



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE DE BOUIRA



FACULTE DES SCIENCES ET SCIENCES APPLIQUEES
DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

**MEMOIRE PRESENTÉ POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME
DE MASTER EN PHYSIQUE**

OPTION : Physique des matériaux.

THEME

**Etude et simulation d'une cellule photovoltaïque en
silicium polycristallin de structure PIN avec PC1D.**

- **Présenté par : BANOUNE Sara.
ABBAS Dihia.**

La Soutenance a lieu le mardi 20/06/2023 à 09h00.

Devant le jury :

Président :	Mr. DJ. MADI	Prof	Univ. Bouira.
Rapporteur :	Mr. DJ. ZERIGUI	M.C.B.	Univ. Bouira.
Examineurs:	Mr. L. BOUHDJER	M.C.A.	Univ. Bouira.
	Mr. N. TOUKA	M.C.A.	Univ. Bouira.



Remerciement



Nous remercions Dieu qui nous a donné la santé, la volonté et la patience de réaliser ce modeste travail.

*Nous tenons également à remercier **nos chers parents** à la fois pour leur soutien moral et financier.*

*La présentation de ce présent travail nous a offert l'occasion d'exprimer nos profondes gratitude et nos vifs remerciements à monsieur **ZERIGUI Djamel**, maitre de conférences à l'université de Bouira, pour la qualité de son encadrement exceptionnel, ses nombreux conseils, sa compréhension, son aide pratique, ses encouragements et sa disponibilité.*

*On tient à exprimer nos remerciements également à monsieur **MADI Djamel**, professeur à l'université de Bouira, d'avoir accepté de présider le jury de ce mémoire.*

*Nos vifs remerciements s'adressent aussi à monsieur **BOUHDJER Lazhar** et monsieur **TOUKA Nassim**, maitres de conférences à l'université de Bouira pour avoir aimablement accepté d'examiner ce travail.*

Sans oublier de remercies nos chers enseignants de département de physique sans exception.





Dédicace

*Avec un grand plaisir et une immense joie, que je dédie ce travail
à mes très chers,*

respectueux et magnifiques parents,

*Pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur
soutien et leurs prières tout au long de mes études.*

*À mes frères : Abderahmane et Abd elmoumene
Pour leurs appuis et leur encouragement.*

À mes grands parents

À mes cousines : Celina, Jhanina

À toute ma famille,

*À mes amis : Widad, Sara, Wissam, Asmahane, Nesrine,
Ademo, Youcef*

*Vous avez partagé avec moi les meilleurs et les mauvais moments
de ma vie, je vous adore.*

Aux étudiants de la promotion 2ème année Master

Physique 2022/2023

Dihia





Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

Mon cher père, la source de ma joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour ma réussite avec son soutien moral.

A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur ; maman que j'adore.

A mes adorables très chers sœur et frères.

A toute ma grande famille et mes proches.

A tous ceux ont partagé avec moi tous les moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail. Ils m'ont chaleureusement aidé et encouragé tout au long de mon parcours.

A ma chère copine et binôme DIHIA.

A mes adorables amies et collègues d'étude ; WISSAM, WIDAD, NESRINE, ASMAHANE, SYLIA, LILIA, RANIA, SIHAM et SARRA.

A tous les étudiants de ma promotion physique des matériaux 2022/2023

A ceux que je souhaite plus de succès.

A tous ceux que j'aime.

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux et soit le résultat de votre soutien constant et fiable.

Merci d'être toujours à mes côtés!

Sara.



Sommaire

Remerciement

Dédicaces

Introduction générale1

CHAPITRE I : NOTIONS DE BASE SUR LA CELLULE SOLAIRE

I.1. Introduction5

I.2. Les semi-conducteurs5

I.2.1. Semi-conducteurs intrinsèques6

I.2.2. Semi-conducteurs extrinsèques7

I.2.3. Dopage7

I.2.3.1. Dopage de type N7

I.2.3.2. Dopage de type P8

I.2.4. La jonction PN.....8

I.3. Cellule photovoltaïque..... 9

I.3.1. Principe de fonctionnement.....9

I.3.2. Modélisation électrique de la cellule photovoltaïque.....10

I.3.2.1. Cellule idéale10

I.3.2.2. Cellule réelle.....11

I.3.3. Caractéristique électrique I(V).....11

I.3.3.1. Le courant de court-circuit I_{cc} 12

I.3.3.2. La tension en circuit ouvert V_{OC} 13

I.3.3.3. Le Facteur de Forme FF14

I.3.3.4. Rendement de conversion η 14

I.3.3.5. Efficacité Quantique.....14

I.3.3.6. Réponse spectrale de la cellule solaire.....15

I.4. Facteurs limitant le rendement.....15

I.4.1. Les pertes optiques15

I.4.2. Les pertes électriques17

I.4.3. Les différents types de recombinaisons.....18

I.4.3.1. Recombinaison radiative18

I.4.3.2. Recombinaison Auger.....18

I.4.3.3. Recombinaison SRH (Schokley, Read, Hall).....20

I.4.3.4. Recombinaison en surface21

I.5. Les constituants de base22

Sommaire

I.5.1. Passivation des faces avant et arrière	22
I.5.2. Couche antireflet	23
I.5.3. Texturation de la surface	23
I.5.4. Contacts avant et arrière	24
I.5.5. BSF.....	24
I.6. Conclusion.....	24
I.6. Références bibliographiques	25
CHAPITRE II : CELLULES SOLAIRES EN COUCHES MINCES À BASE DE SILICIUM POLYCRISTALLIN	
II .1. Introduction	27
II.2. Les différents états du silicium.....	27
II.2.1. Etat monocristallin.....	28
II.2.2. Etat amorphe.....	28
II.2.3. Etat polycristallin.....	29
II.3. Propriétés du silicium polycristallin.....	30
II.3.1. Propriétés cristallographiques	30
II.3.1.1 Structure cristalline.....	30
II.3.2. Propriétés électriques	30
II.3.2.1. Phénomènes de conduction électrique	30
II.3.2.2. Propriétés des porteurs minoritaires	32
a. Mécanismes de recombinaison	32
b. Vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires.....	34
c. Longueur de diffusion des porteurs minoritaires.....	35
II.4. Théorie des Cellules PIN.....	36
II.4.1. L’historique de la première cellule solaire de type PIN	36
II.4.2. Fonctionnement de la cellule solaire PIN	36
II.4.2.1. Structure	36
II.4.2.2. Principe de fonctionnement	37
II.4.3. Modélisation du fonctionnement.....	39
II.4.4.Types des structures des cellules PIN	40
II.4.4.1. Cellules organiques	41
II.4.4.2. Cellules solaires à base de pérovskite	42
II.4.4.3. Structure à base du silicium amorphe.....	43

Sommaire

II.4.5. Comparaison entre la structure PN et PIN.....	44
II.5. Conclusion.....	45
II.6. Références bibliographiques	46
CHAPITRE III: SIMULATION D'UNE CELLULE DE TYPE PIN EN POLYSILICIUM	
III.1. Introduction	48
III.2. PC1D.....	48
III.3. Structure p-i-n d'une cellule solaire en polysilicium.....	50
III.4. Paramètres de simulation.....	51
III.5. Les effets de la variation des paramètres géométriques et physiques sur les performances de la cellule PIN	53
III.5.1. Paramètres variables pendant la simulation de la structure PIN.....	53
III.5.2. L'influence de l'épaisseur de la région N-polySi.....	53
III.5.3. L'influence de l'épaisseur de la région I-polySi	57
III.5.4. L'influence de l'épaisseur de la région P-polySi	59
III.5.5. L'influence de la durée de vie des porteurs de charge dans la région I	62
III.5.6. L'influence de la température T	65
III.6. Conclusion	69
III.7. Références bibliographiques	70
Conclusion générale	71
Résumé	

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Les inquiétudes concernant le réchauffement climatique et la croissance de la demande d'électricité due, entre autres, à une population toujours en augmentation, au développement de la technologie, des moyens transport et de communication, nécessitent des efforts pour s'éloigner des méthodes conventionnelles de production d'énergie [1]. La grande partie de cette énergie est produite par combustion de ressources non renouvelables qui devraient s'épuiser dans quelques décennies. De plus, l'augmentation de la composition de CO_2 dans l'atmosphère due à l'utilisation de combustibles fossiles est l'un des causes à l'origine du changement climatique en cours et hostiles à l'environnement du fait de leurs émissions de CO_2 . Parmi les effets de l'émission de dioxyde de carbone toxique sur l'environnement on peut citer entre autre l'effet de serre, le réchauffement de la terre, et de l'appauvrissement de la couche d'ozone [2].

L'urgence de trouver de nouvelles formes d'énergies renouvelables est extrêmement pertinente et nécessaire aujourd'hui. C'est pourquoi l'humanité doit trouver des sources d'énergie alternatives pour assurer un avenir propre et durable. Actuellement, plusieurs types de sources d'énergie renouvelables sont utilisées et qu'on peut être classé comme suit : l'énergie solaire, l'hydroélectricité, la géothermie, l'énergie éolienne et la biomasse [3].

Dans ces conditions, l'énergie solaire ou énergie photovoltaïque, est le meilleur choix parmi les sources d'énergie renouvelables existantes en raison de son accessibilité généralisée, de son universalité et de sa nature respectueuse de l'environnement. En 1839, E. Becquerel a découvert l'effet photovoltaïque qui permet la conversion de l'énergie solaire. Ce processus implique l'utilisation d'un composé en matériaux sensibles à l'énergie transporté par les photons. À l'échelle élémentaire, ce capteur prend la forme d'une cellule appelée cellule photovoltaïque (PV). La quantité d'énergie électrique produite dépend des propriétés physiques du matériau utilisé, des paramètres géométriques et physiques du la cellule et de sa capacité à collecter les électrons avant qu'ils ne se recombinent dans le matériau [4-5].

La rentabilité de la fabrication d'une cellule photovoltaïque et son efficacité dépendent du matériau à partir duquel elle est fabriquée. De nombreuses recherches dans ce domaine ont été menées pour trouver le matériau le plus efficace et le plus rentable pour la construction de cellules solaires. Les caractéristiques d'un matériau idéal pour les cellules solaires PV comprennent les éléments suivants [6] : les cellules devraient avoir une bande interdite entre ~ 1 et $\sim 1,7$ eV, une structure de bande directe, facilement accessible et non toxique et une efficacité de conversion photovoltaïque élevée. Cependant, le prix élevé de la filière photovoltaïque limite sa généralisation à grande échelle, ce qui nécessite une réduction de son

Introduction générale

prix de revient tout en maintenant un rendement élevé pour assurer sa croissance continue.

Durant ces dernières décennies, depuis l'invention des cellules solaires, il existe quatre grandes catégories qui sont décrites comme les générations de la technologie photovoltaïque [7]. La première génération comprend les technologies de cellules photovoltaïques basées sur le silicium monocristallin et polycristallin et l'arséniure de gallium (GaAs). La deuxième génération comprend le développement de la technologie des cellules photovoltaïques de première génération, ainsi que celles à couches minces à partir de « silicium microcristallin ($\mu\text{-Si}$) et de silicium amorphe (a-Si), de séléniure de cuivre indium gallium (SCIG) et au tellure de cadmium/sulfure de cadmium (CdTe/CdS) ». La troisième génération regroupe les technologies photovoltaïques basées sur des composés chimiques plus récents. En outre, les technologies utilisant des "films" nanocristallins, des points quantiques, des cellules solaires à colorant, à base de polymères organiques et à base des perovskites etc, appartiennent également à cette génération. La quatrième et dernière génération inclut des polymères à couches minces ainsi que des « nanostructures inorganiques innovantes » telles que les oxydes métalliques et les nanoparticules métalliques ou les nanomatériaux à base organique tels que le graphène, les nanotubes de carbone et les dérivés du graphène.

Un problème clé dans le domaine du développement des cellules photovoltaïques est le développement de méthodes pour atteindre le rendement le plus élevé possible au coût de production le plus bas possible. Par rapport aux technologies photovoltaïques classiques à base de silicium cristallin massif, l'approche couches minces permet de réduire drastiquement la consommation de matière. De plus, il permet un dépôt de grande surface sur des substrats étrangers à petit budget. Ainsi, les cellules solaires en silicium polycristallin à couches minces (pc-Si) sur des substrats non-silicium sont intéressantes pour réduire le coût de l'électricité photovoltaïque à condition de produire du silicium de haute qualité et d'appliquer un confinement optique efficace. En raison de son coût avantageux, le silicium polycristallin (poly-Si) est utilisé dans plusieurs applications telles que la microélectronique et le photovoltaïque. Bien que ses applications soient avancées, le poly-Si doit encore être amélioré, en particulier en termes de performances électriques, en raison des densités de défauts résultant des procédés de fabrication choisis, qui altèrent ses propriétés optoélectroniques [8].

L'objectif tracé dans ce manuscrit est l'étude des performances d'une cellule solaire en polysilicium de structure PN lorsqu'on lui insère une couche intrinsèque I. Nous intéressons à la variation des paramètres de sortie (I_{cc} , V_{co} , FF et η) de la cellule en fonction de la

Introduction générale

variation de ses paramètres géométriques et physiques en utilisant le simulateur PC1D. Pour se faire nous avons présenté ce manuscrit de la façon suivante :

Dans le premier chapitre, nous allons décrire les notions de base sur la cellule solaire, sa modélisation et son principe de fonctionnement, ses propriétés optiques, ses constituants de base et les facteurs qui limitent son rendement.

Dans le second chapitre, nous allons présenter les cellules photovoltaïques en couches minces à base de silicium polycristallin, en se basant sur les différents états de silicium, les propriétés du silicium polycristallin et la théorie des cellules PIN.

Le troisième chapitre sera consacré à la présentation des résultats de la simulation obtenus et leurs interprétations. Nous terminerons notre travail par une conclusion générale.

Introduction générale

Références bibliographie :

- [1] Wilson, G.M.; Al-Jassim, M.; Metzger, W.K.; Glunz, S.W.; Verlinden, P.; Xiong, G.; Mansfield, L.M.; Stanbery, B.J.; Zhu, K.; Yan, Y. The 2020 photovoltaic technologies roadmap. *J. Phys.* 2020.
- [2] J.T. Houghton ; Y. Ding ; D.J. Griggs. *Climate Change 2001: The Scientific Basis.* Cambridge university press, Cambridge, United Kingdom, 2001.
- [3] De Kothari, D. P., Ranjan, Rakesh, Singal, K. C. *Renewable energy sources and emerging technologies.* Third edition, by PHI Learning Private Limited. Delhi 2021.
- [4] Singh, B.P.; Goyal, S.K.; Kumar, P. *Solar PV cell materials and technologies: Analyzing the recent developments.* Mater. Today Proc. 2021.
- [5] Muhammad, J.Y.U.; Waziri, A.B.; Shitu, A.M.; Ahmad, U.M.; Muhammad, M.H.; Alhaji, Y.; Olaniyi, A.T.; Bala, A.A. *Recent progressive status of materials for solar photovoltaic cell: A comprehensive review.* *Sci. J. Energy Eng.* 2019.
- [6] C Luque, A.; Hegedus, S. (Eds.) *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, 2nd ed.; John Wiley & Sons: Chichester, UK, 2011;
- [7] Hayat, M.B.; Ali, D.; Monyake, K.C.; Alagha, L.; Ahmed, N. *Solar energy—A look into power generation, challenges, and a solar-powered future.* *Int. J. Energy Res.* 2019.
- [8] M. Mekhalfa, « Croissance et étude de l'effet de l'hydrogène sur les propriétés du silicium polycristallin destiné à l'usage photovoltaïque », thèse de doctorat, université BADJI Mokhtar, Annaba, 2019.

Chapitre I

I.1. Introduction :

Le premier chapitre, intitulé "notions fondamentales de la cellule solaire", établit les bases théoriques et bibliographiques nécessaires à la compréhension du sujet. Nous commencerons par un rappel sur les semi-conducteurs, leur dopage et la jonction P-N, avant de passer au principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque et de ses caractéristiques électriques. Enfin, nous aborderons ses propriétés optiques, les facteurs limitant son rendement, les composants de base de la cellule.

I.2. Les semi-conducteurs:

Un semi-conducteur se caractérise par sa résistivité qui varie entre 10^{-3} et $10^4 \Omega \cdot \text{cm}$ et sa conductivité qui se situe entre celle des métaux et celle des isolant [1]. Pour l'améliorer il suffit de créer plus d'électrons libres dans le matériau par le don de l'énergie à ce dernier pour que les électrons de la bande de valence puissent atteindre la bande de conduction et devenir libre. Cette énergie donnée doit être supérieure à l'énergie de gap E_g qui est la valeur de l'écart entre deux niveaux d'énergie (E_c et E_v). Elle s'exprime en électronvolt (eV) telle que [1] :

$$E_g = E_c - E_v \quad (\text{I.1})$$

Un semi-conducteur a un gap plus faible que celui d'un isolant $\sim 1 \text{ eV}$. Par conséquent, le spectre solaire absorbé par les semi-conducteurs fournit l'énergie nécessaire aux électrons pour se libérer dans le cristal et participer à la conduction [1]. A titre d'exemple, $E_g = 1.12 \text{ eV}$, 0.7 eV et 1.42 eV pour le silicium cristallin (Si), le germanium (Ge) et l'arsenic de gallium (GaAs) respectivement.

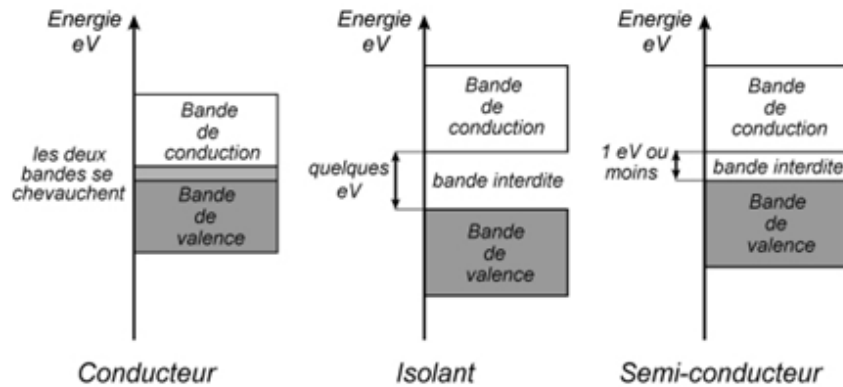


Figure I.1 : Les trois grandes familles des matériaux [1].

I.2.1. Semi-conducteurs intrinsèques:

Est un semi-conducteur pur (non dopé), il ne possède aucune impureté qui peut modifier les densités des porteurs (électron), donc les densités électrons égale à celle des trous dans ce cas [2] :

$$n = p = n_i \tag{I.2}$$

$$\Rightarrow n \cdot p = n_i^2 \tag{I.3}$$

- n : est la densité des électrons.
- p : est la densité des trous.
- n_i : est la densité intrinsèque des porteurs.

À une température très basse les semi-conducteurs intrinsèques deviennent des isolants et leurs conductivités augmentent avec l'augmentation de la température [2].

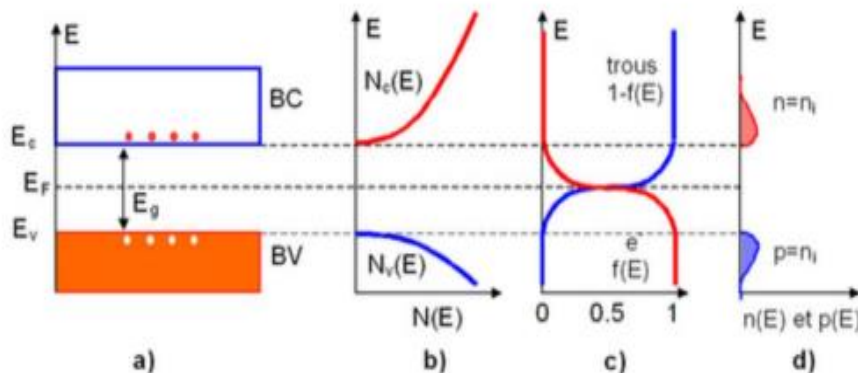


Figure I.2 : Semi-conducteur intrinsèque a) Diagramme des bandes d'énergie b) Densités d'état des charges c) fonctions de distributions d) Densités des porteurs de charges [3].

I.2.2. Semi-conducteurs extrinsèques:

Sont des semi-conducteurs dopés avec des impuretés spécifiques comme le bore (atome accepteur) ou le phosphore (atome donneur), à fin d'améliorer ses propriétés électriques [4].

Les semi-conducteurs de type N sont obtenus on introduisant des impuretés pentavalents (une grande densité des électrons) mais si on introduit des impuretés trivalents (une grande densité des trous) on obtient des semi-conducteurs de type P [4].

I.2.3. Dopage:

C'est une technique utilisée que le semi-conducteur soit plus ou moins conducteur en introduisant des très faibles quantités d'un corps étranger appelé dopeur [1]. Dans le cas d'un semi-conducteur usuel, on distingue deux types de dopage.

I.2.3.1. Dopage type N:

Pour que le semi-conducteur intrinsèque soit dopé en type N et aura un excès d'électrons négativement chargé, il faut qu'on introduisant dans sa structure cristalline des atomes étrangers pentavalents (sont les éléments qui ont 5 électrons périphériques) qui ont la propriété de donner des électrons comme l'arsenic (As), le phosphore(P),... [4].

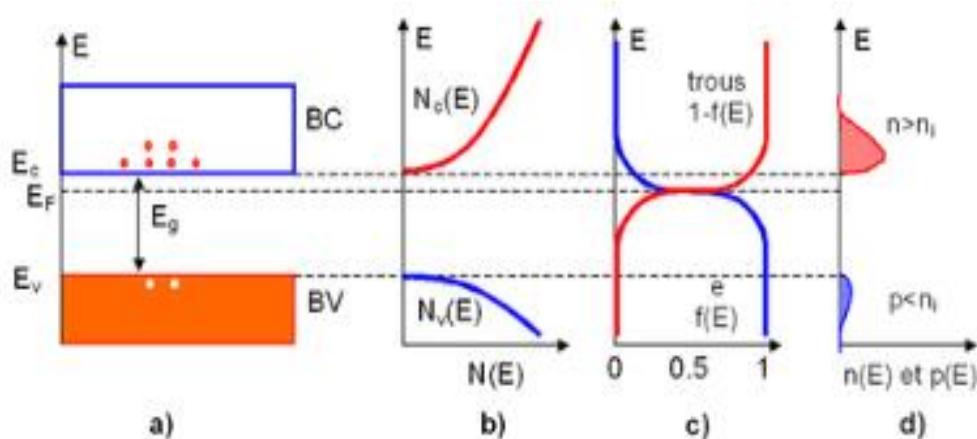


Figure I.3 : Semi-conducteur type N. a) Diagramme des bandes d'énergie b) Densités d'état des charges c) fonctions de distributions d) Densités des porteurs de charges [3].

