

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



Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées
Département de physique

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master en : physique

Filière : Physique

Spécialité : physique des matériaux

Thème :

*Etude comparative des cellules photovoltaïques
en silicium polycristallin et en silicium amorphe*

Présenté par :

BENKOUIDER Chahrazad

Devant le jury composé de :

Mr HAMMA Issam	MCB	UAMOB	President
Mr ZERIGUI Djamel	MCB	UAMOB	Rapporteur
Mr MADI Djamel	PROF	UMMOB	Co-Rapporteur
Melle BOUDAUD Chahrazad	MAA	UAMOB	Examineur
Mr KHELFAANE Hocine	MCB	UAMOB	Examineur
Mm MAHDID Saida	MAA	UAMOB	Invitée

Année Universitaire 2020/2021

Remerciements

A toi seigneur DIEU le tout puissant créateur du ciel et de la terre. Je te remercie pour m'avoir donnée la volonté et surtout le courage de mener dans de bonnes conditions ce travail.

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

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

*J'exprime ma profonde reconnaissance à monsieur **HAMMA Issam** enseignant au département de Physique de m'avoir fait l'honneur de présider le jury de ce mémoire.*

*Je tiens également à remercier monsieur **KHELFANE Hocine** et Melle **BOUDAOUD Chahrazad** enseignants au département de Physique pour avoir aimablement accepté de prendre part au jury en tant qu'examineurs.*

*Invite ; sans oublier de remercier madame **MAHDID Saïda** pour avoir accepté de prendre part au jury en tant qu'invitée d'honneur.*

A celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, mon cher papa.

A la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur ; maman que j'adore.

A mes sœurs et mes frères.



Dédicace

*Avec un énorme plaisir, un cœur ouvert et une immense joie, que je dédie
mon 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.*

A mes sœurs : Amel, Marwa, Rihab et Ahlem

A mes frères : Ahmed et Abd elmoundhir

pour leurs appuis et leur encouragement.

A mes copines : Naziha, Liza, Rihab, meriem, amina,

soumia, Dounia, khadija et amira.

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

*Aux étudiants de la promotion 2^{ème} année Master physique
2020/2021 et à tous mes amis sans exception*

Chahrazad



table de matière

Remerciements	
Dédicace	
Introduction générale.....	1

Chapitre I

Notions fondamentales sur le rayonnement solaire et les semi-conducteurs

I.1 Introduction.....	3
I.2 Le soleil.....	3
I.3 Le rayonnement solaire	4
I.4 Le Spectre solaire	4
I.4.1 Constante solaire.....	5
I.4.2 Convention Air Mass.....	5
I.5 Développement du photovoltaïque en Algérie	6
I.5.1 Niveau d'enseillement en Algérie	6
I.5.2 Gisement solaire en Algérie.....	7
I.5.3 Consommation d'énergie en Algérie	8
I.5.4 Réalisations photovoltaïques en Algérie	9
I.5.4.1 Photovoltaïque dans le secteur Etatique.....	9
I.5.4.2 Photovoltaïque dans le secteur privé.....	10
I.6 Les semi-conducteurs.....	12
I.6.1 Définition.....	12
I.6.2 Semi-conducteurs intrinsèques.....	12
I.6.3 Semi-conducteurs extrinsèques	12
I.6.4 Dopage des semi-conducteurs.....	13
I.6.4.1 Semi-conducteur dopé N.....	13
I.6.4.2 Semi-conducteur dopé P	13
I.6.5 Courants dans le semi-conducteur.....	14
I.6.5.1 Courant de conduction.....	15
I.6.5.2 Courant de diffusion.....	15
I.6.5.3 Courant total dans le semi-conducteur.....	15

I.7 La jonction PN	15
I.7.1 Jonction PN abrupte.....	16
I.7.2 Jonction graduelle.....	16
I.7.3 Jonction PN polarisée	17
I.7.3.1 Polarisation directe.....	17
I.7.3.2 Polarisation inverse.....	17
I.7.4 Effet de la température.....	18
I.7.5 Courant de génération-recombinaison.....	18
I.7.6 Jonction PN sous illumination.....	20
I.8 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	20
I.8.1 L'effet photovoltaïque	20
I.8.2 La cellule solaire	21
I.8.2.1 Constituants de base d'une cellule solaire	21
I.8.2.2 Fonctionnement d'une cellule solaire	21
I.8.2.3 Réponse spectrale.....	22

Chapitre II

Le silicium en phase Amorphe et Polycristallin

II.1 Introduction	23
II.2 Différents états du silicium	23
II.2.1 Silicium mono-cristallin.....	24
II.2.2 Silicium amorphe.....	24
II.2.3 Silicium poly-cristallin.....	25
II.3 Silicium amorphe	26
II.3.1 Présentation du silicium amorphe hydrogéné	26
II.3.1.1 Structure d'a-Si : H.....	26
II.3.1.2 Diagramme de bande.....	27
II.3.2 Défauts dans le silicium amorphe hydrogéné	28
II.3.2.1 Défauts intrinsèques	28
II.3.2.1.1 Défauts de coordination	28
II.3.2.1.2 Concept d'énergie de corrélation	29
II.3.2.1.3 Densité d'états	30

II.3.2.1.4 Rôle de l'hydrogène	31
II.3.2.2 Défauts induits par le dopage	31
II.3.2.2.1 Problématique du dopage dans a-Si:H.....	31
II.3.2.2.2 Mécanisme de formation des liaisons pendantes	32
II.3.3 Propriétés électriques du silicium amorphe.....	32
II.3.3.1 Définition générale de la conductivité électrique	32
II.3.3.2 Conduction dans les états étendus	33
II.3.3.3 Hopping.....	33
II.3.3.4 Résumé des lieux et mécanismes de conduction dans a-Si:H....	
.....	34
II.4 Le silicium polycristallin.....	35
II.4.1 Propriétés structurales.....	35
II.4.1.1 Structure d'un film de silicium polycristallin	35
II.4.1.2 Effet de la température sur la taille des grains.....	36
II.4.2 Défauts dans le silicium polycristallin.....	37
II.4.2.1 Les défauts cristallographiques	37
II.4.2.2 Les défauts chimiques	38
II.4.3 Propriétés électriques	39
II.4.3.1 Effet du dopage sur les caractéristiques électriques	39
II.4.3.2 Influence de la température de dépôt sur la résistivité du silicium polycristallin.....	40
II.4.4 Propriétés de transport des porteurs dans le silicium polycristallin.....	41
II.4.4.1 Modèle de ségrégation des dopants	41
II.4.4.2 Modèle de piégeage des porteurs.....	41

Chapitre III

Simulation des cellules solaires en silicium polycristallin et amorphe

III.1 Introduction	43
III.2 Présentation du programme PC1D.....	43
III.2.1 Aperçu du logiciel.....	43
III.2.2 Les paramètres du dispositif (Device).....	44
III.2.3 Les paramètres des régions.....	44
III.2.4 Les paramètres d'excitation	45

III.2.5 Visualisation des résultats	45
III.3 Fenêtre du PC1Dmod 6-2.....	46
III.4 Structure à simuler	46
III.5 Effets des caractéristiques géométriques et physiques sur les paramètres de sortie d'une cellule photovoltaïque.....	48
III.5.1 Effet de l'épaisseur de la base sur les caractéristiques de sortie.....	48
III.5.2 Effet de dopage de la base sur les caractéristiques de sortie.....	52
III.5.3 Effet de la durée de vie sur les caractéristiques de sortie.....	57
III.6 Conclusion.....	61
Conclusion générale	62
Référence bibliographiques	64
Résumé	68
ملخص	69
Abstract	70

Introduction générale

Aujourd'hui, la plupart des pays au monde consomment plus d'énergie qu'ils en produisent. Cette balance énergétique déficitaire mène à une augmentation du prix des énergies fossiles et un épuisement des gisements de pétrole. En plus aux problèmes qu'occasionne l'énergie nucléaire sur l'environnement, la situation énergétique mondiale est devenue préoccupante. À cet effet, il devient nécessaire de diversifier les sources d'énergies en les rendant moins coûteuses et plus propres pour l'environnement.

Dans ce contexte, de nombreuses recherches scientifiques ont été faites dans le but de passer des énergies de stocks à des énergies renouvelables et notamment celles reposant sur l'énergie solaire comme une solution non polluante à la problématique de production d'énergie électrique.

Parmi ces énergies renouvelables, l'énergie photovoltaïque est considérée comme une solution prometteuse pour la production d'électricité. C'est pourquoi actuellement, la conception, l'optimisation et la réalisation des systèmes photovoltaïques font l'objet de nombreuses recherches pour une meilleure exploitation de l'énergie solaire.

Cependant, cette technologie est largement dominée par le silicium qui souffre toujours d'un faible rendement et d'un coût relativement cher. C'est pourquoi actuellement, la recherche dans le domaine des cellules solaires à base du silicium est orientée vers le silicium multi-cristallin et amorphe. Ceci est dû principalement à deux facteurs importants; le faible prix de revient et le contrôle des propriétés du matériau à travers la taille, l'activité et la composition chimique des cellules durant l'élaboration [1].

L'amélioration du rendement de conversion photovoltaïque nécessite l'amélioration des mécanismes mis en jeu dans le processus de fabrication en faisant un bon choix pour la structure de la cellule par l'optimisation des paramètres physiques internes, pour assurer à la fois un courant de court-circuit, un facteur de forme et une tension en circuit ouvert élevés.

Étant donné que le profil de dopage ainsi que l'épaisseur de la base affectent les propriétés électriques des dispositifs en silicium, en particulier le courant de court-circuit I_{cc} , de la tension en circuit ouvert V_{co} et de rendement η , nous faisons, dans ce présent travail, une étude comparative, en fonction de quelques caractéristiques physiques et géométriques (épaisseur, dopage,.....) d'une cellule solaire au silicium polycristallin et d'une cellule solaire au silicium amorphe, des principaux paramètres; le courant de court-circuit I_{cc} , la tension en circuit ouvert V_{co} ainsi que le rendement énergétique η de conversion photovoltaïque.

Notre mémoire est structuré en trois chapitres :

Le premier chapitre est un chapitre d'introduction qui nous permet de rappeler les notions de base sur le rayonnement solaire hors atmosphère, au sol et plus particulièrement le spectre solaire de référence AM1.5G. Puis, nous décrivons brièvement le développement de cette énergie spécifiquement en Algérie. Ensuite, nous allons présenter des notions de bases sur les semi-conducteurs en particulier la jonction PN en accordant une attention sur les courants qui la traverse.

Le deuxième chapitre se donnera pour objectif la description du silicium polycristallin ainsi que le silicium amorphe. Nous allons passer en revue les différents types de silicium avant de citer les notions fondamentales du silicium polycristallin et amorphe, en décrivant d'abord la structure cristallin de ces matériaux et les différentes propriétés cristallographiques, ainsi que les propriétés électriques avec les phénomènes de conduction électriques mis en jeu.

Dans la troisième et dernière partie, nous allons étudier l'influence des paramètres géométriques et physiques tel que l'épaisseur de la cellule, le dopage de la base sur les caractéristiques de sortie d'une cellule solaire à base du silicium polycristallin et amorphe en couche mince de type $n^+/p/p^+$. En outre, nous avons simulé le fonctionnement de la cellule en utilisant le PC1D afin d'évaluer les variations de ces caractéristiques photovoltaïques. A titre comparatif, nous avons présenté les résultats d'une cellule au silicium amorphe fonctionnant dans les mêmes conditions.

Finalement, la conclusion rappelle les principaux travaux réalisés au cours de notre mémoire, et dresse quelques perspectives pour ce travail.

Chapitre I

Notions fondamentales sur le rayonnement solaire et les semi-conducteurs



I.1. Introduction

Le soleil est la première source d'énergie, donc sa lumière aurait dû être bien exploitée car est une énergie renouvelable. Les scientifiques ont eu recours à la technologie des cellules photovoltaïques, qui est une véritable révolution dans la production directe d'électricité à partir de la lumière, en utilisant les semi-conducteurs.

Dans ce chapitre, nous rappellerons les notions de base sur le rayonnement solaire hors atmosphère, au sol et plus particulièrement le spectre solaire de référence AM1.5G. Puis, on décrit le développement de cette énergie spécifiquement en Algérie. Ensuite, nous allons présenter des notions de bases sur les semi-conducteurs en particulier la jonction PN en accordant une attention sur les courants qui la traverse.

A la fin de ce chapitre, nous donnerons les principales caractéristiques de la cellule solaire telles que le facteur de forme et le rendement.

I.2. Le soleil

Le Soleil est l'étoile centrale du système solaire, c'est environ 1392684 km de diamètre, ce qui équivaut à 109 fois le diamètre de la Terre, et d'une masse de 2×10^{30} kg, ce qui équivaut à 330 000 fois la masse de la Terre. Sa température superficielle moyenne est estimée à 5800 °K. Le soleil est la principale source de lumière, de chaleur et d'énergie. Composée d'hydrogène (75 % de la masse ou 92 % du volume) et d'hélium (25 % de la masse ou 8 % du volume).

Le centre du soleil est l'endroit le plus chaud, avec une température de $15,75 \cdot 10^6$ °C, ce qui entraîne des réactions thermonucléaires provoquant un transfert d'énergie du centre vers la surface du soleil, où les noyaux l'hydrogène (quatre protons) fusionnent pour former une particule alpha (noyau d'hélium). La masse d'une particule alpha est 70% supérieure à la masse des protons, et cette différence est transformée en énergie transmise à la surface par le processus de convection, où elle est libérée sous forme de lumière. 5 millions de tonnes d'énergie sont produites en convertissant 700 millions de tonnes d'hydrogène en hélium, et cela en une seconde[2][3][4]. Chaque seconde la terre en reçoit $1,8 \cdot 10^{17}$ kW d'énergie[3].

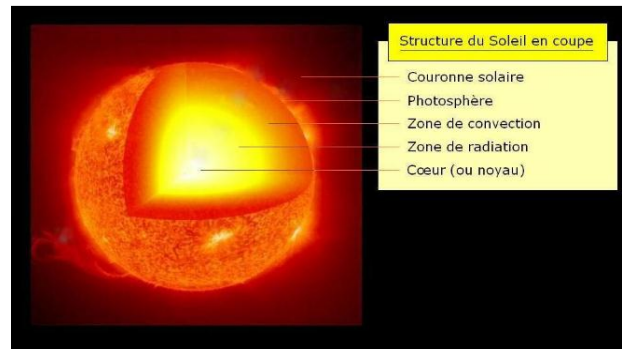


Figure I.1 : Structure du soleil[3].

I.3. Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire arrivant au sol se décompose en deux parties : l'une vient directement du soleil, l'autre est diffusée par l'atmosphère (diffuse). L'atmosphère et la terre ont également un rayonnement propre. La connaissance de ces divers rayonnements permet d'établir un bilan radiatif du système terre-atmosphère.

a) Rayonnement solaire hors atmosphère

L'atmosphère est formée de divers gaz: 78 % d'azote, 21 % d'oxygène, 0,9 % d'argon, 0,03 % de CO₂ et des traces d'autres gaz, avec de la vapeur d'eau dans la troposphère et une mince couche d'ozone dans la stratosphère dont le rôle est si important dans l'absorption des rayons ultraviolets les plus durs[5].

Le rayonnement solaire traverse l'espace jusqu'à atteindre l'atmosphère après environ 150.000.000 km, où il émet un rayonnement constant égal à 1367 [w/ m²] hors de l'atmosphère, et cela dépend de la distance entre la terre et le soleil, puisqu'elle n'est pas fixe[6].

b) Le rayonnement solaire au sol

L'atmosphère modifie le spectre énergétique du rayonnement solaire à travers trois mécanismes principaux [5] :

- L'absorption par les différents gaz.
- La diffusion moléculaire de Rayleigh.
- La diffusion par les aérosols, les poussières et les nuages.

I.4. Spectre solaire

La lumière du soleil se compose de nombreux types de rayonnement de différentes couleurs et de longueurs d'onde, c'est ce qu'on appelle le spectre solaire, qui est caractérisé par

sa gamme de longueur d'onde. Il y a une relation entre les photons qui forment le rayonnement électromagnétique et l'énergie associée à leur longueur d'onde donnée par [7] :

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

Avec h : la constante de Planck. c : la vitesse de la lumière. λ : la longueur d'onde.

I.4.1. Constante solaire

La constante solaire est incertaine autour de l'année puisque la distance terre-soleil est-elle même incertain. La correction de la distance terre-soleil est sans unité, elle est donnée par la relation suivante [8]:

$$C_{t-s} = 1 + 0,034 \cos \left(\frac{360}{365} (j - 2) \right) \quad (\text{I.2})$$

Avec :

J : le nombre de jour de l'année.

La constante solaire corrigée est donc :

$$I = I_0 \cdot C_{t-s} \quad (\text{w/m}^2) \quad (\text{I.3})$$

Avec :

I : La constante solaire corrigée.

I_0 : La valeur moyenne de la constante solaire ($I_0 = 1367 \text{ w/m}^2$).

I.4.2. Convention Air Mass

C'est la masse de l'atmosphère à travers laquelle passe le rayonnement solaire. Pour évaluer cette masse nous utilisons le concept de « masse d'air », cela définit le spectre de référence pour la standardisation des performances du photovoltaïque. AM0 indique le spectre à la limite de l'atmosphère, AM1 indique le spectre venant à la surface de la terre quand le soleil est au apogée (zénith), AM1.5 indique le spectre standard arrivant avec un angle de 48.2° à la surface de la terre à une atmosphère et demi, et AM2 représente le spectre arrivant avec 60.1° à la surface de la terre[9].

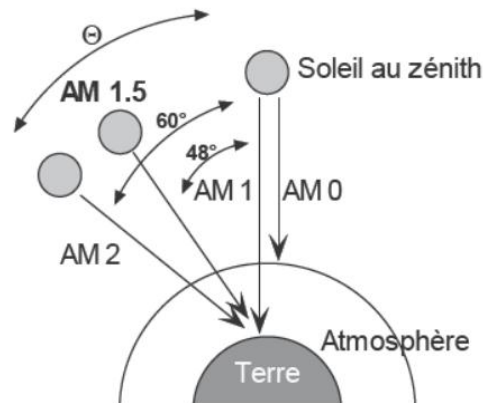


Figure I.2 :Notion Air Masse[10].

I.5. Développement du photovoltaïque en Algérie

L'Etat algérien s'est fixé des objectifs de développement de l'industrie des cellules photovoltaïques, car il a franchi plusieurs étapes de 2014 à 2020. Un plan de travail a été élaboré pour mettre en place une usine de fabrication de silicium.

Un réseau national de fabrication des transformateurs, batteries et autres équipements nécessaires à la construction de la centrale photovoltaïque est également prévu. Dans la période 2021-2030, ces mesures visent à atteindre un taux d'intégration de plus de 80%. Pour y parvenir, la capacité de production de modules photovoltaïques doit être étendue pour atteindre 200MWC/an[9].

I.5.1. Niveau d'ensoleillement en Algérie

L'Algérie a un gisement parmi les gisements les plus élevés dans le monde, où les durées moyennes annuelles d'ensoleillement varient entre 2600h/an dans le Nord à 3500h/an dans le sud. Au vu de sa grande superficie et de sa situation géographique, lui permet d'attirer de grandes quantités d'énergie solaire[9].

La figure I.3 présente la moyenne annuelle de l'irradiation globale reçue sur une surface horizontale durant la période allant de 1992 jusqu'à 2002.

