentes, caractérisées par leur gamme de longueur d'onde. Les photons, grains de lumière qui composent le rayonnement électromagnétique, sont porteurs d'une énergie qui est reliée à leur longueur d'onde par la relation.

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

Une courbe standard de la répartition spectrale du rayonnement solaire extraterrestre compilée selon les données recueillies par les satellites. Sa distribution en énergie est répartie comme il est indiqué sur la figure(I .1) [2].



Figure I.1: Exemple de suiveur solaire.

I.2.2 Position du soleil

Un point à la surface de la terre est repéré par deux coordonnées angulaires : la latitude L et la longitude λ . L'angle formé par la direction du soleil et le plan équatorial terrestre s'appelle la déclinaison solaire δ qui varie au cours de l'année.

23027' (-23,45°) (21 décembre) à 23027' (+23,45°) (21 juin), et elle est donnée par la formule :

$$\delta = 23.45 \cdot \sin(360.284 + n/365). \quad (\text{I.2})$$

- n : est le nombre du jour compté à partir du 1er janvier.

L'angle horaire ω est donné par : $\omega = 15^\circ(\text{TS} - 12)$ et est compté positivement l'après-midi.

- TS (Temps Solaire) est l'heure solaire en fixant $\text{TS} = 12$ h lorsque la hauteur du soleil est maximale (le soleil est à son « zénith »).

Le repérage du soleil s'effectue alors par l'intermédiaire de deux angles :

- L'azimut a : c'est l'angle que fait la direction de la projection du soleil sur le plan horizontal avec la direction Sud, cet angle étant orienté positivement vers l'ouest.
- La hauteur h : c'est l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur le plan horizontal du lieu d'observation. Ces deux coordonnées solaires sont données par les expressions suivantes:

$$\sin(h) = \sin(L) \sin(\delta) + \cos(L) \cos(\delta) \cos(\omega) \quad (\text{I.3})$$

$$\sin(a) = \cos(\delta) \cdot \sin(\omega) / \cos(h). \quad [\text{2}] \quad (\text{I.4})$$

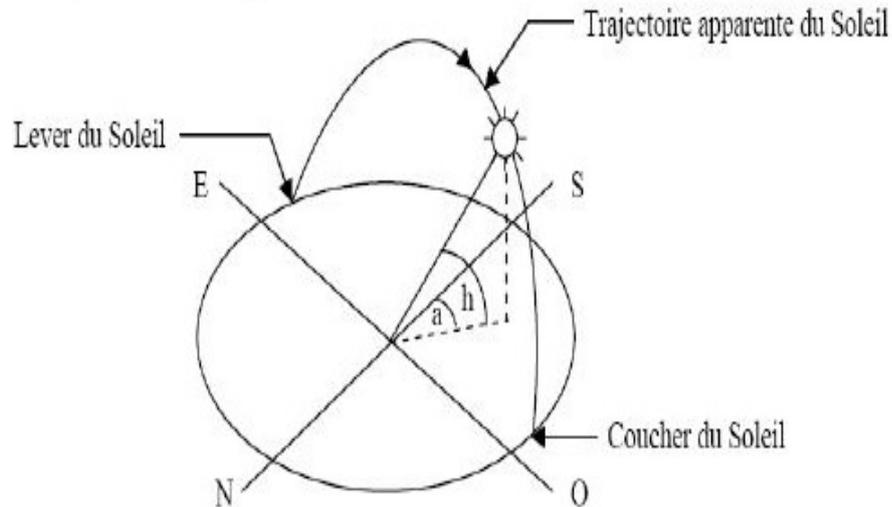


Figure I.2 : Position du soleil

I.2.3 Géométrie d'orientation : collecteur- faisceau du soleil

Le système collecteur est d'abord placé face au bloc collimateur, et les mesures de référence, correspondant aux fractions d'énergie contenues dans le faisceau incident, sont enregistrées pour chaque valeur de α . Puis les mêmes mesures sont répétées une fois l'échantillon mis en place et l'on obtient ainsi des courbes, dont un exemple est donné figure (I-3), et qui représentent le pourcentage de flux réfléchi $P(\alpha_0)$ en fonction de l'ouverture angulaire du système collecteur. On reprend ensuite ces opérations avec une orientation différente de la trace du plan d'incidence dans le plan du miroir (il suffit pour cela de faire tourner l'échantillon autour de son axe).

Ce réflectomètre permet ainsi d'obtenir des résultats avec une précision de 1%, selon toutes les directions de la surface du miroir, pour différents angles d'incidence, et pour un domaine de longueur d'onde compris entre 0,4 et 0,9 μm . Pour interpréter ces résultats, il faut tenir compte de la largeur apparente du faisceau incident [3].

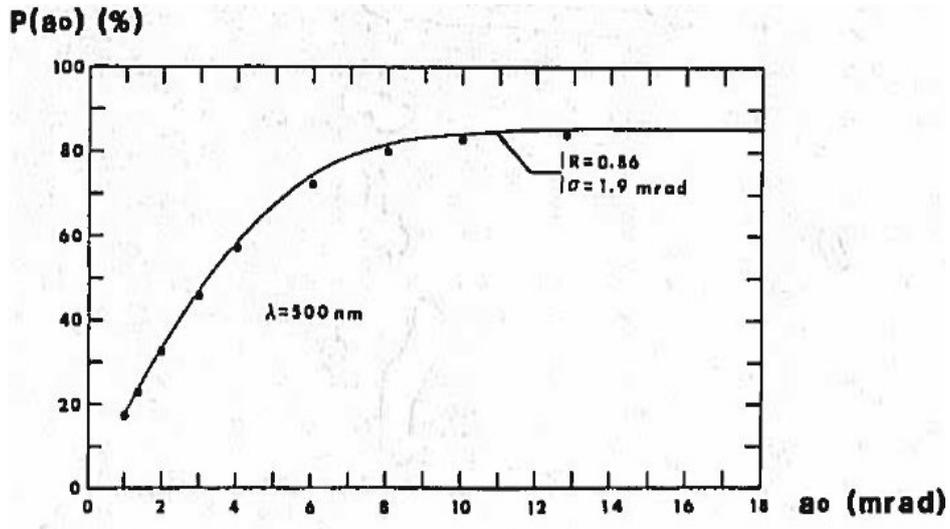


Figure I.3 : Exemple des résultats obtenus avec le réflectomètre bidirectionnel

I.2.4 Spectre solaire

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique, sa décomposition en longueurs d’ondes est appelée spectre électromagnétique. Elle est en effet composée de toutes sortes de rayonnement de différentes caractérisées par leur gamme de longueur d’onde. La fréquence de la lumière détermine sa couleur. Les photons (grains de lumière) qui composent ce rayonnement sont porteurs d’une énergie qui est liée à leur fréquence (longueur d’onde)[1].

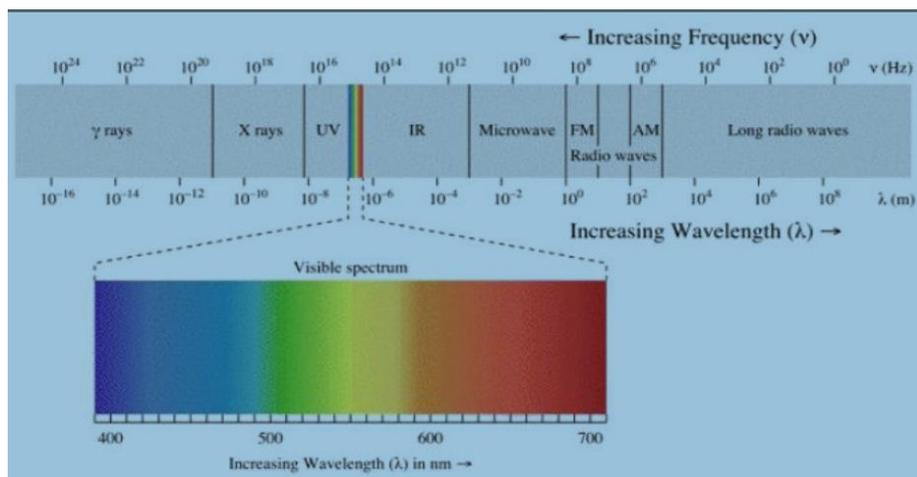


Figure I.4 : Spectre électromagnétique de la lumière.

I.2.5 Masse d'air

Le soleil décharge continuellement une énorme quantité d'énergie radiante dans le système solaire, la terre intercepte une toute petite partie de l'énergie solaire rayonnée dans l'espace. Une moyenne de 1367 watts atteint chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère terrestre (pour une distance moyenne Terre-soleil de 150 Millions de km), c'est ce que l'on appelle la constante solaire égale à 1367W/m^2 . La part d'énergie reçue sur la surface de la terre dépend de l'épaisseur de l'atmosphère à traverser. Celle-ci est caractérisée par le nombre de masse d'air AM. Le rayonnement qui atteint le niveau de la mer à midi dans un ciel clair est de 1000 W/m^2 et est décrit en tant que rayonnement de la masse d'air "1" (ou AM1). Lorsque le soleil se déplace plus bas dans le ciel, la lumière traverse une plus grande épaisseur d'air, perdant plus d'énergie. Puisque le soleil n'est au zénith que durant peu de temps, la masse d'air est donc plus grande en permanence et l'énergie disponible est donc inférieure à 1000 W/m^2 [4].

Les scientifiques ont donné un nom au spectre standard de la lumière du soleil sur la surface de la Terre : AM1.5G ou AM1.5D. Le nombre "1.5" indique que le parcours de la lumière dans l'atmosphère est 1.5 fois supérieur au parcours le plus court du soleil, c'est-à-dire lorsqu'il est au Zénith (correspondant à une inclinaison du soleil de 45° par rapport au zénith). Le « G » représente le rayonnement "global" incluant rayonnement direct et rayonnement diffus et la lettre « D » tient compte seulement du rayonnement direct [4].

I.3 Semi-conducteur

Dans un atome isolé, les électrons prennent des niveaux d'énergie discrets (théorie de Niels Bohr en 1914). Lorsque, les atomes sont rassemblés pour former un solide, les niveaux discrets de chaque atome se différencient pour former des bandes continues d'énergie. Cette structure électronique de bandes nous permet de classer les matériaux en trois grandes familles : les métaux, les isolants et les semi-conducteurs.

Pour un métal, tous les niveaux supérieurs au niveau de Fermi étant autorisés et la quasi-totalité de ces niveaux étant inoccupés à température ambiante, toutes les longueurs

d'onde peuvent être alors absorbées, mais cette énergie absorbée est convertie en phonons (thermalisation des électrons). Dans un isolant, le rayonnement solaire ne peut être absorbé par ce dernier car son gap (8-10 eV) est plus grand que les énergies de ce spectre. Par contre, un semi-conducteur a un gap plus faible que celui d'un isolant (0.6-2 eV). A titre d'exemple, le silicium cristallin (Si) a un gap de 1.12 eV, le germanium (Ge) de 0.7 eV, l'arsenic de gallium (GaAs) de 1.42 eV. Par conséquent, le spectre solaire absorbé par les semi-conducteurs fournit de l'énergie aux électrons et les libère dans le cristal pour participer à la conduction [5].

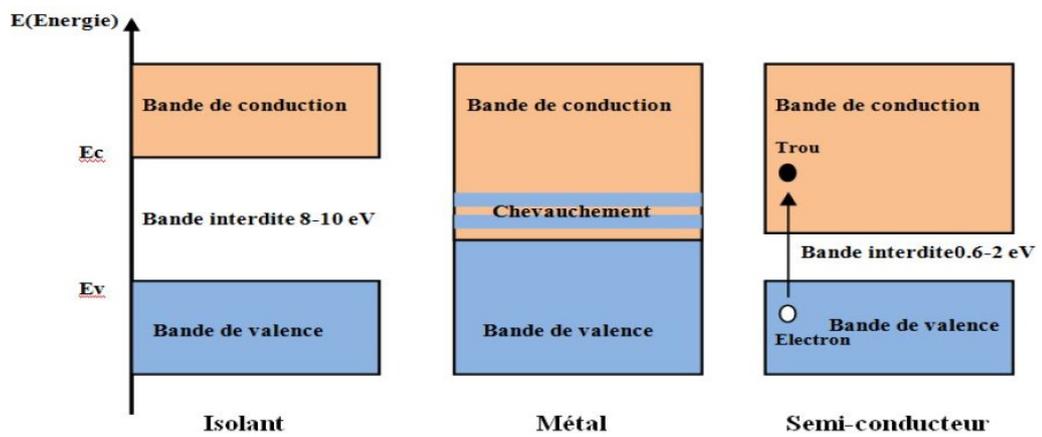


Figure I.5: Les trois grandes familles des matériaux.

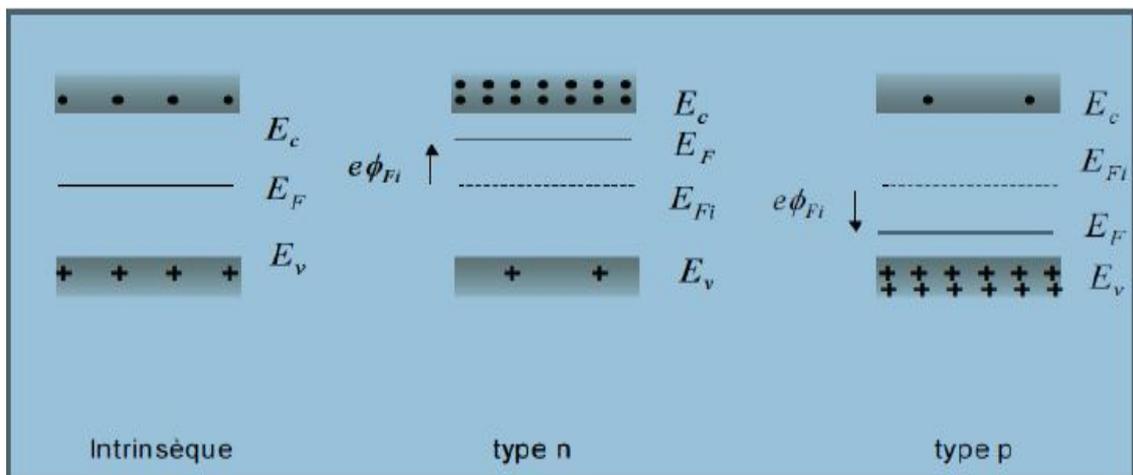


Figure I.6 : Les trois types de semi-conducteur.

I.3.1 Semi-conducteur intrinsèque

Un semi-conducteur dit intrinsèque est un matériau idéal ne possédant ni défaut physique ni défaut chimique. Le monocristal du silicium possède une structure de type tétraédrique c'est à dire que chaque atome est entouré symétriquement de 4 autres. Lorsque le corps est parfaitement pur, il est qualifié d'intrinsèque.

Exemples : Silicium (Si), Germanium (Ge), Sélénium (Se). Le Silicium est un atome tétravalent : Il possède 4 électrons de valence qui vont se mettre en commun avec d'autres atomes de Silicium pour avoir la forme cristalline.

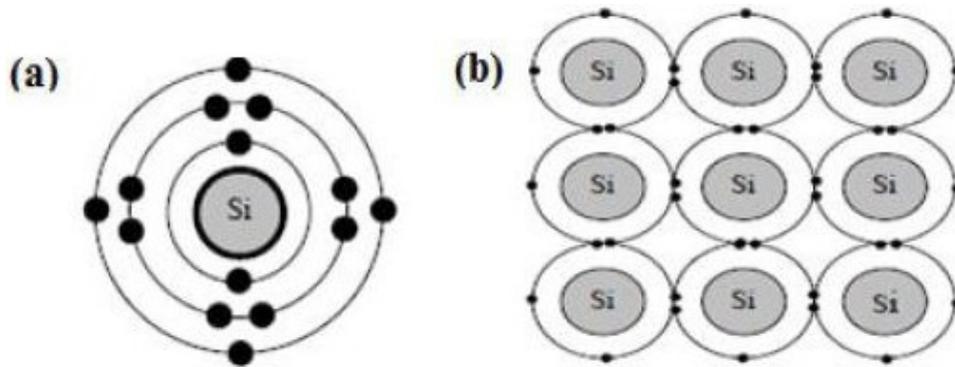


Figure I.7 : (a) Atome de Silicium (b) Cristal de Silicium.

On qualifie le silicium d'intrinsèque lorsqu'il ne présente pas d'impuretés dopantes. Un tel Silicium est en pratique impossible à obtenir. Dans un silicium intrinsèque, il existe autant de trous que d'électrons libres susceptibles de participer à la conduction, mais leur densité n_i est très faible à température ambiante si bien que la résistivité (ρ) théorique du matériau est de $3.2 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$. La densité n_i s'exprime en fonction de densités d'états effectives de la bande de conduction (N_C) et de la bande de valence (N_V) ainsi que l'énergie de bande interdite E_g (1.12eV à 300 °K dans le Silicium)[6]. Le dopage est l'introduction dans un semi-conducteur intrinsèque de très faible quantité d'un corps étranger appelé dopeur. Pour les semi-conducteurs usuels (Si, Ge), les Dopeurs utilisés sont soit des éléments pentavalents: ayant 5 électrons périphériques.

- Exemples : L'Arsenic (As), l'Antimoine (Sb), le Phosphore (P), ...

Soit des éléments trivalents: ayant 3 électrons périphériques.

- Exemples : Le Bore (B), le Gallium (Ga), l'Indium (In), ...

Après le dopage, le semi-conducteur n'est plus intrinsèque mais extrinsèque.

I.3.1.1 Différents types de dopage

Les semi-conducteurs intrinsèques n'ont pas une grande utilité en tant que tels ; ils servent de base aux semi-conducteurs dopés : on y rajoute des impuretés pour modifier leur comportement. Il existe deux types de semi-conducteurs extrinsèques :

➤ Semi-conducteur dopé N

Un semi-conducteur de type N est un semi-conducteur intrinsèque, dans lequel on introduit des impuretés qui possèdent 5 électrons sur leur couche externe (Phosphore ou Arsenic...). Les impuretés sont appelées des donneurs parce qu'elles donnent un électron à la bande de conduction. La figure (I.5) présente schématiquement des liaisons électroniques pour le silicium dopé avec du phosphore.

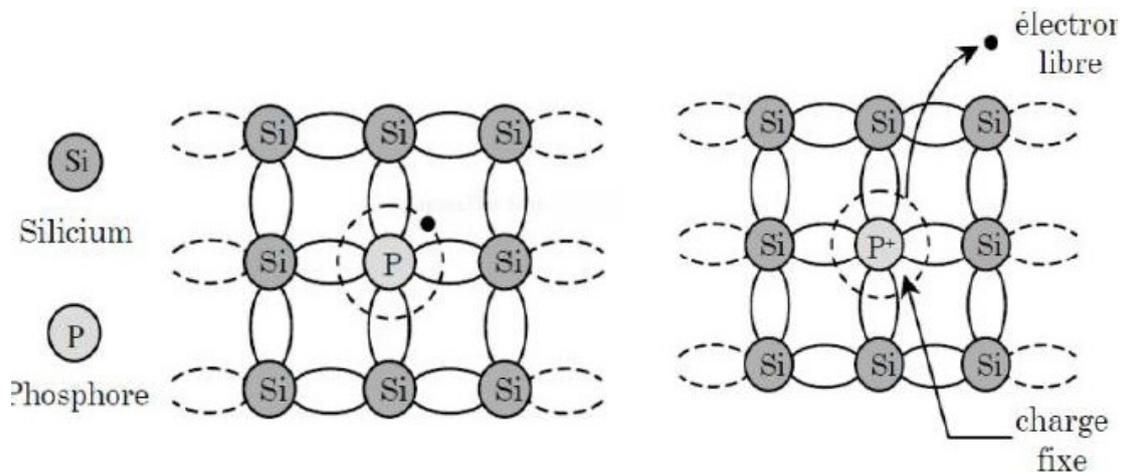


Figure I.8: Silicium dopé au phosphore (a) : $T=0K$ et, (b) : $T \neq 0K$.