I.2.3.2. Dopage type P:

Pour que le semi-conducteur intrinsèque soit dopé en type P, il faut qu'on introduit dans sa structure cristalline des impuretés trivalentes (sont les éléments qui ont 3 électrons dans la couche de valence) de type accepteur chargé positivement comme le bore (B) [4].

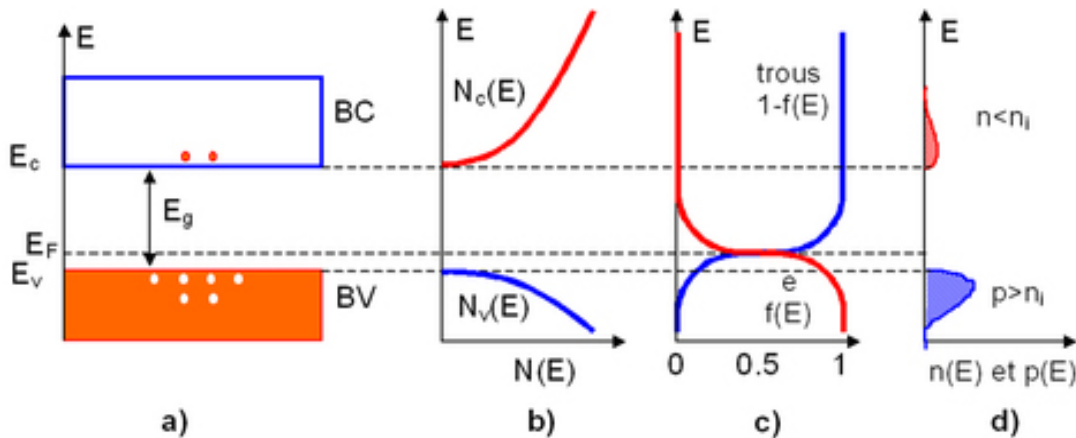
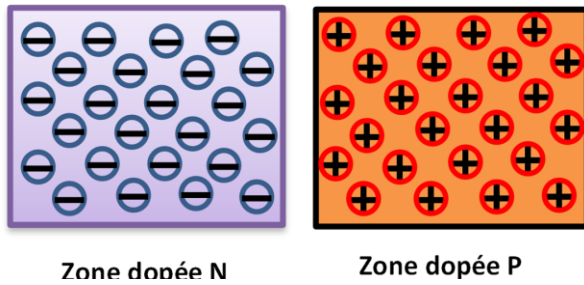


Figure I.4 : Semi-conducteur type P. a) Diagramme des bandes d'énergie b) Densités d'état des charges c) fonctions de distributions d) Densités des porteurs de charges [3].

I.2.4. Jonction PN :

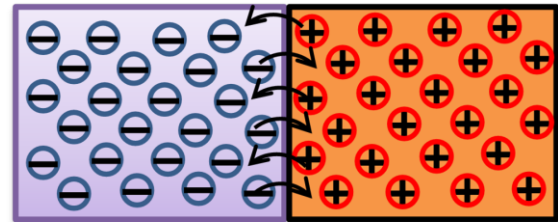
La jonction P-N est la juxtaposition deux semi-conducteurs, l'un de type N et l'autre de type P (voir Figure I.5). Les électrons en excédent dans la zone N se migrent vers la zone P, qui est déficitaire en électrons, et les trous excédentaires de la zone P se migrent vers la zone N, qui est déficitaire en trous (voir Figure I.6). Il en résulte une recombinaison des charges au niveau de la zone de contact et la création d'une zone de charge neutre, créant une différence de potentiel locale, ou barrière de potentiel. Cette différence de potentiel empêche la migration de tous les électrons libres de la zone N vers la zone P et de trous de la zone P vers la zone N (voir Figure I.7). Ils sont repoussés par la différence de potentiel locale vers les bords de leur zone d'origine et la jonction P-N est ainsi formée [5].



Zone dopée N

Zone dopée P

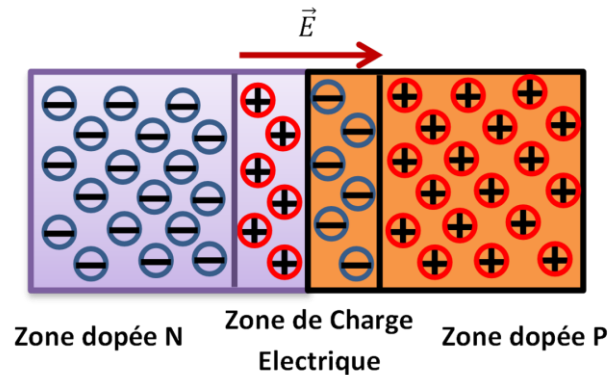
Figure I.5 : juxtaposition de deux Semi-conducteurs dopés.



Zone dopée N

Zone dopée P

Figure I.6 : Migration sous l'effet du gradient de charge.



Zone dopée N

Zone de Charge
Electrique

Zone dopée P

Figure I.7 : Création de la zone de charge et la barrière de potentiel au niveau de contact.

I.3. Cellule photovoltaïque:

Une cellule photovoltaïque est un composant électronique qui se fait généralement d'un matériau semi-conducteur [6]. Il transforme l'énergie solaire en l'énergie électrique par conversion du photon reçu en une tension électrique contenue par "l'effet photovoltaïque "[7]. Un ensemble de ces cellules forme un panneau photovoltaïque.

I.3.1. Principe de fonctionnement:

Le rôle des cellules solaires est de transformer l'énergie solaire en énergie électrique et cela est basé sur l'effet photovoltaïque qu'on décompose en 3 étapes [8,9] :

- Absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap E_g).
- Transformation de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui conduit à la création de paires électrons-trou dans le semi-conducteur.
- Collecte des particules générées sous l'effet d'un champ électrique interne.

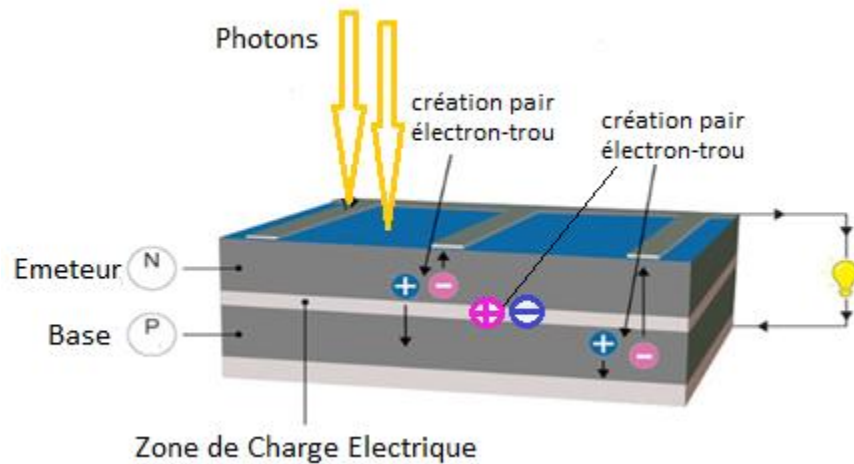


Figure I.8 : Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque [6].

I.3.2. Schéma électrique de la cellule photovoltaïque :

I.3.2.1. Cellule idéale :

On peut schématiser une cellule photovoltaïque sous éclairage solaire connecté à une charge par un générateur de courant (I_{ph}) et une diode en parallèle :

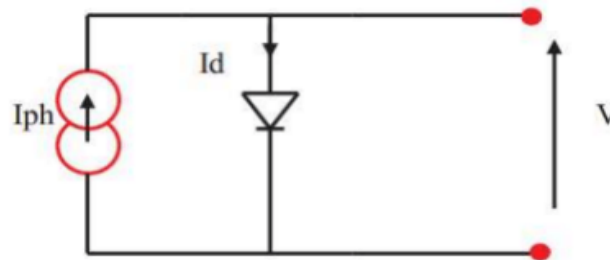


Figure I.9: Schéma électrique d'une cellule idéal [10].

I.3.2.2. Cellule réelle :

En réalité, les performances d'une cellule solaire sont limitées par deux pertes physiques assimilables à deux résistances R_s et R_{sh} .

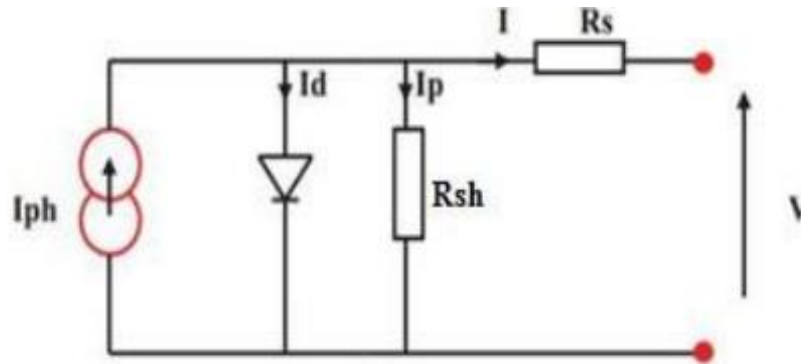


Figure I.10 : Schéma électrique d'une cellule réelle [10].

- R_s : Résistance série, due essentiellement aux pertes par effets Joule à travers les grilles de collectes et la résistance propre des semi-conducteurs, ainsi qu'aux contacts Semi-conducteur- électrodes.
- R_{sh} : Résistance Shunt (parallèle), provient des pertes par recombinaisons dues essentiellement à l'épaisseur, aux effets de surface, ainsi qu'au non idéalité de la jonction PN.

I.3.3. Caractéristique électrique $I(V)$:

Les performances de la cellule solaire sont extraits de la caractéristique courant- tension $I(V)$. Cette dernière apporte une vue claire des paramètres caractérisant la cellule solaire comme le rendement de la cellule et le facteur de forme. Le courant est mesuré en fonction de la tension appliquée sous obscurité et sous ensoleillement, la lumière permet de décaler la courbe $I-V$ vers le bas dans le quatrième quadrant, car le courant photoélectrique provoque la production de l'énergie [11,12].

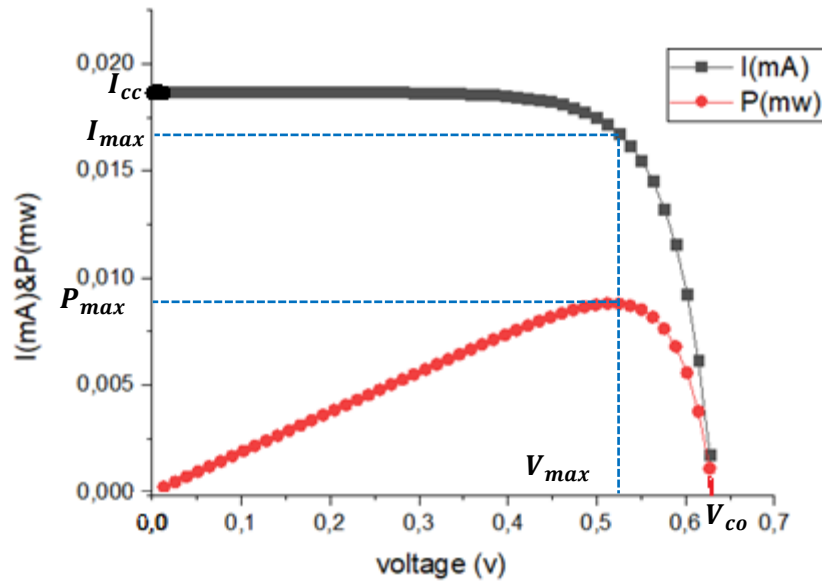


Figure I-11 : Caractéristique I(V) et P(W) d'une cellule photovoltaïque.

A partir de la caractéristique courant tension de la cellule photovoltaïque de la figure I.11 on peut déterminer ses paramètres physiques à savoir : la tension de circuit ouvert noté I_{CC} , le courant du court-circuit V_{CO} , la puissance caractéristique, le facteur de forme FF , et le rendement η . Les paragraphes suivants sont consacré aux définitions de ces paramètres, ainsi que leurs relations théoriques.

I.3.3.1. Courant de court-circuit I_{CC} :

C'est la valeur maximale de courant fournie par une cellule solaire lorsque ses bornes sont court-circuitées. En d'autres termes, la valeur I_{CC} donne le courant fournit par la cellule solaire lorsque la tension à travers la cellule est nulle ($V=0$). Une paire électron-trou est créé en raison de l'absorption d'un photon, puis séparé par la jonction et transporté vers le circuit extérieur. Lorsque ce cycle est terminé sans la recombinaison de l'électron et du trou, alors le photon contribue au courant traversant une cellule photovoltaïque vers la charge. Pour la plus haute valeur d' I_{CC} , il est supposé qu'il n'y a pas de recombinaison dans le matériau. I_{CC} augmente linéairement avec l'intensité d'éclairement, de la longueur d'onde de rayonnement incident, de la mobilité des électrons et des trous et aussi de la température. Sa valeur peut être mesurée en branchant un appareil de mesure (ampèremètre) aux bornes de la cellule.

Il définit le nombre des paires électron-trou générée G qui traverse la jonction sans recombinaison entre les longueurs de diffusion des électrons et trous (L_n et L_p) respectivement [13].

$$I_{cc} = q \cdot G \cdot (L_n + L_p) \quad (\text{I.4})$$

I.3.3.2. La tension en circuit ouvert V_{co} :

La tension de circuit ouvert (V_{co}) est la tension maximale qu'une cellule photovoltaïque peut délivrer lorsque ses bornes sont laissées ouvertes, il est exprimée en millivolts [14]. Le V_{co} correspond à la quantité de polarisation directe d'une jonction PN due au courant généré par la lumière. Un photon d'énergie supérieure à la bande d'énergie excite un électron de la bande de valence à la bande de conduction, augmentant son énergie potentielle d'une quantité égale à l'énergie de la bande interdite. Ainsi, la largeur de la bande interdite du matériau donne la limite supérieure de la tension V_{co} . Plus la bande interdite du matériau est grande, plus la tension V_{oc} de la cellule solaire est élevée.

V_{co} dépend de matériaux de la couche absorbante, de la nature des contacts couche active-électrode et son éclairage, son expression est comme suit [15]:

$$V_{co} = \frac{n k_B T}{q} \log\left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1\right) \quad (\text{I.5})$$

Avec :

n : Facteur d'idéalité de la diode

q : Charge de l'électron = $1,602 \cdot 10^{-19}$ Coulomb

k_B : Constante de Boltzmann = $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K

T : Température effective de la cellule [Kelvin]

I_s : Courant de saturation.

I_{ph} : Courant photonique

I.3.3.3. Le Facteur de Forme FF :

pour qualifier les performances d'une cellule ou d'un générateur PV à partir de la caractéristique $I(V)$, un paramètre important est souvent utilisé: c'est le fill factor (FF) ou le facteur de remplissage [16-17]. Il est illustré sur la Figure I-7. Le FF représente le rapport entre la puissance maximale que peut fournir la cellule notée P_{max} et la puissance formée par le rectangle $I_{cc} * V_{oc}$. Plus la valeur de ce facteur sera grande, plus la puissance exploitable le sera également.

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} \cdot I_{cc}} = \frac{V_M \times I_M}{V_{oc} \cdot I_{cc}} \quad (I.6)$$

I.3.3.4. Rendement de conversion η :

C'est le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente, P_{in} . Le rendement des cellules PV indique le rendement de conversion en puissance.

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{FF \cdot I_{cc} \cdot V_{co}}{G A} \quad (I.7)$$

Avec :

G : L'irradiance total du spectre de photons incidents (W/cm^2).

A : La surface de la cellule (cm^2).

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert. Le rendement de conversion est un paramètre essentiel. En effet, la seule connaissance de sa valeur nous permet d'évaluer les performances de la cellule.

I.3.3.5. Efficacités Quantique :

Le rendement quantique extérieur d'une cellule solaire est une mesure de l'efficacité de la conversion de la lumière en électricité par la cellule solaire. Il est défini comme le rapport entre la quantité de porteurs de charge collectés par la cellule solaire et le nombre de photons qui arrive sur la cellule solaire. En d'autres termes, c'est la proportion de photons qui sont convertis en charges. Le rendement quantique extérieur est généralement exprimé en pourcentage, est donné par [18] :

$$EQE = \frac{J_{sc}}{\phi} \times \frac{E_{ph}}{q} \quad (I.8)$$

J_{sc} : Courant de court-circuit

E_{ph} : Énergie du photon

φ : Flux lumineux incident

q : Charge de l'électron = $1,602 \cdot 10^{-19}$ Coulomb

I.3.3.6. Réponse spectrale:

C'est la mesure de la sensibilité de la cellule solaire à différents niveaux d'énergie lumineuse. En d'autres termes, la réponse spectrale décrit la façon dont la cellule solaire répond à la lumière de différentes longueurs d'onde. Cette réponse est fréquemment donnée sous la forme d'un graphique qui montre l'efficacité de la conversion de la lumière en électricité en fonction de la longueur d'onde de la lumière incidente. La réponse spectrale est un facteur important à prendre en compte lors de la conception de cellules solaires pour des applications spécifiques, car elle peut affecter la performance globale de la cellule solaire dans des conditions de lumière variables. C'est le rapport entre le courant généré par la cellule photovoltaïque et la puissance lumineuse incidente en fonction de différentes longueurs d'onde est donnée par la relation [19] :

$$R_s = \frac{q\lambda}{hc} \times EQE \quad (I.9)$$

EQE :

q : Charge de l'électron = $1,602 \cdot 10^{-19}$ Coulomb

λ : La longueur d'onde

h : La constante de Planck

c : La célérité (vitesse de la lumière)

I.4. Facteurs limitant le rendement:

I.4.1. Les pertes optiques :

Les pertes optiques dans une cellule solaire peuvent se produire de plusieurs façons. Tout d'abord, la présence d'une grille métallique utilisée pour la collecte des charges sur la face éclairée peut causer un effet d'ombrage [20]. Ce phénomène peut avoir une incidence significative sur le rayonnement incident et réduire le flux de photons qui interagissent avec le substrat. L'ombrage causé par la grille métallique peut être pris en compte avec l'équation d'ombrage suivante :

$$P = (1 - F) * I \quad (\text{I.10})$$

où P représente la puissance absorbée par la cellule solaire, F est le facteur d'ombrage et I est l'intensité du rayonnement solaire incident.

D'autre part, la réflectivité du matériau joue un rôle crucial dans les pertes optiques [21]. En effet, un substrat de silicium dont la surface est plane (polie) affiche une réflectivité d'environ 32 % de la lumière reçue, ce qui va entraîner une perte importante de rayonnement solaire réfléchi. La réflectivité du silicium peut être prise en compte avec l'équation de réflectivité suivante :

$$R = (n_{sub} - 1)^2 / (n_{sub} + 1)^2 \quad (\text{I.11})$$

où R représente le coefficient de réflectivité du substrat de silicium, n_{sub} est l'indice de réfraction du substrat.

Enfin, les matériaux déposés sur le substrat de silicium peuvent également avoir un impact sur la transmission des rayonnements jusqu'au semi-conducteur. Tout matériau déposé sur le substrat de silicium doit permettre une réflexion minimale et une absorption minimale du rayonnement solaire afin de transmettre un maximum de rayonnement au substrat de silicium. Ainsi, la qualité des matériaux déposés sur le substrat peut influencer la performance de la cellule solaire. La qualité des matériaux déposés sur le substrat peut être prise en compte avec l'équation de transmission suivante :

$$T = \exp(-\alpha d) \quad (\text{I.12})$$

où T représente le coefficient de transmission, α est le coefficient d'absorption du matériau déposé sur le substrat, et d est l'épaisseur du matériau déposé.

En résumé, les pertes optiques peuvent être causées par la grille métallique, la réflectivité du silicium et la qualité des matériaux déposés sur le substrat, et doivent être minimisées pour maximiser l'efficacité de la cellule solaire. En utilisant ces équations, il est possible d'évaluer les pertes optiques dans une cellule solaire et d'optimiser sa performance.

I.4.2. Les pertes électriques :

Les cellules solaires peuvent subir différentes pertes résistives, notamment la résistance parallèle, la résistance série et les pertes dues à la recombinaison des porteurs de charges. Ces pertes sont représentées dans le modèle électrique à deux diodes (voir Figure I-12).

Lorsque le dispositif génère une densité de courant électrique (J_{ph}) suite à la photo-génération, deux densités de courant peuvent s'opposer au transport des porteurs de charges. Il y a la densité de courant de diffusion des porteurs majoritaires à travers la jonction (J_{D1}) et la densité de courant due à la génération/recombinaison de porteurs et au courant tunnel dans la zone de charge d'espace (J_{D2}). Deux phénomènes résistifs se manifestent également dans les dispositifs. La résistance parallèle doit tendre vers l'infini, tandis que la résistance série doit tendre vers zéro afin d'optimiser le fonctionnement du dispositif photovoltaïque.

Les pertes par résistance parallèle sont causées par des courants parasites entre les électrodes positive et négative de la cellule solaire, tandis que les pertes par résistance série sont causées par des conductivités insuffisantes dans le c-Si et aux différentes interfaces entre les matériaux composant la cellule. Les pertes résistives par recombinaisons des porteurs de charges sont principalement attribuées aux recombinaisons des porteurs de charges au sein de la zone de charges d'espace (ZCE). La présence de défauts cristallins d'origine métallique peut entraîner une diminution de la durée de vie effective τ_{eff} à bas niveau d'injection des porteurs de charges ($<10^{15} \text{ cm}^{-3}$), ce qui peut entraîner une diminution de (J_{D2}).

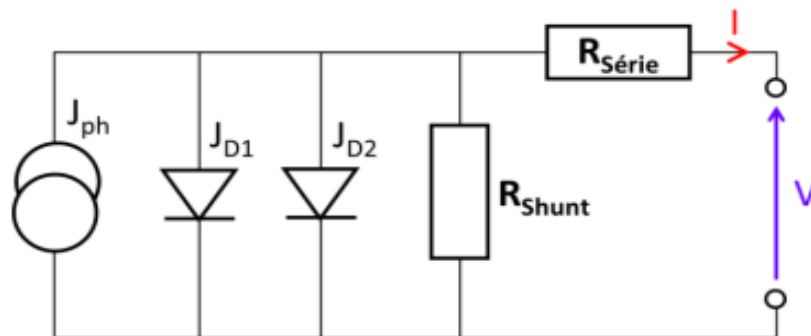


Figure I.12 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.

I.4.3. Les différents types de recombinaisons :

I.4.3.1. Recombinaison radiative :

La recombinaison se produit lorsque les électrons et les trous se combinent, entraînant l'émission d'un photon d'énergie similaire à celle de la bande interdite du matériau, comme le montre la figure (I.13) (ce processus est inverse à la génération photoélectrique) [23].

On utilise le terme "taux de recombinaison radiative" (U_{rad}) pour décrire cette recombinaison, ainsi que la "durée de vie radiative" (τ_{rad}). Cette durée de vie est inversement proportionnelle à la densité des porteurs ($\tau_{rad} \propto 1/n$). Par conséquent, elle reste constante pour de faibles taux d'injection (Δn) et diminue à mesure que Δn augmente. Cependant, en raison de la nature indirecte de la bande interdite du silicium, le taux de recombinaison radiative au sein de ce matériau est faible.