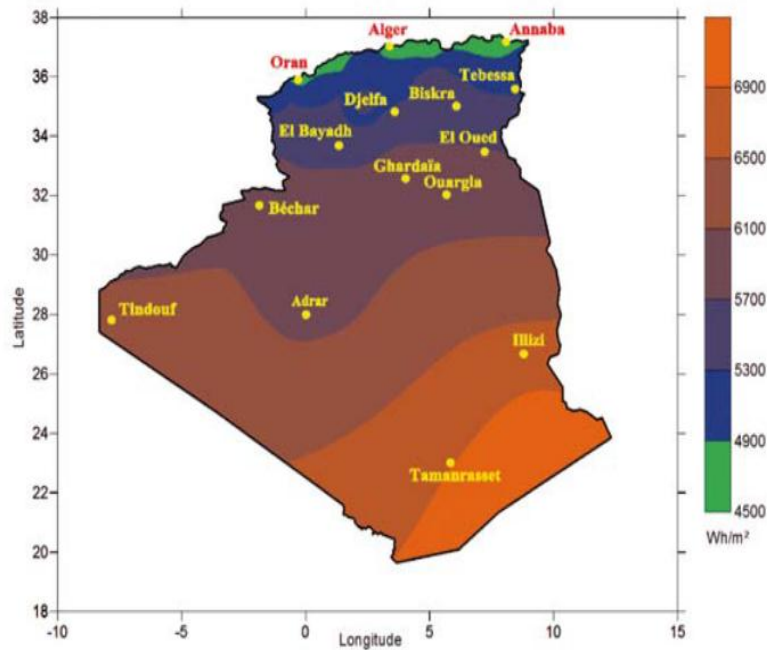


Figure I.3 :Niveau d’enseillement en Algérie[11].

I.5.2. Gisement solaire en Algérie

Les gisements solaires, sont les différentes typiques du rayonnement solaire, susceptibles d'influencer les performances d'un système en un lieu donné. Une bonne compréhension du gisement solaire est nécessaire à l'étude des systèmes photovoltaïques.

De par sa situation géographique, l’Algérie dispose d’un des gisements solaires les plus importants du monde. La durée d’insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et atteint les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L’énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m² est de l’ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 kWh/m²/an au Nord et 2263 kWh/m²/an au sud du pays. Le tableau suivant résume le potentiel solaire en Algérie[9].

Régions	Région côtière	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d’enseillement (heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m2/an)	1700	1900	2650

Tableau I.1 :Potentiel solaire[12].

I.5.3. Consommation d'énergie en Algérie

Si nous voulons connaître la quantité l'énergie consommée en Algérie, il faut connaître le taux de croissance démographique aussi que le développement du secteur industriel. D'après l'ONS, le pourcentage de naissances continue d'augmenter, ce qui augmente continuellement la consommation de ressources énergétiques. Quant au secteur industriel, il a la plus grande part de consommation d'énergie au fil des ans en raison du développement industriel que connaît l'Algérie. Comme le montre la figure suivante [9]:

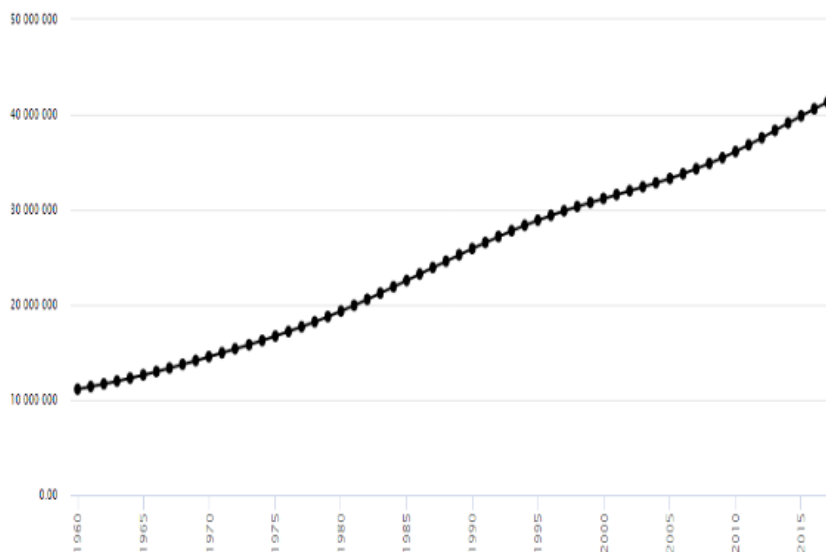


Figure I.4 : La croissance démographique en Algérie entre 1960-2015[9].

De la période 1971-2014, on enregistre 470 % d'augmentations dans la consommation local d'énergie[9]. La figure suivant présente la consommation énergétique en Algérie :

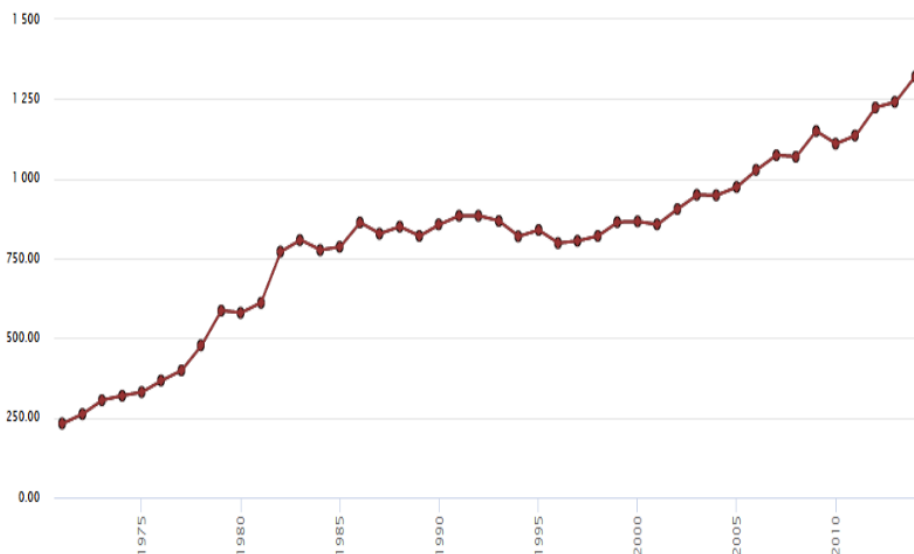


Figure I.5 :La consommation énergétique en Algérie entre 1971-2020[9].

En analysant le taux de croissance démographique et le pourcentage de consommation d'énergie en Algérie, il est nécessaire de recourir à différentes sources d'énergie renouvelable pour parvenir à l'autosuffisance. Parmi les sources d'énergie renouvelables se trouve l'énergie photovoltaïque, qui contribue grandement à répondre aux besoins du pays.

I.5.4. Réalisations photovoltaïques en Algérie

I.5.4.1. Photovoltaïque dans le secteur étatique

- Unité de développement des équipements solaires (L'UDES) :

Le siège de l'UDES est localisé à 40Km à l'ouest d'Alger, le tableau ci-dessous nous présente quelques projets réalisés par l'UDES dans l'installation des panneaux solaire photovoltaïque :

Organisme	Type	Puissance
CRND	Installation de (19) systèmes d'éclairage public par énergie photovoltaïque	2,09 KWc
CDTA	Installation de (26) systèmes d'éclairage public par énergie photovoltaïque	2,86 KWc
NAFTAL	Installation de (22) systèmes d'éclairage public par énergie photovoltaïque et l'alimentation électrique de deux volucompteurs en énergie solaire	7,22 KWc
MDN	Alimentation par énergie photovoltaïque d'une cabine de cuisson tractable	0,7 KWc
Hôpital militaire d'Ain naadja	Installation de (01) système d'éclairage public par énergie photovoltaïque	0,11 KWc
ALGERIE TELECOM	Alimentation d'un relais de transmissions en énergie photovoltaïque	4,2 KWc
MESRS	Installation de (40) systèmes d'éclairage public par énergie photovoltaïque	4,4 KWc
Poste de surveillance routières et unités de la Gendarmerie nationale	Installation de système d'éclairage public et alimentation des cabines 10	07 KWc
Ecole nationale supérieure de l'hydraulique	Installation de (01) système d'éclairage public par énergie photovoltaïque	0,11KWc
Université de boumerdes	Installation de (02) kits d'éclairage par énergie photovoltaïque	0,33 KWc

Complexe touristique (djenan ETAKAFA)	Installation de (12) systèmes d'éclairage public par énergie photovoltaïque	1,32 KWc
AFSI BOUCHAOUI Gendarmerie nationale	Installation de (20) systèmes d'éclairage public par énergie photovoltaïque	2,2 KWc
Station veille de l'atmosphère globale (ONM) Assekrem W-tamanrasset	Installation d'une mini-centrale solaire photovoltaïque pour l'alimentation électrique des équipements de mesure	05 KWc
Direction des minces et de l'industrie : GARA-DJEBILET (tindouf)	Installation d'une mini-centrale solaire photovoltaïque pour l'alimentation électrique des maisons de l'éclairage extérieure	09 KWc
Ministère de la défense nationale	Fourniture de (21) systèmes photovoltaïques de 750 WC pour l'alimentation électrique des appareils de transmissions	15,75KWc
Commandement de la Gendarmerie nationale	Fourniture de (189) systèmes photovoltaïques de 750 WC pour l'alimentation électrique des équipements de transmissions	141,75 KWc

Tableau I.2 : Quelques projets photovoltaïques réalisés par l'UDES[9].

- **Le projet de Rouïba Eclairage :**

L'usine de Rouïba est le plus grand projet dans le continent d'Afrique dans la production des panneaux solaire photovoltaïque.



Figure I.6 : L'usine de Rouïba Eclairage[9].

I.5.4.2. Photovoltaïque dans le secteur privé

- **La société Aurès solaire :**

Cette société est installée dans la zone industrielle d'Ain Yagout de la wilaya de Batna. C'est une nouvelle entreprise de fabrication de panneaux photovoltaïques avec une capacité de 25 MW.



Figure I.7 : Aurès solaire[9].

- **L'usine Condor Electronics pour la production des panneaux solaires photovoltaïque :**

Cette usine est située dans la wilaya de Bordj Bou- Arreridj, Condor a construit sa propre usine pour fabriquer des panneaux solaires photovoltaïques. Avec une capacité de 50 MW par an.



Figure I.8 : L'usine de condor électronique[9].

I.6. Les semi-conducteurs

I.6.1. Définition

Les semi-conducteurs sont les éléments de base de nombreuses applications. Ils sont à la base de toute l'industrie électronique, les diodes, les transistors, les cellules solaires en sont la principale composante. Leurs principales propriétés découlent de leur structure de bande. Alors que la lumière et la température jouent peu sur les propriétés électroniques des matériaux comme les métaux et les isolants, leur influence est très importante sur les semi-conducteurs. La résistivité des semi-conducteurs varie de 10^{-3} à 10^{+4} $\Omega.cm$. Un semi-conducteur peut être soit intrinsèque (pur) ou extrinsèque (dopé) par des impuretés[13].

I.6.2. Semi-conducteurs intrinsèques

Un semi-conducteur intrinsèque est un matériau idéal qui ne présente aucun défaut physique ou chimique. Il a une structure tétraédrique, c'est-à-dire que chaque atome est symétriquement entouré de « 4 » atomes. Lorsque le corps est complètement pure, elle est dite d'intrinsèque. . Exemples: silicium (Si), germanium (Ge), sélénium (Se)[13].

Dans un semi-conducteur intrinsèque le nombre de trous dans la bande de valence est toujours égal au nombre d'électrons dans la bande de conduction.

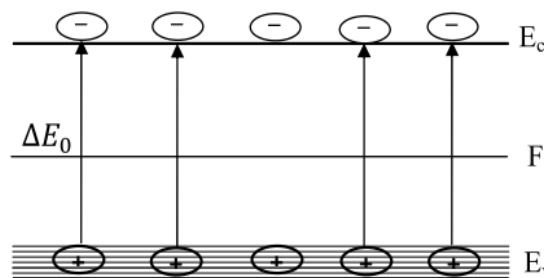


Figure I.9 :Génération d'électrons et des trous dans un semi-conducteur intrinsèque[14].

I.6.3. Semi-conducteurs extrinsèques

Les semi-conducteurs extrinsèque sont obtenus en ajoutant de petites quantités d'atomes bien choisies aux semi-conducteurs intrinsèque appelons « dopage », pour que la concentration des porteurs de charge des semi-conducteurs intrinsèque soit modifiée.

En raison de la nature des atomes introduits, soit le nombre d'électrons devient très supérieur au nombre de trous et le semi-conducteur est appelé de type n, soit le nombre de

trous devient très supérieur à celui des électrons et le semi-conducteur est appelé de type p [13].

Nous allons expliquer le phénomène de dopage et ses conséquences sur le nombre d'électrons et de trous dans le semi-conducteur.

I.6.4. Dopage des semi-conducteurs

Deux types de dopage sont possibles :

I.6.4.1. Semi-conducteur dopé N

On obtient un semi-conducteur de type N en dopant un cristal de 4 atome dans la couche de valence (silicium) avec des atomes possèdent 5 électrons sur leur couche de valence comme le phosphore (P), l'arsenic (As), le bismuth (Bi) et l'antimoine (Sb). (Colonne V de la classification périodique).

Dans un semi-conducteur de type N, les électrons libre sont majoritaires alors que les trous sont minoritaires comme le montre dans cet exemple :

Le phosphore (15^e) est un atome avec 5 électrons sur la couche périphérique, quatre de cinq électrons du phosphore sont mis en commun avec les atomes de silicium voisins pour réaliser des liaisons covalente, le cinquième électron se retrouve libre dans la bande de conduction. L'atome de phosphore qui a fourni un électron libre est appelé atome donneur. Il a perdu sa neutralité pour devenir un ion positif fixe [13].

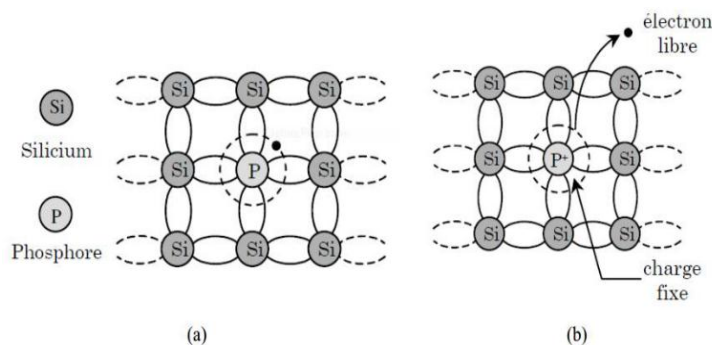


Figure I.10 :Silicium dopé au phosphore (a) à $T = 0$ °K et, (b) à $T \neq 0$ °K [13].

I.6.4.2. Semi-conducteur dopé P

On obtient un semi-conducteur de type P en dopant un cristal de 4 atome dans la couche de valence (silicium) avec des atomes possèdent 3 électrons sur leur couche de

valence comme le Bore(B), Aluminium (Al), Germanium(Ge) et l'indium (In). (Colonne III de la classification périodique).

Dans un semi-conducteur de type **P**, les trous sont majoritaires alors que les électrons sont minoritaires comme le montre dans cet exemple :

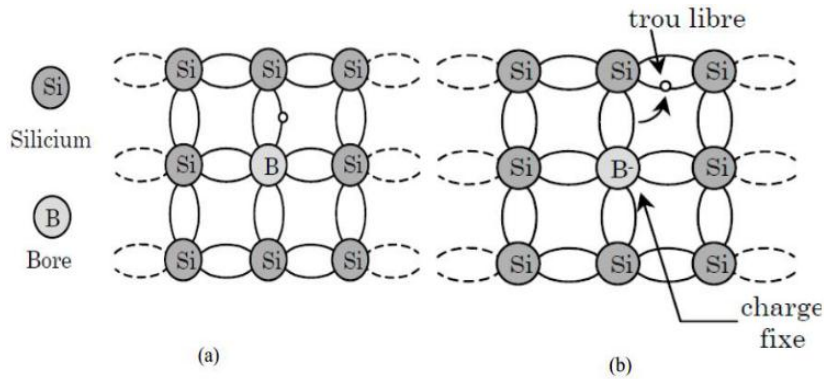


Figure I.11 : Silicium dopé au Bore (a) à $T = 0 \text{ K}$ et, à (b) $T \neq 0 \text{ K}$ [13].

Le Bore (5 e) est un atome avec 3 électrons sur la couche périphérique, il manque un électron de bore pour réaliser des liaisons covalente avec les quatre atomes de silicium qui l'entourent. Tout se passe alors comme si un des atomes de silicium voisins avait cédé un électron à l'atome de bore, créant ainsi un trou dans le cristal de silicium. L'atome de Bore qui capte un électron d'un atome de silicium voisin est appelé atome accepteur. Il a perdu sa neutralité pour devenir un ion négatif fixe[13].

I.6.5. Courants dans le semi-conducteur

Afin de définir le comportement d'un semi-conducteur hors équilibre thermodynamique (soumis à une tension extérieure), il faut étudier les courants résultants du déplacement des porteurs de charges que sont les électrons et les trous. Ce déplacement de charges se fait sous l'action d'une force dont la source peut être un champ électrique ou un gradient de concentration de porteurs de charges. Dans le premier cas, le courant est appelé courant de conduction, dans le second il est appelé courant de diffusion. Nous ne caractériserons pas directement le courant mais la densité de courant \vec{J} , proportionnelle à ce dernier. La densité de courant se définit comme étant la quantité de charges qui traversent une unité de surface par unité de temps[15].

$$\vec{J} = q (n \cdot \mu_n + p \cdot \mu_p) \cdot \vec{E} \tag{I.4}$$

\vec{J} : La densité de courant.

n et p sont les densités de porteurs.

q : La charge d'un électron égale à $1,602.10^{-19}C$

\vec{E} : Le champ électrique de la jonction polarisée.

μ_n et μ_p les mobilités respectivement des électrons et des trous.

I.6.5.1. Courant de conduction

Lorsque les trous et les électrons baignent dans le champ électrique créé par la mise sous tension de la jonction, ils se déplacent et génèrent ainsi le courant de conduction :

Pour un semi-conducteur de type N :

$$\vec{J}_n = q \cdot n \cdot \mu_n \cdot \vec{E} \quad (I.5)$$

Pour un semi-conducteur de type P :

$$\vec{J}_p = q \cdot p \cdot \mu_p \cdot \vec{E} \quad (I.6)$$

I.6.5.2. Courant de diffusion

Quand les électrons ou les trous ne sont pas distribués uniformément dans le semi-conducteur, leur mouvement s'effectue dans un sens qui tend à uniformiser leur distribution spatiale. Le flux de porteurs et donc le courant de diffusion est corrélatif à leur gradient de concentration :

$$\vec{J}_n = +q D_n \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(n) \quad (I.7)$$

$$\vec{J}_p = -q D_p \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(p) \quad (I.8)$$

Où D_n et D_p sont les constantes de diffusion des deux types de porteurs.

I.6.5.3. Courant total dans le semi-conducteur

Le courant total est la somme des courants de conduction et de diffusion des trous et des électrons :

$$\vec{J}_{n_{tot}} = q \cdot n \cdot \mu_n \cdot \vec{E} + q D_n \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(n) \quad (I.9)$$

$$\vec{J}_{p_{tot}} = q \cdot p \cdot \mu_p \cdot \vec{E} - q D_p \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(p) \quad (I.10)$$

I.7. Jonction PN

La jonction PN est l'un des dessins de base pour une cellule solaire et constitue le

Module élémentaire dont dépend le fonctionnement d'un grand nombre de dispositifs à semi-conducteurs.

Pour réussir une cellule photovoltaïque il faut réaliser une diode, c'est-à-dire réaliser une jonction PN. Dans un tel dispositif et lorsqu'on assemble les deux régions, la différence de concentration entre les porteurs des régions P et N va provoquer la circulation d'un courant de diffusion tendant à égaliser la concentration en porteurs d'une région à l'autre. Les trous de la région P vont diffuser vers la région N et les électrons de la région N diffusent vers la région P, [dans une zone dite "zone de charge d'espace ZCE" ou "zone de transition" de très faible épaisseur][16].