Quatre électrons d'atome de silicium voisins sont mis en commun avec quatre électrons de l'atome donneur. Le cinquième électron est faiblement lié à l'impureté. Une très faible Énergie due à une température supérieure au zéro Kelvin est suffisante pour le libérer et le Déplacer dans la bande de conduction pour qu'il se trouve libre. L'atome déphosphore a perdu sa neutralité et est devenu un ion positif (charge fixe). Ainsi, il y a une apparition d'un niveau d'énergie dans la bande interdite ED, situé au-dessous de la bande de conduction. A température ambiante, la quasi-totalité des atomes Donneurs est ionisée. Si ND correspond à la concentration des atomes donneurs, on obtient $N = ND$ électrons libres. Dans un semi- conducteur de type N, les électrons sont Majoritaires, les trous sont minoritaires, et la conduction est assurée par les électrons.

➤ **Semi-conducteur dopé P**

Un semi-conducteur de type P est un semi-conducteur intrinsèque, dans lequel on introduit des impuretés, qui possèdent trois électrons sur leur couche externe (Bore, Indium,). Ces impuretés sont appelées des accepteurs parce qu'elles acceptent un Electron de la bande de conduction afin de réaliser une liaison avec le cristal semi-conducteur. La Figure (I.8) Présente schématiquement des liaisons électroniques pour le Semi-conducteur silicium dope P par du Bore. L'atome dopant a perdu sa neutralité et est Devenu alors un ion fixe négatif par capture d'un électron. Ce phénomène correspond l'apparition d'un niveau d'énergie EA dans la bande de gap, au-dessus de la bande de Valence. La quasi-totalité des atomes accepteurs est ionisée à la température ambiante. Si NA correspond à la concentration des atomes accepteurs, donc on Obtient $p = NA$ trous libres. Dans un semi-conducteur de type P, les trous sont les Majoritaires, les électrons sont les minoritaires, et Conduction est assurée par les trous [6].

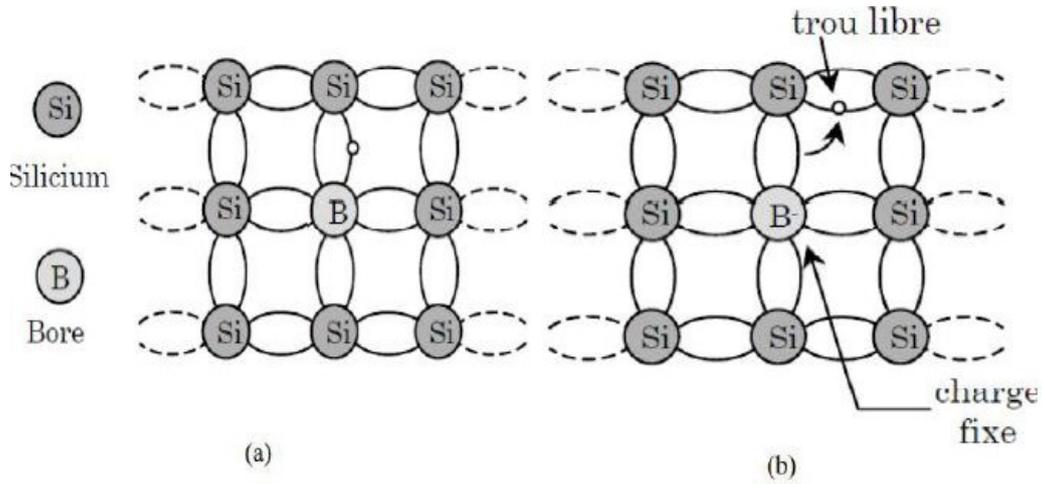


Figure 1.9: Silicium dopé au Bore (a) : $T = 0\text{ K}$ et, (b) : $T \neq 0\text{ K}$.

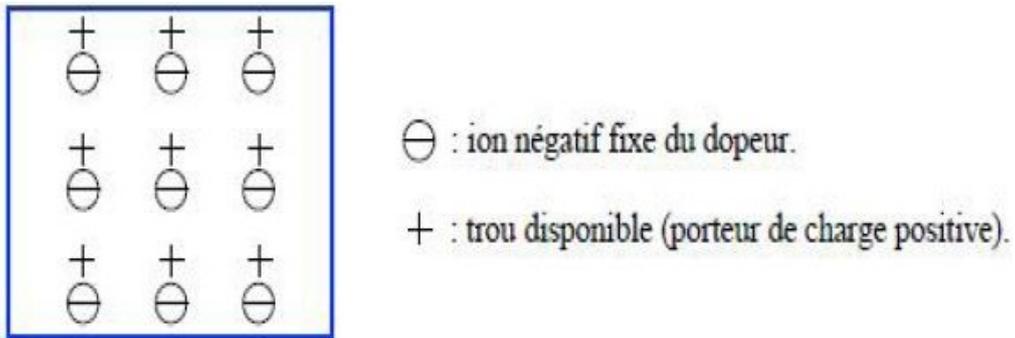


Figure 1.10: La représentation simplifiée d'un semi-conducteur type P.

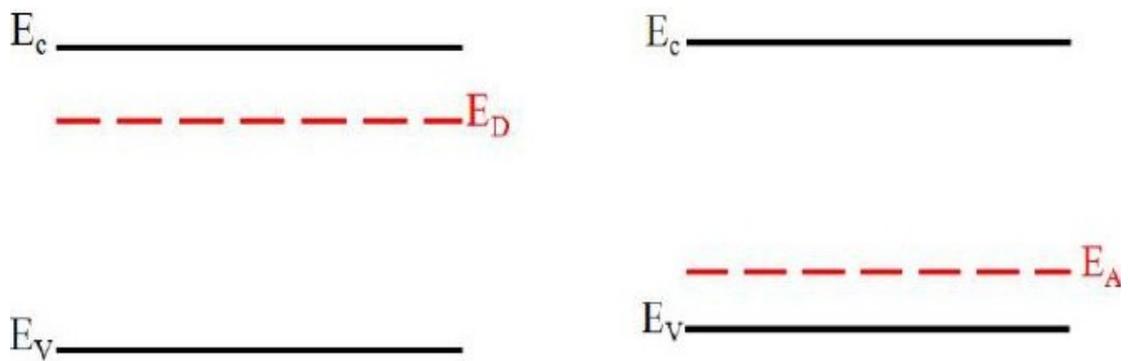


Figure 1.11: Niveau d'énergie (a) pour un dopage de type N, et (b) pour un dopage de type P.

I.3.2 Interaction photon semi-conducteur

L'émission spontanée de lumière n'est pas une propriété intrinsèque de l'émetteur, mais peut être fortement modifiée lorsque l'on change son environnement électromagnétique. Lorsque l'interaction lumière-matière est suffisamment renforcée, par exemple en plaçant l'émetteur au sein d'une cavité optique, un photon émis peut être réfléchi puis réabsorbé très rapidement, avant d'avoir eu le temps de s'échapper de la cavité. Il est ensuite réémis, réabsorbé et ainsi de suite. Les états propres du système sont alors des états mixtes lumière-matière. Ce régime, dit de couplage fort lumière-matière, a été observé expérimentalement en 1992, d'une part pour des vapeurs atomiques en cavité et, d'autre part, en optique des solides pour des semi-conducteurs insérés dans une microcavité optique [7].

Entre le moment où le rayonnement électromagnétique est émis et le moment où il est analysé par le capteur, le signal va être perturbé par les interactions avec l'environnement dans lequel il se propage. Dans le cas des planètes, il va d'abord s'agir de l'atmosphère composée notamment de gaz et d'aérosols. La seconde interaction est liée à la surface planétaire elle-même. Le signal contient alors l'information qui nous intéresse, à savoir la composition minéralogique de la portion de surface observée. La perturbation due à l'atmosphère peut être gênante car elle masque une partie du signal provenant de la surface. Il faut donc distinguer les différents processus à l'origine des variations spectrales [8].

I.4 La jonction PN

Une jonction P-N est la mise en contact entre un semi-conducteur type N (les électrons sont majoritaires) et un semi-conducteur type P (les trous sont majoritaires) issus d'un même cristal [6].

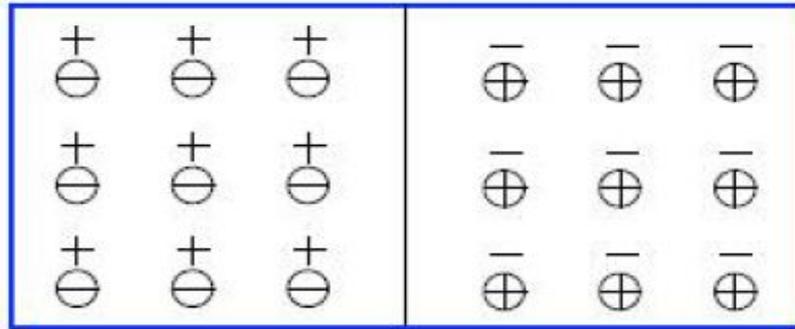


Figure I. 12 : Jonction P.

I.4.1 La jonction PN à l'équilibre

Une jonction PN est la juxtaposition de deux régions de types différents (type n et type p) d'un même matériau semi-conducteur. Lorsque le contact est réalisé, les électrons de la région N, où ils sont majoritaires, vont diffuser vers la région P où ils sont minoritaires. De même, les trous de la région P vont diffuser de la même façon vers la région N. Les déplacements de ces électrons et de ces trous vont provoquer l'apparition, de part et d'autre de la jonction, de deux zones non neutres l'une comprenant des impuretés ionisées positivement (zone N) et l'autre comprenant des impuretés ionisées négativement (zone P). La présence de ces charges positives et négatives donne naissance à un champ électrique interne dont le sens est tel qu'il s'oppose à la diffusion des porteurs majoritaires. À l'équilibre, tout se passe comme si deux courants identiques et opposés se superposaient, donnant un courant résultant nul: l'un est provoqué par la diffusion de gradient de concentration et l'autre de conduction dû à la présence de ce champ électrique interne. La zone comprenant des charges non compensées est dite zone de charge d'espace (ZCE) ou zone désertée, les autres zones sont dites neutres [5].

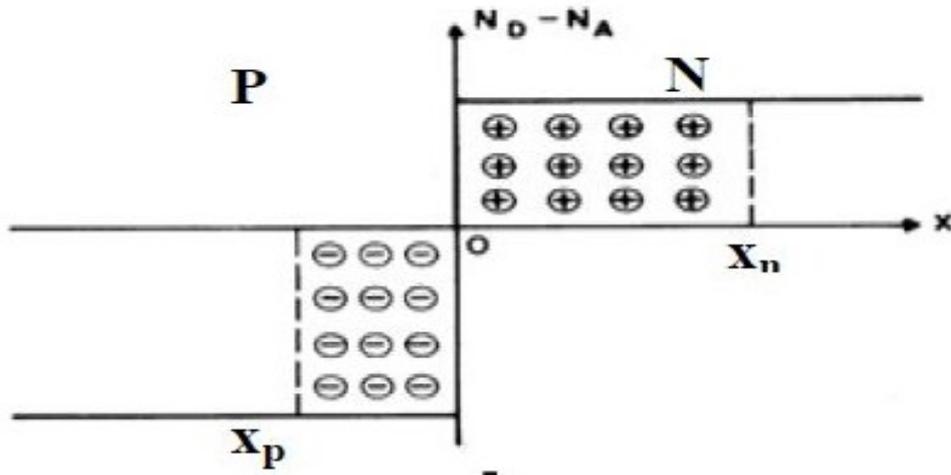


Figure I.13: Jonction PN (abrupte) à l'équilibre.

I.4.2 La jonction PN polarisée

Lorsque la jonction est connectée à une source extérieure de tension V , la différence de potentiel entre les régions N et P varie et le potentiel électrostatique à travers la jonction devient, par conséquent, il y aura un décalage des niveaux de Fermi. Dans la zone de charge d'espace, les niveaux de Fermi des électrons et des trous vont se dédoubler en deux quasi-niveaux de Fermi E_{fn} et E_{fp} s'appliquant respectivement aux électrons et aux trous [5].

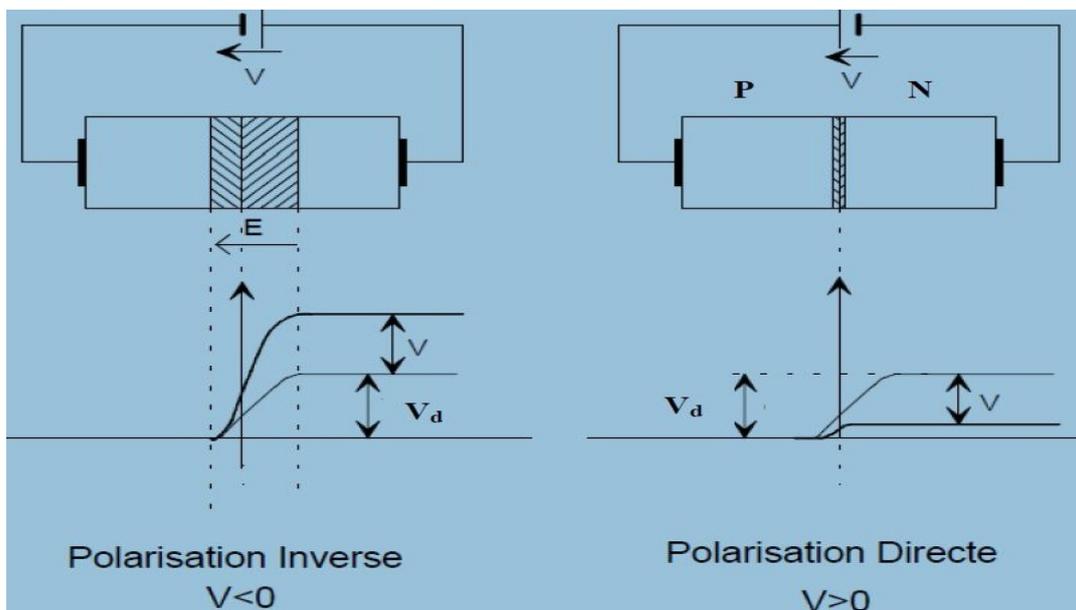


Figure I.14: Jonction PN polarisée directe (positive) et indirecte (négative).

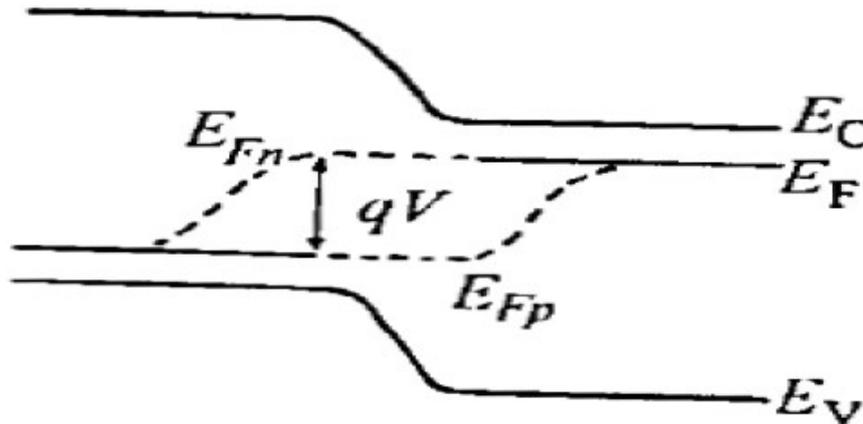


Figure I.15: Jonction PN polarisée (hors équilibre)

I.4.3 La jonction PN sous éclairement

Lorsque la jonction PN est éclairée, des paires électrons-trous sont créées dans le volume. La variation de la densité de porteurs majoritaires est faible tandis que celle des porteurs minoritaires augmente fortement (régime de faible injection). Dans la ZCE, les paires sont instantanément séparées par le champ électrique. Les électrons sont accélérés et injectés dans la zone N et les trous dans la zone P donnant naissance à un photocourant de génération. Les porteurs minoritaires générés dans les zones neutres N et P diffusent dans le matériau. Si ces porteurs atteignent la ZCE, le champ électrique les accélère et les injecte dans la zone où ils sont majoritaires donnant naissance à un photocourant de diffusion. Les contacts métalliques permettent la collecte des charges vers le circuit extérieur: ils se présentent sous forme de grille sur la face avant, et généralement pleine plaque sur la face arrière [5].

I.5 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Le terme « photovoltaïque » désigne le processus physique qui consiste à transformer l'énergie lumineuse en énergie électrique par le transfert de l'énergie des photons aux électrons d'un Matériau. Le principe photovoltaïque a été découvert par le physicien français A. Becquerel en 1839 et expliqué par Albert Einstein en 1905 (c'est pour cette explication qu'il a reçu le prix Nobel de Physique en 1921). Le préfixe Photo vient du grec « phos » qui signifie lumière. « Volt » vient du patronyme d'Alessandro

Volta (1745-1827), physicien qui a contribué aux recherches sur l'électricité. Photovoltaïque (PV) signifie donc littéralement électricité lumineuse. La cellule PV, aussi appelée cellule solaire, constitue l'élément de base de la conversion photovoltaïque. Il s'agit d'un dispositif semi-conducteur qui transforme en énergie électrique l'énergie lumineuse fournie par une source d'énergie inépuisable, le soleil. Elle exploite les Propriétés des matériaux semi-conducteurs utilisés dans l'industrie de l'électronique : diodes, Transistors ET circuits intégrés [9].

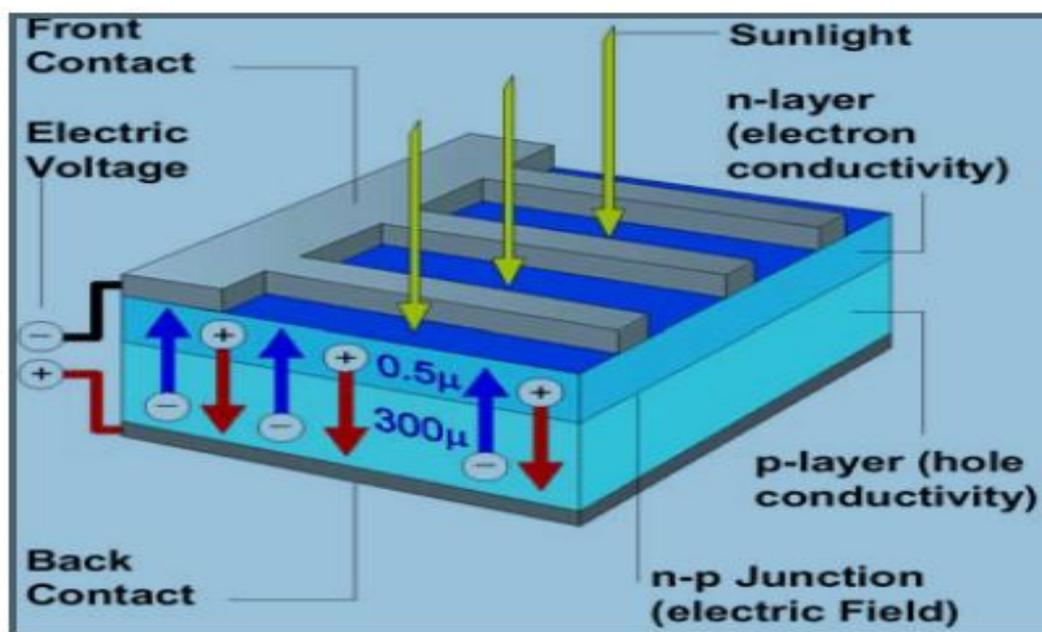


Figure I.16: représentation en coupe d'une cellule photovoltaïque.