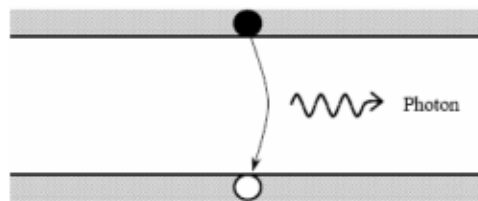


Figure I.13 : recombinaison radiative [23].

Le taux de recombinaison est proportionnel à la fois au nombre d'électron et au nombre de trous :

$$R = B(pn - n_i^2) \quad (\text{I.13})$$

Avec :

B : est le coefficient de recombinaison radiative, sa valeur est égale à $9,5 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^3/\text{s}$. n et p sont les densités de porteurs électroniques et trous, respectivement. n_i la densité intrinsèque.

I.4.3.2. Recombinaison Auger :

La recombinaison Auger est un mécanisme qui implique trois particules distinctes [24,25] (voir Figure I.14). Lorsqu'un électron de la bande de conduction se recombine avec un trou de la

bande de valence, l'excès d'énergie peut être transféré à une troisième particule libre, soit un électron soit un trou. Ces charges supplémentaires sont considérées comme des particules quasi libres qui n'interagissent pas entre elles. De la même manière que précédemment, on utilise le terme "taux de recombinaison Auger" (U_{Auger}) pour décrire ces processus, ainsi qu'une "durée de vie Auger" (τ_{Auger}) associée. Idéalement, la durée de vie Auger est inversement proportionnelle au carré de la densité des porteurs ($\tau_{Auger} \propto 1/n^2$).

Ce mode de recombinaison prédomine dans des conditions de forte injection (comme dans les cellules solaires à concentration) ou lorsque les niveaux de dopage sont élevés (comme dans les émetteurs fortement dopés).

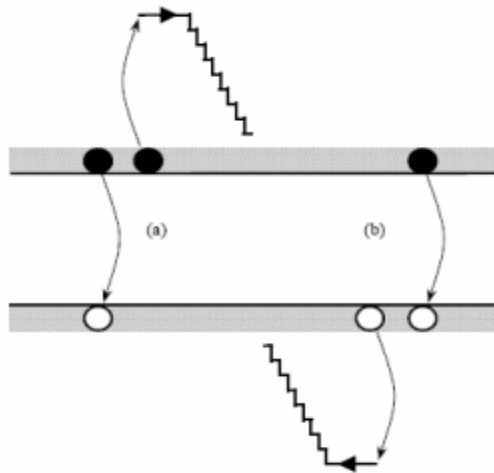


Figure I.14 : recombinaison Auger : (a) l'excès d'énergie issu de la recombinaison peut être transféré à un électron, (b) L'excès d'énergie issu de la recombinaison peut être transféré à trou [24].

La recombinaison de type Auger est exprimée par l'équation suivante:

$$R = (C_n n + C_p p)(pn - n_i^2) \tag{I.14}$$

C_n et C_p sont les constantes d'Auger, n et p sont les densités de porteurs électroniques et trous, respectivement. Avec $C_n = 2,2 \cdot 10^{-31} \text{ cm}^6/\text{s}$ et $C_p = 9,9 \cdot 10^{-32} \text{ cm}^6/\text{s}$.

La constante d'Auger est spécifique à chaque matériau et peut être déterminée expérimentalement. Elle est généralement obtenue à partir de mesures de recombinaison de

porteurs excédentaires dans des cellules solaires, et peut être trouvée dans la littérature scientifique pour différents matériaux.

I.4.3.3. Recombinaison SRH (Schokley, Read, Hall)

La recombinaison de type SRH (Schokley-Read-Hall) est un type de recombinaison de porteurs de charge qui se produit dans les semi-conducteurs [26,27]. Elle est causée par la présence de défauts dans le matériau qui peuvent agir comme des centres de recombinaison pour les porteurs de charge. Les défauts couramment observés sont les défauts ponctuels tels que les lacunes de défauts et les sites de dopage compensateurs.

Le processus de recombinaison SRH implique la capture d'un porteur de charge (électron ou trou) par un défaut et la recombinaison subséquente avec un porteur de charge opposé (trou ou électron) qui est déjà présent dans le matériau. La vitesse de recombinaison dépend de la densité de défauts dans le matériau, de la concentration de porteurs de charge, de la section efficace de capture de défaut et de la durée de vie des porteurs de charge.

La recombinaison SRH est un facteur important dans la détermination de l'efficacité des cellules solaires en silicium et dans d'autres dispositifs électroniques à semi-conducteurs. Pour minimiser la recombinaison SRH, il est important de maintenir la densité de défauts aussi faible que possible et d'augmenter la durée de vie des porteurs de charge. Cela peut être réalisé en utilisant des matériaux de haute qualité et en optimisant les conditions de croissance du semi-conducteur.

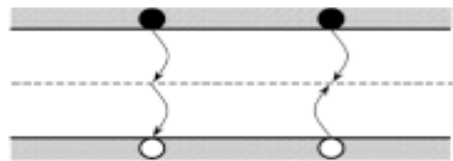


Figure I.15 : recombinaison SRH [24].

La densité de recombinaisons de type SRH, U_{SRH} , est donnée par :

$$U_{SRH} = n * p * [n_i^2 / N_t] * exp(-E_t / kT) \quad (I.15)$$

où n et p sont les densités de porteurs de charge, n_i est la densité intrinsèque, N_t est la densité de pièges, E_t est l'énergie de piège, k est la constante de Boltzmann et T est la température.

Le taux de recombinaison de type SRH, R_{SRH} , est donné par :

$$R_{SRH} = U_{SRH} * q \quad (I.16)$$

où q est la charge de l'électron.

I.4.3.4. Recombinaison en surface :

La recombinaison en surface est un processus de recombinaison des porteurs de charge dans une région près de la surface d'un matériau semiconducteur, souvent impliquée dans les cellules solaires [28-30]. Cette recombinaison peut se produire lorsque les porteurs de charge atteignent la surface du matériau et interagissent avec les états de surface qui peuvent agir comme des pièges, capturant les porteurs de charge et entraînant une diminution du rendement de la cellule solaire.

Les effets de la recombinaison en surface peuvent être minimisés en utilisant des techniques de passivation de surface, telles que le dépôt d'une couche d'oxyde ou de nitrure sur la surface du matériau pour réduire le nombre d'états de surface actifs.

La densité de courant de recombinaison en surface est donnée par l'équation suivante:

$$J_{surf} = q \left(\frac{D_n}{d_n} + \frac{D_p}{d_p} \right) \left[p(x_s) - n(x_s) \exp\left(\frac{qV(x_s)}{kT}\right) \right] / \left(\frac{D_n}{d_n} + \frac{D_p}{d_p} + S \right) \quad (I.17)$$

où J_{surf} est la densité de courant de recombinaison en surface, q est la charge élémentaire, D_n et D_p sont les coefficients de diffusion des électrons et des trous, d_n et d_p sont les longueurs de diffusion des électrons et des trous, $p(x_s)$ et $n(x_s)$ sont les densités de porteurs de charge à la surface de la jonction, $V(x_s)$ est le potentiel de surface, k est la constante de Boltzmann, T est la température absolue et S est la vitesse de recombinaison en surface.

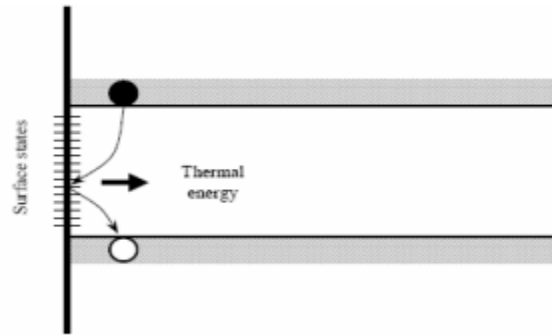


Figure I.16 : recombinaison en surface [28].

I.5. Les constituants de base [30] :

Bien que différentes structures soient envisageables pour l'élaboration des cellules photovoltaïques, des parties similaires sont présentes dans chaque composant. La structure d'une cellule photovoltaïque avec contacts sur les deux faces est présentée sur la figure suivante :

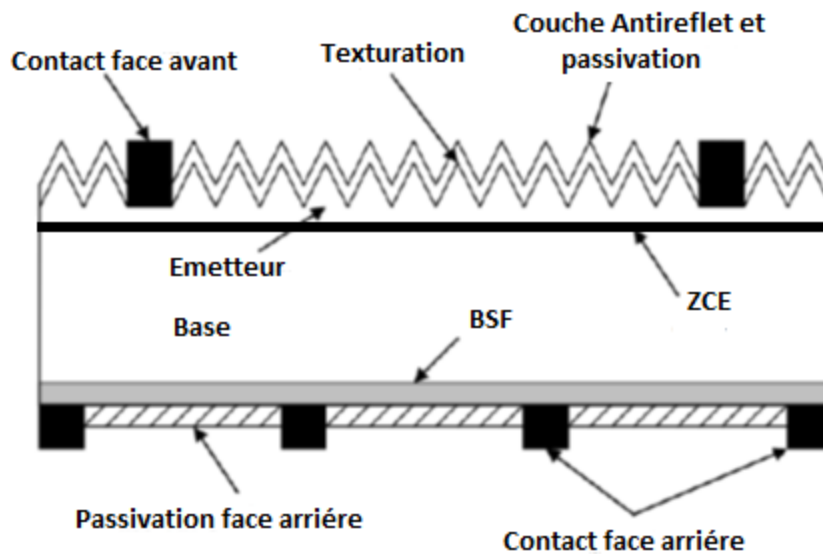


Figure I.17 : Eléments d'une cellule photovoltaïque [30].

I.5.1. Passivation des faces avant et arrière :

La surface des semi-conducteurs contient une densité importante de défauts (liaisons pendantes impuretés, ...etc) entraînant des pertes non négligeables liées à la recombinaison en surface. La passivation consiste à améliorer les qualités électroniques de la surface et de volume du matériau en neutralisant les effets de ses défauts électriquement actifs. Diverses couches de

passivation sont utilisées en photovoltaïque [30] mais les principales sont l'oxyde thermique de silicium (SiO_2) et le nitrure de silicium hydrogéné ($SiN_x:H$).

I.5.2. Couche antireflet :

Pour minimiser la réflexion de la lumière, une couche antireflet (CAR) est utilisée. Le principe d'action des couches antireflets est basé sur l'interférence des faisceaux lumineux dans les couches diélectriques minces. Si l'épaisseur de la couche diélectrique est égale à :

$$d_{CAR} = \frac{(2N+1)\lambda}{4n_{CAR}}, \quad N = 0, 1, 2, 3 \dots \quad (I. 18)$$

On obtient l'annulation des faisceaux réfléchis à l'interface air/CAR et CAR/semi-conducteur.

Pour les cellules photovoltaïques à haut rendement on utilise une double couche antireflet avec deux matériaux transparents, dans ce cas on utilise différentes couches antireflet comme (TiO_2 , SiO_2 , ZnS , MgF_2 ...).

I.5.3. Texturation de la surface :

Pour diminuer la réflectivité de la surface de la cellule on utilise la texturation. Cette opération vise à développer en surface un relief micrométrique, généralement de forme pyramidale. La longueur d'onde de la lumière incidente étant inférieure aux dimensions des structures ainsi réalisées, les rayons incidents suivent les lois de l'optique géométrique. Le relief de la surface entraîne une baisse de la réflexion en face avant: un rayon arrivant à incidence normale (par rapport au plan de la cellule) sur une pyramide sera réfléchi sur la face d'une pyramide adjacente, cette double réflexion sur les pyramides diminue le coefficient de réflexion total, qui ne vaut plus R mais R^2 . D'autre part, un rayon d'incidence normale sera transmis dans la cellule avec un angle θ différent de 0° . Le trajet de ce rayon au sein du silicium sera donc augmenté d'un facteur $1/\sin\theta$ par rapport au cas d'une surface plane et perpendiculaire à l'éclairement, ce qui aura pour effet d'augmenter la part de photons absorbés par le matériau. Pour finir, la texturation de la surface entraîne un piégeage plus important de la lumière pénétrant dans la cellule. Sur face arrière de la cellule, il existe un angle d'incidence critique (θ_c), à partir duquel le rayon est totalement réfléchi et prolonge son trajet au sein du semi-conducteur, augmentant là aussi l'absorption des photons. Ce

phénomène est particulièrement important dans le cas des cellules de faible épaisseur, et peut être renforcé par une texturation de la face arrière et/ou une couche antireflet sur cette même face.

Différents procédés sont utilisés pour texturer la surface du silicium: attaque chimiques de la surface (KOH, NaOH, acides), texturation mécanique (laminage à froid sous un peigne dentelé), texturation laser.

I.5.4. Contact avant et arrière :

Les contacts métalliques à l'émetteur et au substrat servent à collecter le courant de porteurs photo générés. Les contacts doivent être ohmiques, c'est à dire que la caractéristique $I = f(V)$ du contact doit être linéaire. La résistance des contacts est un paramètre très important. La forte résistance des contacts augmente la résistance série de la cellule et baisse le facteur de forme et de rendement. Différents procédés sont utilisées pour réaliser les contacts. Dans le cadre des cellules photovoltaïques industrielles en silicium multi cristallin, les contacts sont généralement réalisés par sérigraphie. Pour les cellules photovoltaïques à haut rendement, la pulvérisation cathodique ou l'évaporation sous vide sont utilisés.

I.5.5. BSF :

Le champ électrique arrière (BSF: Back Surface Field) consiste à créer une barrière de potentielle (par exemple, jonction $p^+ - p$) sur la face arrière de la cellule pour assurer une passivation. La barrière de potentielle induite par la différence de niveau de dopage entre la base et le BSF tend à confiner les porteurs minoritaires dans la base. Ceux-ci sont donc tenus à l'écart de la surface arrière qui est caractérisée par une vitesse de recombinaison très élevée.

I.6. Conclusion :

Dans ce premier chapitre, intitulé "notions fondamentales de la cellule solaire", nous avons établi les bases théoriques et bibliographiques nécessaires à la compréhension du sujet. Nous avons fait un rappel sur les semi-conducteurs, leur dopage et la jonction P-N, avant de passer au principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque et de ses caractéristiques électriques. Enfin, nous avons abordé les propriétés optiques de la cellule photovoltaïque, les facteurs limitant son rendement, les ses composants de base.

I.6. Références Bibliographiques:

- [1] J. P. Colinge, C. A. Colinge, "PHYSICS OF SEMICONDUCTOR DEVICES", Kluwer Academic Publishers, New York. 2002.
- [2] A. Chovet, P. Masson, « Physique des semi-conducteurs », Cours de physique, Ecole Polytechniques, Université de Marseille, 2005.
- [3] Jean-Louis MEYZONNETTE, cours : Capteurs à semi-conducteurs et applications : Conception de capteurs optroniques, Institut d'Optique Graduate School, Université du Maine : http://www.optique-ingenieur.org/fr/cours/pdf/OPI_fr_M05_C02.pdf
- [4] S. M. Sze, Physics of semiconductor devices. 2nd ed. New York: Wiley, (1981).
- [5] Johnston, W.D., Jr. Solar Voltaic Cells. New York, NY: Marcel Dekker, Inc. 1980.
- [6] Backus, Charles E. (ed). Solar Cells. New York, NY: IEEE Press. 1976.
- [7] Jenny Nelson, The physics of Solar Cells, Imperial College Press, 2003.
- [8] Sutton, George W. Direct Energy Conversion. New York, NY: McGraw-Hill Book. 1966.
- [9] Pulfrey, David L. Photovoltaic Power Generation New York, Van Nostrand Reinhold 1978.
- [10] Cheremisinoff, Paul N.; Dickinson, William C. (eds.). Solar Energy Technology Handbook, Part A. New York, Marcel Dekker, 1980.
- [11] Dixon, A.E.; Leslie, J.D. (eds.). Solar Energy Conversion. NY: Pergamon Press; 1979.
- [12] Bailey, Robert L. Solar Electrics Research and Development. MI: Ann Arbor Sciences, 1980.
- [13] Rauschenbach, H.S. Solar Cell Array Design Handbook. NY: Van Nostrand Reinhold, 1980.
- [14] Anne Labouret and Michel Viloz, Solar Photovoltaic Energy, Dunod, Paris, 2009.
- [15] B. Equer, Energie solaire photovoltaïque, vol. 1 : physique et technologie de la conversion photovoltaïque, Ellipses, Paris, 1993.
- [16] M. A. Green, Solid-State Electron, (1981).
- [17] C. M. Singal, Sol. Cells, (1981).
- [18] J. Metzdorf, "Calibration of solar cells. 1: The differential spectral responsivity method," Appl. Opt., 1987.
- [19] H. Mathieu, H. Fanet, " Physique des semiconducteurs et des composants électronique", Livre, Ed Dunod, Paris, 2009
- [20] S. Thibert, " Etude de la métallisation de la face avant des cellules photovoltaïques en silicium ", Thèse de Doctorat, Université Grenoble Alpes, France, 2015.

- [21] C. Boulord, " Développement de techniques de métallisation innovantes pour cellules photovoltaïques à haut rendement ", Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France, 2011.
- [22] A. Mette, "New concepts for front side metallization of industrial silicon solar cells", Fraunhofer Institute for Solar Energy System, Thèse de Doctorat, Université de Freiburg en Breisgau, Allemagne, 2007.
- [23] W. van Roosbroeck and W. Shockley, "Photon-radiative recombination of electrons and holes in germanium," Phys. Rev., 1954.
- [24] Altermatt, P. P., Sproul, A. B., & Cuevas, A. Recombination in solar cells. Progress in photovoltaics: research and applications, 1997.
- [25] Shockley, W., and Queisser, H. J. Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells. Journal of Applied Physics, 1961.
- [26] Shockley, W., Read, W.T., Statistics of the Recombinations of Holes and Electrons, Phys. Rev. 1952.
- [27] Hall, R.N., Electron-hole recombination in Germanium, Phys. Rev. 1952.
- [28] A. Rohatgi, "Surface Recombination Velocity of p/n Junction Solar Cells," Journal of Applied Physics, 1974.
- [29] W. Shockley and H. J. Queisser, "Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells," Journal of Applied Physics, 1961.
- [30] Nichiporuk Oleksiy « Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités, thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Lyon, France, 2005.

Chapitre II

CHAPITRE II : Cellules solaires en couches minces à base de silicium polycristallin

II.1. INTRODUCTION :

La composition du matériau utilisé dans la fabrication des cellules solaires à couche mince est un facteur clé qui influence grandement les propriétés électriques du dispositif. Dans le cas du silicium, les trois états possibles de ce matériau - monocristallin, amorphe et polycristallin - peuvent présenter des propriétés électriques très différentes.

Les propriétés électriques du silicium polycristallin sont principalement déterminées par sa structure cristalline, son état de surface et son niveau de dopage. La structure et la qualité cristalline sont influencées par les conditions de croissance et de dépôt du matériau, telles que la température, la pression et les débits gazeux [1].

Dans la première partie de ce chapitre nous allons passer en revue les différents types de silicium ainsi que les différentes notions fondamentales du silicium polycristallin, en décrivant sa structure cristalline, ses différentes propriétés cristallographiques, électriques et les différents modèles de conceptions. Dans la deuxième partie nous allons présenter la cellule solaire à base d'une structure PIN où son principe et les paramètres qui gouvernent son fonctionnement, sa caractéristique courant-tension et les différents modèles de structure de cellules PIN seront passés en revue.

II.2. Les différents états du silicium :

Le silicium pur n'est pas trouvé naturellement sous forme solide, mais plutôt extrait et purifié à partir de la silice (SiO_2) par diverses étapes de réduction et de purification chimique. Pour une utilisation dans la microélectronique, la fabrication de composants et de dispositifs, le silicium est élaboré sous forme de substrats massifs monocristallins en utilisant des méthodes courantes comme le procédé de Czochralski ou de la zone flottante. Pour obtenir des couches minces de silicium monocristallin, des techniques d'épitaxie en phase vapeur ou liquide sont utilisées. En fonction de l'application souhaitée pour le dispositif, d'autres techniques telles que la méthode de dépôt chimique en phase vapeur (CVD) ou le dépôt par pulvérisation cathodique (sputtering) peuvent être utilisées pour obtenir des couches minces de silicium ayant des structures amorphes ou polycristallines [1]. Le silicium se présente sous trois états différents : état monocristallin, état amorphe et polycristallin.

II.2.1. Etat monocristallin :

L'état monocristallin se caractérise par un agencement régulier et répétitif d'atomes formant une maille au sein d'un réseau cristallin. Le silicium cristallin adopte une structure cubique diamant, qui est une structure cubique à faces centrées (CFC), présentant une distance interatomique de paramètre de maille $d = 2,35 \text{ \AA}$ [1], et une masse atomique de 28.09 g.mol^{-1} . Chaque atome du réseau est lié à quatre voisins équidistants, formant un tétraèdre, et partage ainsi ses quatre électrons de valence avec eux. La nature de la liaison entre les plus proches voisins est de type sp^3 , avec un angle de liaison de $109^\circ 28'$. La bande interdite, qui sépare la bande de valence de la bande de conduction, est de $E_g = 1.12 \text{ eV}$ à température ambiante [2].

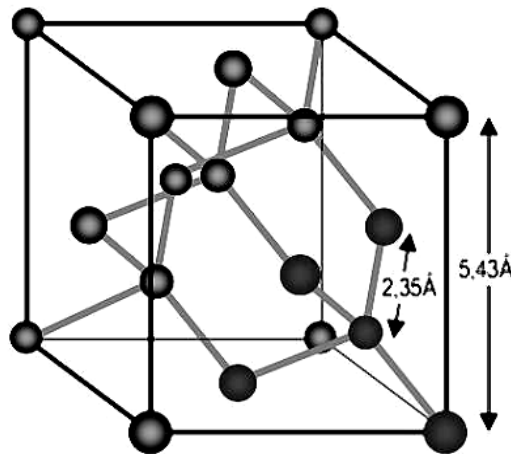


Figure II.1 : Structure cristallographique du silicium monocristallin [1].

II.2.2. Etat amorphe :

Dans l'état amorphe, l'ordre cristallin à longue distance est absent, ce qui entraîne une violation des angles inter-liaison et des distances interatomiques. Bien qu'un ordre à courte distance puisse exister, des distorsions dans les angles de liaison se produisent au-delà des premiers voisins d'un atome de silicium. En conséquence, les atomes sont disposés de manière à ce que certaines liaisons chimiques ne puissent pas être satisfaites en raison de contraintes géométriques. Les niveaux d'énergie associés à ces liaisons insatisfaites se situent dans la bande interdite du cristal, car c'est l'hybridation qui génère la bande interdite [1].