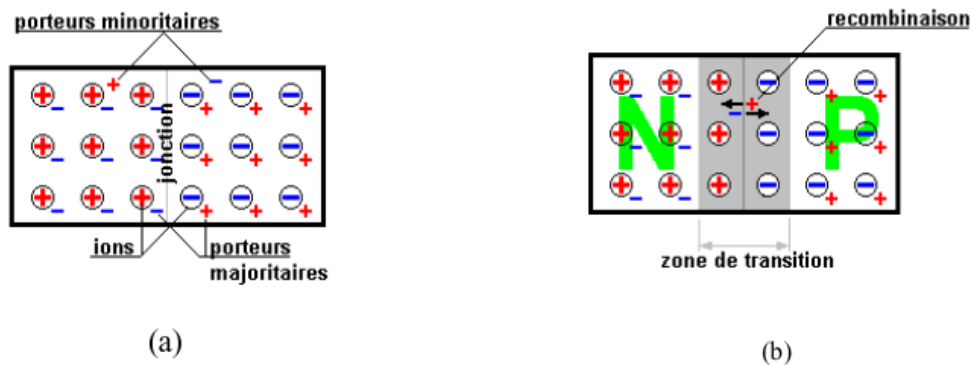


Figure I.12 :Jonction PN : (a) avant contact ; (b) après contact[17].

I.7.1. Jonction PN abrupte

Une jonction PN est créée par la mise en contact d'un semi-conducteur dopé N et d'un semi-conducteur dopé P. La différence des densités de donneurs et d'accepteurs ($N_d - N_a$) passe « brusquement » d'une valeur négative pour la région P à une valeur positive pour la région N. c'est ce qu'on appelle une jonction abrupte[13].

I.7.2. Jonction PN graduelle

La concentration en impuretés est une fonction dépendante de x autour de la région de contact. C'est-à-dire, la différence ($N_d - N_a$) dépend de x entre X_p et X_n , c'est ce qu'on appelle une jonction graduelle. Comme le montre la figure suivante :

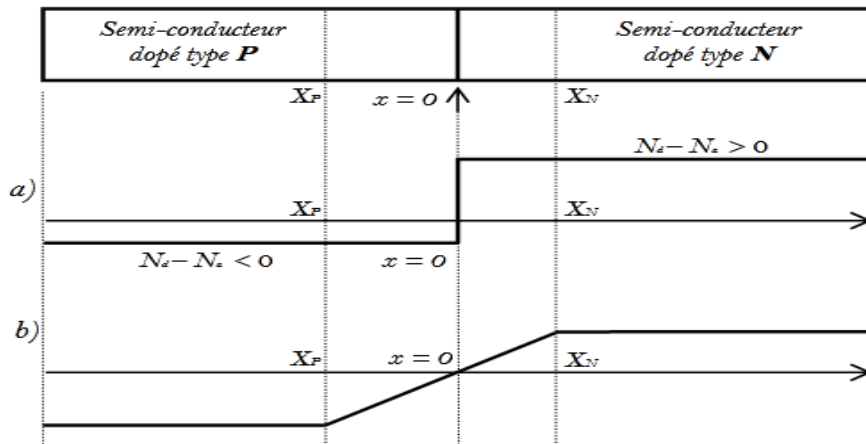


Figure I.13 : Evolution de la différence ($N_a - N_d$). a) abrupte b) graduelle[13].

I.7.3. Jonction PN polarisée

I.7.3.1. Polarisation directe

Une polarisation directe est obtenue en appliquant aux bornes de la jonction une tension V qui réduit la barrière de potentiel et par conséquent le champ électrique interne.

Dans le cas d'une polarisation directe le sens passant d'une diode est défini par le sens des courants créés par les porteurs majoritaires dans la jonction. Les électrons majoritaires de la zone N se déplacent vers l'anode, les trous majoritaires de la zone P se déplacent vers la cathode. Le sens direct est défini par un courant dirigé de l'anode vers la cathode[14].

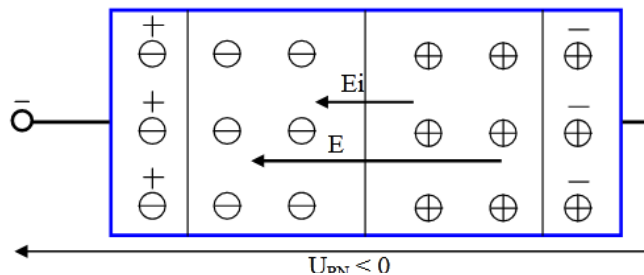


Figure I.14 : jonction PN polarisée en direct.

I.7.3.2. Polarisation inverse

Dans le cas de la polarisation inverse la jonction est reliée à une alimentation dans le sens bloqué. La tension doit rester supérieure à une valeur minimale. Alors, le courant résulte du déplacement des porteurs minoritaires. L'intensité du courant est très faible[13].

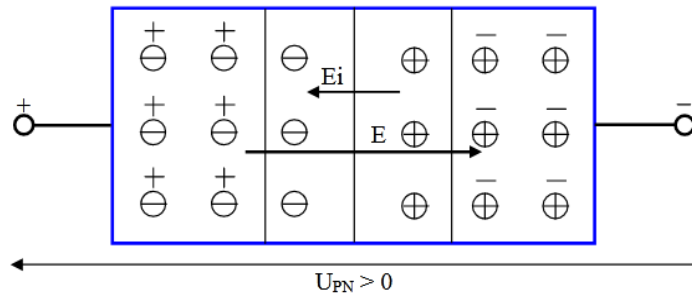


Figure I.15 : Jonction PN polarisée en inverse.

I.7.4. Effet de la température

La température de fonctionnement est une grandeur fondamentale dans la détermination du fonctionnement des dispositifs à semi-conducteurs.

Dans le cas d'une jonction PN, à cause de l'agitation thermique, le courant de saturation est dû aux porteurs minoritaires Ce courant de saturation sera sensible à la température.

Pour une tension de diffusion V_D (barrière de potentiel) positif, la diode a un coefficient de température négatif. Pour V_D négatif, le courant de saturation I_s varie très vite avec la température[13].

I.7.5. Courant de génération-recombinaison

➤ **Le Courant de recombinaison** : Le courant de recombinaison des porteurs est généré dans la région de charge d'espace (ZCE) de la jonction, via des états de piège dont les niveaux d'énergie sont dans la région médiane de la bande interdite, où ils sont prédominants. Le courant est donné par la forme suivante [17]:

$$I_{rec} = q \int_W U \, dx \tag{I.11}$$

Où U est le taux net de génération-recombinaison des porteurs dans la ZCE, Il est donné par l'expression suivante :

$$U = \frac{np - n_1(E_t)p_1(E_t)}{\tau_p(n + n_1(E_t)) + \tau_n(p + p_1(E_t))} \tag{I.12}$$

n_1 et p_1 sont les concentrations.

τ_n et τ_p sont respectivement les durées de vie des électrons et des trous. Exprimées dans le cadre de la statistique de Maxwell-Boltzmann, des électrons et des trous.

Lorsque le niveau de Fermi se trouve confondu ou bloqué par le niveau piège E_t .

$$n_1 = N_c e^{\left(\frac{E_C - E_V}{kT}\right)} \quad (\text{I.13})$$

$$p_1 = N_v e^{\left(\frac{E_t - E_V}{kT}\right)} \quad (\text{I.14})$$

τ_n et τ_p sont reliées à la densité des états pièges.

$$\tau_n = \frac{1}{c_n N_t V_{th}} \quad (\text{I.15})$$

$$\tau_p = \frac{1}{c_p N_t V_{th}} \quad (\text{I.16})$$

Avec :

c_n : la section de capture des électrons.

c_p : la section de capture des trous.

V_{th} : la vitesse thermique des porteurs.

Pour avoir l'expression du courant de recombinaison, nous calculons l'intégrale de l'équation précédant (I.11).

$$I_{rec} = \frac{qn_i}{2\tau} W e^{\left(\frac{qV}{2kT}\right)} \quad (\text{I.17})$$

Avec :

W : la largeur de la ZCE.

- **Le Courant de génération** : La ZCE se trouvant appauvrie en porteurs de charge libres, les paires électron-trou, produites par le processus de génération thermique ou par ionisation des pièges initialement chargés, sont aussitôt balayées par le champ électrique intense de la ZCE vers les zones neutres de la jonction. Ce déplacement de charge produit un courant de génération qui s'exprime comme suit :[17].

$$I_{gen} = q \cdot U \cdot W \quad (\text{I.18})$$

L'expression du terme de génération-recombinaison U (I.12) se simplifie de la forme :

$$U = \frac{n_i}{2\tau} \quad (\text{I.19})$$

En remplaçant le terme U dans l'expression. Il devient :

$$I_{gen} = q \frac{n_i}{2\tau} W \quad (\text{I.20})$$

I.7.6. Jonction PN sous illumination

Lorsque la jonction PN est exposée à la lumière, les paires électrons-trous générés par la lumière dans ZCE sont séparés par le champ électrique qui est dominant, où les trous portant les charges positives sont dirigés vers la région P et les électrons chargés négativement sont dirigés vers le Région N. c'est le photo-courant de génération. Une cellule photovoltaïque sous éclairage est modélisée par un circuit électrique constitué d'un générateur de courant I_{ph} [17].

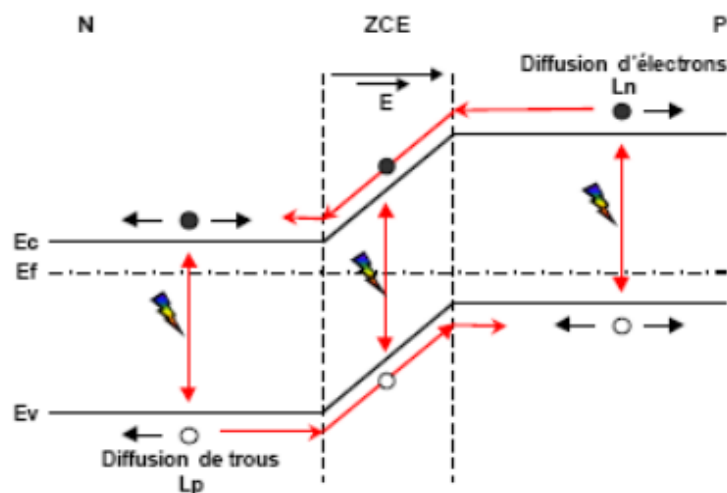


Figure I.16 :diagramme de bande d'une cellule solaire sous illumination[17].

I.8. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

I.8.1. Effet photovoltaïque

L'effet photoélectrique est la conversion directe de l'énergie électromagnétique (rayonnement) en énergie électrique.

Le physicien français Edmund Becquerel découvrit l'effet photoélectrique en 1839. Il montre que l'exposition de certains matériaux (conducteurs ou semi-conducteurs) à une petite quantité de lumière amène ces matériaux à émettre de l'électricité (absorption de photons dans un matériau semi-conducteur), lorsque la cellule photoélectrique (diode) est exposée à la lumière du soleil (composée de photons), l'énergie transportée par un photon est transférée à un électron. Ce dernier se déplace de son emplacement d'origine dans l'atome (de la bande de valence à la bande de conduction) et un trou se forme à sa place, de sorte que les cellules photovoltaïques produisent un courant continu de rayonnement solaire que nous pouvons utiliser pour alimenter des appareils électriques ou charger des batteries[18].

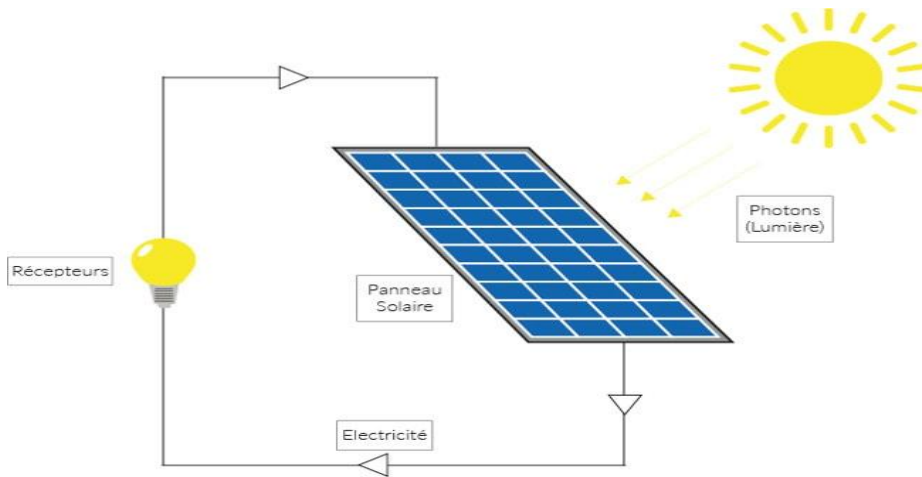


Figure I.17 : principe de l'effet photovoltaïque.

I.8.2. La cellule solaire

I.8.2.1. Constitutions de base d'une cellule solaire

La cellule solaire, est un composant électronique exposé à la lumière, produit de l'électricité grâce à l'effet photovoltaïque.

Les cellules photovoltaïques les plus utilisées aujourd'hui sont constituées de semi-conducteurs. Cela se fait à travers la jonction PN, qui dépend de la connexion de deux parties du semi-conducteur, le dopage de la première du type N (excès d'électrons) et la seconde du type P (déficit d'électrons)[19].

I.8.2.2. Fonctionnement d'une cellule solaire

Le fonctionnement de toute cellule photovoltaïque est basé sur l'existence d'un champ interne afin de séparer les paires électrons- trous générés par l'absorption de la lumière. Cette barrière de potentiel peut être créée par [17]:

- Absorption des photons d'énergie $h\nu \geq E_g$ par le matériau constituant le dispositif.
- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires électron-trou dans le matériau semi-conducteur.
- collecte des particules générées dans les régions neutres N et P sous l'effet d'un champ électrique interne.

I.8.2.4. Réponse spectrale

La réponse spectrale RS d'une cellule photovoltaïque est le rapport entre la puissance lumineuse incidente et le courant généré par la cellule, en fonction des différentes longueurs d'onde formant le rayonnement incident. Il est donné par la relation suivante.

$$RS = \frac{q\lambda}{hc} EQE \quad (I.21)$$

RS : La réponse spectrale.

EQE : représente le rendement quantique externe de la cellule.

Telle que :

$$EQE = \frac{I_{ph}(\lambda)}{q\phi_0} \quad (I.22)$$

ϕ_0 : Le flux de photons incident ($\text{photon.cm}^{-2} \text{s}^{-1}$).

q : la charge élémentaire ($1,6.10^{-19}\text{C}$).

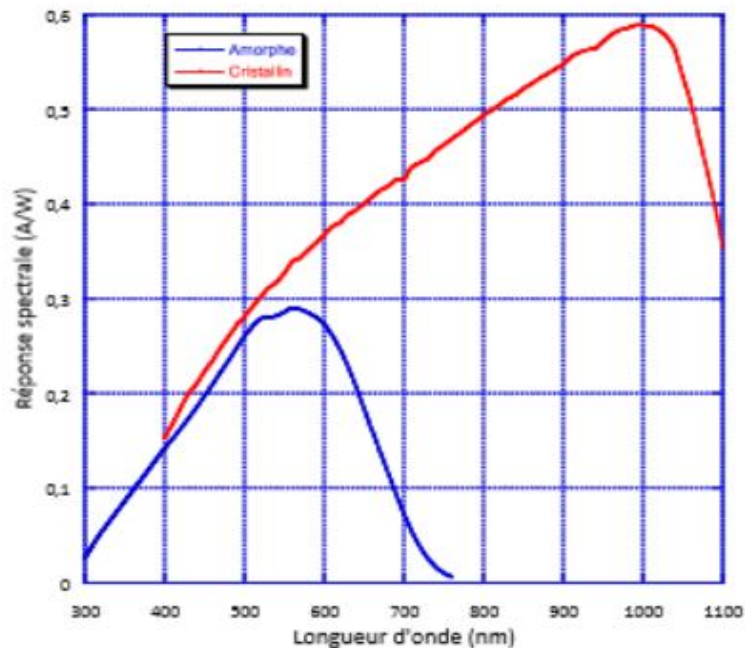
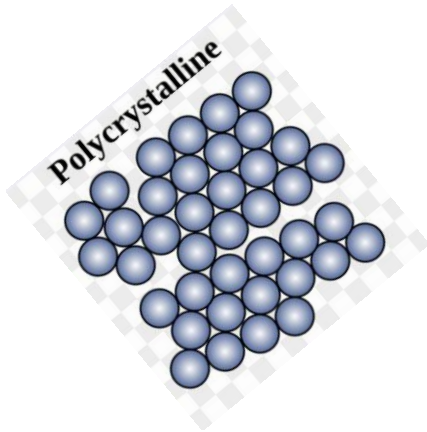
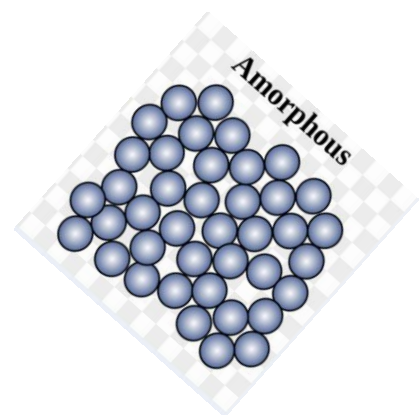


Figure I.18 : Réponse spectrale d'une cellule amorphe et d'une cellule cristalline[20].



Chapitre II

Le silicium en phase amorphe et polycristallin



II.1. Introduction

Le rendement énergétique des cellules solaires varie en fonction des éléments chimiques qui les composent. Chaque élément a son propre coefficient d'absorption d'énergie solaire, il faut donc choisir l'élément approprié qui donne les meilleurs rendements.

L'industrie photovoltaïque est concentrée à plus de 90% [21] sur l'utilisation du silicium comme matériau de base, qui a été découvert en 1840 en Suède. Ce semi-conducteur présente en effet, différents avantages: il est abondant sur la surface du globe car il est facilement extrait à partir du sable, son non toxicité et sa stabilité dans le temps, la maîtrise de sa technologie, par l'industrie micro-électroniques assurant au final un bon rendement de conversion électrique [16].

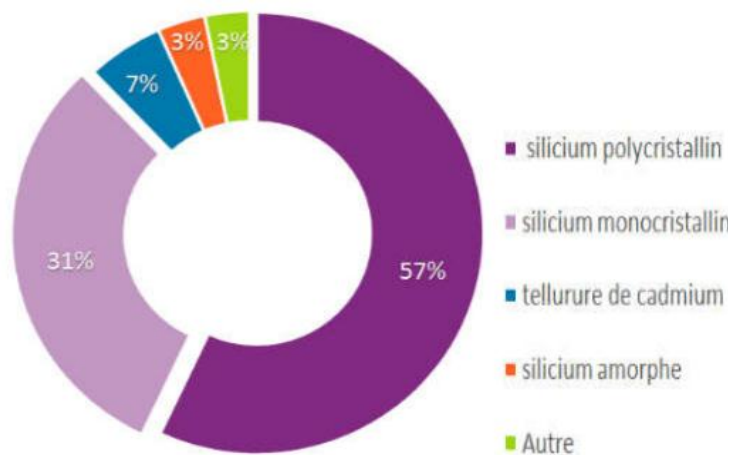


Figure II.1 : Application de silicium en photovoltaïque [16].

II.2. Différents états du silicium

Le silicium est un élément chimique de symbole « Si » et de numéro atomique 14, c'est le plus abondant dans la surface de la terre. Dans la nature, On ne le trouve jamais à l'état pur, c'est sous la forme de silice [dioxyde de silicium (SiO_2), composant principal du sable], ou bien sous forme de silicates (l'aluminosilicate). Sa forme dépend de plusieurs facteurs : la disposition, la nature et la taille des grains. Ceci affecte grandement la structure électronique ainsi que les propriétés optoélectroniques [22]. En tant que semi-conducteur, le silicium est aussi l'élément principal utilisé pour la fabrication de cellules solaires

Photovoltaïques. Celles-ci sont alors montées en panneaux solaires pour la génération d'électricité.

Le silicium existe sous plusieurs états :

II.2.1. Silicium monocristallin

La structure monocristalline est définie comme un arrangement ordonné. De sorte que le silicium monocristallin (ou cristallin « c-Si ») ait une structure de diamant, qui est une cubique à faces centré (CFC), où chaque atome est entouré de 4 plus proches voisins, les atomes sont liés l'un avec l'autre par une liaison covalente, la distance entre atome et autre atome est égale à 2.35 Å et un paramètre de maille est égale à 5.43 Å. L'énergie de gap (l'énergie de la bande interdite séparant les régions supérieures « BC » et inférieures « BV ») est égale à $E_g=1.12$ eV à température ambiante[23].