I.5.1 L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque se manifeste quand un photon est absorbé dans un matériau composé de Semi-conducteurs dopés p (positif) et n (négatif), dénommé comme jonction p-n (ou n-p). Sous l'effet de ce dopage, un champ électrique est présent dans le matériau de manière permanente (Comme un aimant possède un champ magnétique permanent). Quand un photon incident (Grain de lumière) interagit avec les électrons du matériau, il cède son énergie $h\nu$ à l'électron qui se retrouve libéré de sa bande de valence et subit donc le champ électrique intrinsèque. Sous l'effet de ce champ, l'électron migre vers la face supérieure laissant place à un trou qui migre en Direction inverse. Des électrodes

placées sur les faces supérieure et inférieure permettent de Récolter les électrons et de leur faire réaliser un travail électrique pour rejoindre le trou de la Face intérieure [9].

I.6 Recombinaison des porteurs de charge dans le silicium

La génération dans les semi-conducteurs est le processus dans lequel les paires électron trou sont créées. L'énergie nécessaire pour la transition d'un électron de la bande de valence vers la bande de conduction est obtenue selon différents processus physiques : absorption thermique, champ électrique externe et absorption de photons par le semi-conducteur. Les paires électron-trou créées sont tôt ou tard recombinées. Le retour à l'équilibre se fait par émission de l'énergie en excès soit sous forme de photons, soit sous forme de phonons. Le taux de recombinaison est déterminé par les mécanismes physiques intervenants dans de tels phénomènes et par la concentration des porteurs de charge en excès présents dans le semi-conducteur. Dans cette partie, nous discutons les différents mécanismes fondamentaux de recombinaison aussi bien en volume qu'en surface qui se manifestent dans le silicium.

A l'équilibre thermique, les concentrations d'électrons n_0 dans la bande de conduction et des trous dans la bande de valence sont constantes $n_0.p=n_i^2$ où est la densité des porteurs intrinsèque dans le semi-conducteur. Ceci traduit l'équilibre entre le taux de génération thermique et celui de recombinaison des paires électron-trou. Supposons que tous les atomes dopants sont totalement ionisés à la température ambiante, la concentration des électrons et des trous sont données par [1] :

$$\begin{cases} n_0 = N_C \cdot \exp\left(-\frac{E_C-E_F}{K_B T}\right) = N_D, P_0 = n_i^2/n_0 \text{ semi-conducteur de type } n \\ P_0 = N_V \cdot \exp\left(-\frac{E_F-E_V}{K_B T}\right) = N_A, N_0 = n_i^2/p_0 \text{ semi-conducteur de type } p \end{cases} \quad (I.5)$$

N_D et N_A sont respectivement les concentrations des atomes donneurs et accepteurs.

E_F et E_C et E_V représentent les niveaux énergétiques du niveau de Fermi, le bas de la bande de conduction et le haut de la bande de valence. N_C et N_V sont les densités effectives des états permis dans les bandes de conduction et de valence, respectivement

[1].

$$\begin{cases} n = n_0 + \Delta n = N_C \cdot \exp\left(-\frac{E_C - E_{Fn}}{k_B \cdot T}\right) \\ p = p_0 + \Delta p = N_V \cdot \exp\left(-\frac{E_{Fp} - E_V}{k_B \cdot T}\right) \end{cases} \quad (I.6)$$

Δn et Δp les concentrations des porteurs en excès, E_{Fn} et E_{Fp} les quasi-niveaux de Fermi, respectivement pour les électrons et les trous.

Comme l'équilibre thermique ne peut pas être atteint instantanément après la coupure de la source de génération, les densités excessives de porteurs Δn et Δp diminuent jusqu'à ce que le système atteigne de nouveau les concentrations n_0 et p_0 . Le taux de recombinaison U qui décrit cet effet est une caractéristique des différents mécanismes de recombinaison dans le matériau. Il est souvent exprimé comme le rapport entre l'excédent de porteurs Δn et leur durée de vie :

$$\frac{\partial \Delta n}{\partial t} = U = \frac{\Delta n}{\tau} \quad (I.7)$$

U est le taux de recombinaison des porteurs de charge excédentaires en $\text{cm}^{-3}\text{s}^{-1}$, Δn est la concentration excédentaire des porteurs de charge en cm^{-3} et est la durée de vie des porteurs de charge excédentaires en s.

Il existe trois processus de recombinaison dans les semi-conducteurs, à savoir :

I.6.1 La recombinaison radiative

Elle est typiquement un processus dominant dans les semi-conducteurs à structure de bande directe où elle représente la base de fonctionnement des diodes luminescentes, sa contribution est considérée négligeable comparé à d'autres processus de recombinaison dans les semi-conducteurs à structure de bande indirecte, tels que le silicium.

I.6.2 La recombinaison Auger

Il est le mécanisme le plus dominant dans le silicium lorsque le niveau de dopage est élevé. L'excès d'énergie issu de la recombinaison d'un électron de la bande de conduction et d'un trou de la bande de valence peut être transféré à une troisième particule libre, électron ou trou. Ces charges sont considérées comme des particules quasi libres, n'interagissant pas entre elles.

I.6.2 La recombinaison via les défauts

Pour ce type de recombinaison, les porteurs de charge générés se recombinent à travers des états d'énergie intermédiaires dans la bande interdite du semi-conducteur. Ce mécanisme est largement connu sous le nom 'Schrockley-Read-Hall, SRH recombinaisons. C'est le mécanisme le plus probable à température ambiante dans les matériaux semi-conducteurs tel que le silicium. La recombinaison s'effectue par l'intermédiaire d'un centre de recombinaison qui peut être un défaut ou une impureté situé à un niveau proche du milieu de la bande interdite. Un tel défaut peut être occupé par un électron ou par un trou et ainsi interagir avec la bande de conduction et la bande de valence. La surface d'un substrat de silicium représente une discontinuité brusque dans la structure cristalline, qui a comme conséquence un grand nombre d'atomes de silicium partiellement liés. Comme n'importe quelle perturbation de périodicité, ces liaisons provoquent des niveaux recombinants actifs situés dans l'espace de la bande interdite près de la surface du semi-conducteur. En pratique, dans le cas de silicium à haute pureté, les méthodes de réduction de la vitesse de recombinaison en surface dans les dispositifs réels sont basées sur la croissance d'une couche d'oxyde thermique et/ou le dépôt d'une couche de nitrure de silicium (SiN).

I.7 Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque

Rappelons qu'une cellule photovoltaïque est une jonction pn capable de transformer l'énergie absorbée du rayonnement solaire incident en énergie électrique. Lorsque la surface libre de cette jonction est illuminée, les photons d'énergie supérieure à la largeur de la bande interdite E_g (1,124eV pour le silicium à 300K) peuvent générer des

paire électron-trou dans les régions quasi-neutres de l'émetteur et de la base. La figure I.14 représente une cellule photovoltaïque sous illumination reliée aux bornes d'une résistance de charge R_C [1].

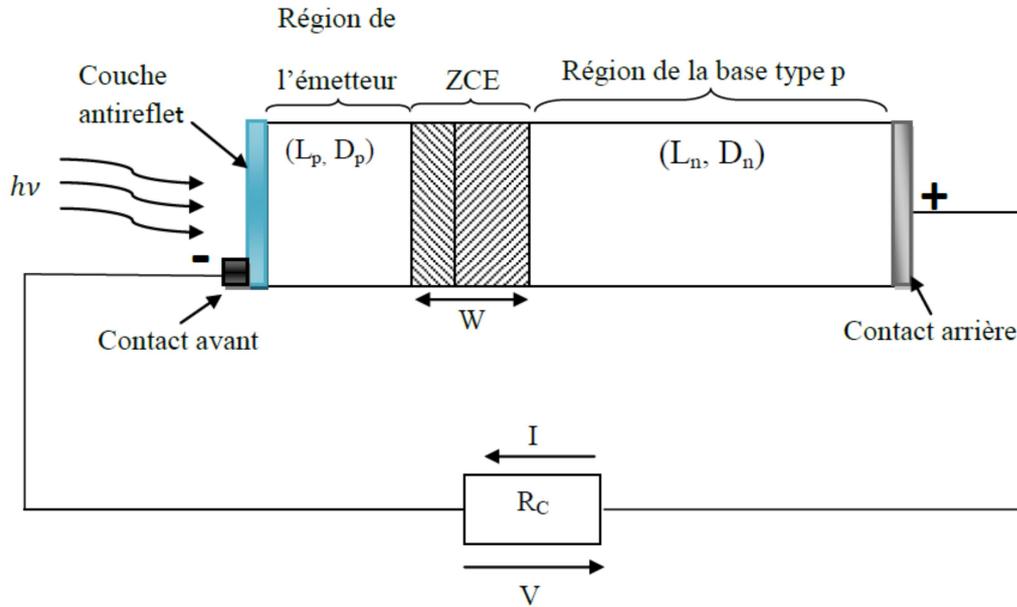


Figure I.17: Cellule photovoltaïque sous illumination reliée à une charge R_C [1].

1.7.1 Caractéristique courant/tension

Les électrons et les trous créés respectivement dans les régions de l'émetteur et de la base diffusent et seuls atteignent la zone de charge d'espace (ZCE) les porteurs minoritaires libérés à une distance inférieure à leurs longueurs de diffusion L . Accélérés par le champ électrique interne, ils traversent la ZCE. La région de l'émetteur reçoit des électrons et se charge négativement alors que la région p accepte des trous et se charge positivement. Si nous relierons les côtés de la jonction à une résistance de charge R_C , un courant électrique la parcourt et une différence de potentiel apparaît entre ses bornes. Un schéma électrique idéal reflétant le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque est donné en figure I.15 on a :

$$I = I_{ph} - I_d \quad (I.8)$$

Avec I_{ph} et I_d représentent respectivement le photo courant et le courant d'obscurité de la diode. Ce dernier est donné par la relation suivante :

$$I_d = I_0 \left[e^{(|e|V/k_B T)} - 1 \right] \quad (I.9)$$

I_0 :est le courant de saturation de la diode, k_B :est la constante de Boltzmann T :la température absolue du semi-conducteur.

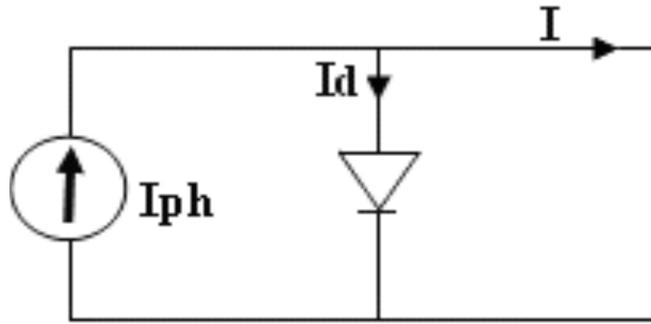


Figure I.18: Schéma électrique idéal d'une cellule photovoltaïque

La relation entre les trois grandeurs I , I_{ph} et I_d (V) représente la caractéristique courant-tension (figure I.19 à droite) permettant de déterminer quatre grandeurs caractéristiques principales du fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.

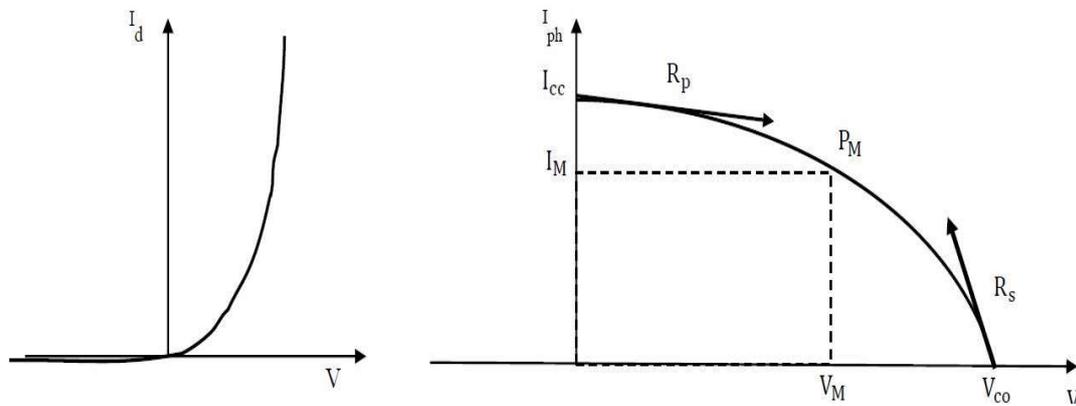


Figure I.19: Caractéristique I-V d'une cellule photovoltaïque à l'obscurité (à gauche) et sous illumination (à droite).

Les paramètres des cellules photovoltaïques (I_{cc} , V_{oc} , FF , η) extraits des caractéristiques courant-tension, permettent de comparer différentes cellules éclairées dans des conditions identiques. Ces paramètres sont définis comme suit :

I.7.2 Courant de court-circuit I_{CC}

Le courant le plus important que l'on puisse obtenir avec une cellule solaire. Augmente généralement avec l'intensité d'illumination et dépend : de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement incident, de la mobilité des porteurs et de la température. I_{CC} est la valeur du courant lorsque la tension $V=0$.

Lorsqu'on éclaire les cellules photovoltaïques, on observe une augmentation du courant par rapport au courant à l'obscurité. Cela est dû aux phénomènes de photo génération de porteurs de charge que l'on a déjà évoquée plus haut. Les photo courants observés sont généralement faibles et dépendent de l'intensité lumineuse incidente. La variation de la photo courant en fonction de l'intensité lumineuse pour les différentes cellules étudiées est décrite par la relation.

$$I_{CC} = |e|.G.(L_n + L_p) \quad (I.10)$$

G : est la quantité des paires électron-trou.

L_n : longueurs de diffusion des électrons.

L_p : longueurs de diffusion des trous.

I.7.3 Tension de circuit ouvert V_{OC}

C'est la tension mesurée lorsqu'aucun courant ne circule dans le dispositif P.V. Elle dépend du type de cellule solaire, des matériaux de la couche active, et de l'éclairement de la cellule, V_{OC} est donné par :

$$V_{OC} = \frac{k_B T}{|e|} \ln \left(\frac{I_{CC}}{I_0} + 1 \right) \quad (I.11)$$

I.7.4 Facteur de forme

Le facteur de forme met en évidence non seulement l'efficacité d'une cellule photovoltaïque mais aussi et surtout son vieillissement. Il est défini par le rapport de la puissance maximale $P_M = V_M \cdot I_M$ et de la valeur du produit I_{CC} et V_{OC} .

$$FF = \frac{V_M \cdot I_M}{V_{oc} \cdot I_{CC}} \quad (I.12)$$

I.7.5 Le rendement

Le rendement des cellules solaires dépend principalement de la lumière absorbée par la couche absorbante. Il est défini comme le rapport entre la puissance maximale produite par la cellule et la puissance du rayonnement solaire qui arrive sur la cellule. Si S est la surface de la cellule (en m^2) et E est l'éclairement-irradiante (en W/m^2). Le rendement énergétique s'écrit :

$$\eta = \frac{P_M}{P_i} S \quad (I.13)$$

P_i : Puissance incident ; S : surface de la cellule photovoltaïque :

$$\eta = \frac{FF \cdot I_{CC}}{P_i \cdot S} V_{oc} \quad [12] \quad (I.14)$$

I.8 Les filières photovoltaïques

I.8.1 Cellules solaires à base de silicium cristallin

Les modules photovoltaïques basés sur silicium cristallin dominent depuis toujours le marché avec plus de 90% des ventes. Les cellules à partir de plaquettes de silicium cristallisé (c-Si) se divisent en deux catégories distinctes, celles à partir de silicium monocristallin (mc-Si) et celles à partir de silicium poly-cristallin (pc-Si). Le silicium monocristallin est plus cher que le silicium multi-cristallin mais permet d'obtenir un rendement plus élevé, avec près de 24.7% contre 19.8% de rendement record sur petite cellule en laboratoire.

Les modules en silicium cristallin sont fabriqués industriellement. Toutes les étapes du processus de fabrication ne cessent de progresser régulièrement afin de viser le plus possible les rendements théoriques calculés tout en évitant d'augmenter le prix des modules. Il reste encore aujourd'hui un large potentiel d'optimisation. La première étape consiste à fabriquer des lingots à base de silicium pur pour les différents processus de fusion et de cristallisation du silicium. Le matériau supérieur est le silicium

monocristallin, typiquement produit par la méthode de Czochralski, consistant à introduire un germe préformé monocristallin dans le lingot de silicium en fusion [9]. Le silicium se solidifie sur ce germe et garde la même organisation cristalline que celui-ci. Le matériau inférieur est le silicium poly-cristallin, produit en lingots par le biais de différents procédés de fusion et de solidification du silicium. Sa cristallisation est assurée par un contrôle drastique de la température de solidification [13].

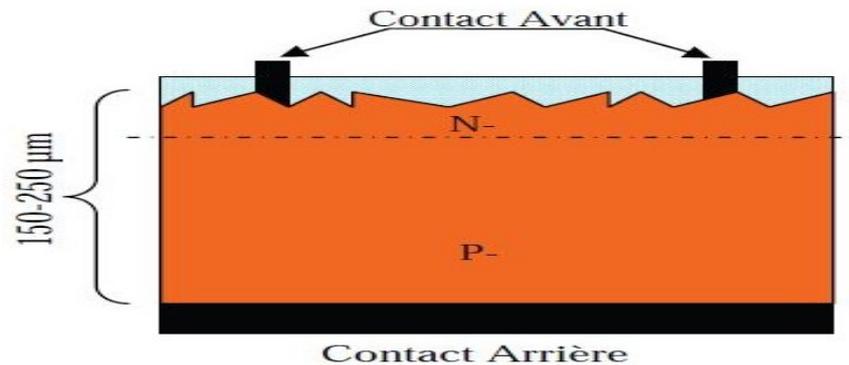


Figure I.20 : Schéma de principe d'une cellule à base de silicium cristallin.