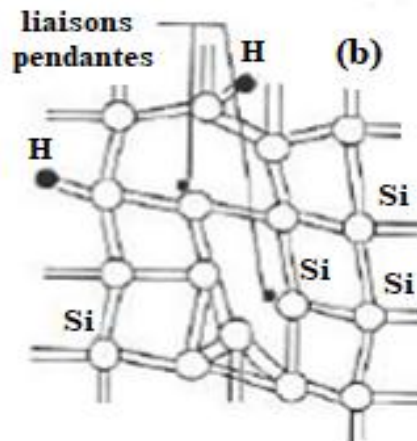


Figure II.2 : Structure cristalline amorphe [1].

II.2.3. Etat polycristallin :

La structure polycristalline est une forme intermédiaire entre l'état cristallin et l'état amorphe, pouvant être considérée comme un mélange de ces deux phases. Le silicium polycristallin est composé de grains monocristallins séparés par des zones désordonnées riches en défauts cristallins, qui peuvent être assimilées au silicium amorphe et sont appelées joints de grains [1].

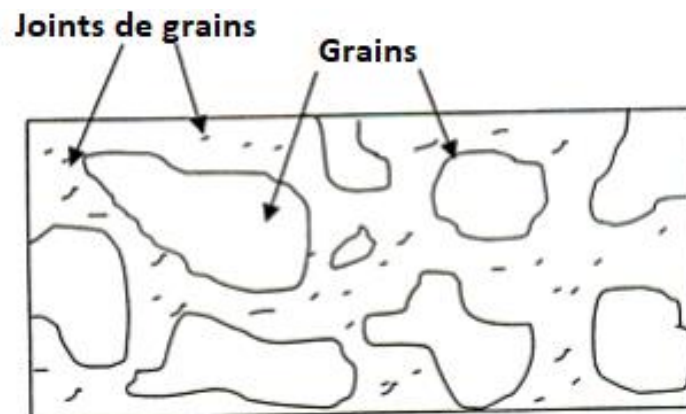


Figure II.3 : Structure du silicium polycristallin [1].

II.3. Propriétés du silicium polycristallin :

II.3.1. Propriétés cristallographiques

II.3.1.1 Structure cristalline :

Le silicium poly-cristallin se compose de grains cristallins séparés par des régions désordonnées appelées joints de grains [3]. Les propriétés de transport sont significativement altérées par la présence de ces joints de grains et de défauts intra-granulaires. La figure II.4 illustre de manière schématique la structure du silicium poly-cristallin.

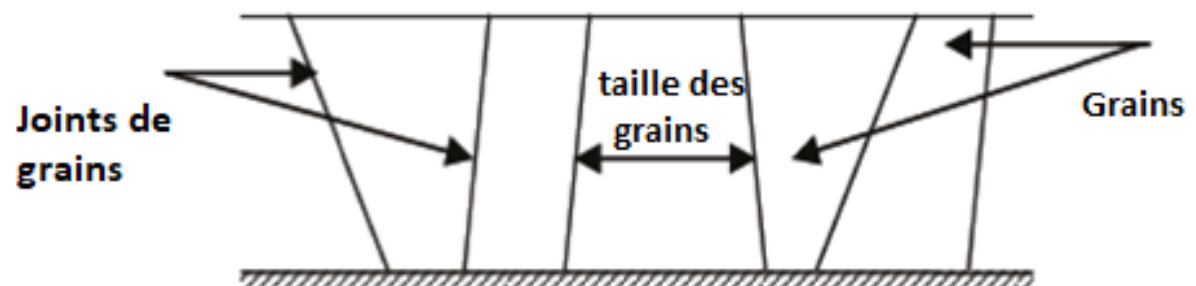


Figure II.4 : Représentation schématique du matériau de silicium poly- cristallin [3].

Le silicium polycristallin est produit principalement à partir de sources de matériau moins raffinées ou de déchets de l'industrie microélectronique, mais il convient à l'industrie photovoltaïque. Bien que les rendements des cellules solaires obtenues soient légèrement inférieurs (15%), ce matériau est le moins coûteux par rapport aux autres procédés de fabrication. Il est donc de plus en plus populaire et représente actuellement 55,9% de la part de marché.

II.3.2. Propriétés électriques :

II.3.2.1. Phénomènes de conduction électrique :

La conductivité électrique d'un matériau polycristallin est intimement liée à sa microstructure, qui consiste en un agencement de petits cristaux ou grains séparés par des zones inter-granulaires fortement désordonnées, appelées joints de grains. Ces zones présentent de nombreuses liaisons incomplètes et sont largement responsables de la limitation de la conduction dans les films polycristallins [4].

CHAPITRE II : Cellules solaires en couches minces à base de silicium polycristallin

Bien que la structure cristalline d'un grain soit généralement assimilée à celle d'un monocristal de silicium, caractérisée par un arrangement périodique d'atomes et exempt de défauts, toutes les lois classiques relatives à la conduction dans un semi-conducteur s'appliquent à l'intérieur du grain. Cependant, de nombreuses études sur la microstructure de couches minces de silicium polycristallin [5-9] ont montré que la qualité cristalline du grain joue un rôle important dans les propriétés structurales et électroniques de ces dépôts. Un grain peut présenter des sous-joints dus à des réseaux de dislocations ou de macles, qui sont générés lors de la croissance du film et sont donc liés aux phénomènes de germination et de cristallisation. D'autre part, un dopage très élevé avec du bore dans les dépôts peut entraîner l'apparition d'agrégats de nature amorphe et électriquement inactifs au sein du grain, ce qui conduit également à une dégradation de la qualité du grain [10-13]. Il est donc crucial de comprendre les caractéristiques de la microstructure du matériau polycristallin pour pouvoir optimiser ses propriétés de conduction électrique.

Les observations précédentes indiquent clairement que les défauts associés aux grains eux-mêmes peuvent également limiter la conductivité dans les films polycristallins. Cependant, il est généralement admis que l'influence des joints de grain reste prédominante sur les propriétés électriques des polycristaux de silicium. Les effets des joints de grain peuvent être décrits selon deux modèles différents, qui sont largement cités dans la littérature. [14-18]

1. Le modèle de ségrégation des dopants implique que les atomes dopants ont tendance à se déplacer vers les joints de grains, ce qui provoque une diminution de leur concentration dans le grain lui-même. De cette manière, le joint se comporte comme un "puits" pour les impuretés, qui deviennent électriquement inactives [14, 15]. Ce phénomène est influencé par la nature du dopant, car le phosphore a tendance à se ségréger au joint de grain beaucoup plus que le bore [19, 20].

2. Le modèle de piégeage des porteurs considère la présence de nombreux défauts dans les joints de grains, tels que les liaisons pendantes, qui créent des états piégés capables d'immobiliser les porteurs libres. Cela entraîne une diminution de la densité de porteurs libres et la création d'une barrière de potentiel de part et d'autre de chaque grain, limitant ainsi la mobilité des porteurs entre les grains adjacents.

II.3.2.2. Propriétés des porteurs minoritaires :

Les performances des cellules photovoltaïques dépendent de plusieurs propriétés de transport des porteurs minoritaires telles que la durée de vie, la vitesse de recombinaison en surface et la longueur de diffusion. Comprendre comment ces propriétés se comportent aux joints de grains est donc crucial, car cela affecte directement la valeur du photocourant généré par la cellule solaire. Dans le cas du silicium polycristallin, ces propriétés dépendent de divers facteurs tels que la qualité cristalline, la pureté et les dimensions des grains, ainsi que le dopage. Toutefois, l'activité électrique des joints de grains reste le facteur prédominant qui influe sur ces propriétés.

a. Mécanismes de recombinaison :

Plusieurs études ont été menées pour comprendre les mécanismes de recombinaison des porteurs minoritaires, en examinant la relation entre la durée de vie de ces porteurs et la concentration de dopant, la taille des grains, ainsi que la densité des états d'interface présents aux joints de grains dans le polysilicium [21-22].

Les porteurs minoritaires sont métastables, c'est-à-dire qu'ils n'existent que pendant une durée de vie moyenne τ , représentant le temps moyen entre la création d'une paire électron-trou et leur recombinaison.

Les semi-conducteurs présentent plusieurs mécanismes principaux de recombinaison pour les porteurs de charge libres, notamment :

- Les mécanismes de recombinaison via les centres profonds (ou recombinaison Shockley-Read-Hall, SRH) introduits par les défauts cristallins (ponctuels, linéaires, 2D et 3D) et les atomes impurifiés (en insertion ou en substitution).
- Les recombinaisons radiatives ou bande à bande.
- Les recombinaisons Auger.

Les recombinaisons dans les semi-conducteurs à gap indirect, tels que le silicium cristallin, sont principalement de type SRH et Auger. En plus de ces deux mécanismes, il

CHAPITRE II : Cellules solaires en couches minces à base de silicium polycristallin

existe également des recombinaisons de type SRH à la surface distinctes des recombinaisons (SRH, radiatives et Auger) qui se produisent dans le volume du matériau.

A chaque mécanisme de recombinaison des porteurs de taux est associée une durée de vie τ par la relation :

$$R = \frac{\Delta n(p)}{\tau} \quad (\text{II.1})$$

Avec $\Delta n(p)$: concentration de porteurs en excès n ou p .

Les quatre mécanismes de recombinaison peuvent coexister dans un même matériau, mais leur proportion varie. Dans les matériaux à gap indirect tels que le silicium cristallin, les recombinaisons radiatives sont négligeables par rapport aux recombinaisons SRH et Auger. Dans les matériaux fortement dopés, les recombinaisons Auger sont prédominantes dans le volume. Les recombinaisons en surface sont plus importantes dans les couches minces que dans les substrats épais, même avec une passivation. En général, on parle plutôt d'un taux de recombinaison effectif pour englober les taux de recombinaison en volume et en surface :

$$R_{eff} = R_{SRH}^{volume} + R_{Auger} + R_{rad} + R_{SRH}^{s.arriere} + R_{SRH}^{s.frontale} \quad (\text{II.2})$$

A ce taux de recombinaison effectif correspond une durée de vie effective, définie par:

$$\frac{\Delta n}{\tau_{eff}} = \frac{\Delta n}{\tau_{SRH}} + \frac{\Delta n}{\tau_r} + \frac{\Delta n}{\tau_A} + \frac{S_f \Delta n_s}{W} + \frac{S_r \Delta n_s}{W} \quad (\text{II.3})$$

En supposant que la concentration des porteurs à la surface égale à celle en volume $\Delta n = \Delta n_s$ (ce qui est valable pour une bonne passivation des surfaces) et qu'on a la même vitesse de recombinaison des porteurs sur les deux surfaces, dans ce cas on trouve que:

$$\frac{1}{\tau_{eff}} = \frac{1}{\tau_{SRH}} + \frac{1}{\tau_r} + \frac{1}{\tau_A} + \frac{2S}{W} \quad (\text{II.4})$$

Dans les travaux de A. K. Ghosh qui portent sur l'effet de la taille des grains sur les propriétés photovoltaïques du polysilicium (durée de vie, longueur de diffusion des minoritaires), montrent que la durée de vie augmente avec la taille des grains, de 10^{-11} s à

CHAPITRE II : Cellules solaires en couches minces à base de silicium polycristallin

10^{-5} s lorsque les grains passent de $0.01 \mu\text{m}$ à $10^3 \mu\text{m}$. Ces faibles valeurs ainsi que leur dépendance linéaire avec d traduisent le fait que la durée de vie est entièrement contrôlée par la recombinaison aux joints de grains. La relation empirique déduite par Ghosh est donnée par:

$$\tau_{eff} = 5 \cdot 10^{-6} d \quad (\text{II.5})$$

Avec τ_{eff} en s et d en μm .

Selon l'auteur, il est également pertinent de souligner la relation entre la taille des grains et le dopage. En effet, il existe une corrélation linéaire entre le dopage et la taille des grains, et cette dernière diminue lorsque le dopage du silicium polycristallin augmente.

b. Vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires :

Le calcul de la vitesse de recombinaison au joint de grain nécessite la connaissance détaillée de la distribution de $N_s(E)$ [23]. Généralement, il est approché par l'expression suivante :

$$S_{jg} = \sigma v_{th} N_T \quad (\text{II.6})$$

Où σ est la section efficace de capture (cm^2), v_{th} est la vitesse thermique et N_T est la densité d'états d'interface effectivement actifs.

La densité des états d'interface ionisés est directement liée à la vitesse de recombinaison dans cette expression. En effet, plus la densité est élevée, plus la vitesse de recombinaison est importante. Cependant, cette dernière est limitée par la vitesse thermique des porteurs, qui en représente la valeur maximale :

$$v_{th} = \left(\frac{3kT}{m^*}\right)^{\frac{1}{2}} \approx 10^7 \text{ cm/s à } 25^\circ\text{C} \quad (\text{II.7})$$

Selon ce modèle, la vitesse de recombinaison aux joints de grains augmente progressivement avec N_T , le niveau d'injection et le dopage de base. En outre, en supposant que les courants de recombinaison aux joints de grains et à l'intérieur des grains sont identiques dans le régime stationnaire, le modèle de D.P. Bhatt prédit l'existence d'un pic de

CHAPITRE II : Cellules solaires en couches minces à base de silicium polycristallin

vitesse de recombinaison aux joints de grains en fonction du dopage pour une taille de grain spécifique.

D'après ce modèle, la vitesse de recombinaison est d'autant plus élevée que la taille des grains est plus petite. Pour éviter cette recombinaison nuisible, il est recommandé de choisir un dopage plus faible ou plus élevé que celui où la vitesse de recombinaison atteint son maximum, en fonction de la taille des grains.

Les travaux de Kazmerski [24] ont montré que la vitesse de recombinaison aux joints de grains dans le polysilicium utilisé pour les applications photovoltaïques est généralement comprise entre 10 et 10⁶ cm/s. De plus, ces travaux ont également révélé que la vitesse de recombinaison augmente de manière linéaire avec la barrière de potentiel du joint de grain sous illumination, qui peut varier de 0,05 à 0,2 Volt.

c. Longueur de diffusion des porteurs minoritaires :

La longueur de diffusion des porteurs minoritaires peut être considérée comme la distance moyenne qu'un porteur en excès peut parcourir avant de se recombiner, et dans le cas du silicium de type *p*, elle est exprimée par la formule suivante :

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n} \quad \text{(II.8)}$$

Où D_n est le coefficient de diffusion et τ_n est la durée de vie.

On compare généralement la longueur de diffusion L_n à l'épaisseur de la cellule photovoltaïque afin de déterminer la portée des porteurs photogénérés : ceux qui se trouvent suffisamment près de la zone de collecte sont collectés, tandis que ceux générés au-delà sont perdus. Il est donc important que la longueur de diffusion L_n soit élevée. Cependant, la réduction de l'épaisseur de la cellule peut faciliter l'efficacité de collecte. La longueur de diffusion est intrinsèquement liée à la durée de vie des porteurs minoritaires et peut varier sur plusieurs ordres de grandeur.

En comparant la longueur de diffusion dans le silicium monocristallin, la recombinaison aux joints de grains dans le silicium polycristallin a une influence qui se manifeste par un minimum autour de 4.10¹⁶ cm⁻³, correspondant au pic de la vitesse de recombinaison en

fonction du dopage. Pour des dopages plus élevés, la longueur de diffusion est détériorée par l'effet Auger lorsque N_A dépasse 10^{17} cm^{-3} [25].

II.4. Théorie des cellules PIN:

II.4.1. L'historique de la première cellule solaire de type PIN :

La première diode à jonction PIN, fabriquée en germanium, a été signalée en 1962, et a pratiquement remplacé la jonction standard PN polarisée en inverse [26]. Avec l'utilisation de semi-conducteurs comme dispositifs de détection de la lumière, l'utilisation de la diode PIN s'est étendue en tant que photo détecteur en raison de sa grande zone de jonction d'épuisement, qui est idéale pour cette application. La ZCE est augmentée artificiellement en insérant une région très légèrement dopée (intrinsèque) entre les régions de type n et de type p , permettant à la zone de charge d'épuisement de s'étendre sur l'ensemble de cette partie du dispositif.

II.4.2. Fonctionnement de la cellule solaire PIN :

II.4.2.1. Structure :

La jonction **PIN** se compose de trois régions dopée différemment [27]. Comme son nom l'indique, il existe une couche intrinsèque ou non dopée prise en sandwich entre une région dopée **P** et une région dopée **N**. Typiquement, ce type de jonction est fabriqué à partir de silicium amorphe avec une bande interdite d'environ 1,8eV. La structure PIN peut être vue comme une jonction en série avec une résistance très élevée, constituée par la zone intrinsèque.

La structure de dispositif n-i-p (ou p-i-n, dans une configuration superstrat) est mise en œuvre dans des cellules solaires de sorte qu'un champ électrostatique intégré est maintenu à travers la couche i pour entraîner la séparation et la collecte des porteurs. La collecte des porteurs par dérivation dans les cellules solaires est utilisée en raison de la faible mobilité des porteurs, et donc des courtes longueurs de diffusion des porteurs minoritaires.

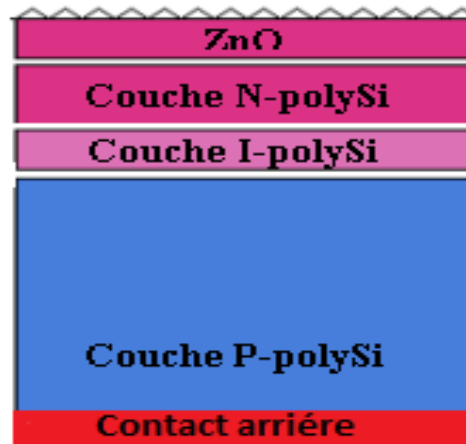


Figure II.5 : Structure PIN.

Pour minimiser le coefficient de réflexion de la première face de la cellule solaire exposée à la lumière, il est recommandé d'utiliser une couche d'oxyde transparente et conductrice (TCO) pour la recouvrir, ce qui permet également d'utiliser cette couche comme contact électrique à l'avant de la cellule.

II.4.2.2. Principe de fonctionnement :

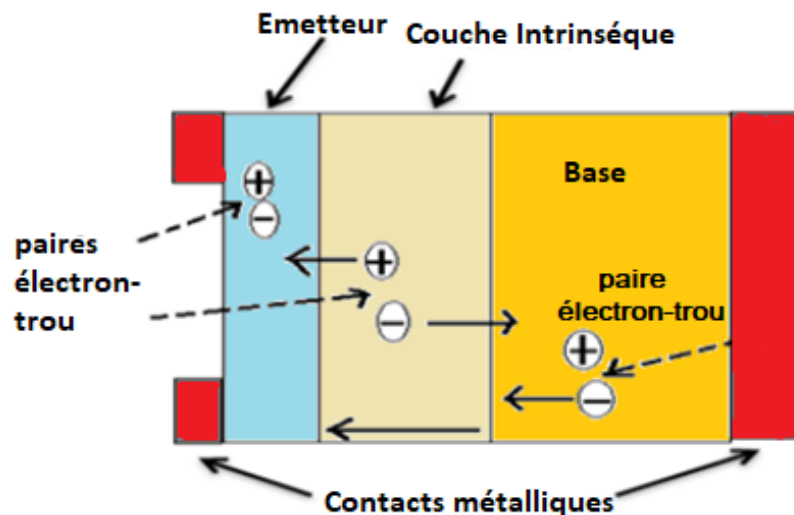


Figure II.6 : Principe de fonctionnement d'une cellule solaire à structure PIN.

La figure II.6 représente le fonctionnement d'une cellule solaire photovoltaïque de type PIN, où la région de charge d'espace créée est intrinsèque. Lorsqu'un photon est incident, des

CHAPITRE II : Cellules solaires en couches minces à base de silicium polycristallin

porteurs sont générés dans les régions P, I et N, mais leurs comportements diffèrent selon la région de la jonction où ils sont créés.

a) Dans les régions électriquement neutres P et N :

Les porteurs minoritaires créés par les photons diffusent. Ceux qui atteignent la zone de charge d'espace sont accélérés par le champ électrique, dirigé de la partie chargée positivement à la partie chargée négativement (voir figure II.12), vers la région où ils deviennent majoritaires. Ainsi, il y a une séparation des porteurs dans la ZCE vers les régions P et N, qui contribuent au courant par leur diffusion. Cela crée un courant de diffusion photoélectrique.

b) Dans la zone de charge d'espace ou intrinsèque I :

Dans cette région, le champ électrique dissocie les paires électron-trou engendrées par les photons, faisant ainsi migrer l'électron vers la zone de type N et le trou vers la zone de type P. Cette migration des porteurs donne naissance à un courant de photo-génération.

De ce fait, lorsque l'anode est polarisée positivement, un courant I_d se produit car des trous passent de la zone P+ à la zone I et des électrons de la zone N+ à la zone I, ce qui correspond à l'injection de porteurs libres dans la zone intrinsèque. Cette région, qui était pratiquement vide de porteurs et donc très résistive, est désormais remplie de porteurs libres, ce qui fait chuter sa résistance.

Dans la cellule à structure p-i-n, l'insertion d'une couche isolante entre les deux couches semi-conductrices de type p et de type n de la jonction p-n permet d'obtenir et de contrôler dans la zone isolante un champ électrique de contact maximal et constant qui transforme cette zone en ZCE, ce qui permet une meilleure séparation des charges dans cette zone et leur accélération vers leurs électrodes respectives. L'avantage de ces structures P-I-N est donc l'augmentation de la zone de charge d'espace qui participe à la photogénération. Il en résulte des longueurs de diffusion plus grandes que celles à simple jonction PN. Ceci a pour objectif d'accroître le nombre de porteurs photo-crésés et de réduire leurs recombinaisons au niveau de la ZCE.

II.4.3. Modélisation du fonctionnement

a. Champ électrique :

Il est bien connu que la zone de charge d'espace de la cellule doit avoir une valeur importante pour que le photocourant soit essentiellement dû à la photogénération de porteurs dans cette zone. Cette épaisseur doit être artificiellement augmentée pour optimiser les performances de la cellule en intercalant une région intrinsèque entre les zones P et N. Ainsi cette condition devrait garantir qu'un champ électrique important puisse exister dans toute la région intrinsèque [28].