Figure II.3 : le silicium monocristallin.

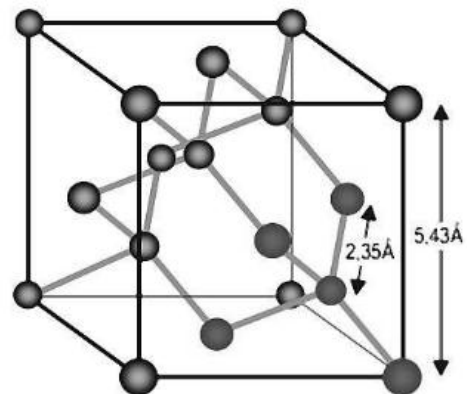


Figure II.2 : Structure du silicium monocristallin (type diamant)[23].

II.2.2. Silicium amorphe

Les atomes de la structure amorphe sont disposés de manière irrégulière, comme dans le silicium amorphe (a-Si) où il apparaît sous la forme d'une structure tétraédrique, similaire au silicium cristallin, mais n'a pas la même disposition et le même espacement entre les atomes, ce qui rend sa forme aléatoire.

Cependant, il a un coefficient d'absorption de la lumière plus rapide que le silicium cristallin et se situe dans la zone visible des valeurs d'énergie supérieures à 1,7 eV. Par

conséquent, une petite quantité de silicium amorphe sous forme de films minces crée un dispositif photovoltaïque idéal[24].

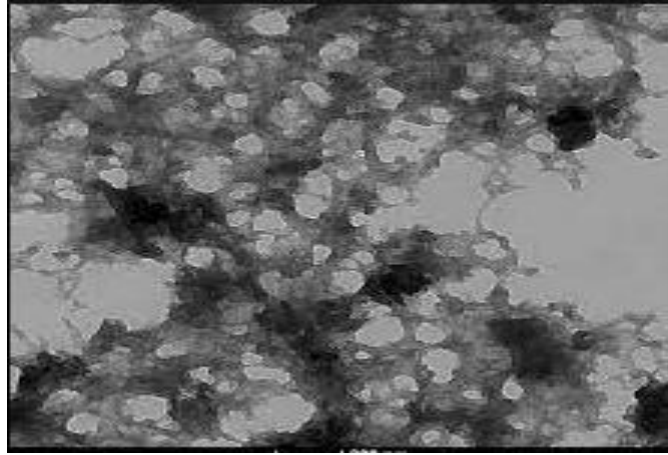


Figure II.4 : le silicium amorphe.

II.2.3. Silicium polycristallin

Le silicium polycristallin est composé de nombreux grains (petites cristaux) de silicium plus petits avec diverses orientations cristallines, c'est un mélange entre l'état monocristallin et l'état amorphe. Contrairement au silicium cristallin, dont les grains sont caractérisés par la proximité et la cohésion, le silicium polycristallin présente des grains séparés les uns des autres par des régions désordonnées appelées joints de grains riches en défauts cristallins. (Le grain peut-être défini par sa taille et par sa qualité cristalline)[25].



Figure II.5 : de silicium polycristallin[9].

Dans ce qui suit nous allons donner plus de détails sur le silicium amorphe ainsi que le silicium polycristallin.

II.3. Silicium amorphe

II.3.1. Présentation du silicium amorphe hydrogéné

Après la découverte du silicium amorphe, l'intérêt pour lui a commencé en (1938)[26], il ne présentait pas de propriétés électroniques importantes, il n'est pas utilisé car il contient beaucoup de défauts. Là où des techniques de pulvérisation et d'évaporation ont été utilisées pour déposer des couches de (a-Si:H), mais vers la fin des années soixante (1975), Chittick a dopé des couches de silicium amorphe avec un pourcentage de 10% d'hydrogène[utilisant la décomposition chimique du silane (SiH_4), ce dernier a saturé les places des défauts et donc les liaisons pendantes ce qui rend ce matériau utilisable comme semi-conducteur[24][26].

Donc la liaison silicium-hydrogène (a-Si:H) a réussi à former un matériau semi-conducteur comme le montre la figure(II.6) capable d'absorber rapidement le spectre solaire, grâce au coefficient d'absorption idéal[24].

II.3.1.1. Structure d'a-Si:H

La figure (II.6) présente la structure du silicium amorphe hydrogéné où il a montré une structure oscillante et instable, en raison de la distribution aléatoire et de l'arrangement des atomes de silicium et d'hydrogène, ce qui a rendu ses propriétés instables comme c'est le cas des propriétés électroniques par rapport au silicium cristallin, mais il montrait une performance acceptable dans son application à une cellule solaire[26].

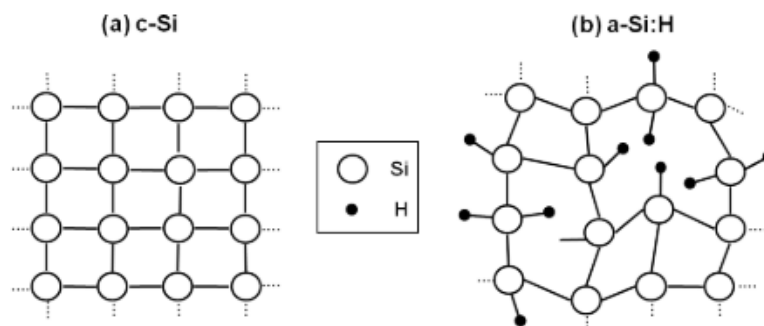


Figure II.6 : Représentation de la structure du silicium cristallin (a) et du silicium amorphe hydrogéné (b)[26].

II.3.1.2. Diagramme de bande

Dans le cas des semi-conducteurs cristallisés, le diagramme de bande se compose d'une bande de valence totalement saturée et d'une bande de conduction complètement vide séparée par une bande interdite qui n'a pas de propriétés électroniques.

Dans le cas d'un silicium amorphe hydrogéné le diagramme de bande représenté sur la figure(II.7), les états sont étendus (les porteurs participent à la conduction) et une queue de bande se prolonge dans la bande interdite. Les états dans ces queues sont localisés. Ils participent à l'absorption. À cause de cela, le gap optique est légèrement inférieur au gap de mobilité. Cependant, la différence n'est que de l'ordre de 0.1 ev. Les queues de bandes sont modélisées par une fonction exponentielle. La largeur de la queue de bande de valence est plus large que celle de la queue de bande de conduction, ce qui montre que le fait de dopage de type p est plus difficile dans le a-Si:H (il y a plus d'états localisés dans lesquels les trous libérés par les atomes trivalents préfèrent se mettre). Les défauts profonds dus aux liaisons pendantes peuvent être modélisés par deux gaussiennes (l'une pour les défauts de caractère accepteur $D^{-/0}$, l'autre de caractère donneur $D^{+/0}$)[27].

D^+ , D^0 et D^- représentent les liaisons pendantes respectivement positives, neutres et négatives.

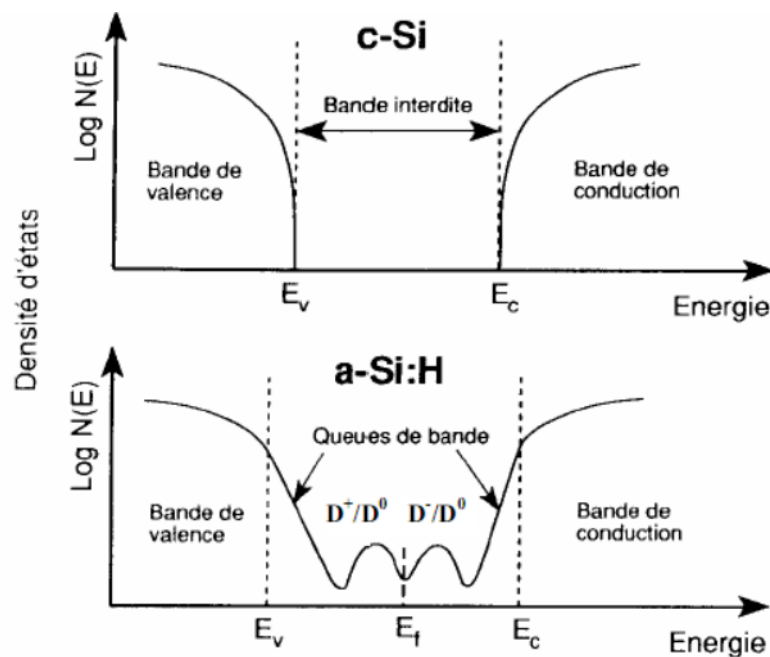


Figure II.7 :Diagramme de bande du silicium cristallin et du silicium amorphe hydrogéné[27].

II.3.2. Défauts dans le silicium amorphe hydrogéné

Le silicium amorphe est rempli de défauts qui ont désordonné sa structure et affecté ses propriétés optiques et électroniques, mais l'hydrogène a fortement réduit la densité de défauts et amélioré ses propriétés, ce qui a conduit à son exploitation pour la conception d'une cellule photovoltaïque. Il existe plusieurs types de défauts dans le silicium amorphe.

II.3.2.1. Défauts intrinsèques

II.3.2.1.1. Défauts de coordination

La périodicité d'un cristal représente la répétition régulière des positions atomiques dans les trois directions de l'espace, ce qui signifie que le défaut est une dégradation dans la cohérence du réseau cristallin, c'est-à-dire son interruption. Une mention spéciale le silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H), lorsqu'il contient un excès ou une carence de liaisons covalentes, ce qui est appelé un défaut de coordination. Ces défauts sont inhérents dans le caractère désordonné du matériau et ont des signatures spéciales dans la bande interdite.

'Dⁱ' est le symbole introduit pour désigner la liaison pendante portée par un atome de Silicium en coordination (Si₍₃₎).

Ils sont classés par indice de coordination (*i*), correspondant à l'écart en nombre de liaisons par rapport à la coordination du Silicium tétravalent (Si₍₄₎) [26]:

- ❖ $i = -2$ (Si₍₂₎) : Lacune double (Divacancy).
- ❖ $i = -1$ (Si₍₃₎) : Liaison pendante (Dangling Bond).
- ❖ $i = 0$ (Si₍₄₎) : Liaison faible (Weak Bond).
- ❖ $i = 1$ (Si₍₅₎) : Liaison flottante (Floating Bond).

La figure suivante montre les défauts mentionnés précédemment.

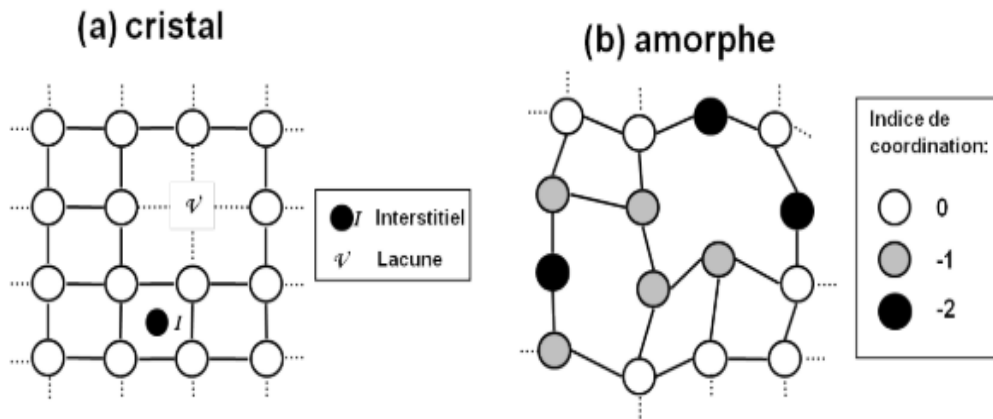


Figure II.8 : Illustration de la notion de défaut dans c-Si (a) et dans a-Si (b)[26].

II.3.2.1.2. Concept d'énergie de corrélation

Selon le principe de Pauli (principe d'exclusion), les électrons appartenant au même système ne peuvent pas être dans le même état quantique en même temps, puisque l'état électronique ne peut pas accueillir plus de deux électrons. Là où l'on trouve que la bande interdite est caractérisé par trois possibilités de charge en fonction de la position de Fermi comme dans le cas de la liaison pendante contenu dans le silicium amorphe hydrogéné :

- ❖ L'état neutre D^0 est occupé par un électron
- ❖ L'état vide d'électron correspond à un défaut chargé positivement D^+
- ❖ L'état doublement occupé sera chargé négativement D^-

Les niveaux d'énergie correspondant aux états D^0 et D^- sont séparés par une certaine quantité d'énergie à la suite de l'interaction entre les deux électrons. Cette énergie résultante est appelée l'énergie de corrélation définie par la relation suivante[26] :

$$U = \frac{e^2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r} - W_r \tag{II.1}$$

Telle que :

- Le premier terme correspond à l'énergie d'interaction coulombienne
- Le deuxième terme correspond à l'énergie de relaxation W_r

e : La charge de l'électron.

ϵ : La permittivité diélectrique relative.

ϵ_0 : La permittivité diélectrique dans le vide.

r : le rayon effectif entre les deux électrons.

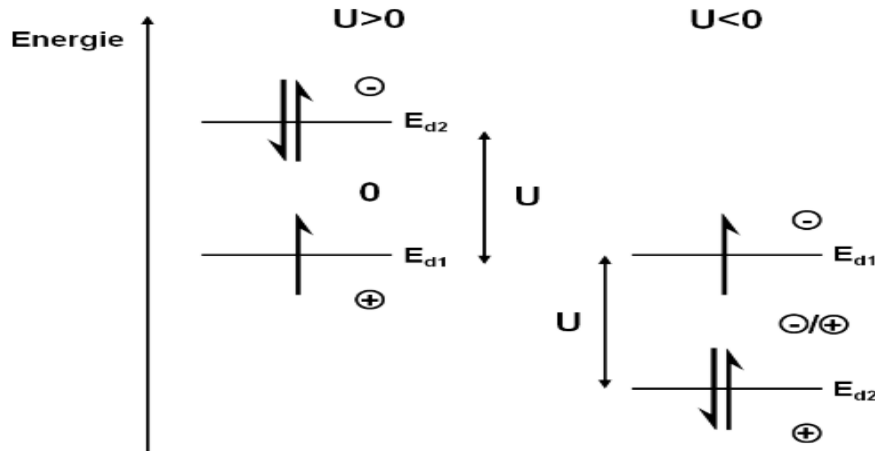


Figure II.9 : Représentation des niveaux énergétiques E_{d1} et E_{d2} dans les cas d'énergie de corrélation positive et négative. Il est également indiqué l'état de charge lorsque le niveau de Fermi se trouve dans une des 3 zones énergétiques délimitées par E_{d1} et E_{d2} [26].

E_{d1} : le premier niveau énergétique correspondant aux états D^+ ou D^0

E_{d2} : le deuxième niveau correspondant à l'état D^- avec $E_{d2} = E_{d1} + U$

Pour $U > 0$ l'énergie du niveau d1 est inférieure à celle de d2 et inversement.

II.3.2.1.3. Densité d'états

La densité d'états (DOS), telle que définie par Davis et Mott, composé de deux distributions principales pour les queues de bandes de conduction (QBC) et de valence (QBV), respectivement, et des distributions gaussiennes pour les états profonds, où la première se rapporte aux angles et les longueurs des liaisons entre les atomes (liées au désordre dans le matériau), et la seconde dépend spécifiquement des liaisons pendantes (la coordination). En plus des deux queues, en se limitant à deux gaussiennes profondes, la DOSN (E) peut s'écrire [27]:

$$N(E) = N_c e^{-\frac{E_c - E}{KT_c}} + N_{m1} e^{-\frac{(E_{m1} - E)^2}{2\sigma_1^2}} + N_{m2} e^{-\frac{(E_{m2} - E)^2}{2\sigma_2^2}} + N_v e^{-\frac{E - E_v}{KT_v}} \quad (II.2)$$

N_c : la densité d'états au bord de la bande de conduction.

N_v : la densité d'états au bord de la bande de valence.

T_c (T_v) : la température caractéristique de la QBC (QBV).

N_{m1} et N_{m2} : les densités d'états aux sommets des gaussiennes.

E_{m1} et E_{m2} : les positions dans le gap par rapport à E_c .

σ_1 et σ_2 : écart-type.

II.3.2.1.4. Rôle de l'hydrogène

L'hydrogène est un élément essentiel pour améliorer les propriétés électroniques du silicium amorphe. Sans l'hydrogène, la densité des liaisons pendantes s'élève à environ $10^{19}/\text{cm}^3$ et le gap optique est de l'ordre de 1,2 eV, donc, on ne peut pas doper le silicium amorphe. En se liant aux atomes de silicium (liaisons covalentes), l'hydrogène réduit la densité des liaisons pendante de 99,99%. Et provoque la disparition de certains cas localisés. L'hydrogène contribue également à réduire le désordre et à diminuer la largeur des queues de bandes et à une augmentation du gap optique.

La concentration d'hydrogène admissible doit varier entre 6 % et 35 %, dépassant principalement la densité requise pour la passivation des liaisons pendantes. Par ce que l'incorporation excessive d'hydrogène peut entraîner un cassé des liaisons faibles et l'introduction de nouvelles liaisons pendante[24]. (En réalité, il existe un équilibre de rupture des liaisons faibles Si-Si et de formation de liaisons pendantes assistées par l'hydrogène)[26].

II.3.2.2. Défauts induits par le dopage

II.3.2.2.1. Problématique du dopage dans a-Si:H

Spear et Le Comber ont démontré expérimentalement qu'il était possible de modifier la conductivité du silicium amorphe hydrogéné après avoir longtemps cru que le dopage était impossible, en introduisant des gaz d'impuretés comme la phosphine (PH_3)(type N) ou le diborane(B_2H_6)(type P). Cette modification de conductivité s'explique en rapprochant le niveau de Fermi de la bande de valence pour le dopage P et de la bande de conduction pour le dopage N. Mais bien qu'il puisse être dopé en a-Si:H, il est très inefficace[24][26].

Chaque fois que l'on essaie de doper le matériau, l'efficacité du dopage diminue, puisqu'elle ne dépasse pas 1% en général, le reste du matériau est tout inactif, ce qui entraîne une diminution la mobilité des porteurs et donc une augmentation du désordre. La majorité des porteurs libérés par les dopants sont piégés par les liaisons pendantes. En général, les forts dopages N ou P provoquent l'augmentation de la densité des défauts à l'intérieur de la bande interdite d'a-Si:H[26].

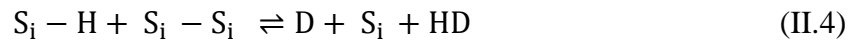
II.3.2.2.2. Mécanisme de formation des liaisons pendantes

L'hydrogène est un facteur intermédiaire très important dans la formation des liaisons pendantes du silicium amorphe hydrogéné où la densité des états de bande interdite des couches a-Si:H est formé principalement à partir des queues de bande, en raison de la faiblesse des liaisons Si-Si et des liaisons pendantes. Qui est formé par le mécanisme d'équilibre réalisé par l'hydrogène en rompant les liaisons faibles et en formant de nouvelles liaisons[26].

L'équation (II.3) représente un équilibre simple, ne faisant pas intervenir l'Hydrogène :



Les liaisons faibles (Si - Si) peuvent réagir avec une ou deux liaisons pendantes. Les espèces (Si - HD) et (Si - HH - Si) résultent passivées (Si - H) pour former respectivement une ou deux liaisons pendantes D.



Les équations(II.4) et (II.5) résumant les mécanismes de formation des liaisons pendantes.