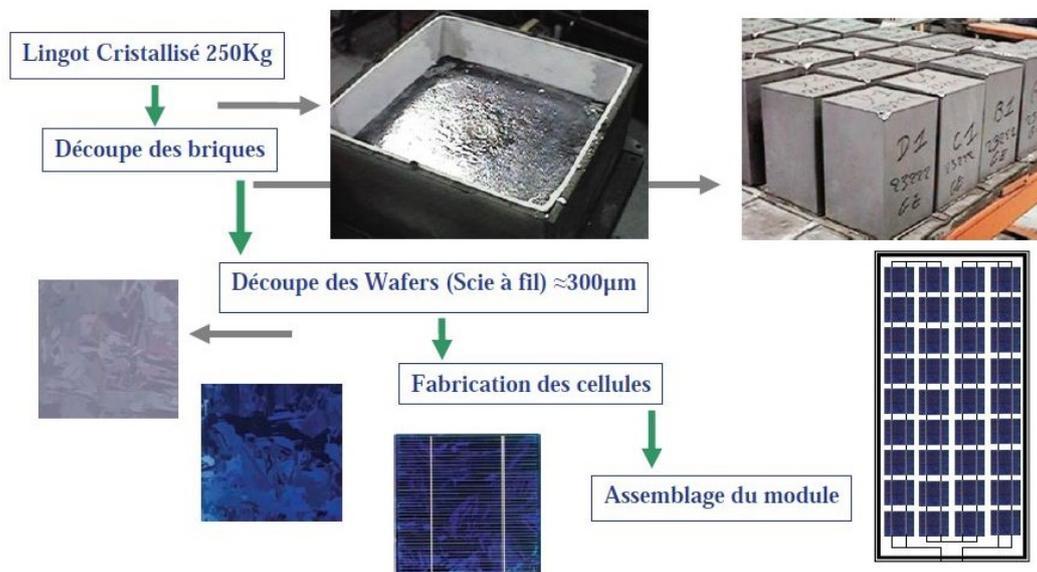


Figure I.21 : Exemple de chaîne de production de cellules photovoltaïques en silicium

I.8.1.1 Silicium multi cristallin

Les techniques de production du silicium multi cristallin sont beaucoup plus simples que celles du silicium monocristallin, et donc bien moins chères à mettre en oeuvre. Néanmoins, la qualité de ce matériau est moins bonne à cause de la présence de joints de grains qui introduisent des zones fortement recombinaisons et un taux assez élevé des impuretés métalliques et autres. Ces joints sont constitués par les surfaces adjacentes de grains d'orientations cristallographiques différentes 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. On peut différencier deux types de défauts dans le silicium multi cristallins les défauts intra granulaires similaires à ceux rencontrés dans le silicium monocristallin, et les défauts inter granulaires [14].



Figure I.22 : Photo d'un substrat de Silicium multi cristallin

I.8.1.2 Silicium monocristallin

Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme. Elle a comme avantage un bon rendement, de 16 % à 24 % (en 2015) (~150 WC/m²)^{7,6,10,11} ; et un nombre de fabricants élevé. Cependant, Elle a un coût élevé, un rendement plus faible sous un faible

éclairage ou un éclairage Diffus¹², et baisse du rendement quand la température augmente.

Avantage :

- Très bon rendement (environ 150 WC/m²).
- Durée de vie importante (+/- 30 ans).

Inconvénients :

- Coût élevé.
- Rendement faible sous un faible éclairage [10].



Figure I.23 : Cellule photovoltaïque à base de silicium monocristallin

I.8.2 Cellules photovoltaïques en couches minces

I.8.2.1 Cellules photovoltaïques à base de silicium 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 μ m est donc suffisante pour absorber l'essentiel du spectre visible. 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 net : La technique utilisée est la vaporisation sous vide. Le silicium amorphe reste relativement stable et peut produire de l'énergie même sous ensoleillement diffus et sous faible éclairage (et artificiel), il est fabriqué à un prix raisonnable. A côté de ces points

avantageux, les modules en silicium amorphe ont une durée de vie plus courte par rapport aux modules en silicium cristallin (> 10 ans contre > 20 ans). En effet, leur taux de dégradation est presque trois fois supérieur à celui des panneaux en silicium cristallin, en particulier les premiers six mois de fonctionnement. Et Inconvénient majeur est sont faible rendement en plein soleil [14].

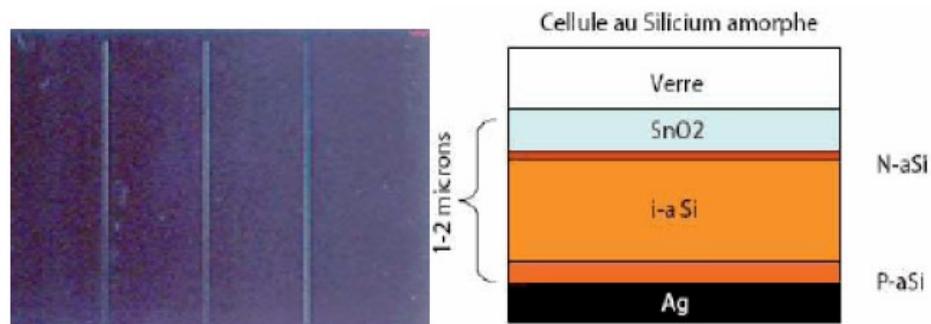


Figure 1.24 : Cellule photovoltaïque amorphe.

I.8.2.2 Cellules CIGS

Le matériau cuivre indium gallium sélénium est le semi-conducteur utilisé. La cellule CGIS résultante est poly cristalline a hétérojonction. Ces cellules peuvent être réalisées par impression ou par déposition sous vide (spray) qui s'avère être des procédés relativement économiques. Le substrat peut être flexible.

I.8.2.3 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 [14].

I.8.3 Cellules à haut rendement

I.8.3.1 Cellules photovoltaïques organiques

Le semi-conducteur utilisé est un polymère comme par exemple le poly acétylène. Des recherches sont en cours afin que toutes les couches de la cellule soient 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 [14].

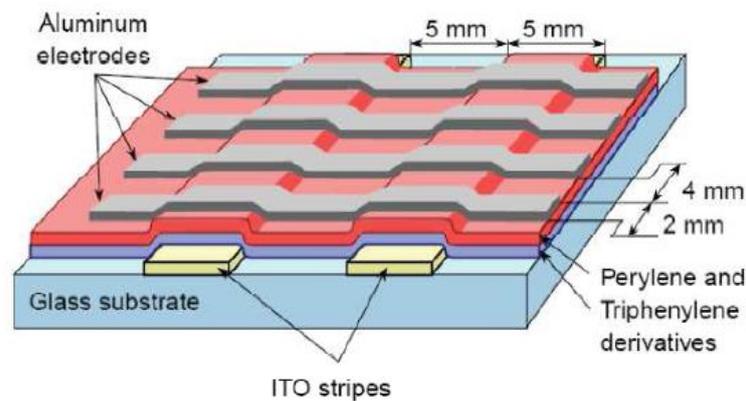


Figure I.25: Schéma de principe d'une cellule organique

I.8.3.2 Cellules à multi jonctions.

Deux ou trois semi-conducteurs différents sont utilisés, 11 semi-conducteurs par couche. L'efficacité est de 40 %. Cependant, le coût de revient est de 40 \$ par cm^2 . 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 [14].

I.9 Conclusion

Le monde de la conversion photovoltaïque, aussi bien au niveau de la recherche qu'au niveau industriel, connaît depuis quelques années une mutation profonde associée à l'intérêt croissant porté à l'énergie photovoltaïque. Ce chapitre nous a permis d'explorer le principe de la conversion photovoltaïque ainsi que les différentes technologies utilisées pour y parvenir. Des aspects aussi bien technologiques qu'électriques ont été abordés afin de mieux comprendre l'ensemble du mécanisme de conversion photovoltaïque. Les possibilités d'innovation sont très grandes et sont portées par le bouillonnement des recherches en vue d'améliorer les filières existantes mais surtout d'en trouver de nouvelles et de préparer les prochaines ruptures, autant technologiques notamment dans les matériaux. A ce jour, les cellules photovoltaïques en silicium dominent le marché car elles permettent d'atteindre des rendements de conversion PV bien acceptables. Pour cela, des panneaux solaires, constitué d'un grand nombre de ces cellules, ont permis de répondre d'une manière minimale aux besoins en électricité qui véhiculent notre vie courante. Par ailleurs, même si l'énergie du soleil est très abondante sur la croûte terrestre, l'énergie photovoltaïque ne peut vraisemblablement être une source d'énergie électrique principale à cause des faibles rendements comparés aux sources fossiles.

I.10 Références bibliographiques du chapitre I

- [1] Alouche Naima « Etude de l'effet des divers paramètres sur le rendement photovoltaïque d'une cellule solaire à base du mono-silicium » Memoire Presente Pour L'obtention Du Diplome Master En Physique, univ bouira akli mohand olhadj 2018.
- [2] MEKELLECHE SIDI MOHAMMED . Modélisation et Simulation de Nouveaux Matériaux Destinés à la Production d'Energie Photovoltaïque Soutenu. MASTER en Physique Spécialité:,univ aboubakr bikayid tlimcen, 2015.
- [3] F. HENAULT, « Concentration du rayonnement solaire par simple et double réflexion : Contribution aux méthodes de réglage et de contrôle des surfaces réfléchissantes à facettes », 1987, [En ligne]. Disponible sur: <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01088867/>. [4] E. Doctorale, « Mémoire de Magister Optimisation d'une cellule solaire à base du silicium polycristallin en couche mince déposé sur un substrat en céramique ».
- [4] YESREF Djamel , « Mémoire de Magister Optimisation d'une cellule solaire à base du silicium polycristallin en couche mince déposé sur un substrat en céramique »2013.
- [5] L. U. Abdel, H. Ibn, et B. De Mostaganem, « Docteur en Physique Mekemeche Abdelkader de cellules solaires au silicium à base de substrat de type n . Dédicaces », 2017.
- [6] Mr. BAKHTI Haddir. BAKHTI Haddi Mr. BENTOUMI Miloud. Etude de comportement de la capacité d'une diode tude de comportement de la capacité d'une diode polycristalline latérale « Memoire de master » UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, 2014.
- [7] Jacqueline Bloch (jacqueline.bloch@lpn.cnrs.fr) et Alberto Amo (alberto.amo@lpn.cnrs.fr) Laboratoire de Photonique et de Nanostructures, LPN/CNRS, Route de Nozay, 91460 Marcoussis Les « Fluides quantiques de

lumière dans les microcavités à semi-conducteurs », p. 49.

- [8] www.wikipedia.com I. La, « Chapitre 1 : Interaction lumière-semi-conducteur ».
- [9] <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=22249509>.
- [10] Metai Abdelkader, Chaab Aymene. Etude et simulation d'un système de production d'énergie photovoltaïque en site isolé. Memoire de master .university badji mokhtar anaba.2018.
- [11] salvator nsengiyumva. Propriétés photovoltaïques et électriques de cellules a base de films langmuir-blodgett de chlorophylle a Et de melanges chlorophylle a-sulfoquinovosyldiacylglycerol . Thèse doctorat chin no 69, p. 33-38, 1996.
- [12] BERREZZOUG Hanane, « Principe de fonctionnement et mesure des caractéristiques d'une cellule photovoltaïque », 2016.
- [13] Stéphane PETIBON, « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques », p. 145, 2009.
- [14] B. Nadjat, « Optimisation des émetteurs sélectifs et passivables des cellules solaires conventionnelles à base de mc _ si », 2012.

Chapitre II

L'état de l'art de silicium monocristallin et polycristalin

II.1 Introduction

Contrairement à l'énergie solaire thermique qui utilise le soleil comme source de chaleur, l'énergie photovoltaïque utilise le soleil comme source de lumière en transformant en électricité l'énergie des photons arrivant à la surface des panneaux solaires. Ces derniers sont généralement à base de matériaux semi-conducteurs en particulier le mono-silicium et le polysilicium. Ainsi, Dans ce chapitre, nous allons citer les notions fondamentales du silicium mono-cristallin, décrire son état cristallin et aussi ses différentes propriétés cristallographiques, optiques et électriques. De plus, les bases théoriques des mécanismes de diffusion des porteurs de charges en régimes d'équilibre ainsi que les techniques et les étapes de son élaboration seront aussi rappeler.

II.2 Notions fondamentales sur le silicium monocristallin (mono-Si)

La plus grande partie des composants électroniques (cellules solaires, transistors, diodes, ...) sont réalisés à base du silicium. En effet, il est le matériau support de 90% de l'industrie microélectronique. Par ailleurs, comme beaucoup d'autres éléments, le silicium peut exister à température ambiante sous différents états, dont les deux extrêmes sont respectivement l'état amorphe et l'état cristallin. Pour ce dernier état, il s'est avéré que l'élaboration du silicium monocristallin donne lieu à des matériaux de grande pureté et moins de défauts. C'est pour cela qu'il est le plus avantageux à utiliser pour pouvoir atteindre des rendements photovoltaïques élevés.[1]

II.3 Propriétés cristallographiques du mono-Si

Le silicium est un élément chimique le plus abondant dans la croûte terrestre, après L'oxygène, puisqu'il représente 25,7% de sa masse. Il fait partie de la famille des Cristallogènes, son symbole est « Si » et son numéro atomique est « 14 ». Dans la nature, il n'existe pas à l'état pur, mais sous forme de composés comme la silice qui est un dioxyde de silicium (SiO_2) et que l'on trouve dans le sable [1].

II.3.1 Structure cristalline

La matière condensée peut se former suivant deux états solides différents : un état dit amorphe, dans lequel la disposition des atomes est aléatoire, ou un état cristallin, caractérisé par un arrangement régulier des atomes. La structure monocristalline est définie comme étant un arrangement ordonné et périodique d'atomes au sein d'un réseau cristallographique dont l'élément élémentaire est appelée maille [20]. Le silicium monocristallin possède une structure cubique diamant où chaque atome est entouré de quatre plus proches voisins. Elle peut être décrite comme étant deux réseaux cubiques à faces centrées (CFC) déplacés l'un par rapport à l'autre le long de la diagonale principale. La position de l'origine du deuxième CFC par rapport à celle du premier CFC est de $(1/4, 1/4, 1/4)$. On remarque sur la figure II le mode de liaison tétraédrique (représenté en rouge) et quelques valeurs caractéristiques, à savoir, le paramètre de maille a et la distance r entre deux proches voisins : $a=5.43\text{Å}$ et $r=2.35\text{Å}$ [2].

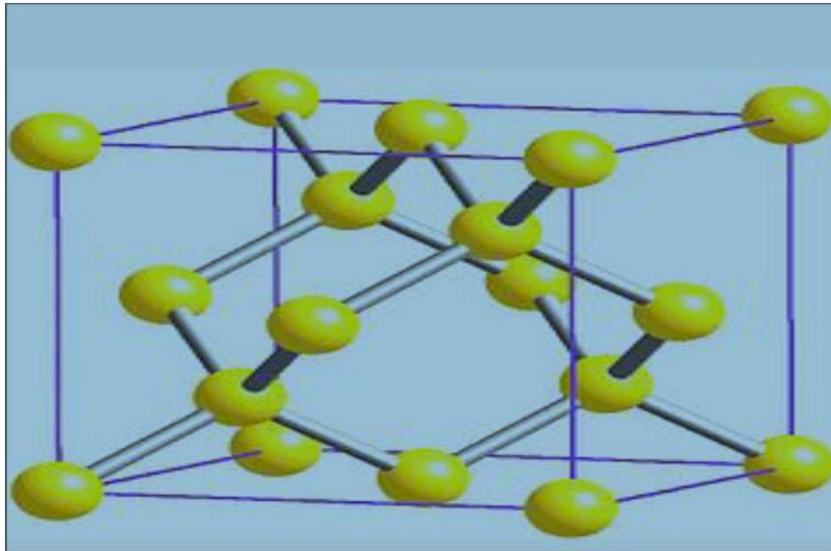


Figure II.1 : Structure cristalline du silicium monocristallin

Le silicium monocristallin est le semi-conducteur le plus utilisé dans l'industrie électronique. C'est un matériau qui présente de très bonnes propriétés électroniques en raison de sa grande pureté chimique et de la faible quantité de défauts structuraux qu'il renferme. Il peut être élaboré à partir de deux procédés, la méthode Czochralski (CZ) et celle de la zone flottante (FZ). Ces deux procédés réalisés à haute température et en phase liquide mènent à des lingots cylindriques de mono silicium. Les lingots sont ensuite découpés en plaquettes (wafers) grâce à une scie à fil [3].

II.3.2 Défauts dans le silicium

Malgré les méthodes d'élaboration FZ et CZ offre l'opportunité d'avoir du mono-Si, néanmoins ils subsistent au sein du matériau des défauts intrinsèques liés à la maille cristalline du silicium et des défauts extrinsèques issus de la présence des atomes étrangers désirables comme les dopants et indésirables comme les impuretés métalliques.

II.3.2.1 Défauts dans la maille cristalline

Les défauts cristallographiques sont des anomalies dans la maille cristalline du silicium. Ils sont classés en deux catégories :

- **Intrinsèques** pour des défauts liés aux atomes de silicium lui-même, exemple: une lacune.
- **Extrinsèques** pour des défauts en relation avec des atomes étrangers, exemple :

Précipité ils sont répertoriés en quatre types suivant leur présence dans la maille cristalline du silicium : ponctuel, linéaire, surfacique et volumique voire la figure II.2, ces défauts sont majoritairement formés durant la cristallisation des lingots de Si mais ils peuvent également se développer lors du procédé de fabrication des composants électroniques comme les cellules solaires si des contraintes trop importantes sont appliquées au silicium [1].

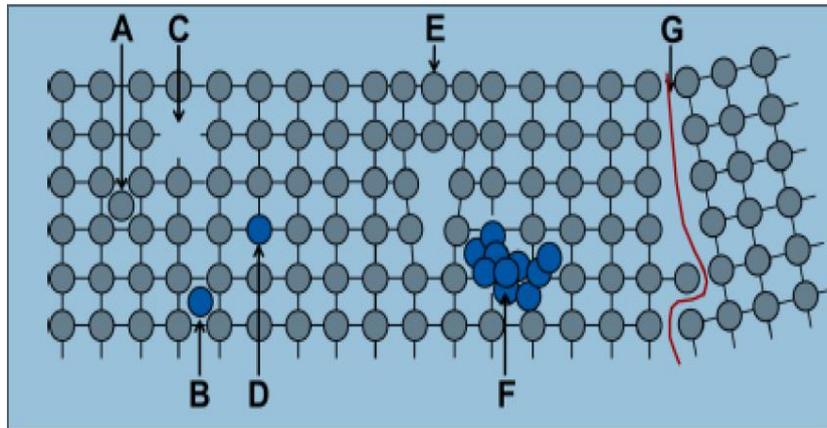


Figure II.2 : Représentation des différents défauts dans la maille cristalline du silicium.

A et B : atome en position interstitielle ; C : lacune ; D : atome étranger position Substitutionnelle ; E : dislocation ; F : précipité ; G : joint de grain.