Vu que c'est le champ électrique dans la Z-C-E qui permet le transport des porteurs générés, il est nécessaire que ce champ soit intense. Pour arriver à obtenir un champ intense et non nul dans la région I, il faut tout d'abord considérer que dans la pratique, les cellules solaires sont conçues avec une région intrinsèque beaucoup plus épaisse que les régions P et N. La densité de charge s'écrit pour la structure PIN (d'après la figure II.7) :

$$\rho(x) = \begin{cases} -eN_a & \text{pour } x_p \leq x \leq x_0 \\ en_i = -ep_i & \text{dans la région intrinsèque } x_0 \leq x \leq x_i \\ eN_d & \text{pour } x_i \leq x \leq x_n \\ 0 & \text{pour } x \leq x_p \text{ et } x \geq x_n \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

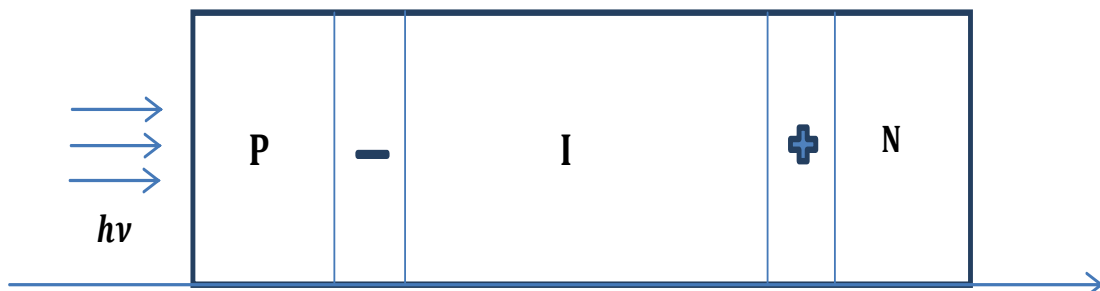


Figure II.7 : Schéma d'une structure PIN

Le champ électrique résultant s'écrit pour la structure PIN :

$$E_p(x) = -\frac{ep_i}{\epsilon}(x - x_{in}) \quad \text{Pour } x_{in} \leq 0 \leq x \leq x_p \quad (\text{II.10})$$

$$E_n(x) = \frac{en_i}{\epsilon}(x - x_{ip}) \quad \text{Pour } x_n \leq x \leq L \leq x_{ip} \quad (\text{II.11})$$

$$E_i(x) = -\frac{en_i}{\epsilon}(x_{ip} - x_{in}) \quad \text{Pour } x_0 \leq x \leq L \leq x_i \quad (\text{II.12})$$

CHAPITRE II : Cellules solaires en couches minces à base de silicium polycristallin

Cette relation montre que le champ électrique dans la zone intrinsèque est constant, et qu'il est d'autant plus intense que $(x_{ip} - x_{in})$ est élevé, ce qui justifie un élargissement important de la zone intrinsèque de la cellule solaire.

Concernant le champ électrique dans les deux zones de charge d'espace étalées dans les zones P et N, la théorie classique de la jonction PN [29] prévoit qu'il a une allure linéaire à l'intérieur des deux parties de la ZCE, et il est nul à l'extérieur de cette zone, c'est-à-dire dans les régions restantes quasi-neutres P et N.

b. Densité de courant :

La densité du courant d'une jonction PIN, selon le modèle de J. C. Rimada et L. Hernandez [30] est donnée par la relation :

$$J = J_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] - J_G + J_R \quad (\text{II.13})$$

où q est le charge d'électron, J_0 est le courant de saturation, J_G et J_R sont le courant de génération et le courant de recombinaison, respectivement. Ils sont donnés par les relations suivantes :

Le courant de génération J_G [31] :

$$J_G = qW[G_{op} + G_{th} + A_{cnr}n_i] \exp\left(-\frac{qV_d}{kT}\right) \quad (\text{II.14})$$

Le courant de recombinaison J_R :

$$J_R = qW[G_{th}] \exp\left(-\frac{qV_d}{kT}\right) \quad (\text{II.12})$$

W : la largeur de la zone intrinsèque.

G_{op} : est le courant de génération optique, G_{th} : est le courant de génération thermique.

A_{cnr} : le coefficient d'absorption non radiative.

II.4.4. Types des structures des cellules PIN :

Différentes structures de cellules PIN peuvent être distinguées en fonction des matériaux utilisés et de l'empilement des différentes couches.

II.4.4.1. Cellules organiques :

Les cellules solaires organiques sont des dispositifs fabriqués à partir de matériaux organiques [32], tels que le pétrole, qui se trouvent dans tous les êtres vivants. Ces matériaux sont considérés comme naturels car ils sont produits dans la nature. Les cellules solaires organiques offrent une solution prometteuse pour les systèmes photovoltaïques à grande échelle et à faible coût. Elles présentent plusieurs avantages, tels que leur facilité de fabrication, leur capacité à fonctionner à des températures basses, l'utilisation de matériaux peu coûteux et de technologies abordables, ainsi que la possibilité de produire des dispositifs flexibles sur des substrats en plastique. Les cellules solaires organiques ont donc le potentiel d'être utilisées dans de nombreuses applications, notamment les montres, les calculatrices de poche, les fenêtres semi-transparentes pour la production d'énergie, ainsi que les systèmes flexibles pouvant être enroulés.

Bien que les cellules solaires organiques aient un rendement énergétique inférieur à celui des cellules solaires en silicium, les dispositifs à base de polymères et de petites molécules ont atteint un rendement de conversion d'énergie d'environ 3 % ces dernières années. Un exemple d'une cellule solaire organique à couche mince de type PIN produite par un procédé de dépôt sous vide est illustré sur la Figure II.13.

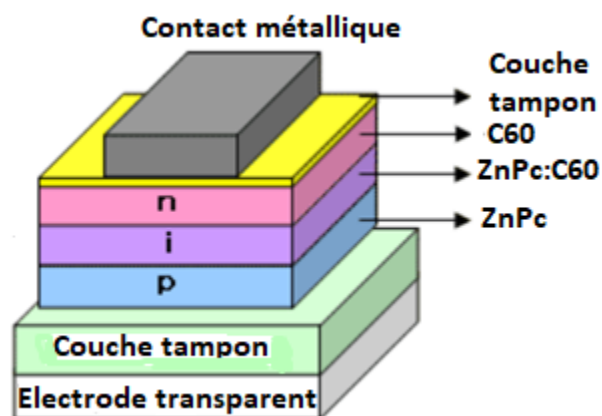


Figure II.8 : Structure de la cellule solaire à couche mince organique de type PIN [33].

II.4.4.2. Cellules solaires à base de pérovskite :

La pérovskite est considérée comme un matériau prometteur pour remplacer le silicium dans les cellules solaires à grande surface [34]. Elle peut être déposée en solution, permettant ainsi de produire des cellules photovoltaïques de grandes dimensions. Cependant, la commercialisation de ces cellules dépend de la réduction des coûts d'installation par rapport aux technologies basées sur le silicium ou les matériaux organiques. Les techniques de dépôt à basse température, telles que la pulvérisation, l'impression, le rouleau à rouleau et le revêtement par rotation, utilisant des matériaux absorbant la lumière et des matériaux d'électrodes, pourraient contribuer à améliorer le coût. Les pérovskites ont suscité un grand intérêt récemment en raison de leur fort coefficient d'absorption, de leur mobilité élevée des charges, de leur longueur de diffusion des charges élevée et de leur rendement important. La formule générale de la pérovskite est ABX_3 . Les cellules solaires à pérovskite sont généralement composées d'un substrat en verre/FTO sur lequel est déposé un oxyde d'étain dopé au fluor (FTO), suivi d'une couche de dioxyde de titane (TiO_2) qui améliore le transport des électrons. La couche active est constituée d'un matériau pérovskite.

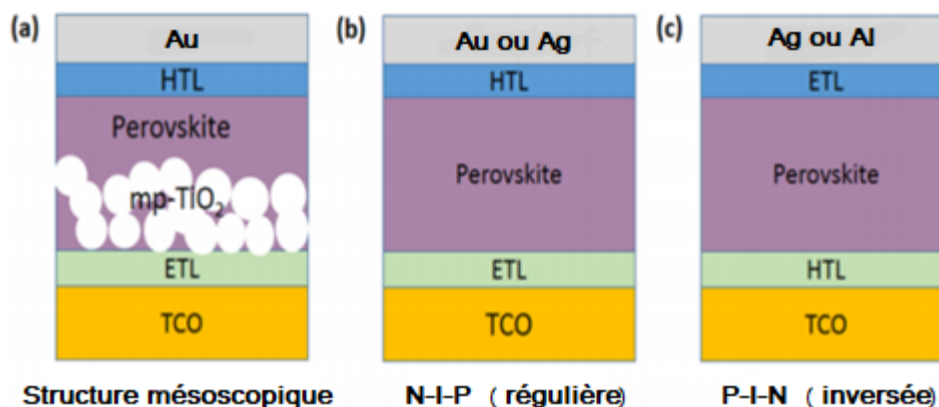


Figure II.9 : trois structures typique de cellules solaires à pérovskite : (a) mésoscopique, (b) structure planaire régulière, (c) structure planaire inversée [35].

Pour améliorer le transport de trous, une couche de spiro-OMeTAD est déposée entre l'électrode en or et la couche active. La structure PIN des cellules solaires à pérovskite est dérivée de la cellule solaire organique, et plusieurs couches de transport de charge utilisées

CHAPITRE II : Cellules solaires en couches minces à base de silicium polycristallin

dans les cellules solaires organiques ont été transférées avec succès dans les cellules solaires à pérovskite. La figure II.9 présente trois structures typiques de cellules solaires à pérovskite.

II.4.4.3. Structure à base du silicium amorphe

Les cellules solaires à couche mince en silicium sont une solution envisageable pour répondre à la demande croissante d'énergie actuelle. Le matériau crucial pour cette technologie est le silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H) qui a été utilisé pendant des décennies pour fabriquer des jonctions PIN en associant des couches absorbantes intrinsèques et des couches dopées [36-37]. Plus récemment, l'a-Si:H a également été utilisé en combinaison avec des plaquettes cristallines de silicium pour créer des cellules solaires à hétérojonction (HIT). L'ajout de dopants dans le matériau désordonné a-Si:H a été une découverte surprenante qui a rapidement mené à la création des premières cellules solaires a-Si:H. De nombreuses entreprises ont produit des panneaux solaires basés sur l'a-Si:H sous différentes configurations. Bien que la plupart des modules solaires aient été produits avec une jonction PIN sur verre (simple ou en tandem avec une couche supérieure a-Si:H et une couche de silicium microcristallin ($\mu\text{c-Si:H}$)), il y a eu des exceptions, comme les cellules solaires en tandem a-Si:H/a-Si:H avec verre avant et arrière produites par Schott Solar, et United Solar Systems Corp.

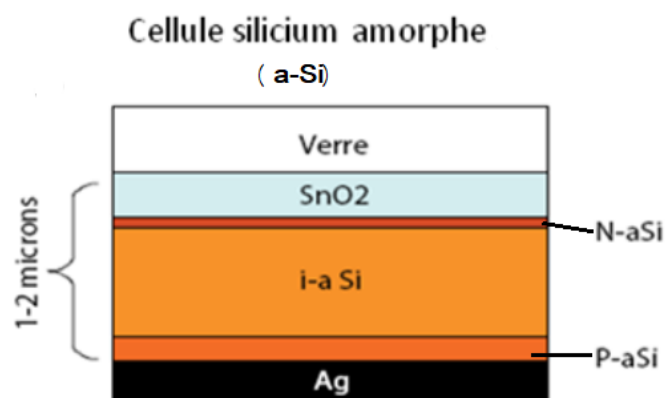


Figure II.10 : Cellule en couches minces à base de silicium amorphe en configuration PIN [38].

CHAPITRE II : Cellules solaires en couches minces à base de silicium polycristallin

Les cellules solaires à base de silicium amorphe sont actuellement les cellules solaires à couches minces les plus avancées. Leur structure est généralement de type dual PIN (ou NIP), où les couches p et n sont principalement utilisées pour créer un champ électrique interne (couche i) composé de silicium amorphe. La couche i, qui a une capacité d'absorption élevée, a généralement une épaisseur de 0,2 à 0,5 μm et sa fréquence d'absorption est comprise entre 1,1 et 1,7 eV, ce qui est différent de celui de la plaquette de silicium (qui a une capacité d'absorption de 1,1 eV). Le rendement de conversion des cellules de type PIN à base de silicium amorphe est encourageant pour les applications photovoltaïques, avec plusieurs travaux en cours pour optimiser leur rendement qui dépasse actuellement 11%.

II.4.5. Comparaison entre la structure PN et PIN :

Sur la Figure II.11, sont représentées les caractéristiques courant-tension de deux structures PN et PIN utilisant des paramètres optimaux. La structure PIN présente des performances légèrement supérieures à la structure PN, avec un rendement de conversion de 11,41% pour la première, contre 8,82% pour la seconde. Cette différence de performance peut être expliquée par le fait que la structure PIN a des courants de court-circuit (I_{CC}) et des tensions de circuit ouvert (V_{CO}) légèrement plus élevés que la structure PN. En effet, la couche intrinsèque de la structure PIN permet d'obtenir une zone de charge d'espace (ZCE) plus large, ce qui améliore la génération des paires électron-trou. L'augmentation de I_{CC} est due à l'augmentation de la concentration des porteurs photo-générés, tandis que l'augmentation de V_{OC} est due à l'augmentation de la largeur de la ZCE.

Le Tableau II.1 présente les paramètres optimaux des deux structures PN et PIN. Nous constatons que les plages de tolérance pour le dopage et l'épaisseur de la couche N sont plus larges pour la structure PIN que pour la structure PN. Cela confère à la structure PIN un avantage considérable pour sa réalisation pratique.

CHAPITRE II : Cellules solaires en couches minces à base de silicium polycristallin

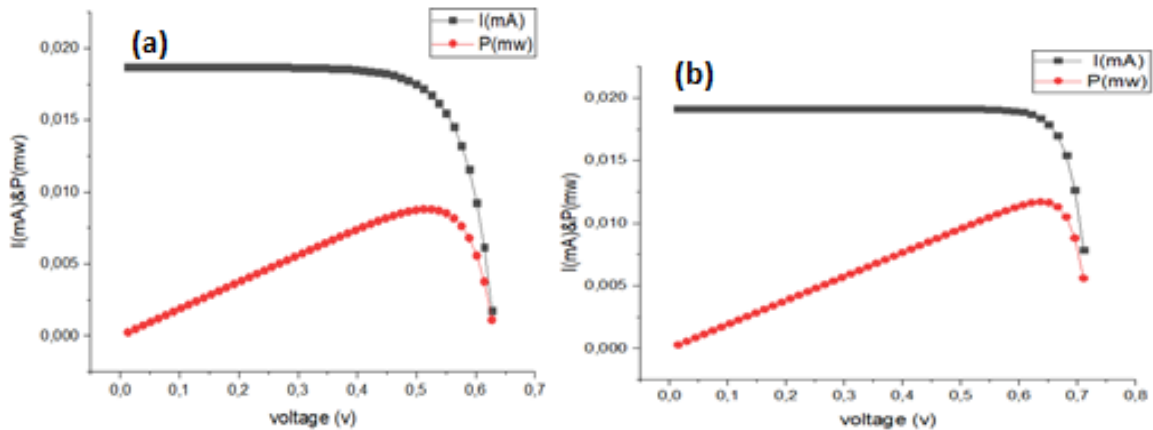


Figure II.11 : Caractéristiques I(V) et P(V) de la cellule solaire PN (a) et de la cellule PIN (b) obtenues avec les paramètres optimaux.

	PIN	PN
V_{oc} (V)	0.70	0.61
J_{sc} (mA /cm ²)	19.14	18.69
FF (%)	84.75	77.60
η (%)	11.41	8.82

Tableau II.1 : intervalles de tolérance pour chaque paramètre optimal de la cellule solaire.

Chacun de ces intervalles représente l'ensemble des valeurs possibles du paramètre, tout en maintenant le rendement de la cellule à plus de 90% de son maximum, tandis que les autres paramètres d'optimisation sont maintenus à leurs valeurs optimales pour les cellules solaires.

II.5. Conclusion :

Dans la première partie de ce chapitre, une revue a été réalisée sur les différents types de silicium et les concepts fondamentaux du silicium polycristallin. La structure cristalline, les propriétés cristallographiques, électriques ainsi que les modèles de conduction ont été décrits. La deuxième partie s'est concentrée sur la présentation des cellules solaires basées sur une structure PIN. Les principes de fonctionnement, les paramètres influençant leur performance, la caractéristique courant-tension, ainsi que les différents modèles de structure de cellules PIN ont été examinés.

II.6. Références Bibliographiques:

- [1] B. Nesrine, « potentialités des films de silicium polycristallin LPCVD destinés à l'étude d'une cellule solaire multicouches », thèse de doctorat, université des frères Mentouri, Constantine.
- [2] B. N. Bouteffah, « Caractérisation des couches du silicium amorphe cristallisé par l'aser excimer KrF », Thèse de magister, Université de Constantine, 2004.
- [3] M. Mekhalfa, « croissance et étude de l'effet de l'hydrogène sur les propriétés du silicium polycristallin destiné à l'usage photovoltaïque », thèse de doctorat, université Badji Mokhtar, Annaba, 2019.
- [4] F. Mansour, 'Propriétés électriques et technologiques de films de silicium LPCVD fortement dopés bore', Thèse de Doctorat d'Etat, Département d'Electronique, Université de Constantine, 1996.
- [5] G. Harbecke, L. Krausbauer, E .F. Steigmeir, A. E. Widmer, Appl. Phys. Lett. 1983.
- [6] G.Harbecke, L.Krausbauer, E.F.Steigmeir, A.E.Widmer, J.Electrochem. Soc. 1982.
- [7] D.Bielle-Daspet, F. Mansour-Bahloul, A. Martinez, G. Pierragi, M. David, B. de Mauduit, A. Oustry, R. Carles, G. Landa, F. Ajustron, A. Mazel, P. Riboulet, Thin Solid Films, 1987.
- [8] E. Campo, Procédés thermiques rapides RTAO, 'Application à la réalisation de transistors à films minces de silicium déposés à partir de disilane', Thèse de Doctorat de L'INSA Toulouse, France 1996.
- [9] D. Bielle-Daspet, E. Scheid, C. Azzaro, B. De Mauduit, B. Pieraggi, Thin solid films 1991.
- [10] T. Makino, H. Nakamura, Solid-State Electronics, 1981.
- [11] A. Armigliato, D. Nobili, P. Ostojca, M. Servidori and S. Solmi, J. Electrochem. Soc. 1977.
- [12] E. Arai, H. Nakamura, and Y. Terunuma, J.Electrochem .Soc, 1973.
- [13] S. Nakayama, L. Kawashima and J. Murota, J.Electrochem.Soc, 1986
- [14] E. Munoz, L. M. Boix, J. Liabres, J. P. Monico, J.Piqueras, Solid State Electron. 1974.
- [15] A. L Fripp, .J.Appl.Phys. 1975.
- [16] J. Y. W. Seto, J.Appl.Phys. 1975.
- [17] T. I.Kamins, J.Appl.Phys. 1971.
- [18] G. Baccarani, B. Ricco, G. Spadini, J.Appl.Phys. 1978.
- [19] L. Mei, M. Rivier, Y .K wark, R. W. Dutton, J.Electrochem.Soc, 1982.

CHAPITRE II : Cellules solaires en couches minces à base de silicium polycristallin

- [20] M. Mandurah, K. C. Saraswat, C. R. Helms, T. I. Kamins, J. Appl. Phys. 1980.
- [21] Ghennou Souad. « Etude et simulation d'une cellule solaire photovoltaïque à base de silicium polycristallin ». 5ème Conférence International des Energies Renouvelables, Université Tahri Mohamed Bechar, (cier-2017).
- [22] Benloucif Nisrine. « Potentialités de films de silicium polycristallin LPCVD destinés à l'étude d'une cellule solaire multicouches ». Thèse de doctorat. Université des frères Mentouri Constantine.
- [23] D. P. Joshi and D. P. Bhatt, Solar Energy Materials, 1991.
- [24] L. L. Kazmerski, Solid-State Electron. 1978.
- [25] Abdellatif Zerga, « Caractérisation, Modélisation et Simulation Numérique des cellules photovoltaïques à base de silicium polycristallin en couche mince déposée par "RT-CVD" ». Thèse de doctorat. Université Abou Bakr BELKAÏD – Tlemcen, (2005).
- [26] Kadri Fatima zahra, « Analyse des performances des cellules solaires de type P-I-N », mémoire de master, université IBN-khaldoun, tiaret, 2020.
- [27]. A. V. Shah, « THIN-FILM SILICON SOLARS CELLS», 1st Edition, Engineering Science, EPFL Press A Swiss academic, 2010.
- [28] S. M. Sze, "Physics of semiconductor Devices", Wiley, New York, 1969.
- [29] H. Mathieu, "Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques ", Edition Masson, Paris 1990.
- [30] J. C. Rimada, L. M. Hernández, «Modeling of ideal AlGaAs quantum well solar cells», Microelectronics Journal, 2001.
- [31] J. C. Rimada, L. M. Hernández, « A new approach to ideal AlGaAs MQW solar cells», Modern physics letters B, 2001.
- [32] J. Xue; B. P. Rand; S. Uchida; S. R. Forrest, Adv. Mater., 2005
- [33] K. Walzer; B. Maennig; M. Pfeiffer; K. Leo, Chem. Rev., 2007
- [34] M. A. Green, A. Ho-Baillie, and H. J. Snaith, "The emergence of perovskite solar cells," Nature Photonics, 2014.
- [35] T. Bin Song et al., "Perovskite solar cells: Film formation and properties," J. Mater. Chem. A, 2015.
- [36] K. S. Lim, M. Konagai, and K. Takahashi, J. Appl. Phys. 1984.
- [37] R. R. Arya, A. Catalano, and R. S. Oswald, Appl. Phys. Lett. ,1986.
- [38] Ignatio Benigno, D. Darminto, IPTEK, Journal of Science, 2017.

Chapitre III

III.1. Introduction :

La simulation numérique est largement employée dans l'optimisation des dispositifs à semi-conducteurs, y compris les cellules solaires. Son utilisation évite la fabrication de plusieurs prototypes de cellules et réduire ainsi le temps et le coût de l'expérience, elle permet une variation considérable des paramètres car elle est indépendante de la technologie utilisée. À cause de ses plusieurs avantages qu'elle devient la méthode la plus pratique pour l'amélioration des paramètres de la cellule photovoltaïque on se basant sur plusieurs logiciels comme l'AMPS-ID, le D-AMPS, l'ASPIN, le PC1D, l'AFORS-HET, ...etc [1].

Dans ce chapitre, nous allons étudier les paramètres géométriques et physiques tels que le courant de court-circuit, la tension en circuit ouvert, le facteur de forme et le rendement en fonction de diverses variables telles que l'épaisseur, la durée de vie et la température d'une cellule photovoltaïque en polysilicium de type PIN en utilisant un logiciel de simulation de cellules solaires bien connu, appelé PC1D. En fin de compte, nous tirerons une conclusion sur les paramètres idéaux que doit posséder une bonne cellule photovoltaïque pour avoir un meilleur rendement.

III.2. PC1D [2] :

Le PC1D (Personal Computer One Dimensional) est un logiciel de simulation numérique des cellules solaire, il a été spécialement développé pour la simulation de dispositifs photovoltaïques à l'université « New South Wales of Sydney » en Australie. Grâce à son interface simple et sa vitesse d'exécution et son unidimensionnalité, il permet de simuler le comportement des cellules photovoltaïques basées sur des semi-conducteurs en respectant la symétrie unidimensionnelle (symétrie axiale), ou comme un intermédiaire de calcul pour les simulateurs multidimensionnels selon les matériaux disponibles en fichiers data, en jouant sur les paramètres variables (largeur, surface, dopage, etc...).