II.3.3. Propriétés électronique du silicium amorphe

II.3.3.1. Définition générale de la conductivité électrique

Dans un matériau homogène, la conductivité électrique σ est due au mouvement des porteurs de charges, ce qui introduit la notion de conductivité en forçant le matériau à se déplacer suivant les lignes de champ. La densité de courant j traversant le matériau est déterminé par la loi locale d'Ohm sous l'influence du champ électrique ε [26].

$$j = \sigma \cdot \varepsilon \quad (\text{II.6})$$

La conductivité σ est définie de façon générale par l'équation suivante

$$\sigma = q \int \mu(E) D(E) F(E) dE \quad (\text{II.7})$$

Où

q : la charge de l'électron

$\mu(E)$: la mobilité d'un porteur à une énergie donnée E

$D(E)$: la densité d'états de porteurs disponibles pour la conduction

$F(E)$: la fonction probabilité d'occupation électronique décrite par la statistique de Fermi

II.3.3.2. Conduction dans les états étendus

Dans le cas de la conductivité des états étendus, les porteurs présents sont soit dans la bande de conduction (les électrons), soit dans la bande de valence (les trous), où ils s'expriment de la même manière que dans les semi-conducteurs cristallins[28].

En raison de la forte densité de pièges et de centres de recombinaisons dans la bande interdite d'a-Si:H, il y a peu de porteurs libres car les trous et les électrons sont piégés dans les régions des liaisons pendantes et des queues de bandes, puis retransmis dans leur position. Une quantité de porteurs restent disponibles à l'état stationnaire pour la conduction dans les états étendus qui déterminent également la position du niveau de Fermi par rapport aux bandes[26].

On peut alors exprimer la conductivité électrique σ_1 par la relation suivant :

$$\sigma_1 = \sigma_n + \sigma_p \quad (\text{II.8})$$

$$\sigma_1 = q(n\mu_n + p\mu_p) \quad (\text{II.9})$$

La conductivité électrique égale à la somme des produits des concentrations d'électrons n et de trous p par leurs mobilités respectives μ_n et μ_p .

II.3.3.3. Hopping

Le mot *hopping* signifie de petits sauts en français. C'est un terme pour le mécanisme de transfert d'électrons. À très basse température, la mobilité des porteurs devient presque nulle, le mécanisme *hopping* a donc été proposé dans les années cinquante du siècle dernier pour expliquer la conduction particulière des semi-conducteurs car il permet le transfert d'électrons entre les états localisés par effet tunnel à l'aide des phonons où la conduction ne se produit que par le saut activé thermiquement à travers les états localisés en dessous de E . Il existe également de nombreux modèles de *hopping*, notamment les modèles Miller, Abrahams et Mott. Le *hopping* peut être décrit comme un mécanisme diffusif avec une mobilité μ_{hop} en introduisant le coefficient de diffusion de D_{hop} associé à la probabilité de hopping ν et à la distance moyenne entre états locale r par la relation suivante [28][26].

$$D_{hop} = \frac{1}{6} \nu r^2 \quad (\text{II.10})$$

En utilisant la relation d'Einstein (II.11) pour présenter la mobilité de la diffusion

$$\mu = \frac{qD}{KT} \quad (\text{II.11})$$

Donc, l'équation de μ_{hop} devient la suivante

$$\mu_{\text{hop}} = \frac{q}{6KT} \nu r^2 \quad (\text{II.12})$$

La fréquence de saut ν d'un site d'énergie E à un autre site d'énergie $E + w$ ($w > 0$) est donnée par l'équation

$$\nu = \nu_{ph} e^{\left(-2\frac{r}{r_0} - \frac{w}{KT}\right)} \quad (\text{II.13})$$

ν_{ph} : la fréquence d'un phonon ($\sim 10^{13} \text{s}^{-1}$)

r : la distance entre les deux sites

r_0 : la distance moyenne entre deux états localisés

w : la différence d'énergies

II.3.3.4. Résumé des lieux et mécanismes de conduction dans a-Si:H

La figure (II.10) illustre dans un diagramme d'énergie les contributions relatives des différents mécanismes de conduction possibles dans a-Si:H dans le cas où les porteurs majoritaires sont les électrons :

σ_1 , σ_2 et σ_3 sont les conductivités associées respectivement à la conduction :

- i. dérivate-diffusion dans les états étendus ($E > E_C$)

$$\sigma_1 = \sigma'_1(T) e^{\left(-\frac{E_A}{KT}\right)} \quad (\text{II.14})$$

- ii. hopping dans les queues de bandes ($E_T < E < E_C$)

$$\sigma_2 = \sigma'_2 e^{\left(-\frac{E'_A + w}{KT}\right)} \quad (\text{II.15})$$

- iii. hopping dans les états profonds ($E \sim E_F$)

$$\sigma_3 = \sigma'_3 e^{\left[-\left(T_0/T\right)^{\frac{1}{4}}\right]} \quad (\text{II.16})$$

Avec : E'_A : L'énergie d'activation, E_T : est une énergie caractéristique située dans les queues de bandes.

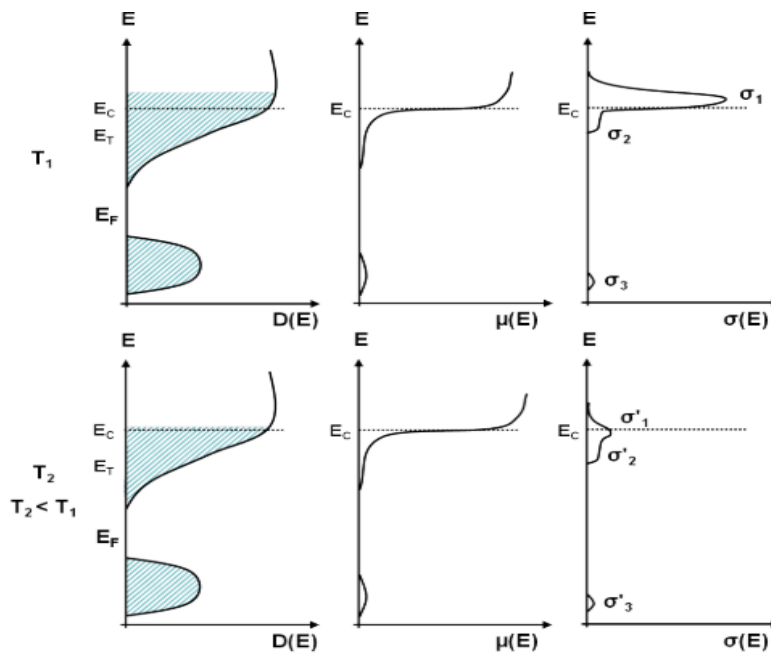


Figure II.10 : Illustration des différents lieux de conduction possibles dans la densité d'états du silicium amorphe ainsi que de leur importance relative pour deux températures T_1 et T_2 avec $T_1 > T_2$ [26].

II.4. Silicium polycristallin

II.4.1. Propriétés structurales

II.4.1.1. Structure d'un film de silicium polycristallin

Comme nous l'avons mentionné précédemment, le silicium polycristallin est constitué de grains de silicium monocristallin de différentes directions, séparés par des joints de grains. Par conséquent, la structure du silicium polycristallin est soit granulaire ou colonnaire.

Le film de silicium polycristallin colonnaire a des grains traversant verticalement son épaisseur. Les propriétés électroniques et physiques du film dépendent principalement de la taille moyenne des grains, car elle est prise comme une référence et une fonction afin de connaître les conditions du dopage, de dépôt et des traitements thermiques.

La structure d'un film peut être décrite par une approximation d'homogénéisation locale. La densité de joints de grains est égale à la surface totale des joints de grains par unité de volume de silicium polycristallin[13][29]. Les figures(II.11), (II.12) présentes les différentes structures du silicium polycristallin.

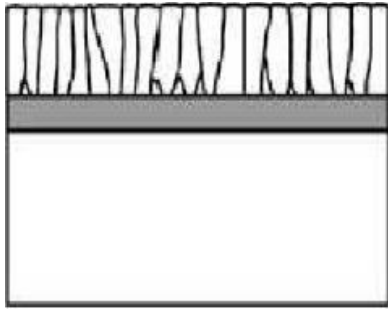


Figure II.11 : structure colonnaire [29].

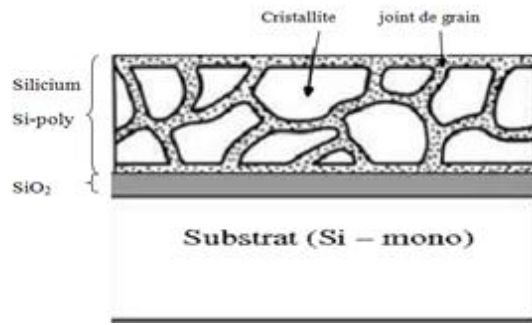


Figure II.12 : structure granulaire.

II.4.1.2. Effet de la température sur la taille des grains

À haute température, la taille des grains de silicium polycristallin augmente et la densité des joints de grains diminue, ce qui signifie que chaque fois que la température s'élève au-dessus de la température ambiante, le phénomène de croissance des grains se produit[13].

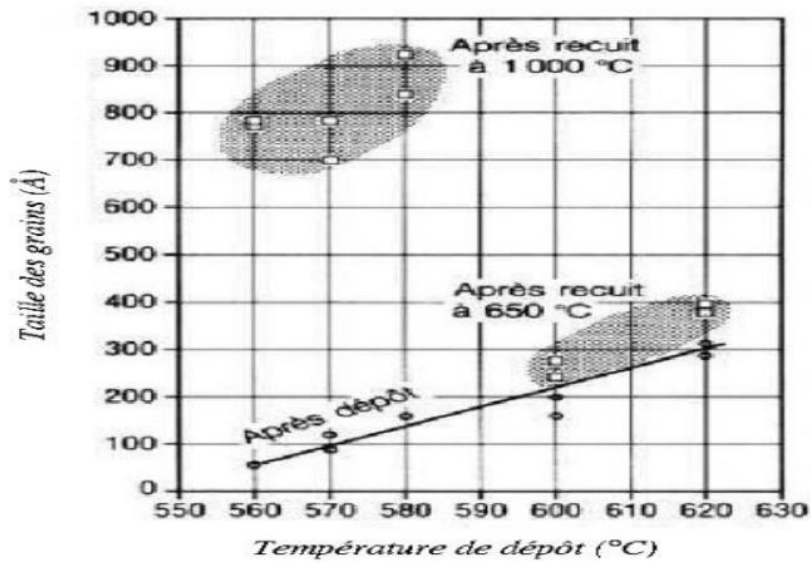


Figure II.13 : Taille moyenne des grains en fonction de la température de dépôt de silicium polycristallin (Epaisseur du dépôt 0.5 µm)[13].

II.4.2. Défauts dans le silicium polycristallin

Les défauts du silicium polycristallin peuvent être classés en deux types : Les défauts cristallographiques et Les défauts chimiques.

II.4.2.1. Les défauts cristallographiques

i. Les joints de grains

Les joints de grains sont composés par les surfaces adjacentes de grains d'orientation cristallographiques divers[29], Il a également une structure désordonnée et contient de grandes quantités de liaisons pendantes qui piègent les porteurs minoritaires présents dans la bande interdite car ils attirent les porteurs majoritaires, ce qui conduit à affaiblir leur présence et à une dégradation des propriétés électriques des semi-conducteurs poly-cristallins.

Lorsque la densité des éléments dopants augmente, les joints de grains deviennent le siège de la séparation des éléments dopants, ce qui conduit à leur inhibition, c'est-à-dire qu'ils deviennent inactifs. Cet effet est plus important si le rayon atomique du dopant est grand par rapport au rayon atomique du silicium[23].

ii. Les défauts intra-granulaires

On distingue trois types de défauts intra-granulaires du silicium, les dislocations, les sous-joints et les joints de macles.

- ❖ Les défauts linéaires, qui sont des dislocations, résultent de la distorsion de deux régions adjacentes de la structure cristalline ou du déplacement de certains niveaux atomiques. Au cours de l'élaboration du matériau, des chocs thermiques se produisent qui conduisent à l'apparition de la dislocation et provoquent la stimulation de liaisons pendantes et augmenter la vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires car ces défauts sont activés électriquement, ce qui conduit à une diminution de la longueur de diffusion, détériorant ainsi les propriétés électriques du poly silicium. La présence d'une grande quantité de dislocation entraîne l'apparition de sous-joints[23].
- ❖ Les sous-joints séparent à l'intérieur d'un cristal des zones d'orientation proche. En général, l'angle de désorientation est inférieur à 15° . Ces joints sont actifs électriquement à cause de la présence de dislocations[23].

- ❖ Une macle est un défaut d'empilement causé par la transformation locale de la séquence caractéristique d'atomes dans le silicium en une structure symétrique (une association orientée de deux ou plusieurs cristaux identiques).

Les atomes sont disposés sur le plan des joints de macle sans modifier la longueur des liaisons atomiques ni le degré de l'angle sauf pour le deuxième voisin, qui change dans ce plan. Voigt et Gallien ont observé qu'environ la moitié des joints de grains dans les siliciums poly-cristallins sont en réalité des joints de macle[30].

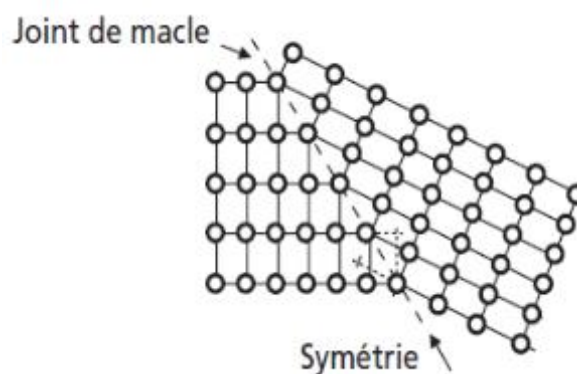


Figure II.14 : Schématisation à deux dimensions d'un joint de macle.

II.4.2.2. Les défauts chimiques

Les défauts chimiques, sont des impuretés (comme L'hydrogène et L'oxygène) incorporées dans le silicium polycristallin soit dans la chambre du dépôt, soit pendant le processus de cristallisation, ou alors exprès pour la passivation des défauts ou pour le dopage de la couche[23].

i. L'hydrogène

L'hydrogénation des couches poly-cristallines permet la passivation des liaisons pendantes provoquées par les dislocations. Cela se fait en formant des liaisons entre les atomes d'hydrogène et les défauts structuraux du silicium (liaisons pendantes). Les barrières de potentiel présentes aux joints de grains ainsi que la densité d'états électroniques dans la bande interdite sont réduites. Il active également la mobilité des porteurs de charge et augmente la longueur de diffusion[23].

ii. L'oxygène

L'hydrogène est l'une des impuretés les plus compatibles avec le silicium. Précipité sous forme de SiO_x. Il agit pour piéger les impuretés dans la couche et détériorer la durée de vie et la longueur de diffusion des porteurs minoritaires[23].

II.4.3. Propriétés électroniques

Le silicium polycristallin possède des propriétés électroniques importantes, c'est pourquoi de nombreuses études ont été menées pour connaître et comprendre ces propriétés.

Les joints de grains du silicium poly-cristallins, considérés comme des défauts basiques sont caractérisés par une activité électrique. Les propriétés des joints de grains contrôlent la plupart des propriétés optiques et électriques des matériaux poly-cristallins. L'un des processus physiques les plus importants à prendre en compte est l'interaction de ces derniers avec les porteurs de charge libres, les défauts ponctuels intrinsèques et les impuretés[13].

II.4.3.1. Effet du dopage sur les caractéristiques électroniques

La microstructure des grains a un rôle important dans le mouvement et la vie des porteurs, en plus de la concentration de dopage et de la température.

Les caractéristiques électriques de si-poly de type N montrent que ses propriétés sont différentes de ceux de type P. Le comportement particulier de la résistivité est montré par la (figure II.15).

La résistivité d'un matériau polycristallin, de type N ou de type P est élevée pour les faibles dopages, décroît rapidement aux dopages intermédiaires, pour que finalement se compare avec les valeurs du silicium monocristallin à des concentrations élevées de dopage (figure II.15). Cependant, pour des concentrations de dopant entre 10^{17} cm et 10^{20} cm, le silicium polycristallin de type N et P présentent une différence significative[13].

Le si-poly de type N a une résistivité inférieure comparée à celle de type P.

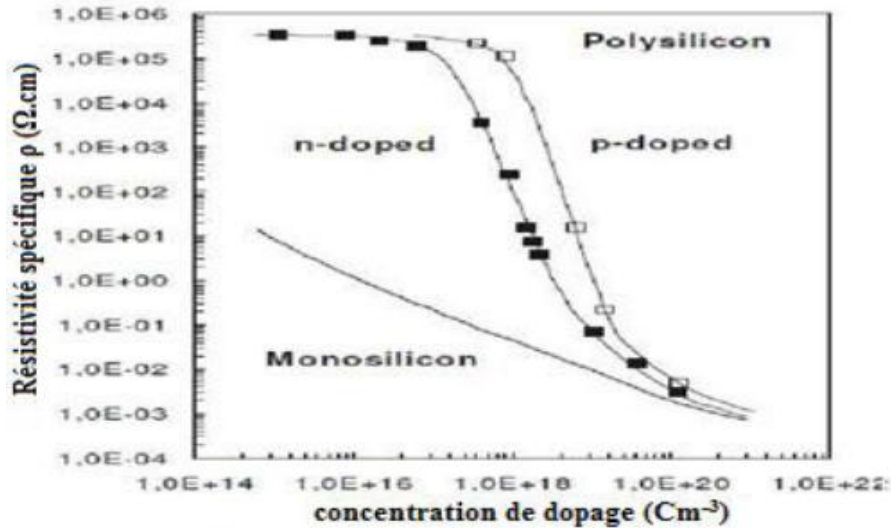


Figure II.15 : Résistivité du silicium poly et monocristallin en fonction du niveau de dopage[13].

II.4.3.2. Influence de la température de dépôt sur la résistivité du silicium polycristallin

Lors du dopage du silicium polycristallin, ces atomes dopants se lient aux joints de grains et se fixent avec les liaisons pendantes, ce qui conduit à des joints de grains ayant une charge électriquement neutre, se comportant comme des barrières électriques.

La résistivité du matériau est affectée par plusieurs facteurs tels que la température et les conditions de dépôt. Lorsque le silicium est déposé à une température supérieure à la température ambiante T , cela conduit à la formation d'un grand nombre de pièges et donne une barrière de potentiel et une épaisseur plus importante des joints de grains. Ce qui rend la résistivité au joint de grain supérieur à celle du grain. Par conséquent, la résistivité du silicium polycristallin est grande[13].

C'est-à-dire que plus la température est élevée, plus la valeur de la résistance du silicium polycristallin n'est élevée.

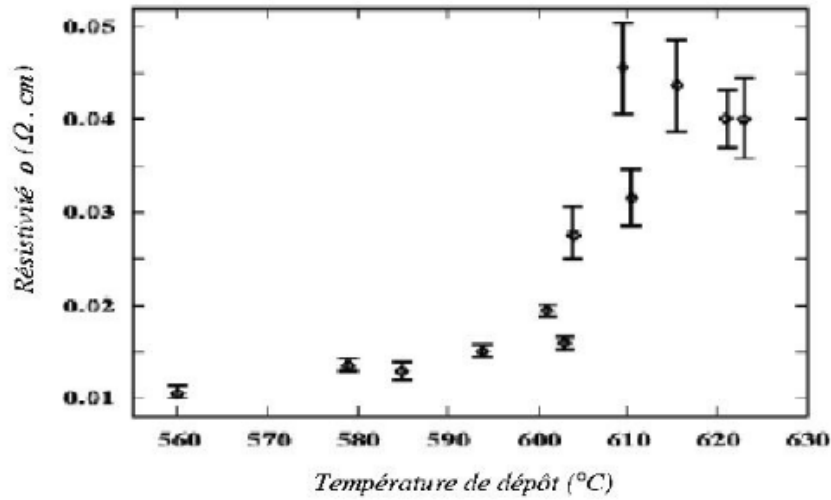


Figure II.16 : Résistivité du silicium polycristallin en fonction de la température de dépôt[13].