Nom de défaut	Type de défaut	Sa définition	Représentation correspondante en figure II.2
Interstitiel	Ponctuel	Atome en dehors de la maille cristalline et positionné entre les atomes de silicium.	A et B
Lacunaire	Ponctuel	Absence d'atome dans la maille cristalline du silicium.	C
Substitutionnel	Ponctuel	Atome étranger prenant la place d'un atome de silicium.	D
Dislocation	Linéaire	Défauts classés en deux types : vis et coin. Une dislocation coin est générée avec l'ajout ou la disparition d'un plan atomique dans la maille. Par contre, une dislocation vis est créée à la perpendiculaire d'un glissement de deux plans cristallins.	E
Joint de grain	Surfacique	Frontière entre deux cristaux d'orientations cristallines différentes.	G
Précipité	Volumique	Agrégat d'impuretés dans le silicium	F

Figure II.3: Défauts présents dans le silicium cristallin

II.3.3 Impuretés métalliques

La présence d'impuretés métalliques introduit des niveaux d'énergie dans la bande Interdite du silicium pouvant générer des recombinaisons des porteurs de charge de type Schrockley-Read-Hall (SRH). Les pièges créés sont ainsi caractérisés en termes de densité dans le silicium, de la section efficace de capture des trous et des électrons et également de leur position dans la bande interdite. Suivant ces paramètres, les impuretés métalliques impactent différemment les propriétés électriques du silicium. En jouant le rôle de dopant désirable, ces impuretés peuvent également donner un caractère donneur ou accepteur au silicium. La composition du silicium, lorsqu'il est fondu dans le creuset, est relativement infectée par les impuretés métalliques. Les atomes dopants désirables sont ajoutés sous forme de poudre ou sous forme de bouts de silicium cristallin fortement dopés (par exemple un dopage en phosphore donne lieu à du silicium de type n) afin d'obtenir la gamme de résistivité souhaitée. Lors de refroidissement du silicium, les concentrations incorporées dans la partie cristalline ne sont pas identiques pour chaque fraction solidifiée du lingot. En effet, un rapport de concentrations entre la phase liquide et la phase solide se crée en fonction de l'affinité des impuretés avec chaque phase [1].

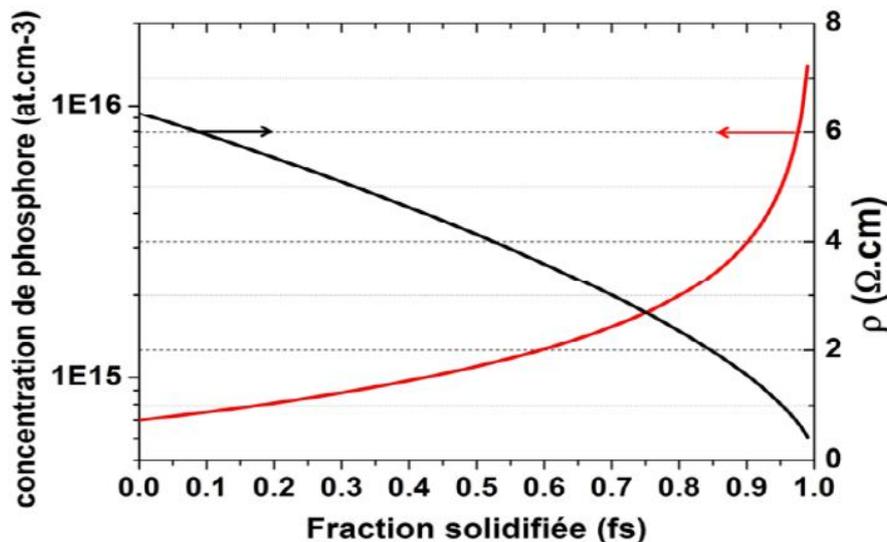


Figure II.4 : Exemple de variation de la concentration du phosphore et de la résistivité le long d'un lingot de silicium .

II.3.4 L'oxygène

L'oxygène présent dans le silicium cristallin élaboré par la méthode Czochralski provient essentiellement de la dissolution des creusets en silice dans le silicium fondu. L'oxygène est alors, préférentiellement, positionné en interstitiel dans la maille du silicium en quantité importante. Au contraire, dans le silicium FZ, l'absence de contact du barreau de silicium avec un creuset ou une atmosphère légèrement oxydée réduit les quantités d'oxygène incorporées [3].

Structure cristalline de silicium	Concentration d'oxygène (O_i) dans le Si (atomes/cm ³)
Silicium multi cristallin (mc-Si)	$(2 - 6) \times 10^{17}$
Silicium monocristallin :	
• Cz-Si	$(5 - 15) \times 10^{17}$
• FZ-Si	$\approx 10^{16}$

Figure II.5: Gamme de concentration d'oxygène pour différentes structures Cristalline de silicium.

II.4 Propriétés électriques du silicium monocristallin

Les propriétés électroniques des matériaux semi-conducteurs résultent de la mobilité, dans le réseau cristallin, de deux types de porteurs de charge électrique : les électrons libres et les trous. Ces porteurs interagissent de différentes manières avec le réseau cristallin et avec des impuretés ainsi que d'autres défauts qui peuvent fixer des charges, positives ou négatives, et se trouver ionisés.

Le silicium cristallise dans le système cubique à faces centrées, chaque atome établissant des liens de covalence avec quatre de ses voisins. Les électrons ne peuvent être que libres ou liés aux atomes du cristal, la transition entre l'un et l'autre des deux états s'accompagnant nécessairement de sauts d'énergie potentielle d'amplitude au moins égale à l'énergie d'ionisation de ces atomes dans le cristal. Il est à admettre qu'un trou comme la charge positive d'un atome ayant perdu l'un de ses électrons de valence ; la

migration de cette charge positive, par le jeu du déplacement de proche en proche d'autres électrons de valence, lui donne le caractère dual de l'électron libre, également applicable aux autres matériaux semi-conducteurs : la bande de valence, comme son nom l'indique, regroupe les niveaux d'énergie des électrons de liaison et la bande de conduction regroupe ceux des électrons libres : les deux bandes sont séparées par une bande interdite de largeur représentant l'énergie d'ionisation ($300\text{k}=1.12\text{eV}$ pour le silicium et 1.43 pour le l'arséniure de gallium) les trous correspondent aux lacunes de la bande de valence [1].

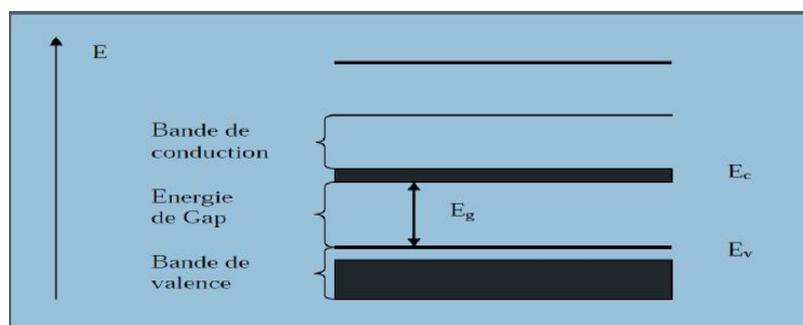


Figure II.6 : Diagramme de bandes d'énergie simplifié du silicium.

II.5 Dopage du mono silicium

Parmi les atomes étrangers qu'on peut rencontrer dans le cristal de silicium, ceux qui se trouvent ionisés aux températures de fonctionnement des éléments électroniques jouant ainsi un rôle particulièrement important : les atomes dopants. On distingue les atomes donneurs ionisés positivement et les atomes accepteurs ionisés négativement. Le dopage du cristal est l'introduction contrôlée de tels atomes. Pour le silicium, il s'agit essentiellement d'atomes pentavalents, phosphore ou arsenic (donneurs) et trivalents, bore ou aluminium (accepteurs). Ces atomes sont introduits dans le matériau semi-conducteur, lors même de son élaboration, et par des procédés tels que l'implantation ionique et la diffusion à haute température, à différentes étapes du processus de fabrication des composants. Dans le réseau cristallin, ces atomes dopants se substituent de place en place aux atomes de silicium et leur énergie d'ionisation est assez faible dans ces conditions pour qu'on puisse les considérer comme effectivement tous ionisés, sauf

aux très basses températures. À ces atomes dopants se trouvent donc associés, dans la bande d'énergie dite « interdite », des niveaux d'énergie proches de la bande de conduction pour les donneurs, de la bande de valence pour les accepteurs.

II.6 Propriétés optiques du silicium monocristallin

Le rendement des cellules solaires dépend principalement de la lumière absorbée par la couche absorbante. Du point de vue technologique, la couche absorbante doit avoir un gap optimal pour absorber la plus large gamme des longueurs d'ondes du spectre solaire avec un coefficient d'absorption élevé. Dans ce cas, il est important de minimiser les pertes relatives aux phénomènes de réflexion et/ou de transmission. Conformément à la théorie corpusculaire, l'énergie d'un photon correspondant à une radiation donnée est reliée à sa longueur d'onde par la relation :

$$E_{\text{ph}} = h\nu = hc/\lambda = 1.24\text{eV}/\lambda. \quad (\text{II.1})$$

ν : est la fréquence de la radiation, λ : est la longueur d'onde de la radiation.

c : est la vitesse de la lumière dans la vide, E_{ph} : est l'énergie du photon en et est la constante de Plank.

Une radiation lumineuse rencontrant un semi-conducteur est absorbée suivant la loi de Lambert-Bouguer :

$$I(x) = I(1-R) e^{-\alpha x} \quad (\text{II.2})$$

x : est la profondeur d'absorption du faisceau dans le matériau à partir de la surface du Semi-conducteur, R : est le coefficient de réflexion et α : est le coefficient d'absorption.

Quand les photons incidents ont une énergie suffisante pour provoquer le transfert des électrons de la bande de valence vers la bande de conduction, des paires électron-trou peuvent se créer. L'énergie minimale nécessaire au photon incident pour provoquer la transition électronique dépend de la largeur de la bande interdite du matériau, on détermine un seuil d'absorption intrinsèque et on trouve dans le cas du silicium, et dans

celui de l'arséniure de gallium, [38]. Pour les photons d'énergie inférieure à, le coefficient d'absorption est négligeable et la radiation lumineuse traverse le matériau avec une atténuation quasiment nulle. D'autres types d'absorption interviennent encore dans le cristal : par les atomes d'impuretés (absorption extrinsèque), par les porteurs libres et le réseau cristallin [1].

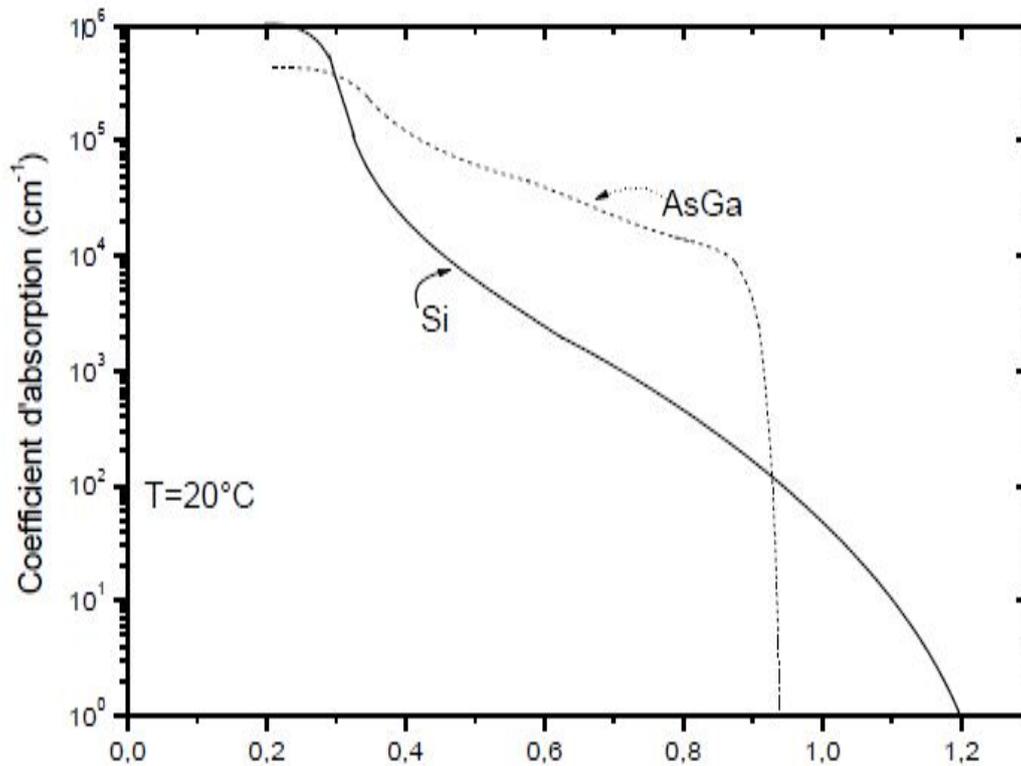


Figure II.7 : Spectre d'absorption de silicium (Si) et de l'Arséniure de Gallium (AsGa)
En fonction de la longueur d'onde de la lumière[4].

II.7 Propriétés du silicium poly cristallin

II.7.1 Généralités

Le silicium poly cristallin est un matériau solide constitué de cristallites (grains) séparées les unes des autres par des joints de grain. A l'intérieur de chaque cristallite, les atomes sont rangés de façon périodique et similaire à celle du silicium monocristallin[5].

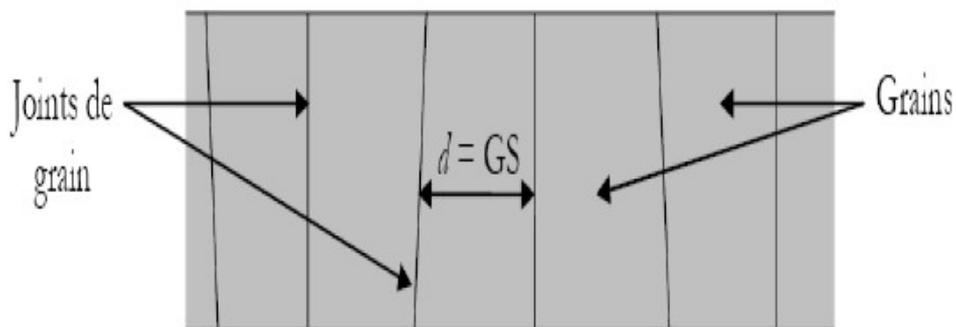


Figure II.8 : Vue générale du silicium poly cristallin.

II.7.2 Propriétés du silicium poly cristallin

II.7.2.1 Structure cristalline

La taille de grains est un paramètre très important du silicium poly cristallin. La modélisation des propriétés de transport et de recombinaison dans le silicium poly cristallin suppose généralement que tous les grains ont la même taille d . cette dimension appelée taille de grains permet d'une façon globale de différencier différents types de silicium poly cristallin[5] :

Silicium	Monocristallin	Multicristallin	Polycristallin	Nanocristallin	Polymorphe	amorphe
Notation	Mono-Si	mc-Si	pc-Si	nc-Si	μ -morph Si	a-Si
d	∞	0.5-30mm	0.5-100 μ m	10-200 nm	10-500Å +a-Si	-

Figure II.9 : Les tailles de grains dans le cas du dépôt CVD à haute température sur substrat étranger sont de l'ordre de 0.1 à 20nm.

II.7.3 Les défauts cristallins dans le silicium

II.7.3.1 Interaction des impuretés et défauts

La densité de défauts cristallins conditionne la qualité du silicium, et par suite ses propriétés photovoltaïques. On peut regrouper les défauts cristallins dans quatre grands ensembles :

- ✓ **Défauts ponctuels :** ils se présentent comme un écart localisé à la périodicité de la matrice cristalline. Les défauts ponctuels peuvent par exemple être des atomes d'impuretés, des lacunes ou des Interstitiels. Ces défauts sont susceptibles de s'associer pour former des défauts ponctuels complexes (paire de lacunes par exemple).
- ✓ **Défauts linéaires ou dislocations:** elles apparaissent lors d'une croissance du matériau hors des conditions d'équilibre. Sous les conditions d'équilibre, seuls des défauts ponctuels sont en effet à même d'être créés.
- ✓ **Défauts plans:** ces défauts sont soit des fautes d'empilement, soit des joints de grains dans le cas d'un matériau poly cristallin.

- ✓ **Défauts volumiques**: précipités et vides constituent les principaux défauts volumiques[6].

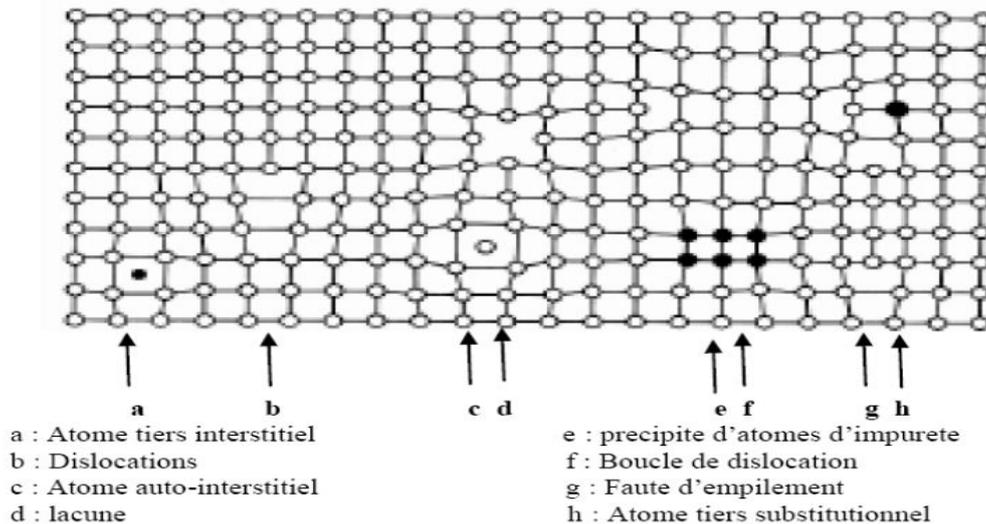


Figure II.10 : Les différents défauts cristallins présents dans une matrice cristalline.

La difficulté de compréhension des propriétés et des mécanismes de formation de chaque défaut vient du fait que le silicium multi cristallin avec sa structure compliquée, dans laquelle les défauts natifs, les dopants, les impuretés, et les défauts de structure réagissent entre eux et s'influencent mutuellement.

L'identification des défauts dans le silicium multi cristallin reste inévitable pour l'étude des cellules solaires. Ces défauts qui contrôlent les propriétés électriques du matériau peuvent être associés à des défauts de structures (comme les joints de grains, dislocations défauts d'empilement et des micros précipités) ou des impuretés. Donc, il est important de trouver non seulement les défauts électriquement actifs et dominants mais aussi de comprendre leurs natures chimiques et identifier les facteurs qui affectent leur formation et leurs propriétés de recombinaisons[7].

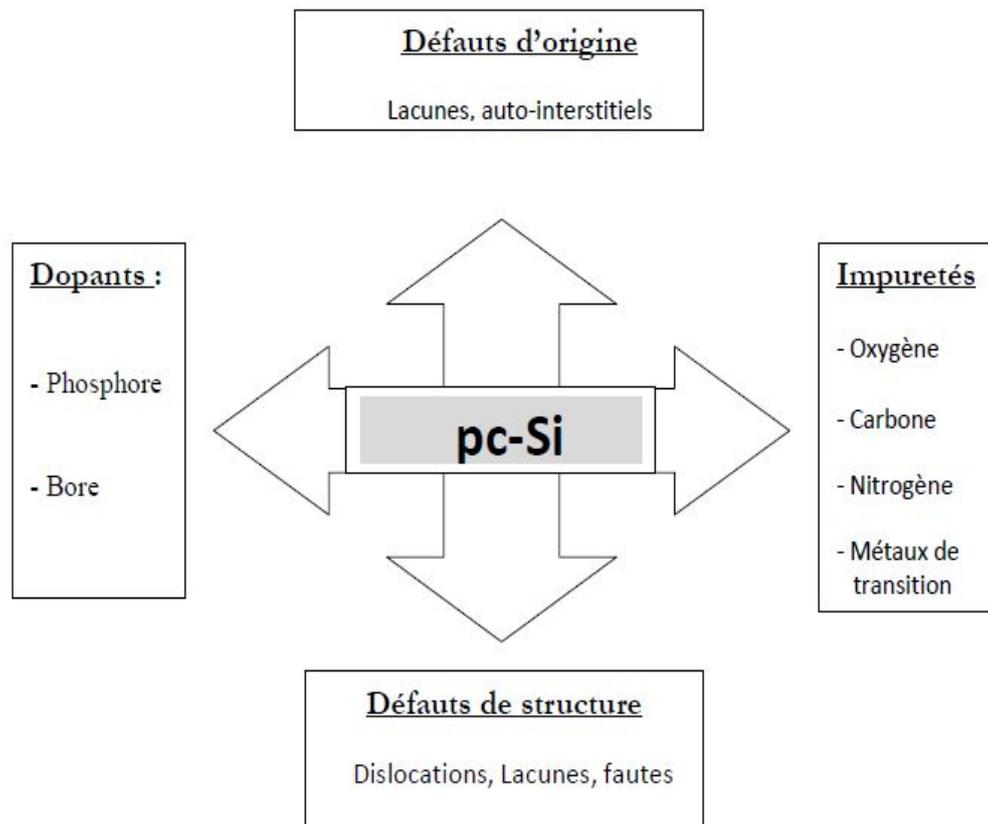


Figure II.11 : Représentation des différents types de défauts dans le silicium polycristallin.