Le PC1D contient des fichiers de bibliothèque avec les paramètres des semi-conducteurs cristallins utilisés dans la technologie photovoltaïque tels que le GaAs, l'a-Si, l'AlGaAs, le Si, l'InP et le Ge. Les fichiers du spectre solaire sont également disponibles dans ce logiciel, principalement le spectre AM0 et AM1.5. La fenêtre principale de PC1D est la suivante :

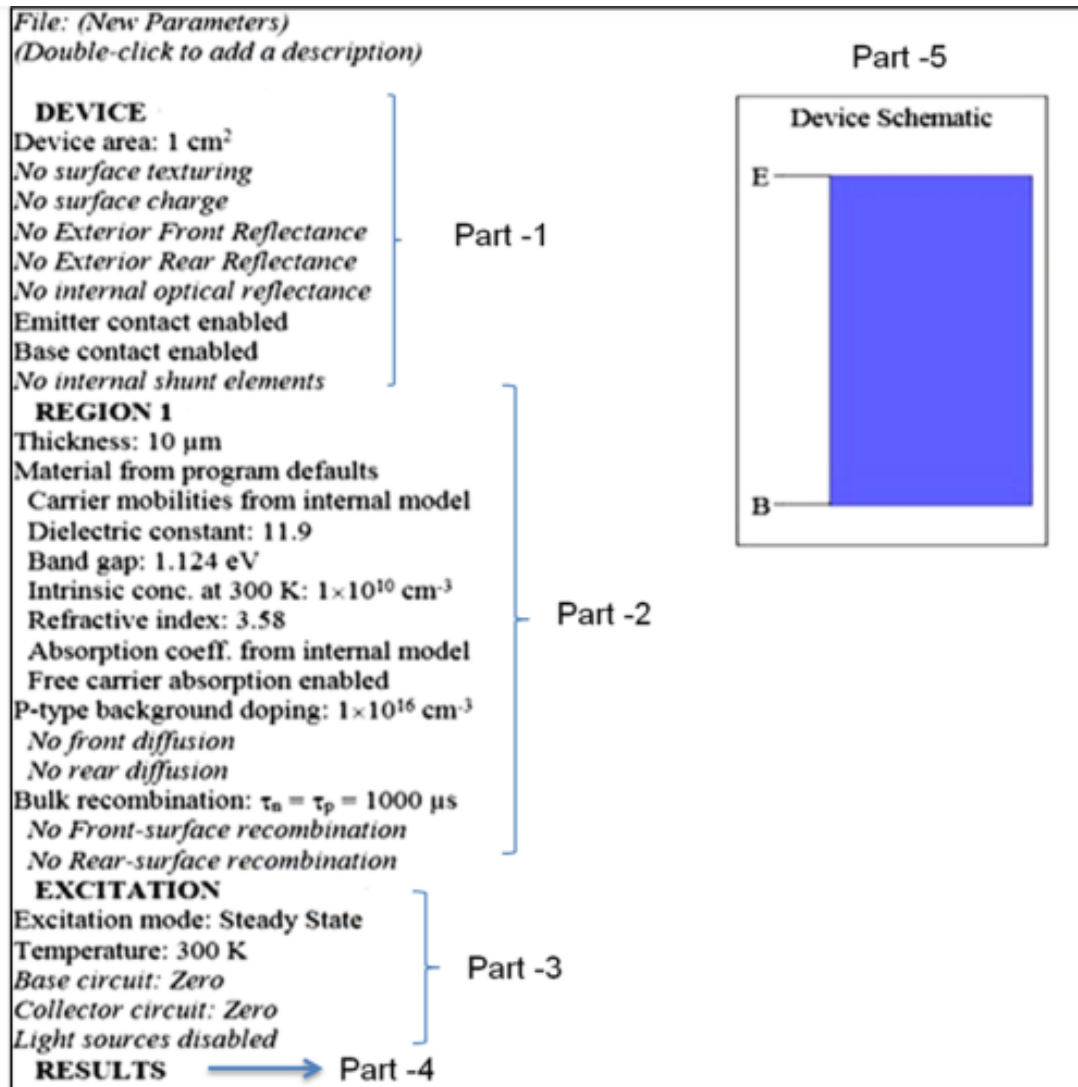


Figure III.1: La fenêtre principale de PC1D.

Nous distinguons essentiellement 5 parties :

- La partie 01 "DEVICE" : cette partie contient les informations générales sur le dispositif que nous souhaitons simuler.
- La partie 02 "REGION 1" : les paramètres essentiels liés à la région du composant du dispositif (type de matériaux utilisés, épaisseur, type de dopage, etc.) sont introduits dans cette partie. Sur la figure ci-dessus, il y a qu'une seule région, mais en peut ajouter d'autres (au maximum cinq) et supprimer, mais au moins une région doit être présente.
- La partie 03 "EXCITATION" : c'est dans cette partie que nous introduisons les paramètres d'excitation de notre dispositif, qui nous serviront à simuler son comportement. Par exemple, dans le cas des cellules solaires, c'est dans cette partie que nous résoudrons l'irradiation ainsi que la température de fonctionnement et d'autres paramètres.

- d) La partie 04 "RESULTS" : c'est dans cette partie que nous aurons notamment, après le lancement du calcul, les valeurs de J_{cc} , V_{oc} , et la puissance maximale pour la simulation des cellules solaires.
- e) La partie 05 "DEVICE SCHEMATIC" : il s'agit simplement du plan du dispositif que nous créons. Il peut changer instantanément dès que l'on touche aux paramètres des régions (par exemple, des changements de couleur en fonction du dopage).

III.3. Structure p-i-n d'une cellule solaire en polysilicium:

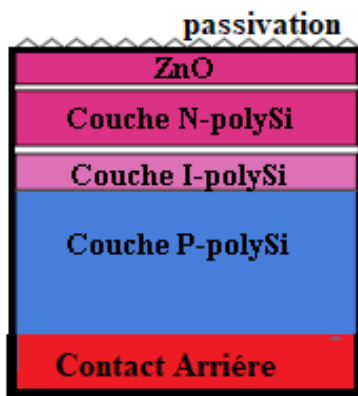


Figure III.2 : Représentation schématique de la cellule solaire simple PIN à base de polysilicium.

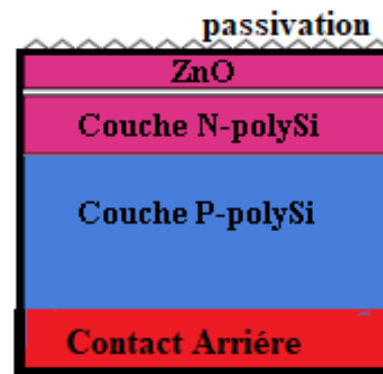


Figure III.3 : Représentation schématique de la cellule solaire simple PN à base de polysilicium.

La figure (III.2) illustre le schématique de la cellule (p-i-n) à base de (polysilicium) utilisée dans la simulation. Elle est constituée d'une couche absorbante qui est la jonction p-i-n à base de silicium polysilicium dont une couche I-polysilicium intrinsèque d'épaisseur : 0.1 μm , prise en « sandwich » entre une couche n-polysilicium d'épaisseur : 0.3 μm et une couche fenêtre p-polysilicium d'épaisseur 2 μm . Alors que la couche de contact avant est formée d'une couche d'oxyde conducteur transparent (TCO), ici c'est le ZnO que nous avons utilisé et le contact arrière est constitué d'une couche métallique hautement réfléchissante. Tandis que la figure (III.3) illustre le schématique de la cellule (pn) à base de (polysilicium) utilisé comme référence. Elle est constituée des mêmes couches que la jonction p-i-n mais sans la couche intrinsèque I.

III.4. Paramètres de simulation :

Les calculs utilisant le programme PC1D nécessitent des paramètres d'entrée, tels que, la bande interdite, la constante diélectrique, le dopage et les caractéristiques des couches qui composent la structure à simuler. Les paramètres de la cellule solaire utilisés dans cette simulation sont couramment disponibles et sont décrits dans le Tableau 1.

	n-poly Si	p-poly Si	I poly Si	ZnO
Bande Interdite (E_g)	1.3	1.3	1.3	3,37
Epaisseur(μm)	0.3	2	0.1	0.1
Constante diélectrique	11,9	11,9	11,9	9
Dopage(cm^{-3})	$1 \cdot 10^{18}$	$1 \cdot 10^{18}$	$1 \cdot 10^{15}$	10^{18}
N_C	$1,02 \cdot 10^{19}$	$1,02 \cdot 10^{19}$	$1,02 \cdot 10^{19}$	$2,2 \cdot 10^{18}$
N_V	$2,8 \cdot 10^{19}$	$2,8 \cdot 10^{19}$	$2,8 \cdot 10^{19}$	$1,8 \cdot 10^{19}$
τ_n (μs)	$2,5 \cdot 10^3$	$2,5 \cdot 10^3$	$2,5 \cdot 10^3$	$2,1 \cdot 10^{-3}$
τ_p (μs)	$2,5 \cdot 10^3$	$2,5 \cdot 10^3$	$2,5 \cdot 10^3$	$2,1 \cdot 10^{-3}$
μ_n	12	1109	12	100
μ_p	25	155	25	25

Tableau III.1. Paramètre de la cellule de référence

Après avoir simulé les deux structures PIN et PN à l'aide de PC1D, en utilisant les paramètres enregistrés dans le tableau 1, les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ des deux structures sont représentées sur les figure III.4 et III.5 respectivement. Les valeurs de densité de courant de court-circuit J_{SC} , une tension en circuit ouvert V_{OC} , un facteur de remplissage FF et un rendement η obtenus par la simulation sont répertoriés dans le tableau 2.

	PIN	PN
V_{co} (V)	0.70	0.61
J_{SC} (mA / cm^2)	19.14	18.69
FF (%)	84.75	77.60
η (%)	11.41	8.82

Tableau III-2. Résultats de simulation des deux structures PIN et PN.

On observe que l'inclusion de la couche intrinsèque dans la jonction p/n augmente la tension en circuit ouvert, la densité de courant de court-circuit J_{SC} , le facteur de forme et le

rendement de conversion η de la cellule PIN. Le rendement de conversion de puissance est estimé à (11.41%) pour l'utilisation du silicium polycristallin.

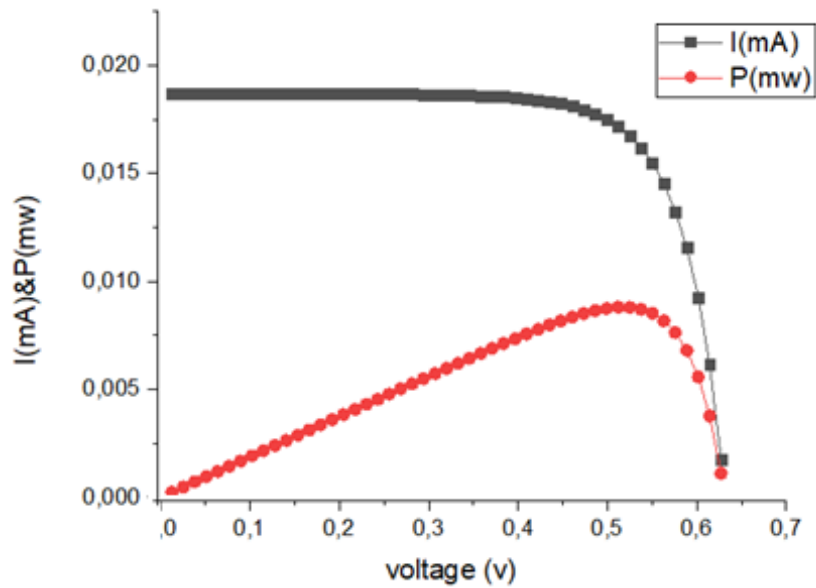


Figure III.4 : Caractéristiques I(V) et P(V) de la jonction PN.

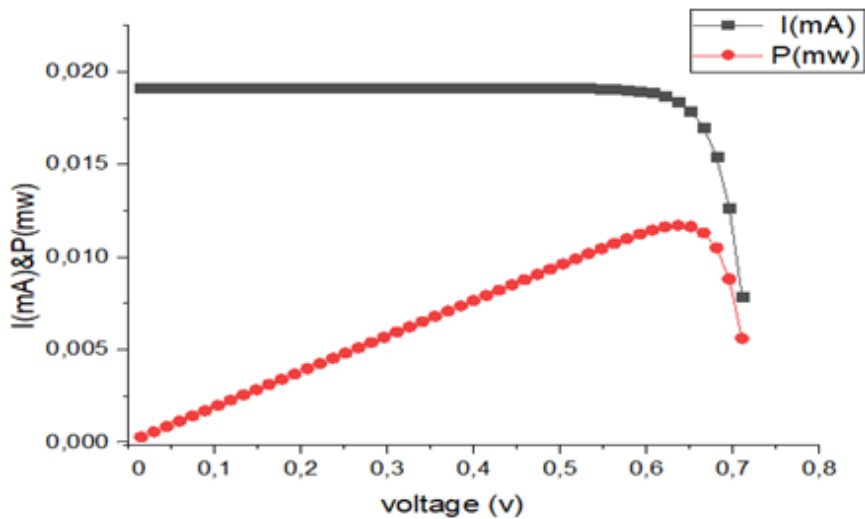


Figure III.5 : Caractéristiques I(V) et P(V) de la jonction PIN.

D'après ces résultats, on conclut que l'utilisation de la couche intrinsèque 'i' provoque une augmentation de l'efficacité de la cellule, démontrant la pertinence de cette couche dans les cellules solaires à couches minces à base de silicium polycristallin.

III.5. Les effets de la variation des paramètres géométriques et physiques sur les performances de la cellule PIN :

III.5.1. Paramètres variables pendant la simulation de la structure PIN:

A partir de la cellule de référence décrite plus haut (conventionnelle) avec un ensemble des paramètres fixes, 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 (J_{sc} , V_{oc} , FF et le rendement η). L'ensemble des variations est résumé dans le tableau III.3.

Les paramètres	L'intervalle de variation
Épaisseur de la région N-polySi (μm)	[0.1, 15]
Épaisseur de la région I-polySi (μm)	[0.05, 05]
Épaisseur de la région P-polySi (μm)	[0.5, 20]
Température (k)	[300, 410]
τ_p de la région I-polySi (μs)	[05, 30]

Tableau III.3. Paramètres variables pendant la simulation

III.5.2. L'influence de l'épaisseur de la région N-polySi :

Afin d'étudier l'impact de l'épaisseur de la couche N-polySi sur les différentes caractéristiques de sortie de la cellule, nous avons varié cette épaisseur dans l'intervalle $[0.1\mu\text{m}, 15\mu\text{m}]$ tout en maintenant les autres paramètres constants.

Les graphiques sur les figures (III.6, III.7, III.8, III.9) illustrent la variation du courant de court-circuit, de la tension en circuit ouvert, du rendement et du facteur de forme en fonction de l'épaisseur X de la couche N-polySi.

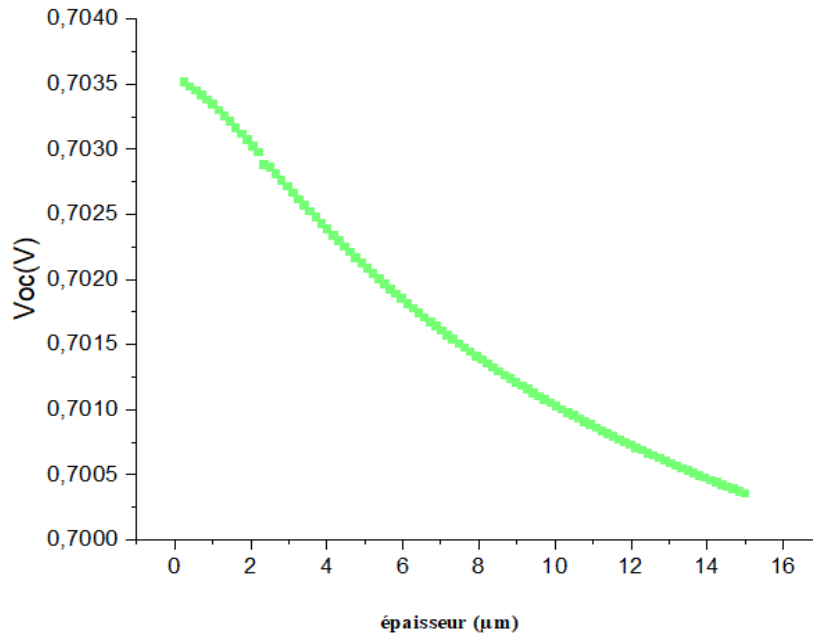


Figure III.6 : Effet de l'épaisseur de la région N-polySi sur le V_{oc} .

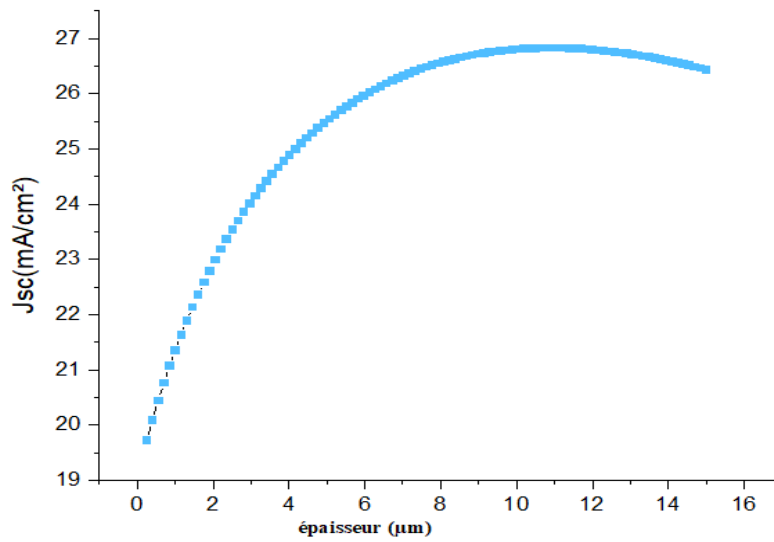


Figure III.7 : Effet de l'épaisseur de la région N-polySi sur le J_{sc} .

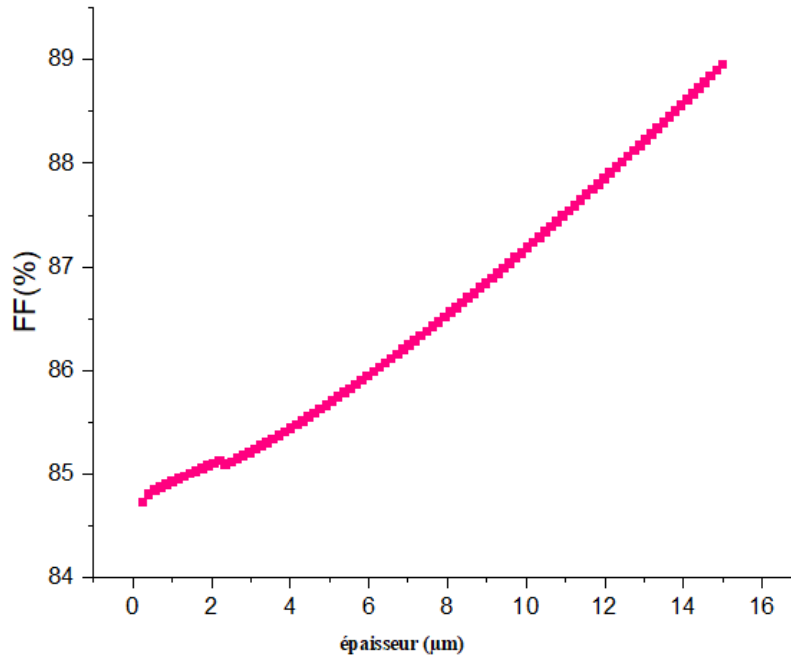


Figure III.8 : Effet de l'épaisseur de la région N-polySi sur le FF.

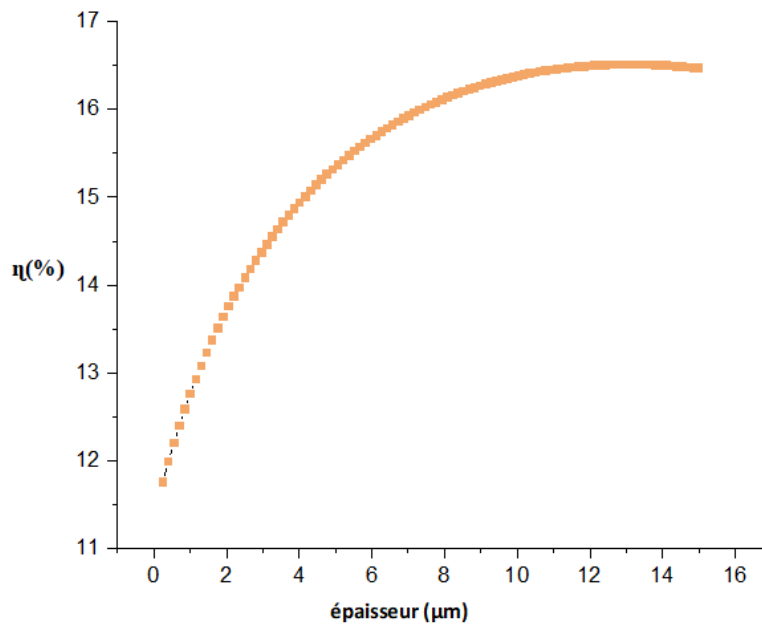


Figure III.9 : Effet de l'épaisseur de la région N-polySi sur le η .

Chapitre III : simulation d'une cellule de type PIN en polysilicium.

En général, une diminution de l'épaisseur de l'émetteur réduit la recombinaison des porteurs de charge, ce qui augmente la tension en circuit ouvert. D'après Fig.III.6, on remarque que l'augmentation de l'épaisseur de la couche N-PolySi dans l'intervalle [0.5 ; 15 μm], s'accompagne d'une légère diminution de la tension de circuit ouvert V_{co} , presque inchangeable. On peut justifier cela par une augmentation de la densité de défauts, qui influence négativement sur la bande interdite et provoque une transition interbande assisté par des pièges, ce qui augmente la recombinaison des charges et influe négativement sur la tension en circuit ouvert.

En général, une augmentation de l'épaisseur de l'émetteur peut augmenter le nombre de pair électron-trou générés, ce qui augmente le courant de court-circuit. Cependant, il existe une limite à cette augmentation, car une trop grande épaisseur peut entraîner une recombinaison des porteurs de charge avant qu'ils soient collectés, ce qui limite également le courant de court-circuit. D'après Fig.III.7. on constate que la densité de courant de court circuit est proportionnelle à l'épaisseur de la couche N-PolySi, jusqu'à la valeur 10 μm , on peut justifier cela par une meilleure absorption optique, qui augmente avec l'épaisseur de cette couche. Arrivant à un certain niveau, la densité de courant de court circuit reste presque inchangée et commence à se dégrader lentement, vu qu'une très grande épaisseur de la couche absorbante N-PolySi va impliquer une réduction du courant.