II.4.4. Propriétés de transport des porteurs dans le silicium polycristallin

II.4.4.1. Modèle de ségrégation des dopants

Afin d'expliquer la variance de la résistivité en fonction de la concentration de dopant, ce modèle a été proposé par Cocher et Sidgwick[29] (basé sur le mécanisme de la ségrégation des dopants), la première hypothèse est que les sites préférés pour séparer les impuretés sont les joints de grains, pour les faibles concentrations de dopant, car tous les atomes sont situés dans les sites de joints de grains, qui sont électriquement inactifs. De ce fait, la quantité d'impuretés à l'intérieur des grains est réduite et la concentration des porteurs devient bien inférieure à la concentration des dopants qui est supposée être uniformément répartie. C'est-à-dire que lorsque le dopage est augmenté, les joints de grains sont saturés d'impuretés et les atomes sont uniformément distribués dans le grain. Ainsi, la concentration en porteurs libres rejoint la concentration en dopant, la résistivité du film de silicium polycristallin, qui initialement décroît très rapidement, croît linéairement avec la concentration en dopant à fort dopage.

II.4.4.2. Modèle de piégeage des porteurs

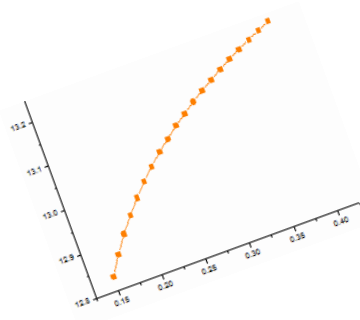
Pour expliquer les propriétés électriques des couches de poly-silicium, ce modèle a d'abord été proposé par Kamins[13]. Cependant, le premier à développer ce modèle et prouver son efficacité c'est Seto en réalisant une étude quantitative du silicium polycristallin

Ce modèle présente l'hypothèse que les atomes d'impuretés sont uniformément répartis dans des films de silicium polycristallin et que les joints de grains contiennent un grand nombre d'états pièges qui sont initialement neutres, car les états pièges se chargent électriquement par capture de porteurs, ainsi des barrières potentielles sont formées. Ce qui limite le passage libre des porteurs d'un grain à l'autre. En plus des régions désertées de porteurs, tous les porteurs sont piégés. En conséquence, la concentration de porteurs libres est très faible et la résistivité est très élevée. Cependant, lorsque la concentration de dopage augmente, les états pièges se saturent en porteurs et les barrières potentielles atteignent leur maximum et la mobilité son minimum. La résistance diminue, ce qui est compensé par une augmentation de la concentration en porteurs libres. Cela est dû à l'augmentation du dopage, la largeur des régions désertées devient très étroite avec des barrières de potentiel de très faible hauteur, la concentration des porteurs libres approche la valeur de la concentration de dopant et la résistivité approche celle du silicium monocristallin.

Grâce à Seto, le modèle de piégeage des porteurs a été développé et a pu bien expliquer les propriétés du silicium polycristallin, Il s'agit notamment des propriétés de conduction électrique, sur la base d'un ensemble d'hypothèses :

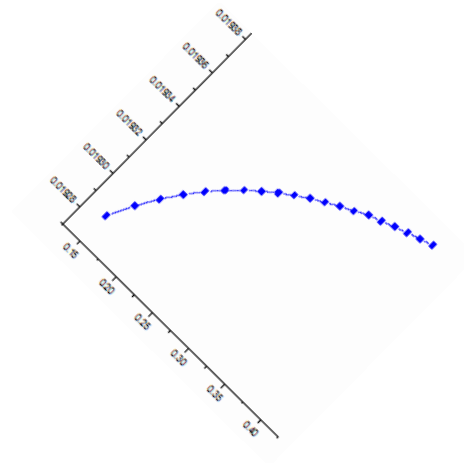
- Grains identiques de taille L .
- Les joints de grains ont une épaisseur négligeable par rapport à la taille des grains, et contiennent une densité d'états pièges Q_i , situés à un niveau d'énergie E_i par rapport au niveau intrinsèque dans la région neutre.
- Les pièges sont initialement neutres et se chargent en piégeant des porteurs.
- Présence d'un seul type d'atomes de dopant uniformément distribués et totalement ionisés avec une concentration N dans la couche de silicium poly- cristallin.

Enfin, pour une bonne explication des propriétés de conduction électrique dans les couches de silicium polycristallin, les deux modèles doivent être combinés, il faut donc s'appuyer sur le modèle de piégeage en tenant compte de la ségrégation des dopants. Car, les différences de propriétés ne peuvent pas être expliquées par des traitements thermiques et des espèces dopantes différentes[13].



Chapitre III

Simulation des cellules solaires en silicium polycristallin et amorphe



III.1 Introduction

Un grand nombre de paramètres influent sur le fonctionnement de la cellule solaire. Ces paramètres qui sont les matériaux utilisés et la géométrie de la cellule ne sont pas dépendants, ce qui rend nécessaire l'étude de l'influence de tous ces paramètres. Une optimisation de ces paramètres est nécessaire quel que soit la structure, pour avoir un bon rendement. En raison des coûts élevés de l'expérimentation et la fabrication des cellules solaires, plusieurs chercheurs se sont orientés vers la simulation numérique. Cette dernière permet d'éviter la fabrication de plusieurs prototypes de la cellule avec des paramètres différents, indépendante de la technologie utilisée, ainsi elle est très rapide, donc gagnant du temps et de l'argent.

Le but de ce chapitre est l'étude comparative des différentes structures à base de silicium, dans laquelle nous allons étudier l'influence des paramètres géométriques et physiques tel que l'épaisseur de la base, le dopage ainsi que la durée de vie sur les caractéristiques de sortie des différentes cellules photovoltaïques en couche mince de type $n^+/p/p^+$ en utilisant le simulateur PC1D qui sera détaillé dans la suite de chapitre.

L'étude fondée sur la combinaison de simulations numériques et de résultats expérimentaux obtenus à partir de la réalisation de cellules photovoltaïques. Pour étudier l'influence d'un paramètre, on va le faire varier sur un intervalle donné, mais tous les autres paramètres resteront fixés. Pour chaque variation d'un paramètre donné, on a généré les caractéristiques de sortie : la tension de circuit ouvert V_{CO} , le courant de court circuit I_{CC} , et le rendement de conversion η de la cellule sous l'éclairement AM1.5 .

III.2.Présentation du programme PC1D

III.2.1. Aperçu du logiciel

Le PC1D (personnel computer one-dimensionnel) a été développé en 1985 (première version) par Paul A. Basare à l'université « **New South Wales of Sydney** » en Australie à la faculté d'ingénierie électrique, La deuxième version a été présentée en 1988 (La dernière version vérifiée 6.2 de PC1D a été lancée à partir de février 2016)[31][32][33].

Le logiciel PC1D a été développé et utilisé car il a prouvé son efficacité dans la résolution d'équations non linéaires liées à divers phénomènes physiques. Elle a également été utilisée notamment dans le fonctionnement de composants semi-conducteurs, notamment photovoltaïques, de sorte que la compréhension des cellules photovoltaïques devient plus facile grâce au mouvement des porteurs minoritaires et à divers phénomènes photovoltaïques internes tels que la recombinaison et la photo-génération. Ce programme a montré d'excellents résultats proches des résultats expérimentaux.

Le logiciel se divise en quatre parties distinctes. Les trois premières sont consacrées à la programmation où il faut introduire respectivement les paramètres du dispositif, les paramètres des régions et les paramètres de l'excitation. Dans la quatrième partie sont affichés les résultats de la simulation.

Le PC1D permet de créer plusieurs régions (5 régions maximum) selon leurs géométries et leurs propriétés. La simulation de la structure photovoltaïque est réalisée en introduisant en premier lieu ses différents paramètres (géométrie, dopages, paramètres électriques et optiques, etc...), ensuite, on choisit l'excitation caractéristique et enfin, l'exécution du programme.

III.2.2. Les paramètres du dispositif (Device)

- La surface du dispositif
- La texturisation
- La densité de charge surfacique
- La couche de passivation
- La réflectance externe
- La réflectance interne
- Les résistances séries internes
- Les résistances shunt internes

III.2.3. Les paramètres des régions

On peut introduire plusieurs régions selon la forme et les propriétés de la structure. Ces paramètres de région sont les suivants :

- L'épaisseur du matériau,

- Le matériau utilisé : les paramètres qui le décrivent sont stockés dans des fichiers d'extension (*.mat). ils sont : les mobilités, le constant diélectrique (permittivité électrique), la concentration intrinsèque (cm^{-3}), l'énergie du gap (eV), l'indice de réfraction, le coefficient d'absorption optique (cm^{-1}) et l'absorption des porteurs libres,
- Le type et la concentration du dopage (type N ou bien P) : le dopage dans ce logiciel présente quatre profils (le profil uniforme, le profil exponentiel, le profil gaussien et le profil décrivant la fonction erreur 'erfc'), la concentration maximale est de 10^{19}cm^{-3}
- Les durées de vie des porteurs,
- Les vitesses de recombinaison dans chaque région.

III.2.4. Les Paramètres d'excitation

- Cette partie contient deux fichiers intégrés au programme qui permettent de simuler certaines caractéristiques telles que la caractéristique courant-tension et autre caractéristiques en utilisant le fichier « **One-Sun.exc** » (intensité globale de tout le spectre du soleil), ou la simulation de la réponse spectrale en utilisant le fichier « **Scan-qe.exc** » (intensité de chaque longueur du spectre).
- Mode d'excitation : il y a trois modes d'excitation (en équilibre, stationnaire et transitoire),
- Température,
- Circuit (résistance, tension),
- Eclairement (intensité, fichier d'air masse).

III.2.5. Visualisation des résultats

A travers cette partie, on peut visualiser les résultats à l'aide du fichier d'excitation « **One-Sun.exc** »

- La valeur du courant de court-circuit I_{CC} ,
- La valeur de la tension en circuit ouvert V_{CO} ,
- La valeur de la puissance maximale.

Ceux obtenus avec le fichier « **Scan-qe.exc** » sont :

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

III.3. Fenêtre du PC1Dmod 6-2

Parameter file: (new parameters)
 Configuration file: (default)
 => *select configuration file*

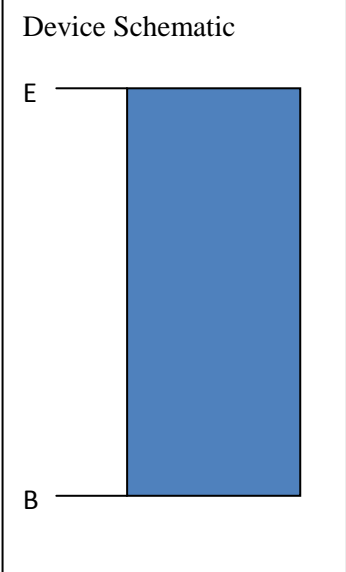
DEVICE
 Device area: 1 cm²
No surface texturing
No surface charge
No Exterior Front Reflectance
No exterior Rear Reflectance
No internal optical reflectance
 Emitter contact enabled
 Base contact enabled
No internal shunt elements
 (Global) band structure parameters

REGION 1
 Thickness: 10 μm
 Material from program defaults
 Dielectric constant: 11.9
 Refractive index: 3.58
 Absorption coeff. from internal model
 Free carrier absorption enabled
 P-type background doping: $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$
No frond diffusion
 No rear diffusion
 Bulk recombination: $\tau_n = \tau_p = 1000 \text{ } \mu\text{s}$
No Front-surface recombination
 No Rear-surface recombination

EXCITATION
 Excitation mode: Steady State
 Temperature: 300 K
Base circuit: Zero
Collector circuit: Zero
Light sources disabled

RESULTS
Base contact

Device Schematic



III.4. Structure simulée

Les cellules étudiées dans ce mémoire est de type **n+/p/p+** qui présente une surface de 1 cm² ainsi qu'une texturisation à la surface avant.

Les cellules sont à base de silicium polycristallin (poly-Si) et de silicium amorphe, d'épaisseur 4 μm avec un émetteur de type **n+** dopé Phosphore d'épaisseur 0,5 μm, d'une base d'épaisseur 3 μm de type **p** dopé Bore et d'une couche BSF d'épaisseur 0,5 μm de type **p+** dopé Bore, comme indiqué dans la figure (III.1).

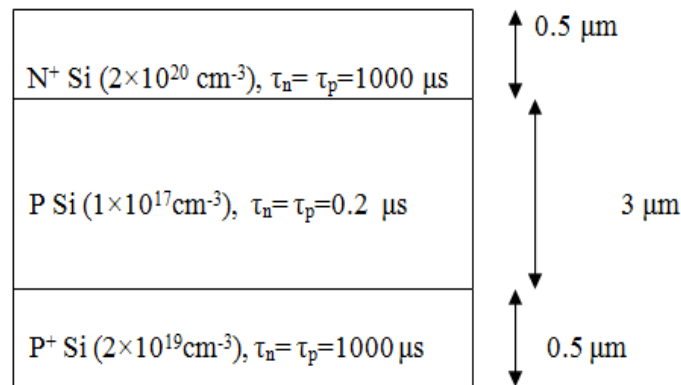


Figure III.1 : la structure et les paramètres de la cellule de référence utilisée pendant la simulation

A partir de la cellule de référence décrite dans la figure (III.1), nous avons fait varier l'épaisseur de la base, son dopage et la durée de vie en volume de la base. Puis nous avons généré les caractéristiques de sortie : la tension en circuit ouvert V_{co} , le courant de court-circuit I_{cc} , et le rendement η . Les intervalles des variations est résumé dans le tableau (III.1).

Tableau III.1 : paramètres variables pendant la simulation pour la base :

Paramètres	L'intervalle des valeurs
L'épaisseur	[1 μm ,6 μm]
Dopage	[$1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$]
Durée de vie	[0.15 μs , 10 μs]

III.5. Effets des caractéristiques géométriques et physiques sur Les paramètres de sortie d'une cellule photovoltaïque

III.5.1. Effets de l'épaisseur de la base sur les caractéristiques de sortie

Notant qu'un substrat trop épais accroît le coût de fabrication d'un module. Et dans le but de réduire la proportion de silicium cristallin dans le coût de fabrication, les industriels du photovoltaïque prévoient une réduction importante de l'épaisseur des plaquettes. Dans cet esprit, nous allons voir l'influence de l'épaisseur du substrat sur les caractéristiques électriques de notre cellule.

Pour étudier l'influence de l'épaisseur x_b de la base sur les différentes caractéristiques électriques de sortie de la cellule, à savoir le courant de court-circuit I_{cc} , la tension en circuit ouvert V_{co} et le rendement η , nous avons varié l'épaisseur x_b de [1-6] μm tout en fixant les autres paramètres. Les résultats de la simulation sont représentés sur les figures (III.2, III.3 et III.4) pour le courant de court-circuit I_{cc} , la tension en circuit ouvert V_{co} et le rendement η respectivement pour le silicium polycristallin et amorphe.

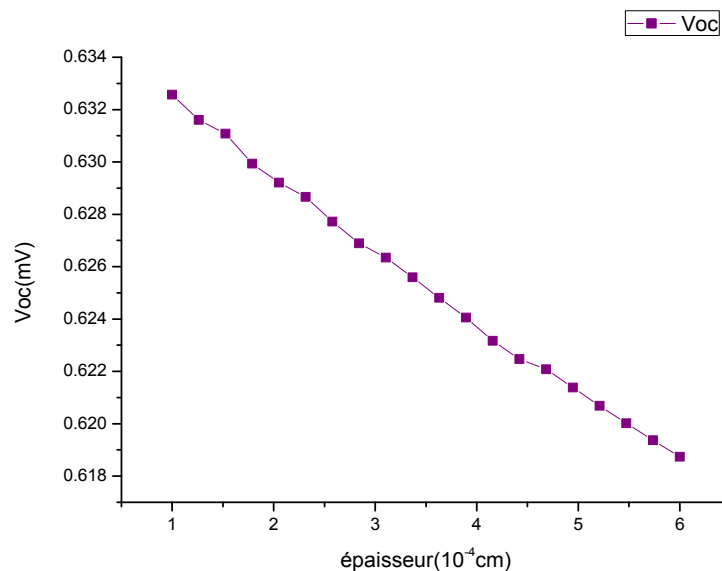


Figure III.2-a: Effet de l'épaisseur de la base sur la tension (V_{co}) d'une cellule en silicium polycristallin.

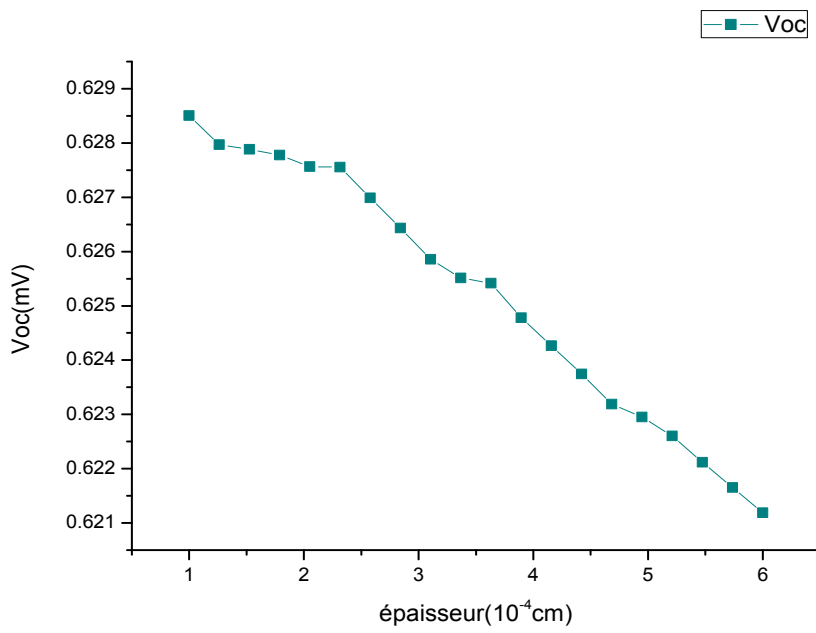


Figure III.2-b : Effet de l'épaisseur de la base sur la tension (V_{co}) d'une cellule en silicium amorphe.

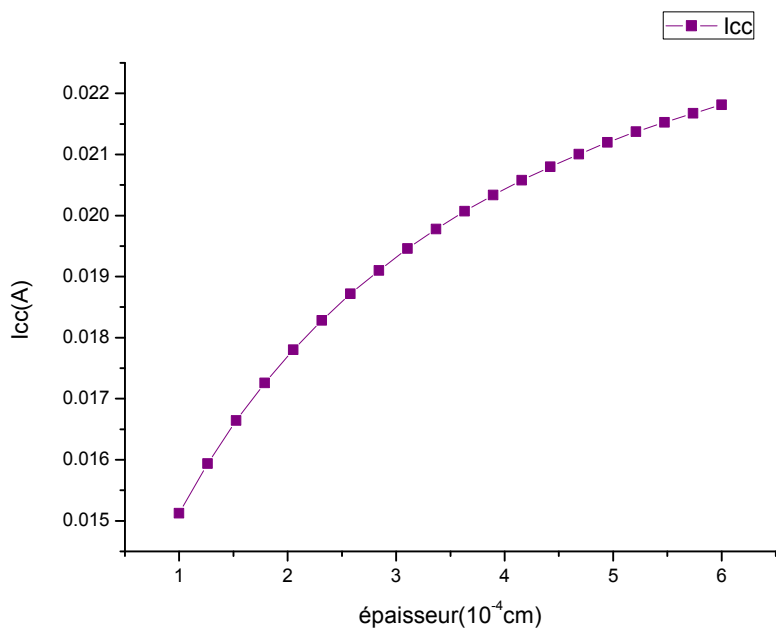


Figure III.3-a : Effet de l'épaisseur de la base sur le courant de court circuit (I_{cc}) d'une cellule en silicium polycristallin.