II.7.3.2 Défauts natifs

Les plus communément types de défauts cristallin sont les défauts ponctuels natifs (lacunes, auto interstitiels et leurs complexes). L'origine de ces défauts a été un thème important des recherches dans le passé, ces défauts sont formés via les interactions des lacunes et les autos interstitielles avec l'oxygène, et que leur formation est déterminée par les conditions d'élaboration du matériau.

II.7.3.3 Impuretés non métalliques (oxygène et carbone)

Le carbone et l'oxygène agissent indirectement sur les propriétés photoélectriques du matériau en se précipitant dans les zones très disloquées ou en s'associant à d'autres impuretés. L'oxygène est introduit dans le silicium du creuset en quartz. Une grande

fraction de l'oxygène interstitiel incorporé au cristal précipite durant le refroidissement du lingot ou durant les traitements thermiques. Les échantillons impurifiés dans le silicium multi cristallin. Les concentrations de l'oxygène sont à peu près comparables à ceux dans le silicium monocristallin, alors que les concentrations du carbone sont assez fortes dans le silicium multi cristallin. En plus l'oxygène et le carbone peuvent précipiter au niveau des joints de grains et des dislocations et ainsi changer leurs comportements électriques. Ces impuretés peuvent aussi avoir un impact sur les recombinaisons en volume et sur les propriétés de la jonction PN[8].

II.7.3.4 Impuretés métalliques et leurs complexes

Le silicium poly cristallin est caractérisé par une significative concentration d'impuretés métalliques due à la mauvaise qualité du silicium utilisé comme matériau de base pour l'élaboration du matériau. Une contamination par les impuretés métalliques rencontrées durant les traitements à hautes températures est aussi possible. Elles existent sous différents états de charge, occupant à la fois des sites substitutionnels et interstitiels dans le réseau cristallin. Ces défauts sont caractérisés par un grand coefficient de diffusion et peuvent facilement diffuser à travers l'échantillon et atteindre la zone de charge d'espace dans des concentrations assez fortes qui peuvent atteindre 10^{14}cm^{-3} et ainsi produire des niveaux profonds. Les impuretés métalliques peuvent agir comme centre de recombinaison puissant où peuvent précipiter au niveau des défauts cristallographiques. Ainsi si les défauts sont présents près de la jonction, ceci résulte en une forte dégradation de la tension V_{OC} de la cellule. Il est alors absolument nécessaire d'éliminer ou de déplacer ces impuretés métalliques des régions actives du composant et les rendre électriquement inactifs[9].

II.7.3.5 Activité électrique des défauts étendus

Comme mentionner auparavant, le silicium poly cristallin est caractérisé par plusieurs défauts étendus. Ainsi, l'utilisation du silicium poly cristallin pour la fabrication des cellules solaire nécessite une étude soignée de ces défauts avec une considération de leurs propriétés structurale et électrique. Les plus communément types de défauts

étendus dans le silicium poly cristallin sont les dislocations et les joints de grains dont les propriétés sont associées à leur interactions avec une variété d'autres formes de défauts, en particulier avec les impuretés qui ségrégent au niveau de ces derniers et changer leurs comportements électriques [5].

II.8 Effet des joints de grains sur les performances des cellules photovoltaïque.

Le joint de grains est défini comme la limite entre deux grains monocristallins voisins ayant chacun une orientation cristallographique bien définie. Par ailleurs, les joints de grain ont une structure très complexe. Ils sont formés d'un amas d'atomes désordonnés et décalés par rapport aux réseaux cristallins des grains adjacents.

En outre, ils peuvent contenir un nombre important de défauts qui affectent considérablement le transport des porteurs et la diffusion des dopants dans le silicium poly cristallin. en général, les défauts localisés dans les joints de grain sont de deux types : Intrinsèques et extrinsèques. Les défauts intrinsèques se présentent sous la forme de liaisons pendantes ou de queues de bandes. En effet, par exemple, pendant le dépôt chimique en phase vapeur de la couche poly cristalline, une rupture de la périodicité du réseau cristallin se produit et engendre des liaisons interatomiques non satisfaites, appelées "liaisons pendantes".

Ces liaisons constituent des pièges pour les porteurs de charges et elles introduisent des niveaux profonds dans la bande interdite du silicium poly cristallin, avec une distribution des états d'interface UM (figure)[5].

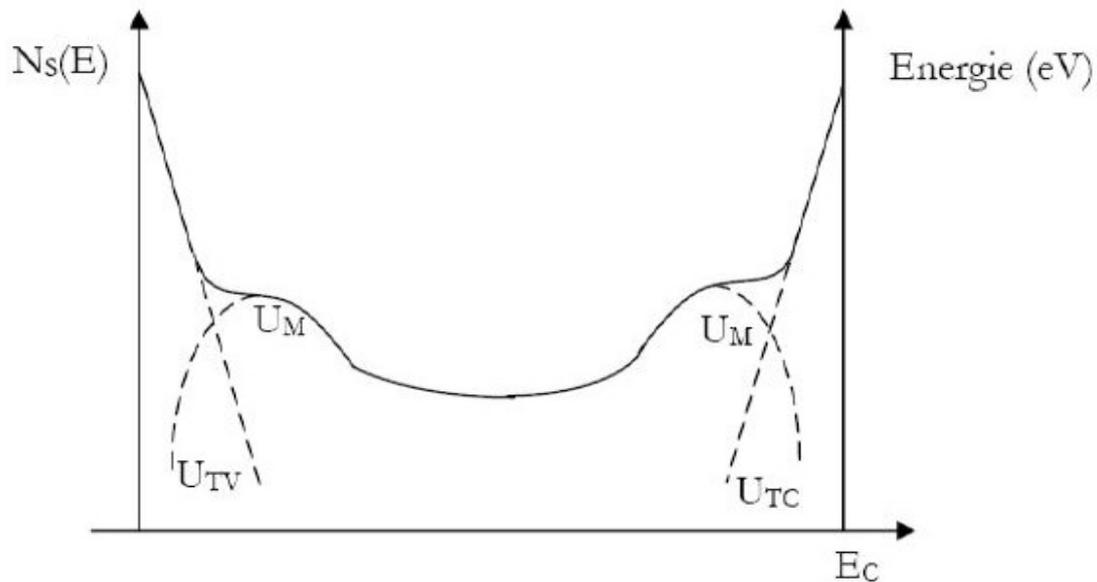


Figure II.13 : Distribution des états d'interface en forme de U introduite par les défauts intrinsèques localisés aux joints des grains.

Par ailleurs, des contraintes se présentent à la surface latérale des grains et provoquent une distorsion des liaisons interatomiques. Ceci réduit la largeur de la bande interdite en introduisant des états pièges localisés au voisinage de chacune des bandes de conduction et de valence. Ces états d'interface sont appelés “queues de bande”. Leurs distributions notées U_T , additionnées à la distribution des états des liaisons pendantes donne une distribution des états d'interface introduits par les défauts intrinsèques $N_S(E)$ en forme de U localisée aux joints des grains[5] .

II.9 Propriétés optiques

La présence de défauts cristallins tels que les joints de grain ou les dislocations introduit une absorption plus importante dans le silicium poly cristallin que dans le mono-Si. Cette propriété est illustre sur la figure II.14.

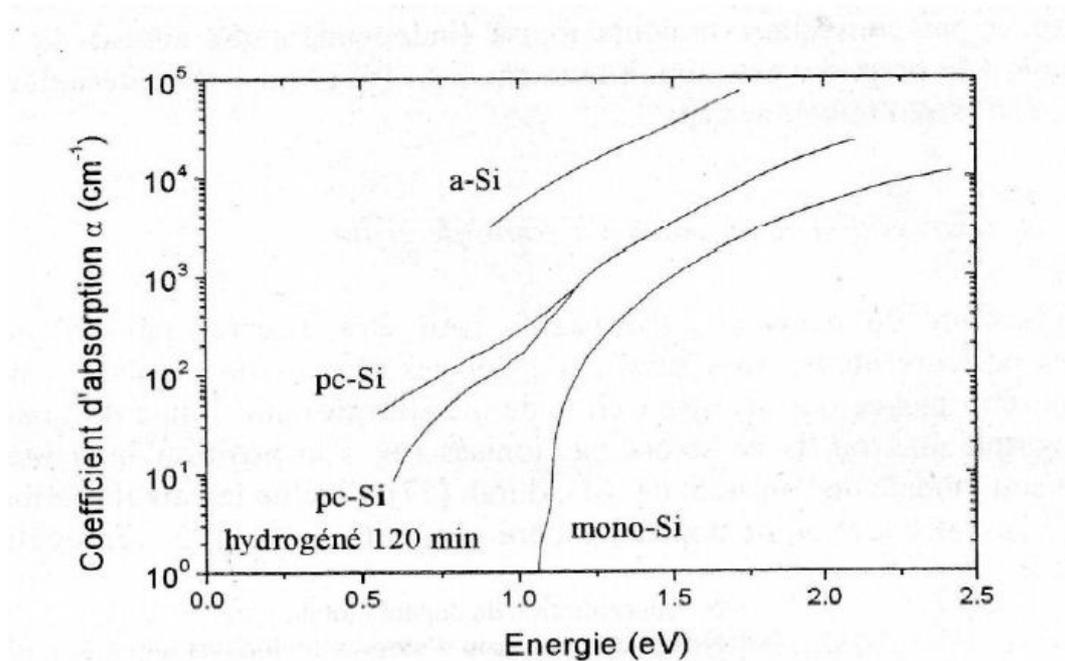


Figure II.14 : Influence des défauts cristallins sur les propriétés d'absorption dans le Silicium. La taille de grain du poly-Si est $d=30-50$ nm [5].

Le désordre cristallin au niveau des joints de grains permet de transitions optiques qui sont interdites dans le cristal et l'absorption est alors gouvernée par celle au joint de grain. Dans le silicium polycristallin l'absorption de la lumière pourra être distinguée selon deux domaines de longueurs d'ondes :

- Pour $h\nu > 1.3$ eV ($\lambda < 950$ nm), l'absorption sera égale à celle dans le mono-Si.
- Pour $1.1 < h\nu < 1.2$ eV ($\lambda = 1000$ nm à 1300 nm), les queues de bande pourront donner lieu à une absorption plus élevée que dans le mono-Si. Dans cette gamme de longueur d'onde, l'absorption par les porteurs libres peut également contribuer à augmenter l'absorption de façon significative[5].

II.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons noté quelques aspects essentiels du silicium monocristallin et polycristallin, à savoir son état cristallin et ses différentes propriétés : cristallographiques, optiques et électriques. De plus, la présentation des défauts dans le silicium mono et polycristalin. Ainsi que l'effet de joint de grain sur les performances des cellules photovoltaïques.

II.11 Références bibliographiques du chapitre II

- [1] M. E. N. Physique, « Etude de l'effet des divers paramètres sur le rendement photovoltaïque d'une cellule solaire à base du mono-silicium », 2018.
- [2] D. D. L. E. F. F. J.-J. S. P. T. S. V. W. V. Judikaël LE ROUZO, « Photovoltaïque », *Photoniques*, vol. 44, p. 50-53, 2009, [En ligne]. Disponible sur: <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=22249509>.
- [3] BERREZZOUG Hanane, « Principe de fonctionnement et mesure des caractéristiques d'une cellule photovoltaïque », 2016.
- [4] L. U. Abdel, H. Ibn, et B. De Mostaganem, « Docteur en Physique Mekemeche Abdelkader de cellules solaires au silicium à base de substrat de type n . Dédicaces », 2017.
- [5] E. Doctorale, « Mémoire de Magister Optimisation d'une cellule solaire à base du silicium polycristallin en couche mince déposé sur un substrat en céramique ».
- [6] P. Minist *et al.*, « Diplôme de Magister ».
- [7] Stéphane PETIBON, « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques », p. 145, 2009.
- [8] J. Bloch, « Fluides quantiques de lumière dans les microcavités à semi-conducteurs », p. 4-9.
- [9] E. D. E. Quelques, P. P. Et, et A. U. F. E. N. Post-recolte, « Memoire de master ii », 2014.

Chapitre III

Résultats et discussions

III.1 Introduction

La simulation numérique ou informatique est la représentation initiative du fonctionnement d'un système ou d'un phénomène physique quelconque sans expérimentation. En raison du coût élevé de l'expérience, elle est devenue indispensable pour le développement des recherches notamment en photovoltaïque, gagnant ainsi du temps et de l'argent. Bénéficiant de l'essor remarquable de la technologie des semi-conducteurs et de la microélectronique en particulier, le développement d'outils de conception assisté par ordinateur permet de simuler une cellule solaire et d'en optimiser les paramètres physiques et technologiques préalablement à sa fabrication.

Dans ce chapitre, nous allons présenter les résultats de calcul des grandeurs photovoltaïques d'une cellule solaire en utilisant la simulation numérique à l'aide du logiciel PC1D. Ainsi, nous intéresserons aux effets des différents paramètres physiques et technologiques de la région de l'émetteur sur les performances photovoltaïques. Aussi, une interprétation adéquate des comportements observés sur les cellules que ce soit en mono-silicium ou en polysilicium gouvernera le choix de la fabrication de l'émetteur pour atteindre des rendements de conversion photovoltaïques élevés.

III.2 Présentation du logiciel de simulation PC1D

III.2.1 Aperçu général du logiciel

Le logiciel PC1D (personnel computer one-dimensionnel) a été conçu par Paul A. Basaure durant ses travaux de recherche à la faculté d'ingénierie électrique à l'université d'Iowa en Australie, et fut rendu public, pour la première fois, après l'avoir annoncé à la 18^{ème} conférence sur le photovoltaïque IEEE PVSC (décembre 1985) [1]. Il est l'un des programmes qui a été élaboré pour modéliser et exploiter les composants semi-conducteurs, notamment les composants photovoltaïques. Il est capable de résoudre les équations couplées non linéaires qui gouvernent les phénomènes physiques du dispositif étudié. En conséquence, il permet de simuler n'importe quelle structure photovoltaïque et d'approcher les résultats expérimentaux sous des gains de temps et d'argent considérés faibles [2].

A l'aide du PC1D, la compréhension du fonctionnement des cellules solaires et leurs phénomènes physiques internes tels que le mouvement des porteurs minoritaires, la recombinaison et la photo génération, deviennent aisée. Les résultats de la simulation sont très proches de ceux issus de l'expérimental. En conséquence, il est considéré comme étant un moyen qui permet de gagner des gains de temps et d'argent considérables.

III.2.2 L'environnement du logiciel PC1D

La fenêtre du logiciel PC1D est présentée sur la Figure III.1. Pour visualiser les résultats de la simulation, il faut d'abord introduire les paramètres du dispositif, à savoir ceux des régions de la base et de l'émetteur. Aussi, une reconduction de l'excitation lumineuse est nécessaire. Cependant, à la fin de la simulation, les résultats obtenus sont vulgarisés sous forme de données ou de graphes. Nous distinguons essentiellement cinq parties :

- 1- **La partie "device"**: cette partie contient les informations générales sur le composant que nous voulons simuler.
- 2- **La partie «Région»** : elle permet d'introduire les paramètres essentiels liés au composant (type de matériaux utilisés, épaisseur, type de dopage ... etc).
- 3- **La partie "excitation"**: cette partie contient les paramètres d'excitation qui vont servir à simuler le comportement du composant.
- 4- **La partie "résultats"**: cette partie sert après le lancement de la simulation de visualiser les principaux paramètres, à savoir, le courant de court-circuit (I_{cc}), la tension en circuit-ouvert (V_{oc}) et la puissance électrique maximale produite (P_{max}).
- 5- **La partie "schéma du dispositif"**: elle contient l'architecture du dispositif photovoltaïque à simuler.

DEVICE
Device area: 1 cm²
Front surface texture depth: 3 μm
No surface charge
Front surface optically coated
No Exterior Rear Reflectance
Internal optical reflectance enabled
Emitter contact enabled
Base contact enabled
No internal shunt elements
(Global) band structure parameters

REGION 1
Thickness: 0.6 μm
Material modified from si_updated.mat
Dielectric constant: 11.9
Refractive index from si_green2008.inr
Absorption coeff. from si300_green2008.abs
Free carrier absorption enabled
N-type background doping: 2×10²⁰ cm⁻³
No front diffusion
No rear diffusion
Bulk recombination: $\tau_n = \tau_p = 1000 \mu s$
Front-surface recom.: S model, $S_n = 20000$, $S_p = 5000 \text{ cm/s}$
Rear-surface recom.: S model, $S_n = 1 \times 10^6$, $S_p = 5000 \text{ cm/s}$

Device Schematic

Figure III.1 : Fenêtre du logiciel PC1D utilisé en simulation numérique

III.2.3 Fonctionnement du PC1D

Après l'introduction de toutes les données nécessaires au matériau étudié, ainsi que la configuration de la cellule solaire, une icône nommée « Run » permet de lancer les calculs. Après quelques secondes, de nouvelles fenêtres s'ouvrent pour visualiser les différents résultats numériques et/ou graphiques désirés. Le fonctionnement du PC1D nécessite plusieurs critères à respecter :

- Le choix des gammes des valeurs des différents paramètres n'est pas aléatoire, elles doivent être réalisables par la technologie.

- Pour des considérations numériques, les valeurs à introduire, doivent être comprises dans des intervalles bien déterminés.
- Pour une convergence rapide, il est indispensable de minimiser au maximum la taille des éléments finis, et choisir un nombre adéquat des itérations.
- Le bon choix des paramètres numériques.
- Une initialisation convenable des différents paramètres de la simulation.

III.2.4 Visualisation des résultats

Les résultats peuvent être visualisés en utilisant les deux fichiers d'excitation suivants :

A) Le fichier « One-Sun.exc » permet de visualiser:

- ✓ La caractéristique courant-tension $I(V)$.
- ✓ La valeur du courant de court-circuit (I_{cc}).
- ✓ La valeur de la tension en circuit ouvert (V_{co}).
- ✓ La valeur de la puissance maximale P_{max} .
- ✓ Le rendement η .
- ✓ Le facteur de forme FF

B) Le fichier « Scan-qe.exc » permet de calculer :

- ✓ la réponse spectrale.