Ce qui peut être expliqué par le fait que la distance parcourue par les photoporteurs augmente avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche absorbante, qui devient supérieure à la longueur de diffusion de la jonction et la probabilité de collecte devient assez faible réduisant ainsi la probabilité de leur collection. La longueur de diffusion, qui est un paramètre important pour les performances des cellules solaires, est définie comme la distance moyenne que les porteurs peuvent parcourir depuis le point de génération avant de se recombiner [3].

On peut aussi remarquer sur Fig.III.8 que le facteur de forme a connu une légère augmentation lorsqu'on augmente l'épaisseur de la couche N-PolySi, ceci est causé par une augmentation de nombre de pair électron-trou générés, qui permet hisser le facteur de forme.

D'après Fig.III.9, nous constatons que le rendement de conversion de la cellule solaire augmente progressivement avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche N-PolySi, jusqu'à où il atteint sa valeur maximale de 16,5% à une épaisseur de 12 μm , puis il se fixe pour commencer à diminuer au fur et à mesure qu'on augmente l'épaisseur de la couche N-PolySi. Donc cette valeur de l'épaisseur est suffisante pour exploiter une large gamme du spectre solaire.

III.5.3. L'influence de l'épaisseur de la région I-polySi :

Afin d'étudier l'impact de l'épaisseur de la couche I sur les différentes caractéristiques de sortie de la cellule, nous avons varié cette épaisseur dans l'intervalle $[0.05\mu\text{m}, 0.5\mu\text{m}]$ tout en maintenant les autres paramètres constants. Les graphiques (III.10 à III.13) illustrent la variation du courant de court-circuit, de la tension en circuit ouvert, du rendement et du facteur de forme en fonction de l'épaisseur X de la couche I.

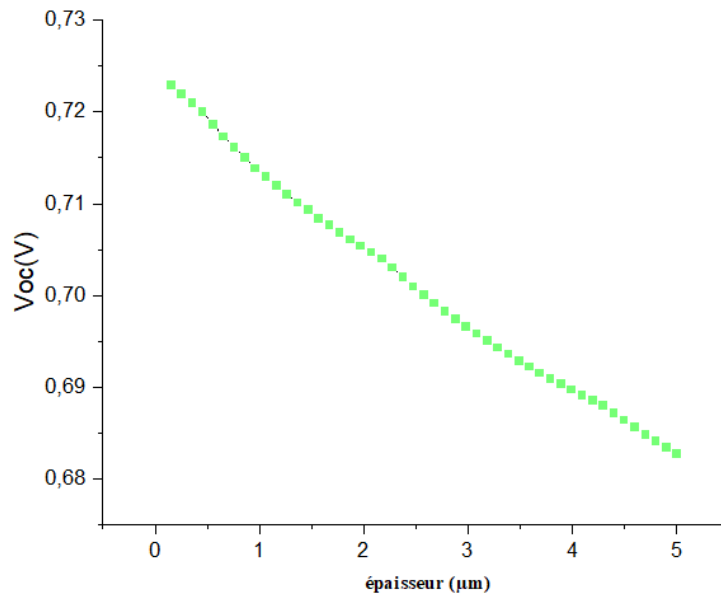


Figure III.10 : Effet de l'épaisseur de la région I-polySi sur le V_{co} .

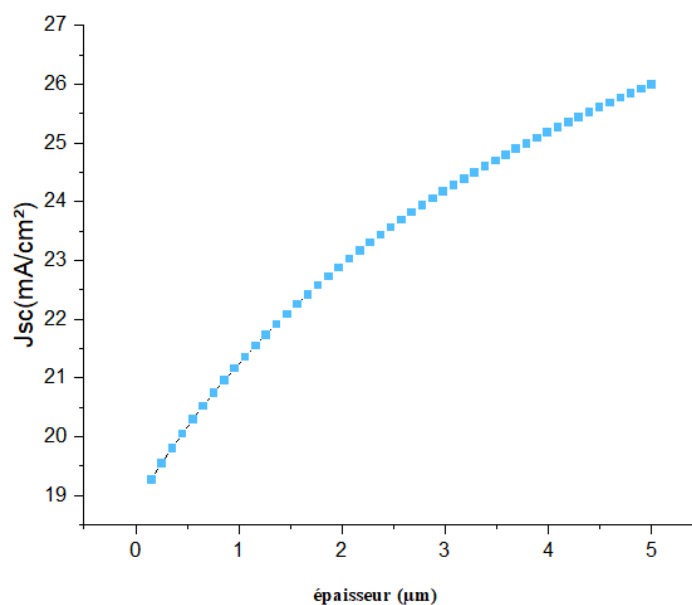


Figure III.11 : Effet de l'épaisseur de la région I-polySi sur le J_{cc} .

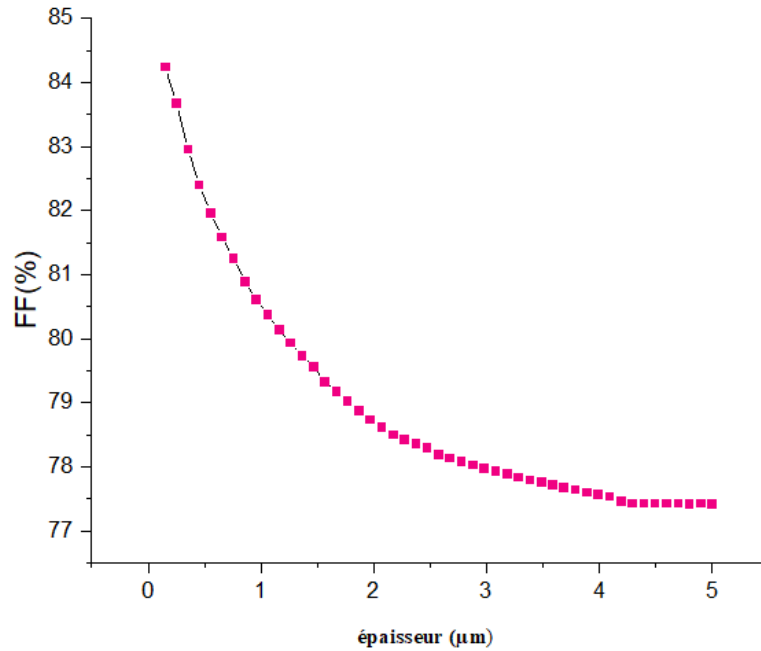


Figure III.12 : Effet de l'épaisseur de la région I-polySi sur le FF .

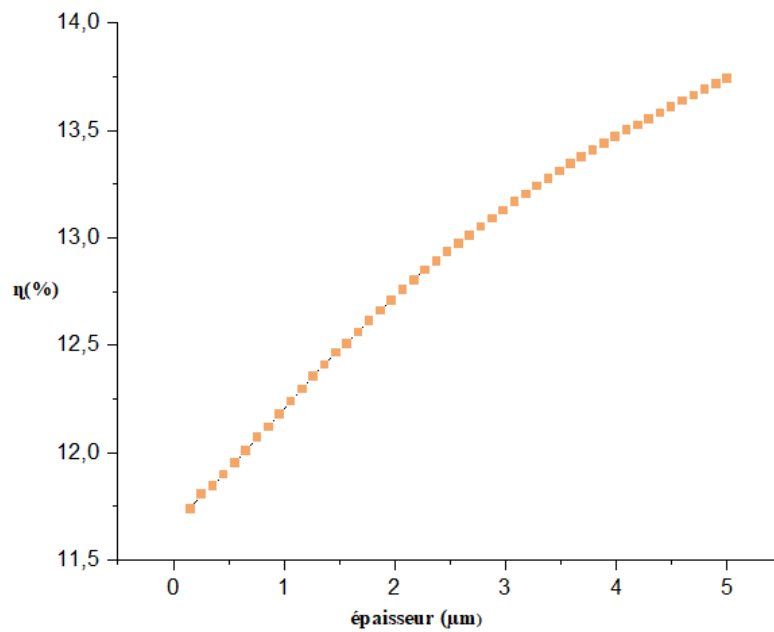


Figure III.13 : Effet de l'épaisseur de la région I-polySi sur le η .

D'après les figures III.10 A III.13 on remarque que l'augmentation de l'épaisseur de la couche active s'accompagne d'une diminution progressive de la tension V_{CO} et du facteur de

forme FF , et d'autre part une augmentation de la densité de courant de court-circuit J_{cc} et du rendement η , ce qui est en accord avec la littérature [4, 5].

La diminution de V_{co} avec l'épaisseur peut être provoquée par une augmentation de la densité de défauts dans la couche active qui s'accompagne de l'augmentation des recombinaisons dans cette couche ainsi que l'augmentation de courant de saturation I_0 . Quant à la diminution du facteur de forme FF , elle peut être due à l'augmentation de la résistance série R_s dans la cellule.

L'augmentation du courant J_{cc} peut être expliquée par le fait que lorsque l'épaisseur X augmente, le nombre de photons absorbés augmente, de fait que les grandes épaisseurs de la couche I assure un champ électrique interne élevé pour collecter les porteurs photosensibles et éviter une réduction sévère de l'efficacité induite par la lumière [6].

III.5.4. L'influence de l'épaisseur de la région P-polySi :

Afin d'étudier l'impact de l'épaisseur de la couche P sur les différentes caractéristiques de sortie de la cellule, nous avons fait varier cette épaisseur dans l'intervalle $[0.5\mu\text{m}, 20\mu\text{m}]$ tout en maintenant les autres paramètres constants. Les graphiques (III.14, III.15, III.16, III.17) illustrent la variation du courant de court-circuit, de la tension en circuit ouvert, du rendement et du facteur de forme en fonction de l'épaisseur X de la couche P.

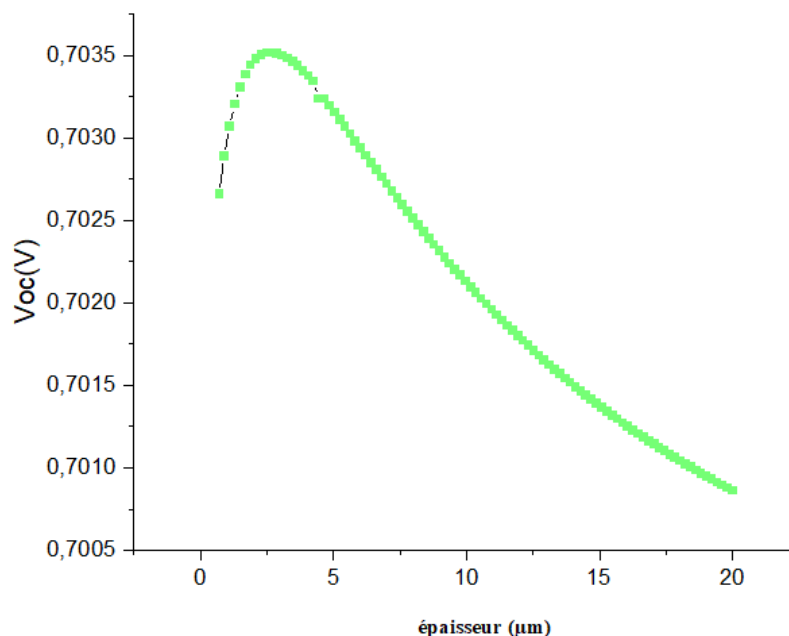


Figure III.14 : Effet de l'épaisseur de la région P-polySi sur le V_{co} .

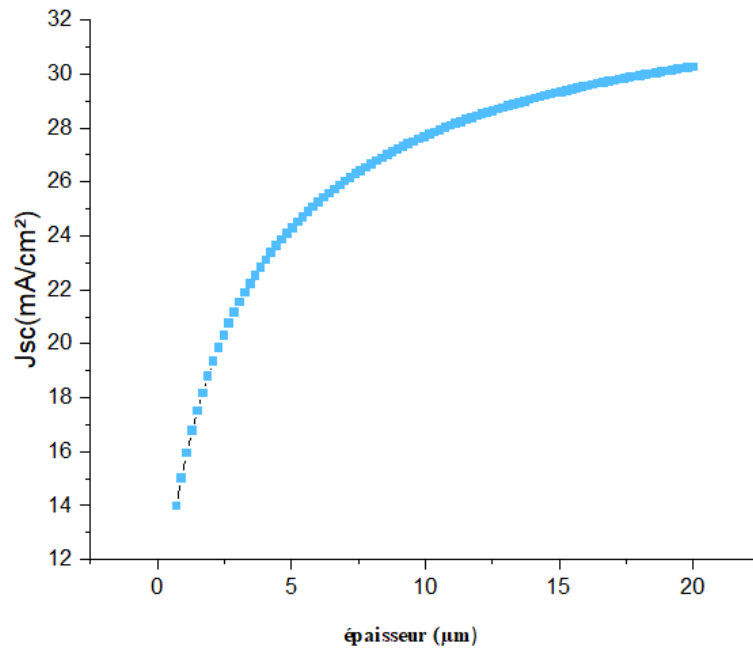


Figure III.15 : Effet de l'épaisseur de la région P-polySi sur le J_{sc} .

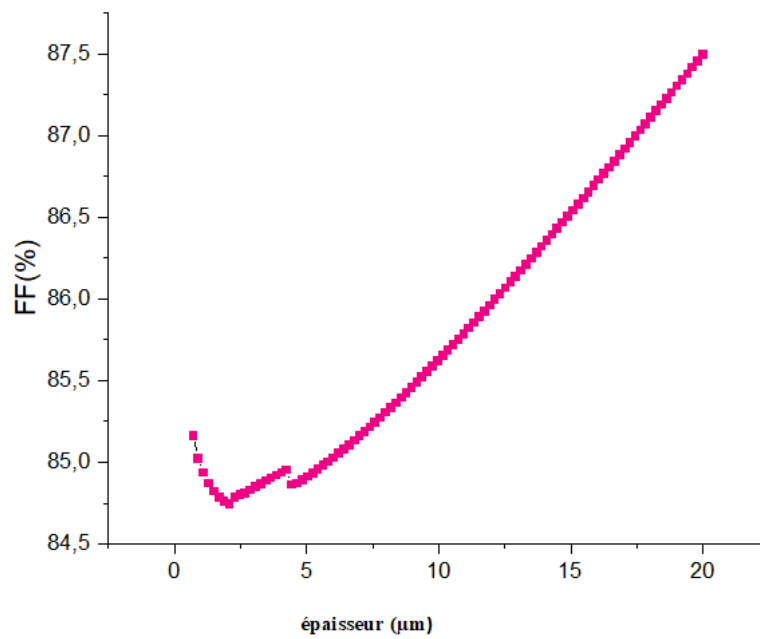


Figure III.16 : Effet de l'épaisseur de la région P-polySi sur le FF .

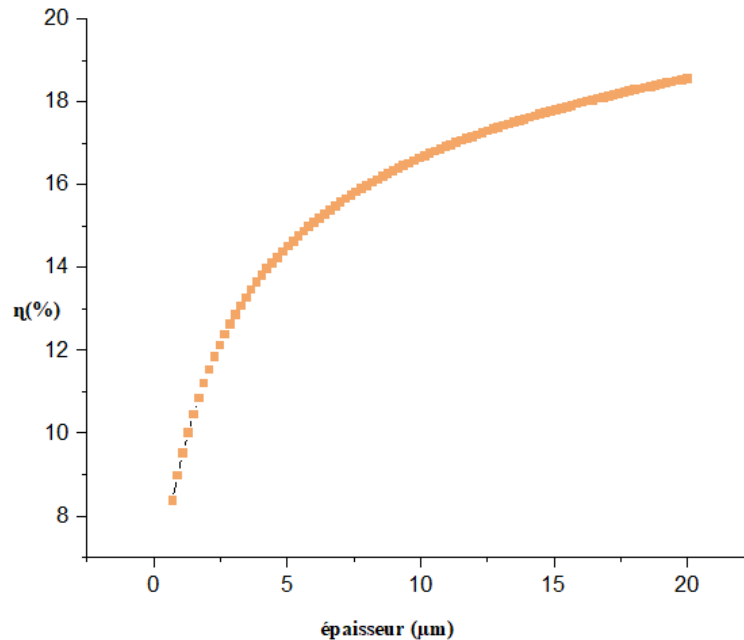


Figure III.17 : effet de l'épaisseur de la région P-polySi sur le rendement.

Il a été constaté que même de petits changements dans l'épaisseur de la base des cellules solaires entraînent une variation notable de I_{sc} et V_{oc} et cela affecte les performances globales des cellules solaires [7]. L'essentiel du spectre solaire utile pour le silicium reçu au sol est collecté par la base. Il faut donc privilégier cette zone. Parmi les solutions idoines pour l'optimisation de la base, c'est de varier son épaisseur.

D'après la Fig.III.14, nous remarquons que le V_{oc} augmente avec l'augmentation de l'épaisseur de la région P-PolySi jusqu'à une épaisseur de 2,5 μm puis il commence à diminuer avec l'augmentation de l'épaisseur X . Cependant, une diminution de l'épaisseur de la base peut réduire la zone de déplétion de la jonction PN, ce qui peut entraîner une augmentation de la tension en circuit ouvert. Cependant, une trop grande épaisseur de la base peut également augmenter les pertes par recombinaison et une augmentation de la valeur de la résistance série et affecter négativement la tension en circuit ouvert.

La figure III.15 suggère que le courant de court-circuit augmente avec la croissance de l'épaisseur dans l'intervalle [0,5, 20 μm] de la région P-PolySi. Avec l'augmentation de l'épaisseur de la base, plus de photons sont absorbés par la cellule (au lieu de pénétrer dans la cellule), excitant plus d'électrons dans la bande de conduction, ce qui augmente l' J_{sc} .

On peut aussi remarquer sur la Fig.III.16, que le facteur de forme a connu une légère diminution lorsqu'on augmente l'épaisseur de la couche P-polySi jusqu'à $2.5 \mu m$, puis il commence à augmenter au fur et à mesure qu'on augmente l'épaisseur de la couche P-polySi, ceci est causé par une augmentation de la valeur de la résistance série au début, puis plus de photons sont absorbés par la cellule avec augmentation de l'épaisseur de la couche absorbante, ceci permet d'augmenter le facteur de forme.

Le rendement quant à lui suit les variations du courant de court circuit J_{cc} en montrant une nette augmentation, par conséquent, cette épaisseur permet de tirer profit d'une vaste gamme du spectre solaire. Ceci peut s'expliquer par le fait que cette épaisseur est suffisante pour exploiter une large gamme du spectre solaire permettant d'atteindre un rendement de 18.9% et ce résultat indique que l'épaisseur optimale de la région de base devrait être la plus large possible.

En bref, afin de gagner suffisamment de photons pour exciter des paires électron-trou, une certaine épaisseur de base est nécessaire. Cependant, dans une cellule plus épaisse fait apparaître une résistance élevée et un coût élevé. Ainsi, l'amplitude de l'épaisseur de base doit être maintenue à environ $15 \mu m$.

III.5.5. L'influence de la durée de vie des porteurs de charge dans la région I :

Afin d'étudier l'impact de la durée de vie des porteurs de charge minoritaires de la région I, nous avons varié cette vitesse dans l'intervalle $[5\mu s, 30\mu s]$ tout en maintenant les autres paramètres constants.

Les graphiques des figures (III.18, III.19, III.20, III.21) illustrent la variation du courant de court-circuit, de la tension en circuit ouvert, du rendement et du facteur de forme en fonction de la durée de vie.

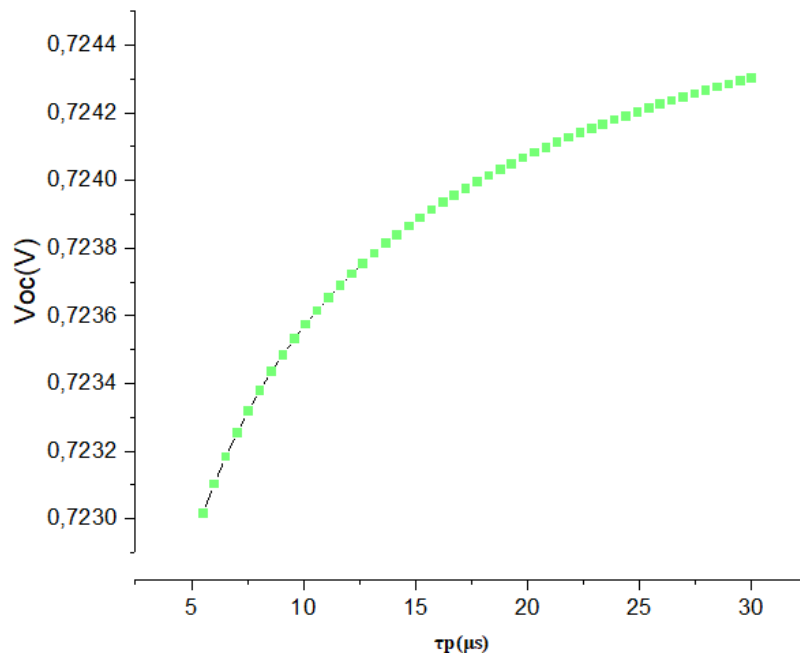


Figure III.18 : Effet de la durée de vie des porteurs de charge dans la région I sur le V_{co} .

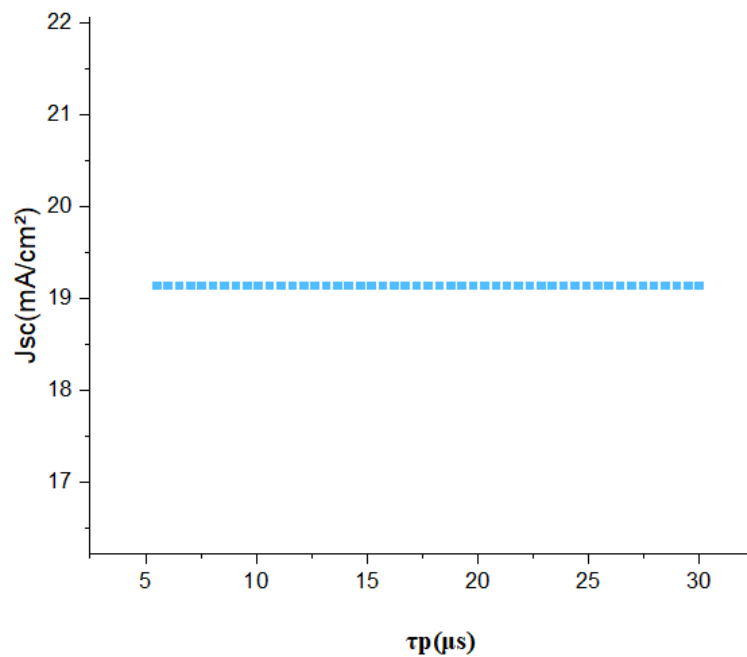


Figure III.19 : Effet de la durée de vie des porteurs de charge dans la région I sur sur le J_{cc} .