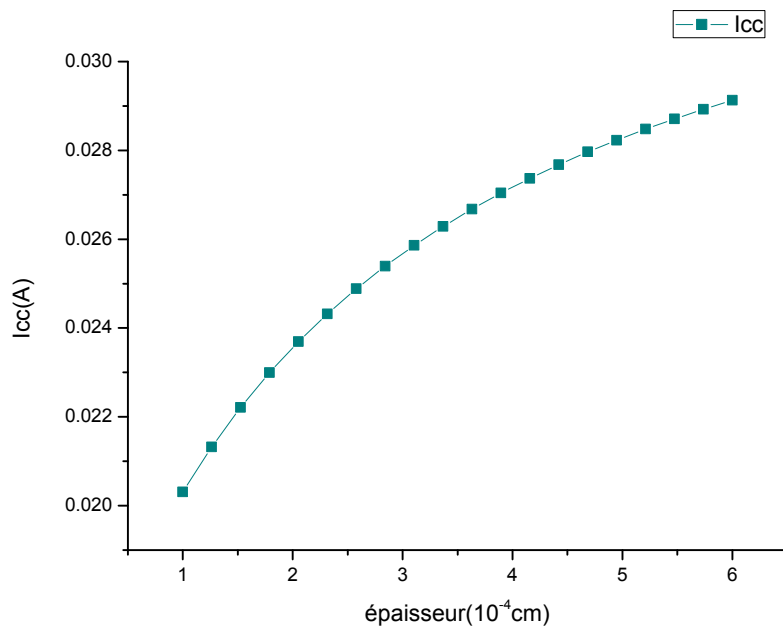


Figure III.3-b : Effet de l'épaisseur de la base sur le courant de court circuit (I_{cc}) d'une cellule en silicium amorphe.

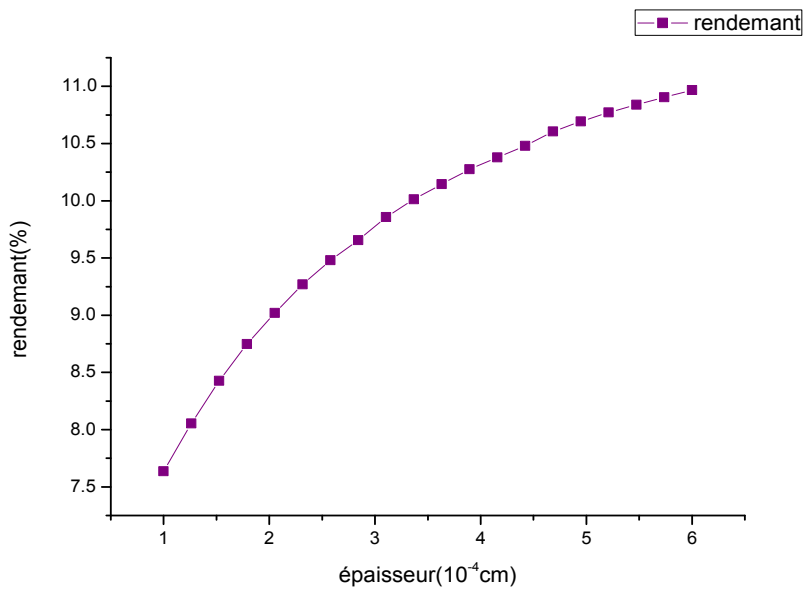


Figure III.4-a: Effet de l'épaisseur de la base sur le rendement d'une cellule en silicium polycristallin.

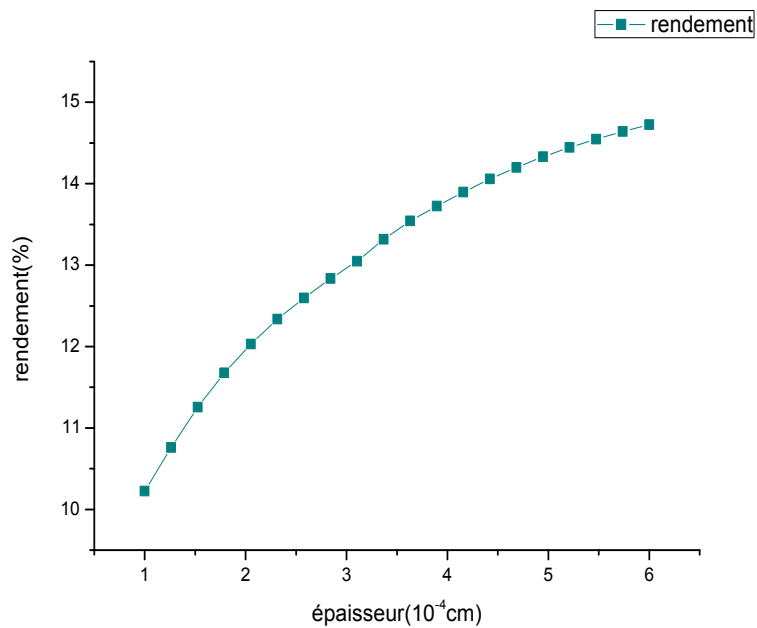


Figure III.4-b : Effet de l'épaisseur de la base sur le rendement d'une cellule en silicium amorphe.

Il est clair que l'augmentation de l'épaisseur du substrat est un avantage pour absorber plus de photons, mais si la longueur de diffusion L est inférieure à l'épaisseur de la base, le photo-courant est fortement diminué[34]. D'après l'allure de V_{co} de la figure III.2, on remarque que plus l'épaisseur de la base (couche de type **P**) augmente plus la tension en circuit ouvert diminue. La même remarque pour la variation de (V_{co}) est observée pour la cellule en silicium amorphe mais moins importante que le poly silicium. Donc on peut dire que l'influence de l'épaisseur sur la tension en circuit ouvert est importante. C'est en raison de l'augmentation de la résistance de la base que cette diminution est due, puisque le (V_{co}) est affecté par la résistance série.

Par contre, on remarque qu'avec l'augmentation de l'épaisseur du substrat, le courant de court-circuit prend une allure croissante, qui peut être expliqué par le fait que l'augmentation de l'épaisseur du substrat signifie augmentation de l'absorption des photons. En effet, les photons très énergétiques qui pénètrent profondément dans le silicium sont collectés qui peut s'expliquer par la grande longueur de diffusion des porteurs minoritaires par rapport à l'épaisseur de la base.

Le rendement quant à lui suit les variations du courant de court-circuit en montrant une nette amélioration pour les deux types de cellules. On peut constater également, que la

dépendance avec (V_{co}) de rendement est assez faible, de ce fait, la dépendance avec (V_{co}) de l'épaisseur de la base est assez faible.

Nous constatons aussi que l'amélioration de rendement de la cellule en silicium amorphe (avec environ 4,2 %) est plus importante par rapport à la cellule en silicium polycristallin (avec environ 3,4 %) lorsque l'épaisseur de la base variée dans l'intervalle [1-6] μm , qui peut être s'expliquer par l'influence des grains sur le comportement électrique du poly silicium. En effet, plus l'épaisseur est grande plus les porteurs rencontrent un plus grand nombre de joints de grains qui se comportent comme pièges pour les électrons, ceci a pour effet un amortissement d'amélioration de rendement.

III.5.2 Effet du dopage de la base sur les caractéristiques de sortie :

La détermination du comportement par rapport à la concentration de dopants (dopage) est d'un grand intérêt pour l'optimisation des cellules photovoltaïques en silicium polycristallin et silicium amorphe.

L'augmentation du dopage N_d de la base entraine une amélioration des paramètres électriques des cellules par la diminution des pertes résistives. En effet, d'un côté l'augmentation de la concentration des atomes dopants dans le substrat induit une augmentation de sa conductivité et donc une amélioration de ses propriétés électriques qui se reflètent par l'amélioration des performances photovoltaïques de la cellule. Mais, d'un autre côté, l'augmentation de N_d permet de diminuer la largeur de la zone de charge d'espace dans la couche absorbeur, ce qui diminue leur performances. En effet, la durée de vie des porteurs décroît avec une concentration de dopants plus importante. Donc, il faut prendre en compte cette dépendance pour déterminer les résultats de simulation lorsqu'on fait varier la concentration de dopants.

Pour étudier l'influence de dopage de la base sur les différentes caractéristiques électriques de sortie de la cellule, à savoir le courant de court-circuit I_{cc} , la tension en circuit ouvert V_{co} et le rendement η , nous avons varié cette dernière de [$1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$] tout en fixant les autres paramètres. Les résultats de la simulation sont représentés sur les figures (III.5, III.6 et III.7) pour le courant de court-circuit I_{cc} , la tension en circuit ouvert V_{co} et le rendement η respectivement pour le silicium polycristallin et amorphe.

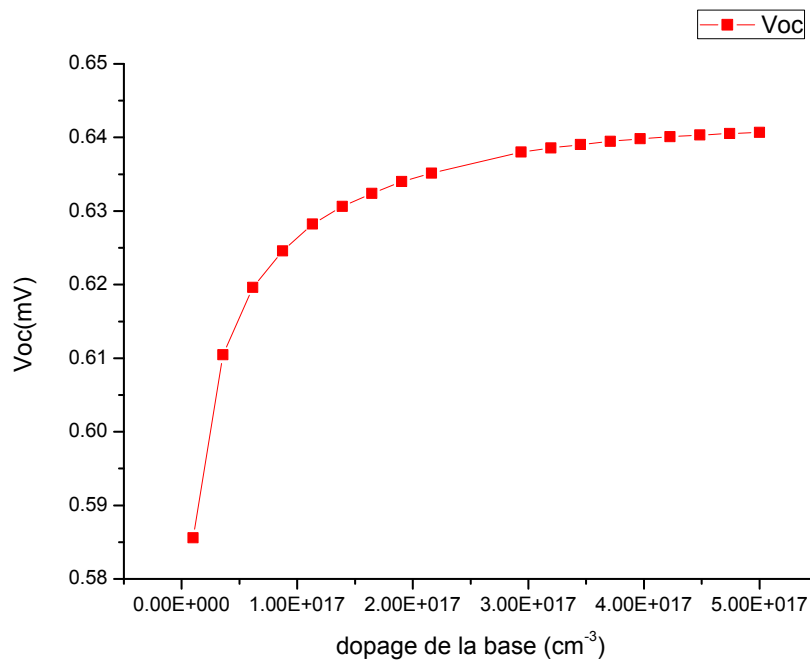


Figure III.5-a : Effet du dopage de la base sur la tension (V_{co}) d'une cellule en silicium polycristallin.

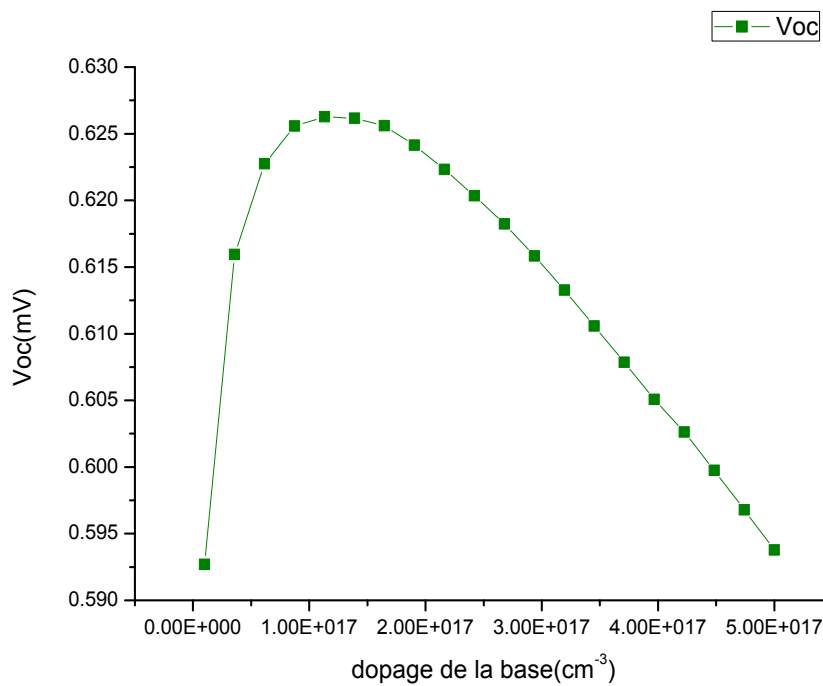


Figure III.5-b: Effet du dopage de la base sur la tension (V_{co}) d'une cellule en silicium amorphe.

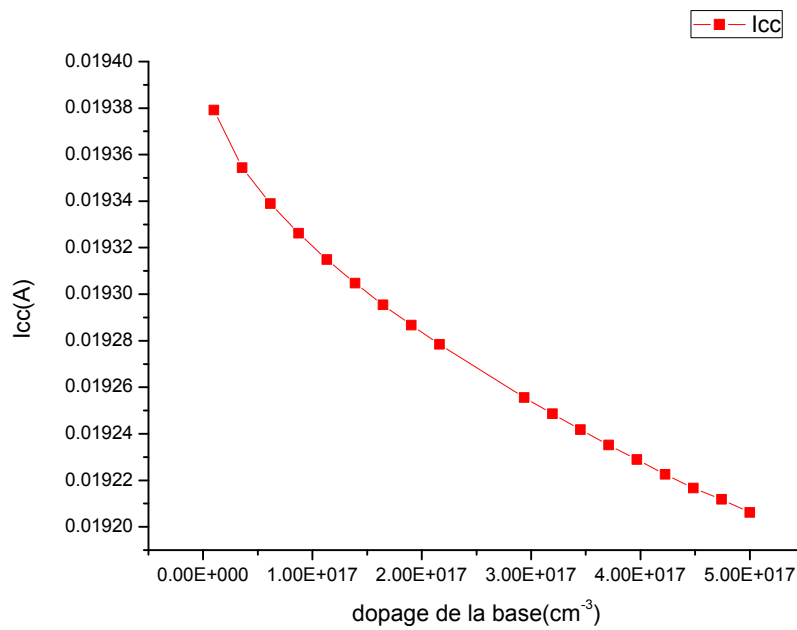


Figure III.6-a : Effet du dopage de la base sur le courant de court-circuit (I_{cc}) d’une cellule en silicium polycristallin.

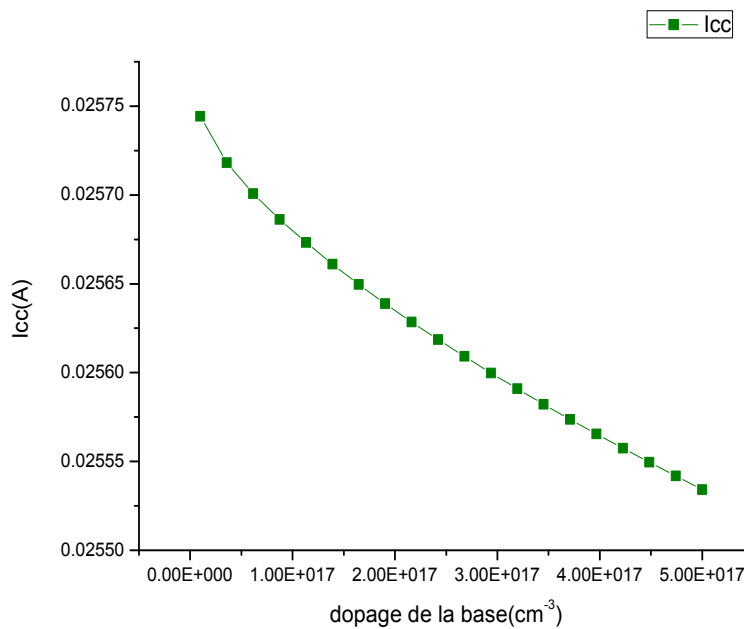


Figure III.6-b: Effet du dopage de la base sur le courant de court circuit (I_{cc}) d’une cellule en silicium amorphe.

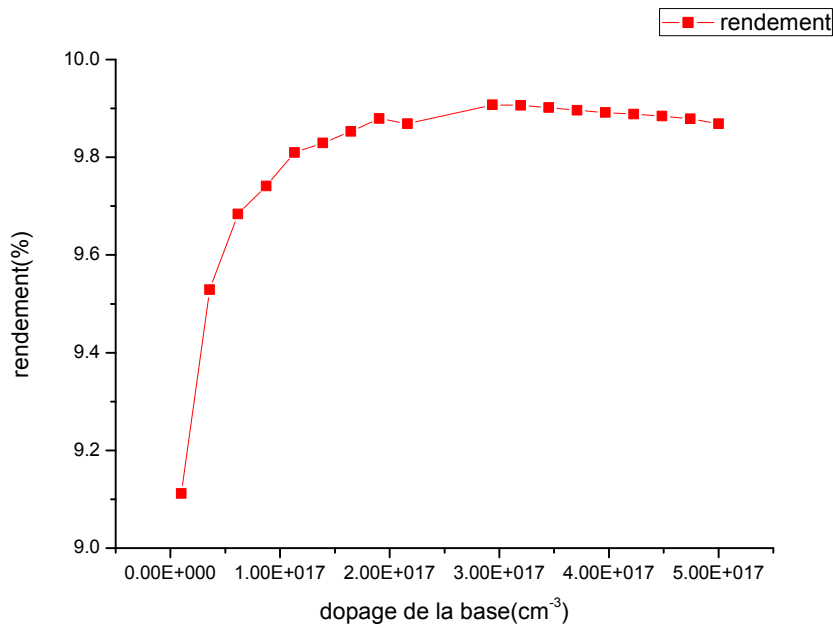


Figure III.7-a : Effet du dopage de la base sur le rendement d’une cellule en silicium polycristallin.

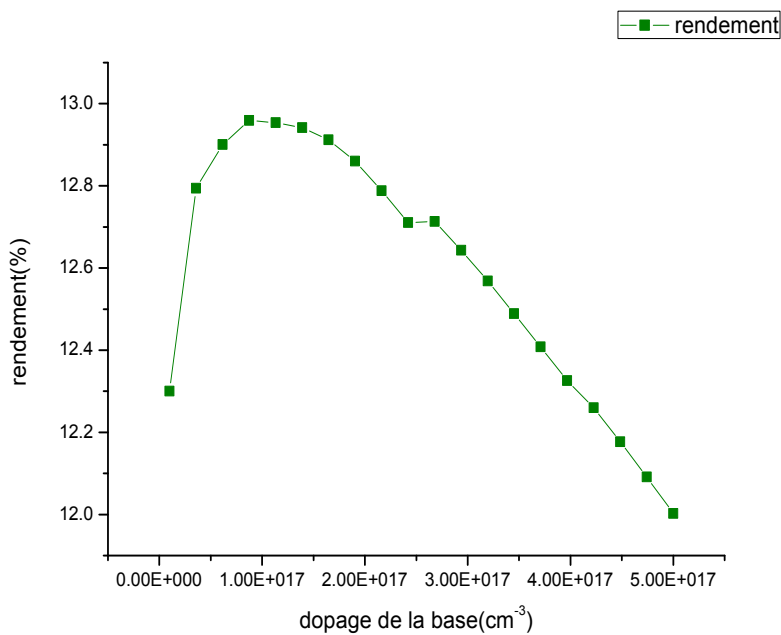


Figure III.7-b : Effet du dopage de la base sur le rendement d’une cellule en silicium amorphe.

La figure III.5-(a) représente la variation de la tension en circuit ouvert (V_{co}) en fonction du dopage de la base de la cellule solaire en silicium polycristallin. On remarque que la tension augmente rapidement jusqu’à la valeur de $(4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3})$ à partir de laquelle a une

valeur presque constante. Tandis que le courant de court-circuit (figure **III.6-(a)**) décroît pour les grandes valeurs de dopage et varie très peu en fonction de ce dernier ($\Delta I_{cc} \approx 2 \cdot 10^{-3} A$). Par contre la variation du rendement est remarquable (figure **III.7-(a)**), il atteint son maximum à $3 \cdot 10^{17} cm^{-3}$, ce qui est due à un effet considérable du fort dopage (excès des recombinaisons). Après, il commence à diminuer légèrement.

Ce résultat peut s'expliquer par l'influence de la taille des grains sur le comportement électrique du poly silicium qui diminue lorsque le dopage augmente[25]. Cette dernière joue un rôle prépondérant, car si elle est très petite, les porteurs rencontrent un plus grand nombre de joints de grains. Sachant que les joints de grains se comportent souvent comme pièges pour les électrons, ceci a pour effet d'augmenter la résistance des joints, ce qui conduit une dégradation de ses caractéristiques photovoltaïques pour des grandes concentrations de dopant.