Ils existent plusieurs spectres solaires standards, chacun d'eux spécifie l'endroit de l'étude, par exemple, dans l'espace, on choisit le spectre air-mass AM0 par contre sur la surface de la terre, il est à choisir air mass AM1.5.

III.3 Cellule photovoltaïque simulée et paramètres utilisés

III.3.1. Cellule photovoltaïque simulée

La structure de la cellule utilisée pour la simulation est de type $n^+ - p - p^+$ de surface 1cm^2 avec une texturisation à la surface avant de $3\mu\text{m}$ et faisant un angle de 54.74° avec l'horizontal. Le substrat qui porte la cellule est caractérisé par un coefficient de réflexion interne de la lumière de 80% de type diffuse c'est-à-dire la lumière est réfléchié dans un

grand nombre de directions et l'énergie du rayon incident est redistribuée dans une multitude de rayons réfléchis.

Pour simuler l'influence des différents paramètres, nous avons tout d'abord défini une cellule solaire de référence avec un ensemble de paramètres fixes. Ensuite, nous avons fait varier les paramètres un par un (les autres restant fixes) afin d'analyser leur influence sur les caractéristiques de la cellule solaire. Les figures III.2 et III.3 représentent respectivement les structures et les paramètres des cellules de référence à base du silicium poly- et mono-cristallin utilisées pour la simulation.

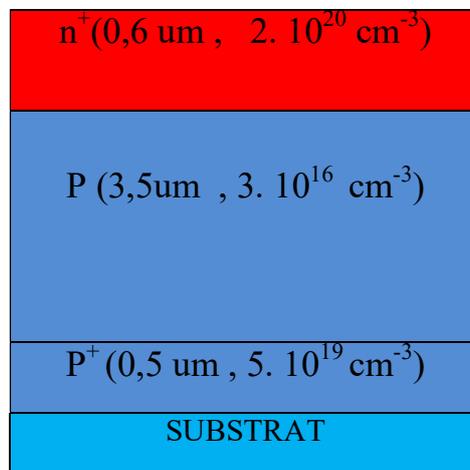


Figure III.2 : Cellule à base de silicium poly cristallin

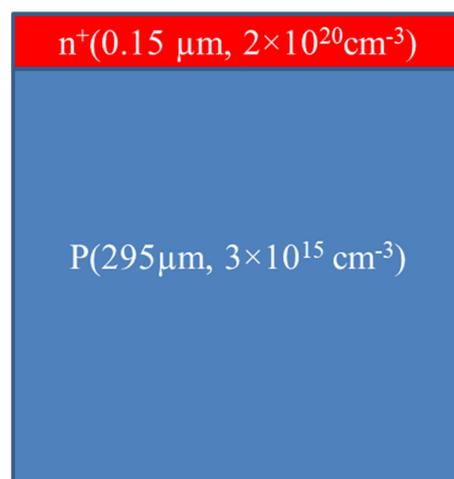


Figure III.3 : Cellule solaire à base de silicium mono-cristallin

III.3.2 Paramètres de la structure simulée

Les paramètres des différentes régions composant la cellule de référence à base du silicium polycristallin sont résumés ci-dessous dans le tableau III.1.

Emetteur n⁺	Valeur
Epaisseur	0,6μm
Dopage	$2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$
Base P	
Epaisseur	3.5μm
Dopage	$3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$
Durée de vie des minoritaires	0,2μs
BSF P⁺	
Epaisseur	0,5 μm
Dopage	$5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$
Texturation face avant	
Angle	54.74°
Profondeur	3 μm

Tableau III.1 : Paramètres de la cellule de référence à base du silicium polycristallin

III.4 Exploitation des résultats de la simulation

A partir de la cellule de référence décrite plus haut, nous avons tous d'abord fait varier l'épaisseur et le niveau de dopage de la région de l'émetteur. Puis nous avons analysé l'influence de la variation de ces paramètres sur le rendement des cellules en silicium poly- et mono-cristallin pour faire ressortir les meilleurs paramètres géométriques des deux cellules accompagné d'une étude adéquate des comportements observés. La plage de variation des paramètres à analyser est résumée dans le tableau III.2.

Paramètre	Valeur minimale	Valeur maximale
Épaisseur de l'émetteur	0,01 μm	0,3 μm
Niveau de dopage de l'émetteur	$1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$	$2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$

Tableau III.2 : Plage des paramètres physiques variés pendant la simulation

III.4.1 Effet de l'épaisseur de l'émetteur sur les grandeurs photovoltaïques

Pour étudier l'effet de l'épaisseur de l'émetteur sur les différentes caractéristiques de sortie des cellules à base du silicium poly- et mono-cristallin, à savoir le courant de court-circuit I_{cc} , la tension en circuit ouvert V_{oc} et le rendement de conversion η , nous avons exécuté des simulations en faisant varier l'épaisseur de 0,01 à 0,03 μm tout en fixant les autres paramètres. Sur les figures III.4 et III.5, nous avons représenté la tension en circuit ouvert V_{oc} en fonction de l'épaisseur de la région de l'émetteur pour les deux types de cellules photovoltaïques. On remarque clairement que les valeurs de V_{oc} mesurées sur des cellules mono-silicium sont nettement supérieures à celles mesurées sur des cellules en polysilicium. Ce constat est dû au fait que le polysilicium est un matériau qui contient une forte densité de défauts aux joint de grains comparé au mono-silicium qui est exempt de défauts. En conséquence, les vitesses de recombinaison des porteurs de charges sont très élevées dans les cellules en silicium polycristallin. Par suite, ce qui explique nos résultats vu que la tension en circuit-ouvert V_{oc} se dégrade en présence des défauts. Par ailleurs, les mêmes courbes présentent une diminution de V_{oc} au fur et à mesure que l'épaisseur de l'émetteur augmente. Néanmoins, les valeurs de V_{oc} mesurées sur des cellules en polysilicium sont peu affectées comparé à une diminution considérable pour celles enregistrées sur des cellules en mono-silicium. En effet, pour la même plage de variation de l'épaisseur de l'émetteur, V_{oc} passe de 0,710V à 0,675V pour le mono-silicium contre une diminution de 0,611V à 0,607V pour le polysilicium. Etant donné que l'éclairement des cellules, dans notre cas, se fait à travers l'exposition de l'émetteur à la lumière, alors son épaisseur affectera simultanément le nombre de porteurs de charges libres et leurs distances parcourues jusqu'aux contacts. Vraisemblablement, un émetteur épais présentera une profondeur de pénétration de la lumière minimales et des longueurs de

diffusion de porteurs de charges libres faibles. Dans ce cas, on enregistrera une faible densité de porteurs de charges libres ainsi que des vitesses de recombinaisons élevées dans la région de l'émetteur.

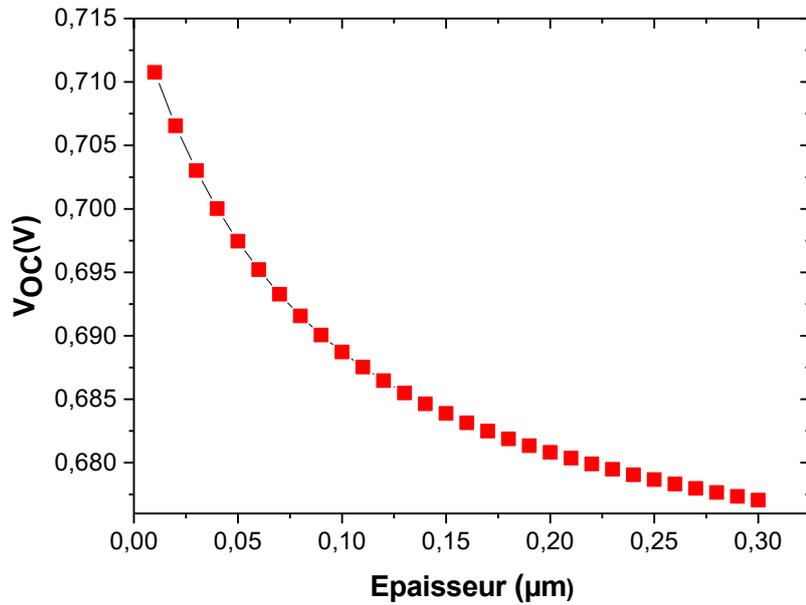


Figure III.4 : Effet de la variation de l'épaisseur de l'émetteur sur la tension en circuit-ouvert V_{oc} d'une cellule solaire à base de silicium monocristallin.

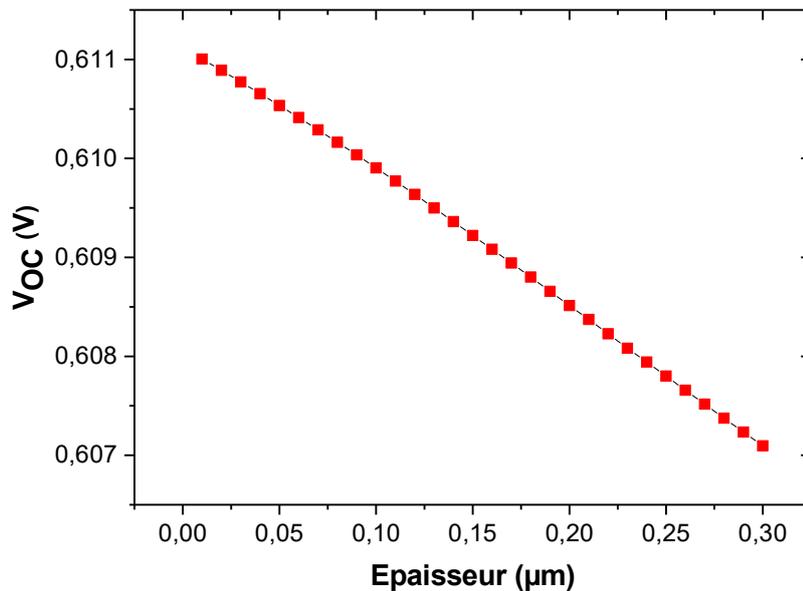


Figure III.5 : Effet de la variation de l'épaisseur de l'émetteur sur la tension en circuit-ouvert V_{oc} d'une cellule solaire à base de silicium polycristallin.

De même, l'épaisseur de la région de l'émetteur influence le courant de court-circuit I_{cc} et par la suite le rendement photovoltaïque η . En effet, on peut constater sur les figures III.6, III.7, III.8 et III.9 des valeurs de I_{cc} et de η nettement élevées mesurées sur des cellules à base du mono-silicium comparée à celles en silicium polycristallin. En effet, les valeurs de η sont 21% et 12,6% respectivement pour les cellules en silicium mono- et polycristallin. Aussi, il est à signaler que l'augmentation de l'épaisseur de l'émetteur entraîne la dégradation de I_{cc} et de η . Cette dégradation est considérable sur des cellules en mono-silicium comparée aux cellules en polysilicium. Ceci s'explique en grande partie par l'effet prépondérant des joints de grains dans le polysilicium où l'impact de l'augmentation de l'épaisseur de l'émetteur est insensible. Par contre, sur des cellules en mono-silicium, une perte de 6,5 mA pour le courant de court-circuit et de 3% pour le rendement photovoltaïque pour une plage de variation de l'épaisseur de l'ordre de 0,3 μm .

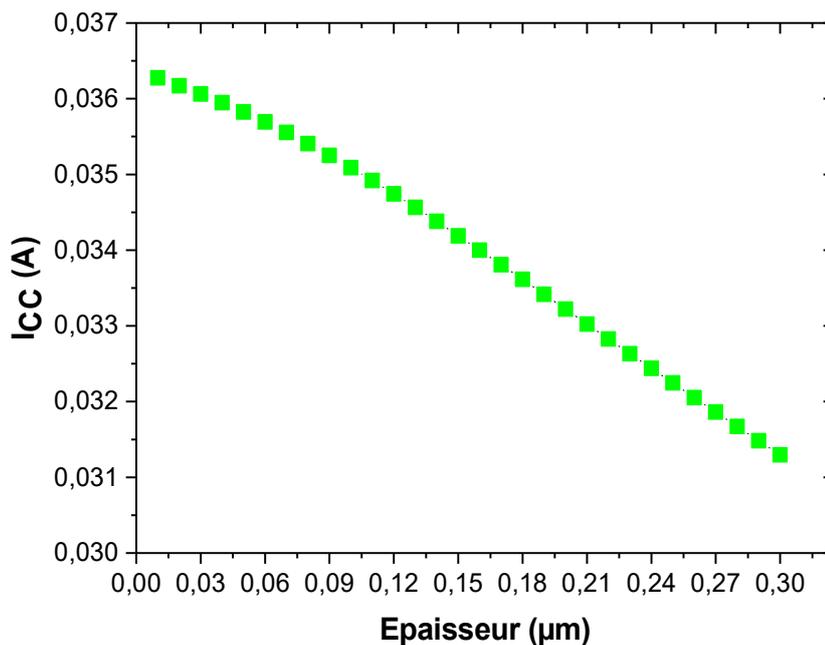


Figure III.6 : Effet de l'épaisseur de l'émetteur sur le courant de court-circuit I_{CC} mesuré sur des cellules solaires en mono-silicium

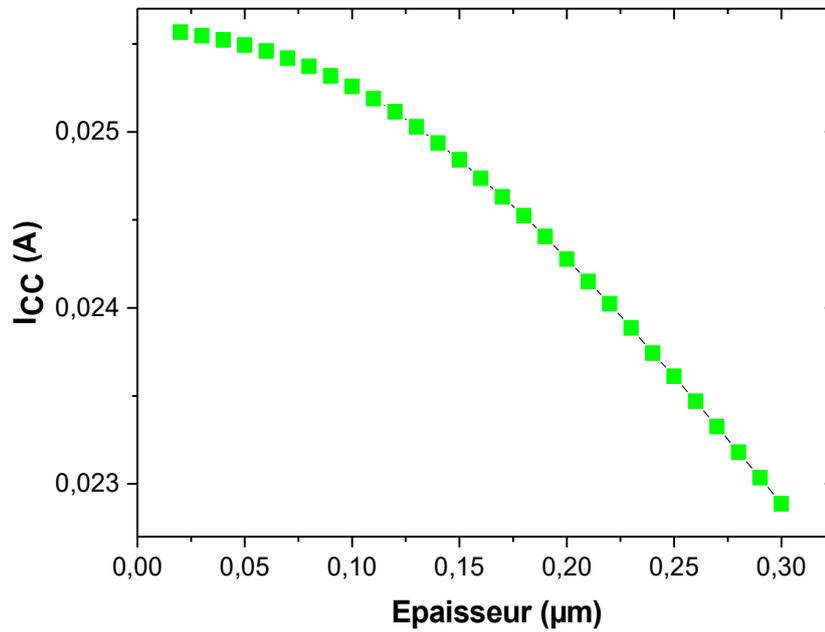


Figure III.7 : Effet de l'épaisseur de l'émetteur sur le courant de court-circuit I_{CC} mesuré sur des cellules solaires en polysilicium

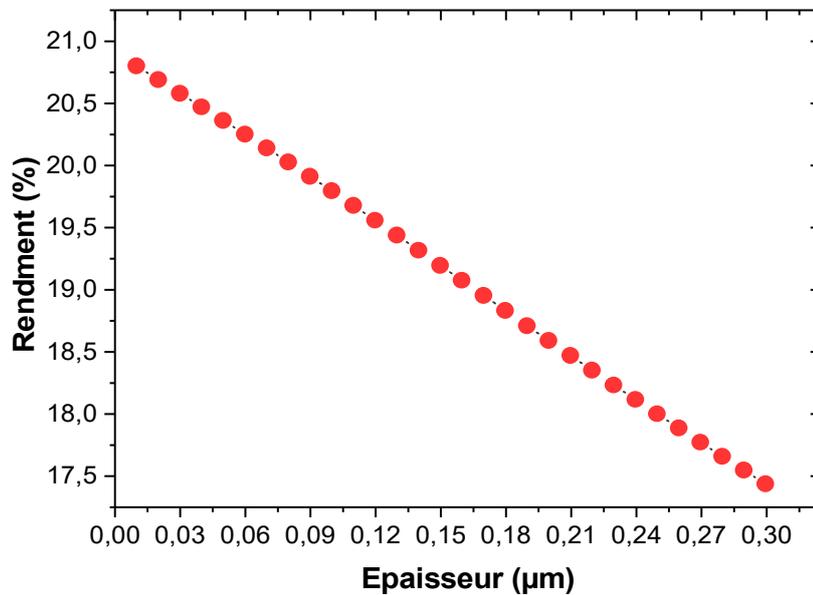


Figure III.8: Effet de l'épaisseur de l'émetteur sur le rendement photovoltaïque η d'une cellule solaire en silicium mono-cristallin

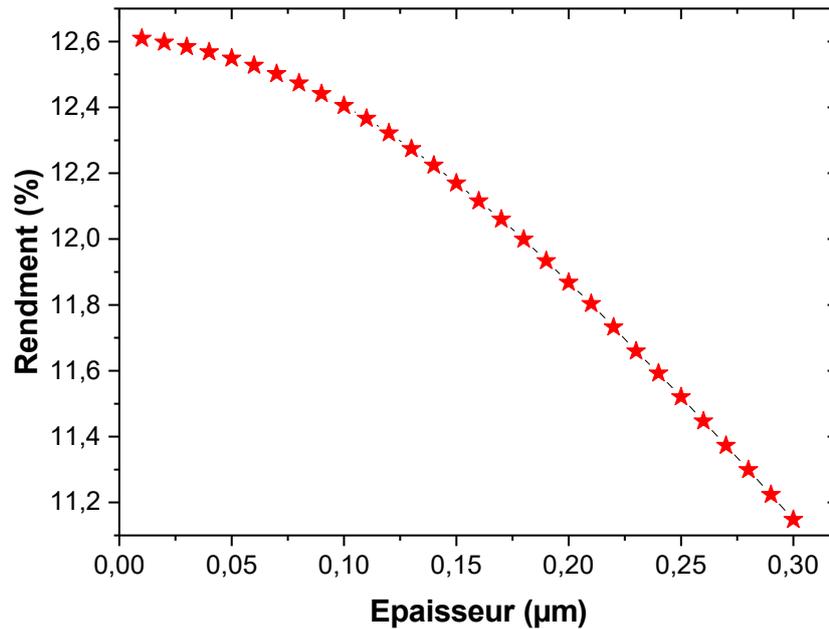


Figure III.9 : Effet de l'épaisseur de l'émetteur sur le rendement photovoltaïque η d'une cellule solaire en silicium polycristallin

III.4.2 Effet du niveau de dopage de l'émetteur sur les grandeurs photovoltaïques

Dans cette partie, nous divulguons les mesures relatives à la tension en circuit-ouvert V_{oc} , au courant de court-circuit I_{cc} et au rendement photovoltaïque η issus des simulations avec le logiciel PC1D en faisant varier le niveau de dopage de l'émetteur en phosphore de 1×10^{17} jusqu'à 2×10^{19} atomes. cm^{-3} . Les divers résultats sont représentés sur les figures III.10, III.12, III.14 pour des cellules en mono-silicium et sur les figures III.11, III.13, III.15 pour des cellules en silicium polycristallin.