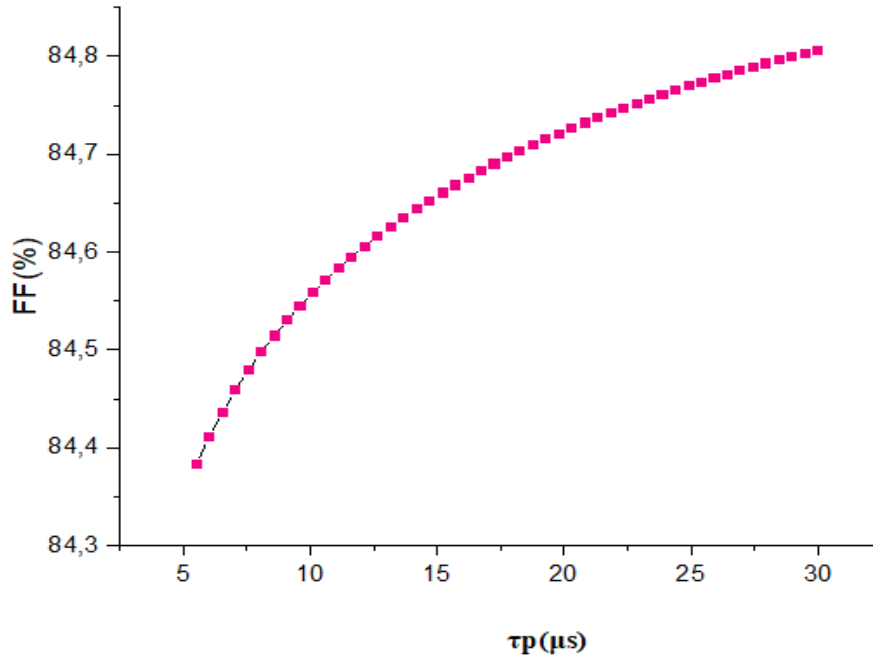


Figure III.20 : Effet de la durée de vie des porteurs de charge dans la région I sur sur le FF .

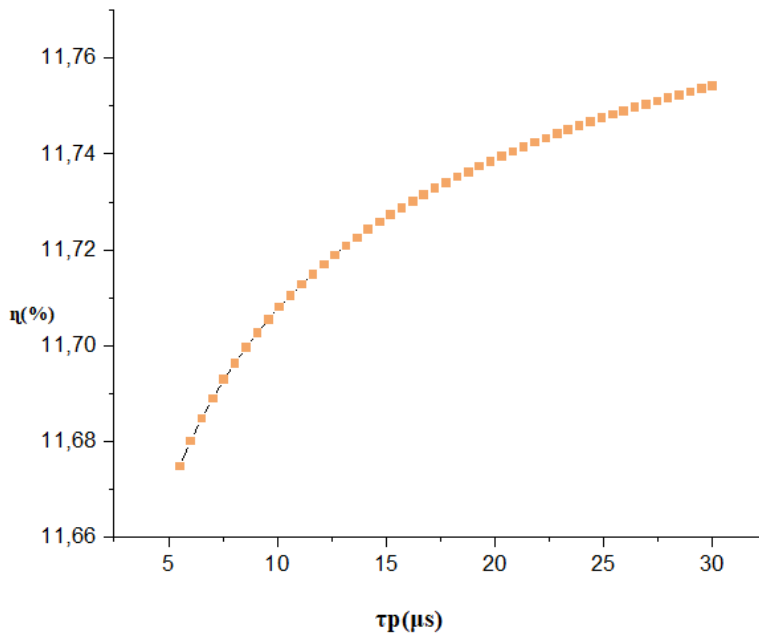


Figure III.21 : Effet de la durée de vie des porteurs de charge dans la région I sur η .

D'après les résultats obtenus sur les figures III.18 à III.21, on constate que les paramètres de la cellule (rendement, le facteur de forme, le courant court-circuit et la tension de court-circuit) dépendent fortement de la durée de vie (τ) vie des minoritaires. Le rendement, la tension du circuit ouvert et le facteur de forme augmentent avec l'augmentation

de la durée de vie. Cependant, une durée de vie des porteurs minoritaires plus longue dans une cellule solaire contribue à maintenir une tension de circuit ouvert plus élevée, ce qui est bénéfique pour l'efficacité globale de la cellule solaire, un résultat qui peut être interprété par l'élimination des recombinaisons en volume. Si la durée de vie des porteurs minoritaires est courte, cela signifie qu'ils se recombinent rapidement avec les porteurs majoritaires, réduisant ainsi le courant électrique et la tension de la cellule solaire. En conséquence, la V_{co} sera plus faible.

Sur la figure III.19, nous constatons que lorsque la durée de vie des porteurs minoritaires dans la couche intrinsèque augmente, le courant de court-circuit reste constant car l'augmentation du nombre de porteurs minoritaires contribuant au courant est compensée par la diminution de la densité de courant de chaque porteur.

III.5.6. L'influence de la température T :

L'influence de la température de fonctionnement sur la réponse électrique de la cellule solaire est significative et ne peut être négligée. Afin d'étudier cette influence sur les paramètres de la cellule, nous avons fait varier la température tout en maintenant les autres paramètres constants.

Les résultats de cette variation de température sur le courant de court-circuit, la tension en circuit ouvert, le rendement η et le facteur de forme sont présentés sur les figures III.22, III.23, III.24 et III.25 ci-dessous.

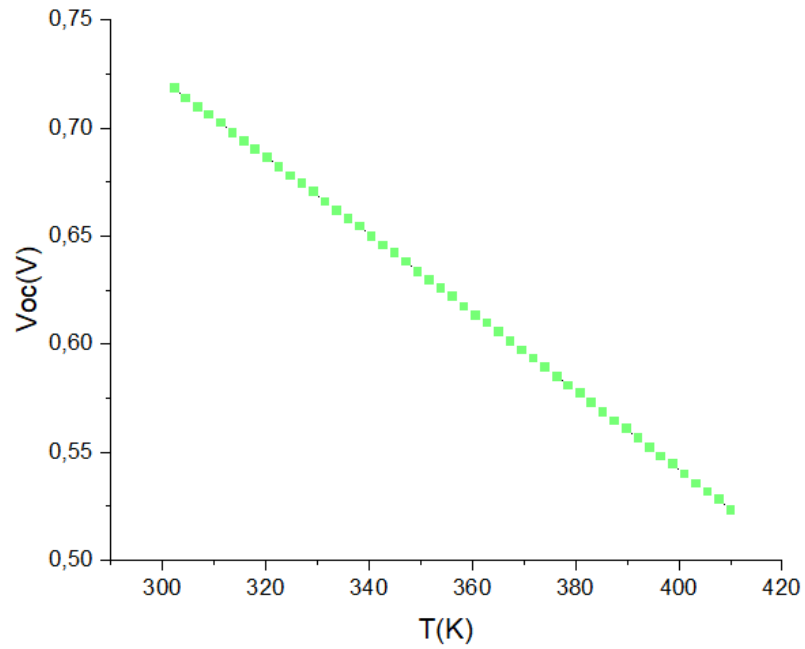


Figure III.22 : Effet de la température sur la tension en circuit ouvert.

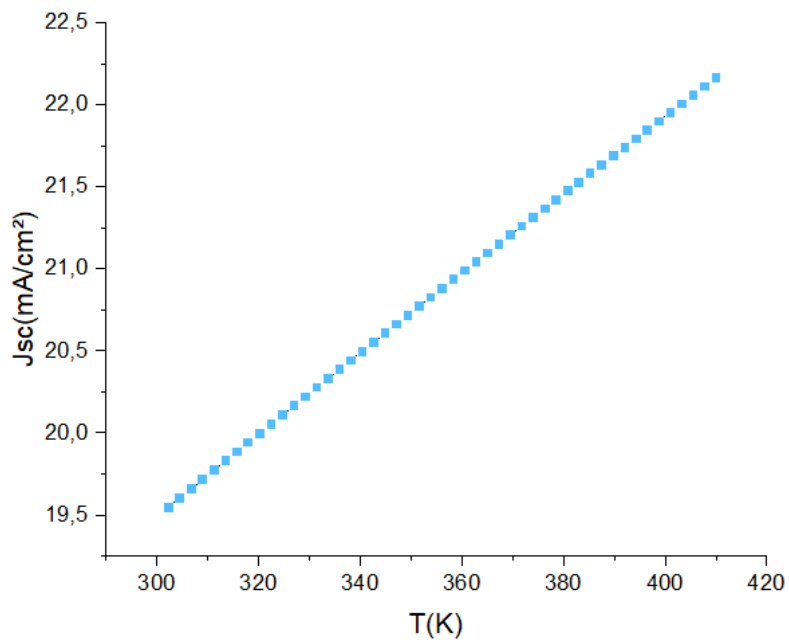


Figure III.23 : Effet de la température sur le courant de court-circuit..

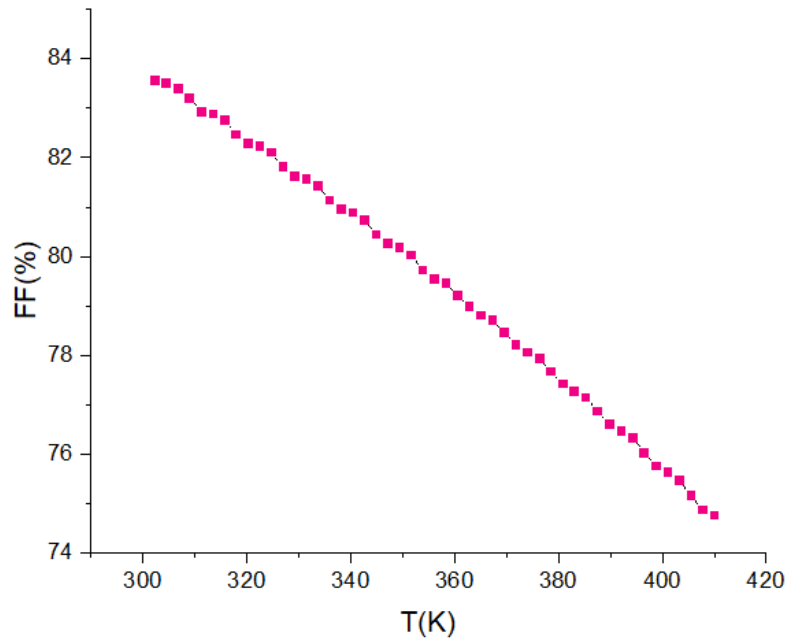


Figure III.24 : Effet de la température sur la tension en circuit ouvert.

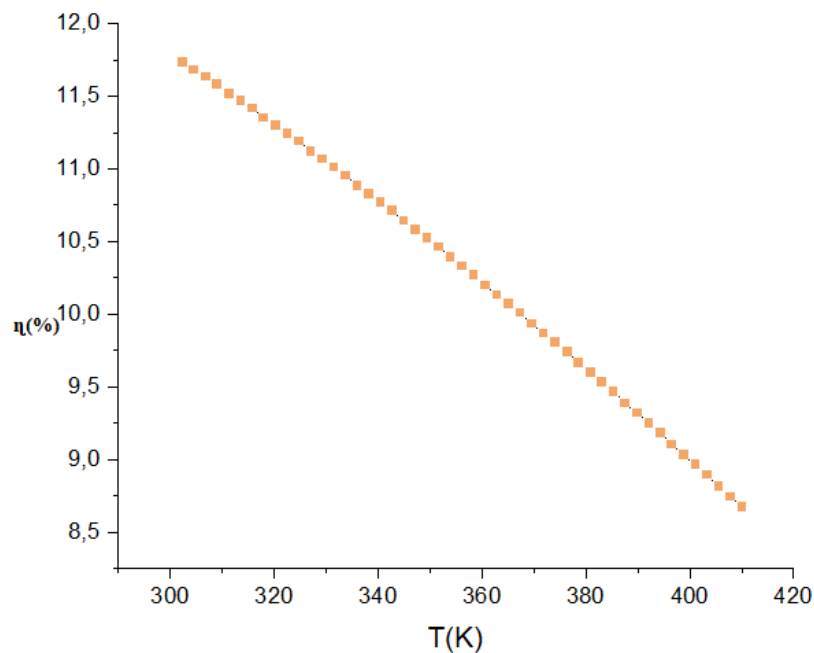


Figure III.25 : Effet de la température sur le rendement.

L'effet dominant pour la dépendance à la température des cellules solaires au silicium est la dépendance à la température de l'énergie de la bande interdite du silicium. Pour la

Chapitre III : simulation d'une cellule de type PIN en polysilicium.

plupart des semi-conducteurs, y compris le silicium, l'énergie de la bande interdite diminue avec l'augmentation de la température [8] :

$$E_g(T) = E_{g0} + \frac{\alpha T^2}{\beta + T} \quad \text{III.1}$$

où E_{g0} est l'énergie de la bande interdite à 0 K, et α et β sont des paramètres matériels.

Le deuxième effet de la température est une augmentation du taux de recombinaison des porteurs. Le premier changement a pour effet d'augmenter le courant de court-circuit I_{sc} de la cellule alors que le second diminue la tension en circuit ouvert V_{co} en augmentant le courant de saturation. Ces deux changements principaux ont des effets inverses : l'augmentation de I_{sc} tend à augmenter le rendement alors que la diminution de V_{co} tend à réduire le rendement. L'effet net est une diminution du rendement. Ces dernières prennent la forme [9], soit :

$$\eta_T = \eta_0 [1 - \beta_0 (T - T_0)] \quad \text{III.2}$$

où η_0 est le rendement à la température de référence T_0 . β_0 est un coefficient calculé théoriquement ou mesuré expérimentalement.

Les graphiques sur les figures III-22, III-23, III-24 et III-25 présentent de manière évidente la dégradation des caractéristiques de la cellule photovoltaïque ainsi que l'effet néfaste d'une température élevée qui montre que nos résultats sont conformes à la littérature. Cette dégradation est principalement due à la diminution de la tension en circuit ouvert et du courant de saturation, qui sont implicitement liés à la température, cette liaison on peut la traduire par la relation suivante [9] :

$$J_0 = B.T^3 \exp\left(\frac{-E_{g0}}{KT}\right) \quad \text{III.3}$$

Avec B une constante indépendante de la température mais dépendante des paramètres du transport du matériau.

En revanche, on observe une amélioration du fonctionnement de la cellule photovoltaïque à basse température. On peut donc en conclure que les cellules solaires sont optimisées pour un meilleur fonctionnement dans des environnements froids et ensoleillés.

III.6. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons réalisé une étude des performances d'une cellule solaire à jonction PIN par des simulations numériques. Les résultats de simulation ont clairement montré que l'insertion d'une couche intrinsèque à la jonction PN améliore les performances de la cellule solaire. Nous avons aussi montré que l'épaisseur de la zone intrinsèque et le taux de recombinaison des porteurs minoritaires jouent un rôle important dans les performances de la cellule.

Nous avons étudié ensuite, l'effet de l'épaisseur des couches absorbante P et N dans le but d'optimiser les performances de la cellule. En analysant les résultats obtenus, il est clair que la variation de l'épaisseur des différentes couches a une influence significative sur ses paramètres de sortie tels que le courant de court-circuit, la tension en circuit ouvert, le facteur de forme et le rendement η .

On a également observé que des températures élevées détériorent les performances de la cellule solaire, tandis que des températures basses favorisent son bon fonctionnement. Par conséquent, nous pouvons conclure que les cellules solaires fonctionnent de manière optimale dans des environnements à la fois froids et ensoleillés.

III.7. Références bibliographies :

- [1] A. Bensmaine, « investigation de l'ingénierie de bandes des cellules solaires à hétérojonction a-Si : H/ cSi : modélisation et simulation numérique », thèse de doctorat, université de SIDI BELABBES, 2018.
- [2] M. BELARBI and all, "simulation of the solar cells with pc1d, application to cells based on silicon "université de Abou Bekr Belkaid-Tlemcen.
- [3] C. Battaglia, A. Cuevas, and S.D. Wolf, *Energy Environ. Sci.* 2016.
- [4] M. I. Kabir, Z. Ibrahim, K. Sopian, N. Amin," Effect of Structural variations in Amorphous Silicon Based Single and Multi-junction Solar cells From Numerical Analysis" ,Solar Ener. Mater. Solar Cells, 2010.
- [5] A. Fantonia, M.Vieraa, R.Martinsb, " Influence Of The Intrinsic Layer Characteristics On a-Si:H p-i-n Solar Cell Performance Analyzed by means of a computer simulation", Solar Energy Materials & Solar Cells, 2002.
- [6] F. Hammour, A. Belfar ,H. Aït-kaci " Effet des caractéristiques de la couche tampon p-nc-SiOx :H sur les performances d'une cellule solaire à base de aa-Si :H", Revue des Energies Renouvelables SIENR'18, Ghardaïa , 2018.
- [7] M. Wolf, and E.L. Ralph, IEEE Trans. Electron. Devices, 1965.
- [8] Y. P. Varshni, "Temperature dependence of the energy gap in semiconductors," Physica, 1967.
- [9] Van Dyk, E. E., Meyer, E. L., Leitch, A. W. R. et Scott, B. J. Temperature dependence of performance of crystalline silicon photovoltaic modules. *South African Journal of Science*, 2000.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Les avantages environnementaux et sociaux de disponibilité des énergies renouvelables, tels que l'énergie photovoltaïque ont attiré un intérêt grandissant pour le développement du photovoltaïque (PV) ces dernières années. Cette tendance s'est renforcée récemment, avec l'électricité photovoltaïque devenant également un choix économiquement viable pour les fournisseurs d'énergie. Cette évolution stimule l'augmentation des efforts de caractérisation du PV, visant à comprendre de manière approfondie et globale les performances et la fiabilité du PV, depuis les propriétés atomiques jusqu'aux niveaux des modules.

La caractérisation multi-échelle prend une part importante dans l'amélioration ciblée des systèmes PV et nécessite l'utilisation de méthodes complémentaires pour identifier les implications de performance résultant de divers aspects tels que les couches de dispositifs spécifiques, les composants, les défauts, les interfaces, les additifs, etc. Pour mieux comprendre la relation entre la fonction des semi-conducteurs et la structure à l'échelle micro/nano, il serait avantageux de développer davantage la sensibilité chimique et d'atteindre une résolution spatiale élevée. Ces améliorations profiteraient à la communauté en permettant une meilleure compréhension des performances des semi-conducteurs.

En outre, faciliter l'accès à ces capacités de caractérisation pour un éventail plus large de non-spécialistes est essentiel pour parvenir à une compréhension globale grâce à une plus grande statistique. Cela aidera une utilisation plus large de l'énergie solaire en permettant à un plus grand nombre de chercheurs de contribuer à l'amélioration de la technologie PV.

Dans le but de diminuer le prix de l'électricité générée par les cellules solaires photovoltaïques, répondre aux besoins des nouveaux utilisateurs et pour atteindre une technologie durable, respectueuse de l'environnement et économiquement avantageuse, il est nécessaire de développer les instruments non traditionnels et adaptés à des environnements extérieurs et poursuivre les investissements et les améliorations dans ce domaine, quel que soit le type de cellule solaire utilisé.

L'objectif de notre travail concerne l'étude et la simulation d'une cellule solaire en silicium polycristallin de structure PIN en utilisant le simulateur PC1D, en se basant sur l'étude de l'influence des paramètres géométriques et physiques sur les paramètres de sortie de la cellule.

Conclusion générale

Afin de bien comprendre l'objectif étendu de la partie simulation, une étude théorique préalable a été présentée. Cependant, dans le premier chapitre nous avons fait une étude sur la cellule solaire, sa modélisation et son principe de fonctionnement, ses propriétés optiques, ses constituants de base et les facteurs qui limitent son rendement. Dans le second chapitre, on a présenté les cellules photovoltaïques en couches minces à base de silicium polycristallin, en se basant sur les différents états de silicium, les propriétés du silicium polycristallin et la théorie des cellules PIN. Dans le dernier chapitre nous avons étudié les performances de la cellule solaire (J_{sc} , V_{oc} , FF et η) en fonction de l'épaisseur des régions P, I et N, la vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires ainsi que de la température T.

D'après les résultats obtenu on a conclu que :

- L'inclusion de la couche intrinsèque dans la jonction p/n améliore la tension en circuit ouvert, la densité de courant de court-circuit J_{sc} , le facteur de forme et le rendement de conversion.
- La variation de l'épaisseur de la cellule solaire a une influence significative sur ses paramètres de sortie tels que le courant de court-circuit, la tension en circuit ouvert, le facteur de forme et le rendement η car l'augmentation de l'épaisseur du substrat est un avantage pour absorber plus de photons.
- La vitesse de recombinaison joue un rôle majeur dans le rendement de la cellule solaire.
- Les cellules solaires fonctionnent de manière optimale dans des environnements à la fois froids et ensoleillés.

Résumé

Dans ce travail nous avons procédé à l'étude de l'effet des paramètres géométriques et physiques sur les performances d'une cellule photovoltaïque à base de silicium polycristallin de structure PIN par simulation en utilisant le programme PC1D. Cependant, l'inclusion de la couche intrinsèque I dans la jonction PN permet d'augmenter les performances de la cellule à travers l'amélioration des paramètres de sortie de la cellule (V_{oc} , J_{sc} , FF et η). Par conséquent, l'amélioration du rendement est liée à l'optimisation de différents paramètres de la cellule comme l'épaisseur, la vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires ainsi que la température.

Les mots clés : logiciel PC1D, cellule photovoltaïque, silicium polycristallin, la structure PIN, la jonction PN, V_{oc} , J_{sc} , FF , η , l'épaisseur, le taux de recombinaison et la température.

Abstract

In this work, we have studied the effect of geometric and physical parameters on the performance of a photovoltaic cell based on polycrystalline silicon of PIN structure by simulation using the PC1D program. However, the inclusion of the intrinsic layer I in the PN junction makes it possible to increase the performance of the cell through the improvement of the output parameters of the cell (V_{oc} , J_{sc} , FF and η). Therefore, the improvement of the efficiency is related to the optimization of various cell parameters such as the thickness, the recombination rate of the minority carriers as well as the temperature.

Key words: PC1D software, photovoltaic cell, polysilicon, PIN structure, PN junction, V_{oc} , J_{sc} , FF , η , thickness, recombination rate and temperature.

ملخص

يساهم هذا العمل في دراسة تأثير الإعدادات الهندسية والفيزيائية للخلية الشمسية ذات التركيبة PIN عن طريق المحاكاة باستخدام برنامج PC1D. أوضحت الدراسة أن إدراج الطبقة الجوهرية I في التركيبة PN يسمح بزيادة أداء الخلية من خلال تحسين إعدادات الخرج الخاصة بها (V_{oc} , J_{sc} , FF و η). و بالتالي تحسين المردود يتعلق بتحسين الإعدادات المختلفة للخلية مثل السُمك، معدل إعادة التركيب لحاملات الأقلية بالإضافة إلى درجة الحرارة.

الكلمات المفتاحية : السيليكون متعدد الكريستالات، الخلايا الكهروضوئية، التركيبة PIN ، برنامج PC1D ،

التركيبة PN ، إعدادات الخرج (V_{oc} ، J_{sc} ، FF ، η) .