L'analyse des valeurs des grandeurs photovoltaïques témoignent qu'un matériau exempt de défaut présente des valeurs clairement élevées comparées aux celles fournies par un matériau dégradé. Néanmoins, il est à signaler sur les figures III.12 et III.13 que l'augmentation du niveau de dopage de la région de l'émetteur influence d'une manière minime le courant I_{cc} . Cependant, les comportements de V_{oc} et de η avec le dopage montrent que la croissance de la concentration du phosphore dans l'émetteur est bénéfique pour des cellules en polysilicium alors qu'il est dommageable pour celles en

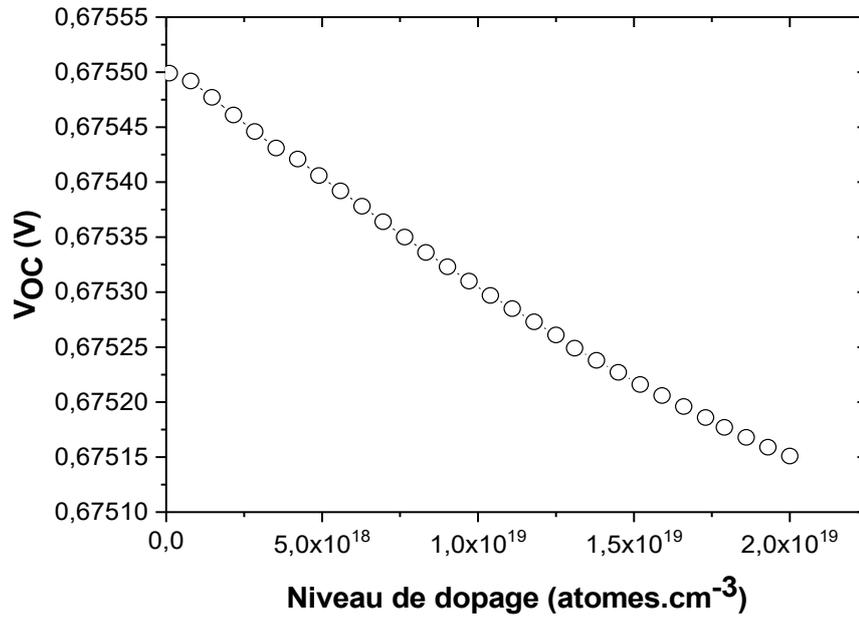


Figure III.10 : Effet du niveau de dopage de l'émetteur sur la tension en circuit-ouvert V_{oc} d'une cellule solaire en silicium mono-cristallin

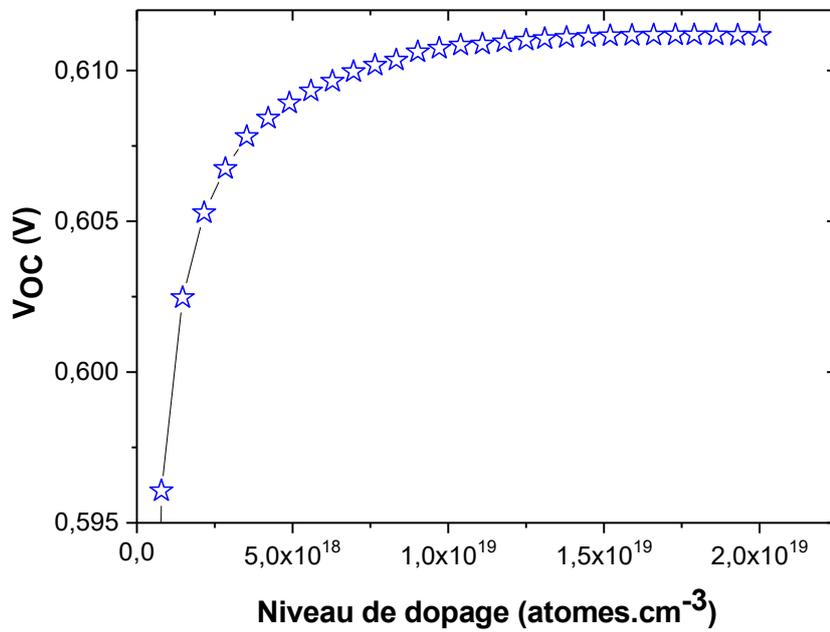


Figure III.11 : Effet du niveau de dopage de l'émetteur sur la tension en circuit-ouvert V_{oc} d'une cellule solaire en silicium polycristallin

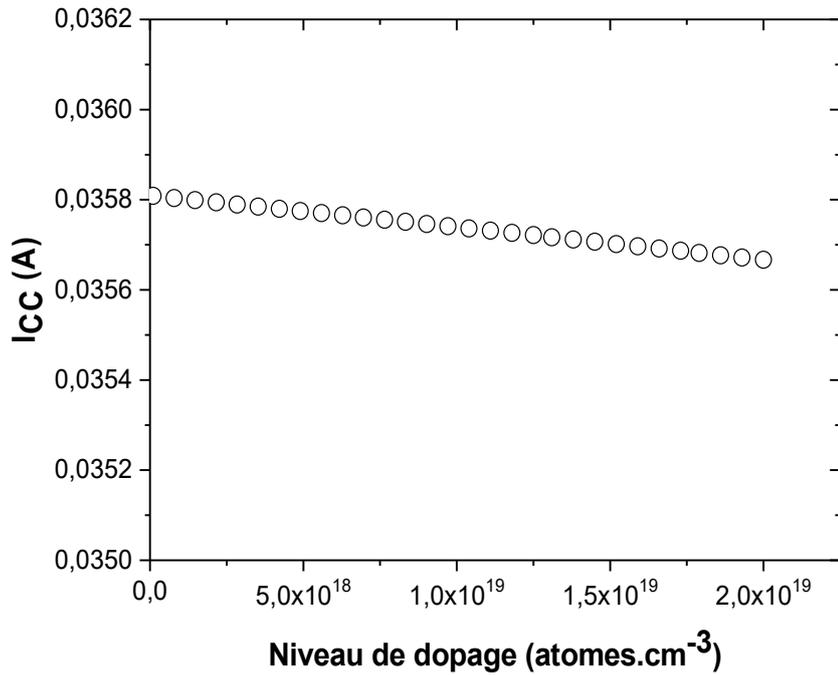


Figure III.12 : Effet du niveau de dopage de l'émetteur sur le courant de court-circuit I_{cc} d'une cellule solaire en silicium mono-cristallin

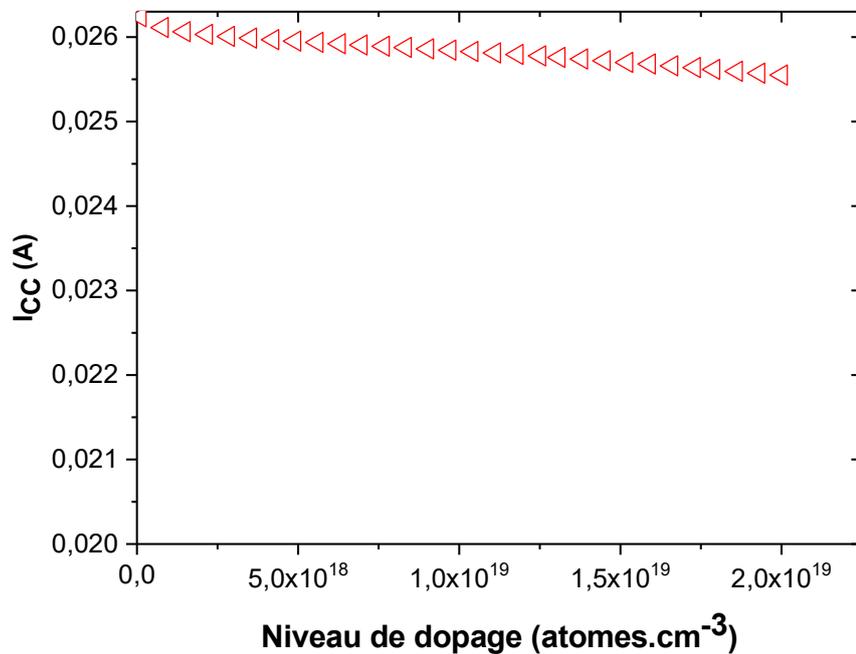


Figure III.13 : Effet du niveau de dopage de l'émetteur sur le courant de court-circuit I_{cc} d'une cellule solaire en silicium polycristallin

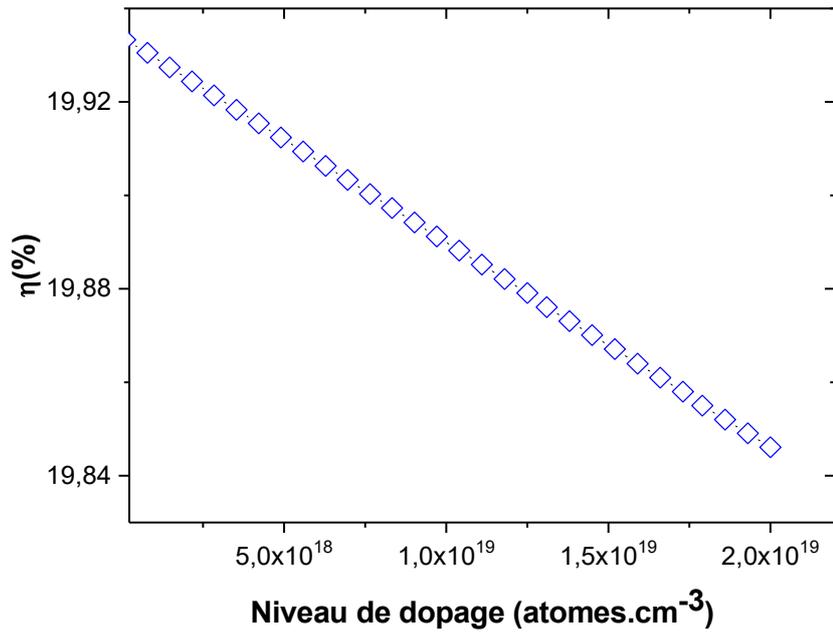


Figure III.14 : Effet du niveau de dopage de l'émetteur sur le rendement photovoltaïque η d'une cellule solaire en silicium mono-cristallin

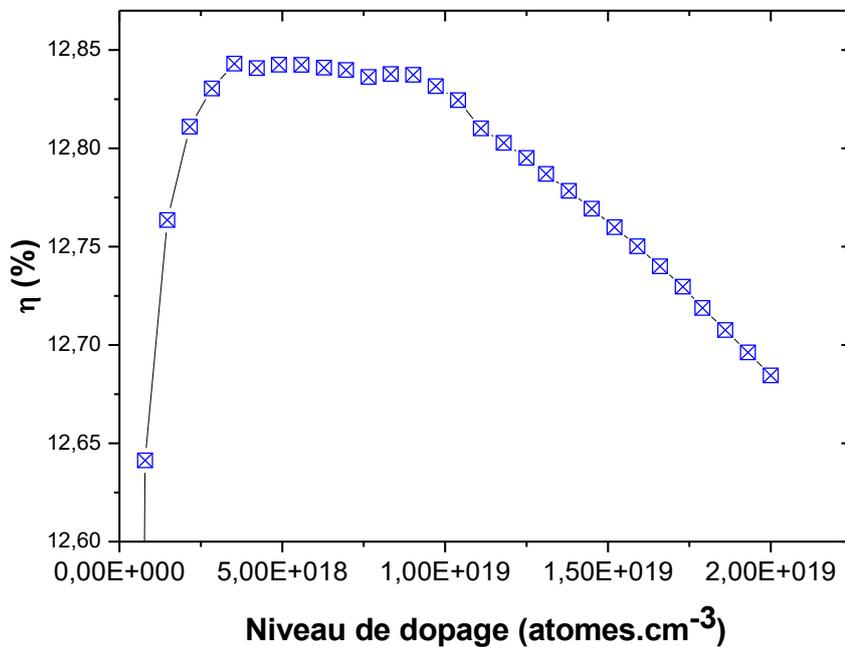


Figure III.15 : Effet du niveau de dopage de l'émetteur sur le rendement photovoltaïque η d'une cellule solaire en silicium polycristallin

mono-silicium. Ceci s'explique par le fait que le phosphore a la tendance de diffuser aux joints de grains et par la suite il désactive leur activité. Dans ce cas, la concentration des défauts dans les cellules solaires en polysilicium diminue, ce qui donne lieu à une amélioration de ses propriétés électriques. Néanmoins, pour des concentrations très élevées du dopage en phosphore, la désactivation des défauts aux joints de grains se sature, ce qui induit une présence élevée du phosphore dans les grains et par la suite des vitesses de recombinaison Auger très élevées, ce qui explique la dégradation des grandeurs photovoltaïques avec la croissance du niveau de dopage de l'émetteur enregistrée sur des cellules en mono-silicium.

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié l'effet de l'épaisseur et du niveau de dopage de l'émetteur sur les paramètres de sortie des cellules solaires en silicium mono- et polycristallin. Pour ce faire, nous avons suivi l'évolution de la tension en circuit-ouvert V_{oc} , du courant de court-circuit I_{cc} et du rendement photovoltaïque η dans l'environnement du logiciel de simulation PC1D. Les résultats obtenus ont clairement montré que des cellules solaires en silicium monocristallin donnent lieu à des grandeurs photovoltaïques nettement élevées comparées aux celles mesurées sur des cellules en silicium polycristallin. Aussi, il est favorable d'utiliser des émetteurs d'épaisseurs fines mais avec un dopage faible dans le cas d'une cellule en mono-silicium et avec un fort dopage pour le choix d'une cellule en polysilicium. L'optimisation de nos résultats prévoit pour une cellule à base du polysilicium des valeurs de $I_{cc} = 0,0262A$, de $V_{oc} = 0,61V$ et de $\eta = 12,85\%$ contre un $I_{cc} = 0,0358A$, un $V_{oc} = 0,675V$ et un $\eta = 19,94\%$ pour une cellule en monosilicium.

III.6 Références bibliographiques du chapitre III

- [1] P. A. Basore, « PC1D installation manual and user's guide version 3.1 », Photovoltaic Technology Research Division Sandia National Laboratories, NM 87185, Sep.1991.
- [2] N. Bedda, « Etude des propriétés physiques des semi-conducteurs : simulation des cellules solaires à base de Si et GaAs », Université El-Hadj Lakhder de Batna, (Algérie) 2011.

Conclusion générale

Au cours de ce travail, nous avons étudié l'efficacité des cellules solaires en mono-silicium et en polysilicium en optimisant la région de l'émetteur. Pour ce faire, nous avons rappelé des notions fondamentales du rayonnement solaire ainsi que des propriétés cristallographiques, optiques et électriques du silicium cristallin. De plus, nous avons évoqué un bagage théorique soutenant ainsi la conversion photovoltaïque, les caractéristiques principales des cellules solaires et leurs fonctionnements. Par ailleurs, ce travail est réalisé sous un environnement de simulation numérique PC1D où nous avons défini des cellules de référence pour lesquelles tout changement de paramètres donne lieu à une variation des grandeurs photovoltaïques.

Ainsi, la simulation à l'aide du logiciel PC1D des cellules solaires en silicium cristallin nous a permis d'étudier l'effet des paramètres de la région de l'émetteur sur les grandeurs photovoltaïques de ces cellules. Les résultats obtenus montrent que ces cellules peuvent fournir des rendements optimums de l'ordre de 12,85% et de 19,94% à condition qu'elles soient élaborées à base respectivement du silicium poly-et mono-cristallin. De plus, ces rendements sont atteints lorsque les émetteurs sont minces et ayant des niveaux de dopage en phosphore faibles pour des cellules en mono-silicium et élevés pour celles en polysilicium.

Bien que notre modeste travail a révélé l'importance de développer des cellules solaires sur du silicium exempt de défauts, nous proposons, au lieu d'utiliser du mono-silicium qui présente un coût de revient élevé, d'opter pour des recherches dont l'objectif est d'élaborer du silicium polycristallin avec des gros grains et/ou d'investiguer des méthodes de passivation des défauts notamment ceux aux joints de grains.

Résumés du mémoire: Arabe, Anglais, Français

Résumés du mémoire : Arabe, Anglais , Français

ملخص

تعد خطوة إنشاء المنطقة السالبة في الخلايا الشمسية المصنوعة من السيليسيوم البلوري جد هامة للوصول إلى تحويل الطاقة الضوئية إلى طاقة كهربائية بمرودود عالي. يتم ذلك باستخدام العديد من التقنيات. على الرغم أن هذه التقنيات قابلة للتكرار واقتصادية وبسيطة، إلا أن لها عيباً رئيسياً يتمثل في ضياع الشحنات الكهربائية الحرة. للحد من هذه الظاهرة، من الضروري دراسة المعاملات التي تتحكم في تكوين وإنشاء هذه المنطقة. لهذا يهدف بحثنا، من خلال استعمال برنامج معالجة للمعلومات المحاكاة لعمل الخلايا الشمسية، تأثيرات سماكة المنطقة ذات الشحنة السالبة وكذلك نسبة تواجد الفوسفور في هذه المنطقة على تغيرات المقادير الكهروضوئية المقاسة على الخلايا الشمسية المصنوعة من السيليسيوم البلوري. أظهرت النتائج أن هذه الخلايا يمكن أن توفر مردود مثلي تبلغ حوالي 12.85% و 19.94% بشرط أن تكون هذه الخلايا مصنوعة من السيليسيوم متعدد البلورات أو أحادي البلورية. بالإضافة إلى ذلك، يتوجب على المنطقة السالبة أن تكون ذو سمك رقيق وذات مستويات منخفضة من الفوسفور بالنسبة للخلايا أحادية البلورات ومرتفعة لخلايا متعددة البلورات.

Abstract

Formation of the emitters is a crucial step in the fabrication of crystalline silicon solar cells. Several techniques are used in the photovoltaic industry. Although these techniques are reproducible, cheap and simple, they have the major drawback of having a heavily doped emitter region which induces strong recombination of the minority charge carriers. To limit this effect, emitter formation parameters are necessary. Thus, our research consists to study, through the PC1D simulation software, the effects of the thickness of the emitter region as well as its phosphorus doping level on the evolution of photovoltaic values measured on crystalline silicon solar cells. The obtained results show that these cells can provide optimum efficiencies of around 12,85% and 19,94% when they are made respectively from poly- and mono-crystalline silicon. In addition, these efficiencies are achieved once the emitters are thin and having low phosphorus doping levels for mono-silicon cells and high for polysilicon cells.

Résumé

La formation des émetteurs constitue une étape cruciale dans la fabrication des cellules solaires en silicium cristallin. Plusieurs techniques sont utilisées dans l'industrie photovoltaïque. Malgré que ces techniques soient reproductibles, économiques et simples, elles présentent l'inconvénient majeur d'avoir une région d'émetteur fortement dopée qui induit une forte recombinaison des porteurs de charge minoritaire. Pour limiter cet effet, une optimisation des paramètres de formation de l'émetteur est nécessaire. Ainsi, notre recherche consiste à l'étude, à travers le logiciel de simulation PC1D, les effets de l'épaisseur de la région de l'émetteur ainsi que son niveau de dopage en phosphore sur l'évolution des grandeurs photovoltaïques mesurées sur des cellules solaires en silicium cristallin. Les résultats obtenus montrent que ces cellules peuvent fournir des rendements optimaux de l'ordre de 12,85% et de 19,94% à condition qu'elles soient élaborées à base respectivement du silicium poly-et mono-cristallin. De plus, ces rendements sont atteints lorsque les émetteurs sont minces et ayant des niveaux de dopage en phosphore faibles pour des cellules en mono-silicium et élevés pour celles en polysilicium.