Contrairement au silicium polycristallin, les caractéristiques de la cellule en silicium amorphe présentent des comportements totalement différents, de telle sorte, lorsque la concentration de dopage augmente, I_{cc} diminue comme on peut l'observer dans la figure **III.6-(b)**. Cela est dû à la durée de vie des porteurs et leur mobilité, qui diminuent avec l'augmentation de la concentration de dopage et les recombinaisons qui deviennent plus importante.

Les paramètres V_{co} et η évoluent dans le même sens lorsque la concentration de dopage varie, illustré sur les figures **III.5-(b)** et **III.7-(b)**. Dans l'intervalle $[10^{16}, 10^{17}] cm^{-3}$, le rendement croît en fonction de dopage pour atteindre son maximum à la valeur $1,2 \cdot 10^{17} cm^{-3}$ de dopage. Puis décroît pour les valeurs au-delà de $1,2 \cdot 10^{17} cm^{-3}$.

Sachant qu'une grande proportion de l'ordre de 99% des atomes dopants dans a-Si:H ne s'ionisent pas et ne libèrent donc pas de porteurs libres. De plus, parmi la quantité relativement faible de porteurs libérés par les atomes dopants, la majorité est piégée par les liaisons pendantes[35]. L'introduction d'une grande concentration de dopants dans a-Si:H provoque l'augmentation de la densité des défauts profonds qui piègent la majorité de porteurs libérés par les atomes dopants[36]. Ce qui explique la dégradation de rendement η pour des grandes concentrations de dopants. Ces différentes variations résultent de l'existence d'une concentration de dopage optimale qui correspond au η maximum des cellules solaires comme on peut le voir sur la figure **III.7-(b)**.

III.5.3 Effet de la durée de vie de la base sur les caractéristiques de sortie

La durée de vie des porteurs minoritaires est un paramètre permettant de quantifier la qualité des matériaux. Elle est caractéristique des recombinaisons des paires électrons-trous qui réduisent les performances des cellules. La durée de vie des porteurs minoritaires τ peut être définie comme le temps moyen entre la formation d'un porteur par photo génération et sa disparition par recombinaison. Plus la durée de vie est grande, plus le porteur aura le temps d'être extrait de la cellule et de participer au courant électrique généré.

La durée de vie en volume τ_{vol} est définie en fonction du taux de recombinaison volumique U_{vol} et de la concentration Δn d'excès de porteurs minoritaires, les électrons dans le cas d'une cellule basée sur une base dopé P :

$$\tau_{vol} = \frac{\Delta n}{U_{vol}} \quad (\text{III.1})$$

Les recombinaisons volumiques sont dues à des phénomènes différents, chacun étant lié à un taux de recombinaison propre :

- Les recombinaisons radiatives liées à U_{Rad}
- Les recombinaisons Auger liées à U_{Auger}
- Les recombinaisons Shockley-Read-Hall liées à U_{SRH}

Ces recombinaisons qui s'additionnent pour former la recombinaison en volume :

$$U_{vol} = U_{Rad} + U_{Auger} + U_{SRH} \quad (\text{III.2})$$

Les taux de recombinaison en volume s'expriment couramment en $cm^{-3}.s^{-1}$.

Pour examiner l'influence de la durée de vie en volume des porteurs minoritaires dans la base de la cellule solaire, nous avons varié la durée de vie des porteurs dans une gamme de $0,15\mu s$ à $10\mu s$ tout en fixant les autres paramètres. Les résultats de l'influence de la durée de vie des porteurs sur le courant de court-circuit I_{cc} , la tension en circuit ouvert V_{co} et le rendement η , sont présentés sur les figures III.8, III.9 et III.10.

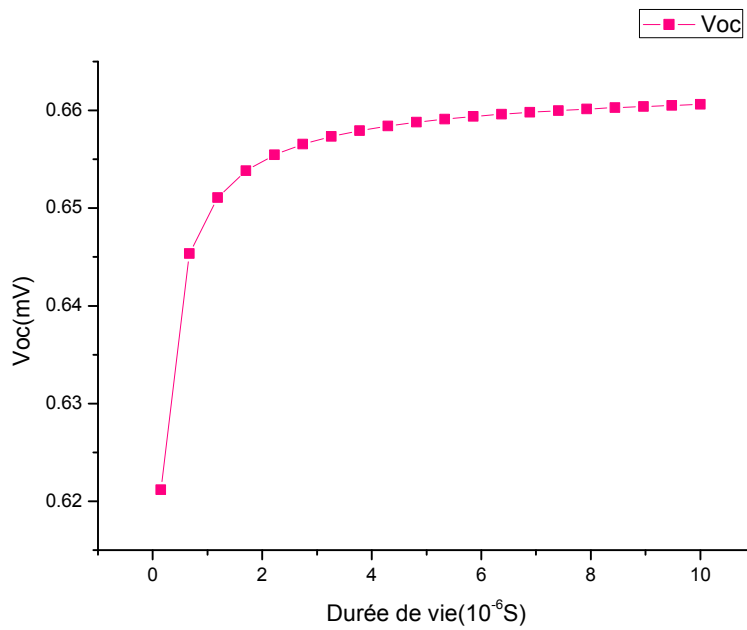


Figure III.8-a : Effet de la durée de vie sur la tension en circuit ouvert (V_{co}) d'une cellule en silicium polycristallin.

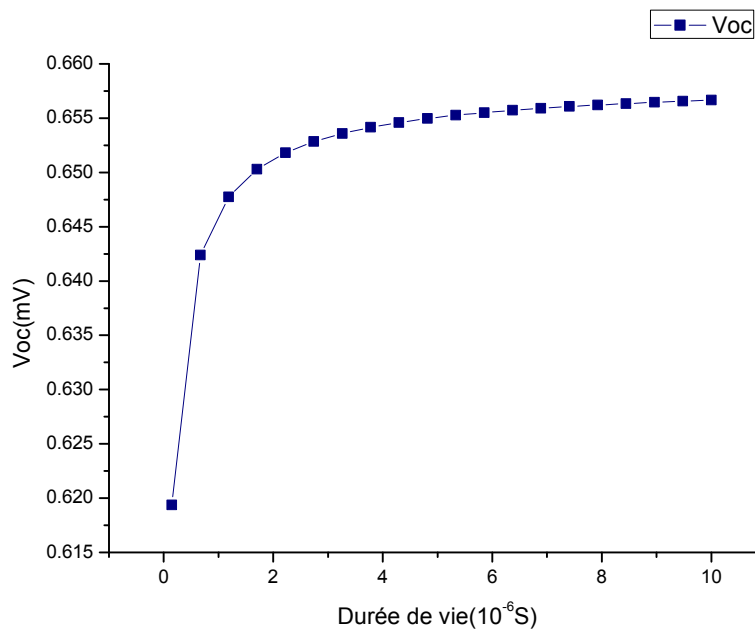


Figure III.8-b : Effet de la durée de vie sur la tension en circuit ouvert (V_{co}) d'une cellule en silicium amorphe.

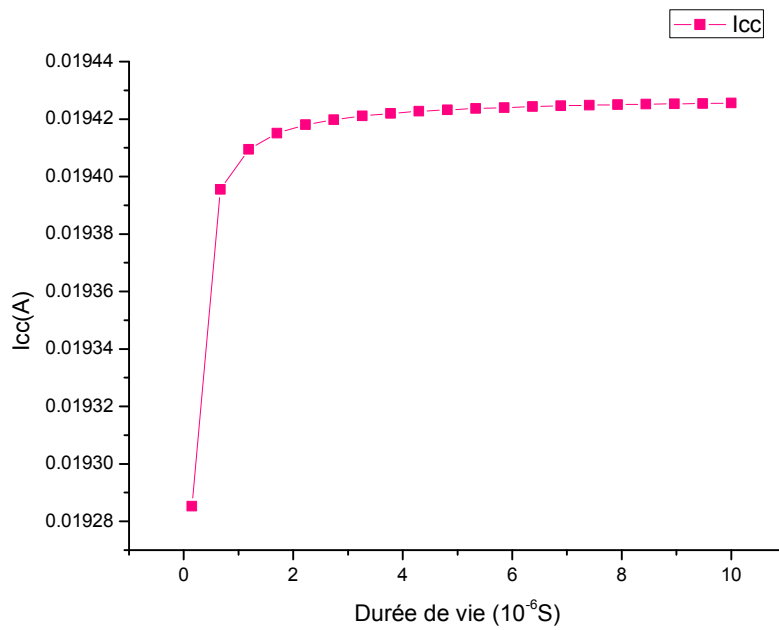


Figure III.9-a : Effet de la durée de vie sur le courant de court circuit (I_{cc}) d'une cellule en silicium polycristallin.

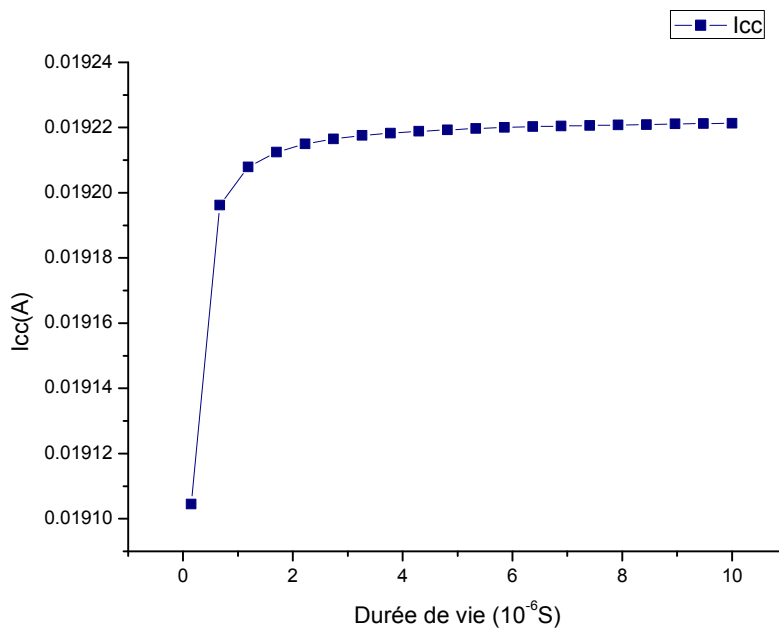


Figure III.9-b : Effet de la durée de vie sur le courant de court-circuit (I_{cc}) d'une cellule en silicium amorphe.

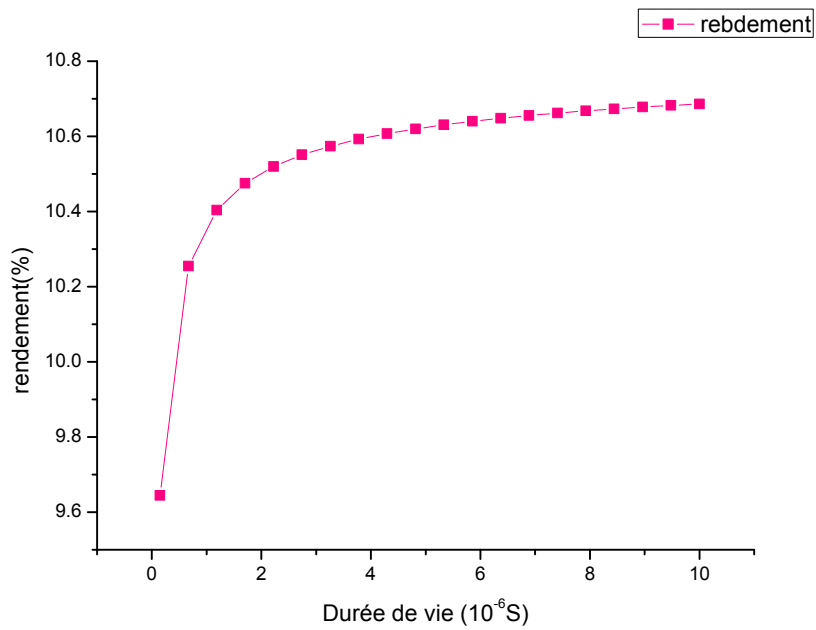


Figure III.10-a : Effet de la durée de vie sur le rendement d’une cellule en silicium polycristallin.

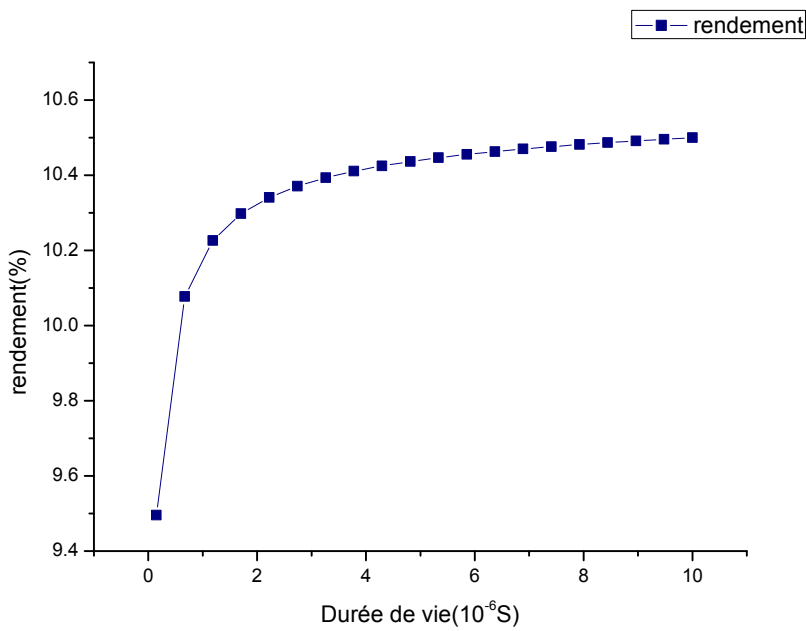


Figure III.10-b : Effet de la durée de vie sur le rendement d’une cellule en silicium amorphe.

En faisant varier la durée de vie des porteurs minoritaires dans l'intervalle [0.15 μ s, 10 μ s], les courbes obtenues illustrées sur les figures **III.8**, **III.9** et **III.10** possèdent la même allure. Tous les paramètres de la cellule augmentent rapidement avec l'augmentation de la durée de vie jusqu'à la valeur de 3 μ s. Au delà de cette valeur, l'amélioration n'est pas trop significative et atteint la valeur maximale quel que soit l'augmentation de la durée de vie. Ce résultat était prévu car l'accroissement de la durée de vie entraîne une meilleure collecte des porteurs de charge. Qui peut être expliqué par le fait que plus la durée de vie est grande, plus le porteur aura le temps d'être extrait de la cellule et de participer au courant électrique généré due à la diminution du taux de recombinaison.

Sachant que la longueur de diffusion (L_n) des porteurs de charge minoritaires (les électrons (n) dans le cas d'un silicium type P, correspond à la distance moyenne parcourue par un porteur de charge entre la position où il est généré et celle où il se recombine. La longueur de diffusion dépend de la durée de vie volumique (τ_n) qui est principalement influencée par les impuretés présentes dans le silicium ainsi que par son dopage.

La longueur de diffusion suit l'expression suivante :

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n}$$

où D est le coefficient de diffusion.

III.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié l'influence des paramètres géométriques et physiques tel que l'épaisseur de base, le dopage ainsi que la durée de vie en volume des porteurs minoritaires sur les caractéristiques de sortie de deux cellules solaires à base du silicium polycristallin et amorphe en couche mince de type n+/p/p+. Nous avons observé que la variation de l'épaisseur de la base influe considérablement sur les paramètres de sortie des deux cellules entre autre le courant de court-circuit I_{cc} , la tension en circuit ouvert V_{co} et le rendement η avec une amélioration des performances dans la cellule en silicium amorphe. Aussi le dopage de la base a un effet majeur sur le rendement de la cellule solaire avec l'existence d'une concentration de dopage optimale qui correspond au η maximum des cellules solaires. Ensuite, nous avons observé l'influence de la durée de vie en volume des porteurs minoritaires qui favorisent le bon fonctionnement de la cellule solaire mais avec des valeurs limites pour le rendement.

Conclusion générale

Les énergies renouvelables sont amenées à jouer un rôle de plus en plus prépondérant dans le paysage énergétique mondial. L'Algérie ces dernières années s'est résolument engagée dans le développement des énergies renouvelables tant pour la production d'électricité que de chaleur et la maîtrise de la demande énergétique vue l'augmentation de la demande interne marquée par un emballement de la consommation d'énergie, majoritairement issue de ressources fossiles.

Les sources d'énergies renouvelables sont multiples et présentent chacune des caractéristiques particulières. Parmi celles-ci, la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire permettant la production directe d'électricité est particulièrement séduisante. De ce fait l'industrie photovoltaïque connaît une croissance extrêmement rapide, dominée par la filière du silicium cristallin (silicium monocristallin et multi cristallin). D'autres technologies existent (couches minces, silicium amorphe,...) où leurs performances et leurs coûts leur permettent de rivaliser avec la filière au silicium cristallin.

Le silicium amorphe est un matériau désordonné, défectueux et très absorbant ; il n'a, a priori, pas les caractéristiques attendues d'un matériau pour une application photovoltaïque. En revanche, les propriétés de a-Si:H dépendent de la concentration en hydrogène, de la position du niveau de Fermi et de caractéristiques intrinsèques au a-Si:H. Le rôle de l'hydrogène au sein de a-Si:H est multiple et complexe mais il offre l'avantage d'élargir la bande interdite et de réduire considérablement les défauts de coordination, principalement les liaisons pendantes, en formant des liaisons Si-H.

Le poly silicium, se situe entre celle du silicium monocristallin et celle du silicium amorphe. Elle est constituée de grains de silicium monocristallins d'orientations cristallines dont la taille diffère d'un grain à un autre mais reste comprise entre 1 μm et 1 mm qui sont séparés entre eux par des zones désordonnées et riches de défauts cristallins appelée les joints de grains. Néanmoins, la qualité cristalline du grain joue un rôle important sur les propriétés structurales et électroniques de ces matériaux.

Quelle que soit la structure d'une cellule solaire, une optimisation de ses paramètres est nécessaire pour avoir un rendement optimal. Habituellement, les paramètres à optimiser d'une cellule peuvent être, en général, physiques, géométriques et optiques tels que l'épaisseur des couches (émetteur, base, BSF), le dopage etc....

L'optimisation de la cellule solaire comprend donc l'étude de l'influence de ses paramètres sur le rendement afin d'obtenir une structure conduisant au rendement maximum.

Ce modeste travail a porté, principalement, sur l'étude de l'influence des paramètres géométriques et physiques de la base entre autre l'épaisseur, le dopage et la durée de vie en volume des porteurs minoritaires sur les caractéristiques de sortie d'une cellule solaire à base du silicium polycristallin et du silicium amorphe en couche mince de type n+/p/p+ en se basant sur des données expérimentales et théoriques trouvés dans des travaux de recherches.

Dans le premier chapitre, nous avons rappelé les notions de base sur le rayonnement solaire hors atmosphère, au sol et plus particulièrement le spectre solaire de référence AM1.5G. Puis, nous avons décrit le développement de cette énergie spécifiquement en Algérie. Ensuite, nous avons présenté les notions de bases sur les semi-conducteurs en particulier la jonction PN en accordant une attention sur les courants qui la traverse. Nous avons terminé le chapitre par les principales caractéristiques de la cellule solaire telles que le facteur de forme et le rendement.

Dans le deuxième chapitre Nous avons rappelé les différents états du silicium, les différentes propriétés structurelles, électriques et optiques du poly silicium et de l'amorphe.

Dans le dernier chapitre nous sommes intéressés à la variation des paramètres (I_{cc} , V_{co} et η) de la cellule en fonction la variation d'autres paramètres, à savoir, l'épaisseur et le dopage de la base, la durée de vie en volume des porteurs minoritaires.

Les résultats obtenus nous ont permis de déduire :

- La variation de l'épaisseur de la cellule vers des valeurs plus grandes fait augmenter le courant de court-circuit ainsi que le rendement. Mais une dégradation de la tension de circuit-ouvert. Des améliorations plus importantes de rendement ont été obtenues dans les couches de silicium amorphe.
- Quant au dopage de la base, il a un effet majeur sur le rendement de la cellule solaire avec l'existence d'une concentration de dopage optimale qui correspond au η maximum des cellules solaires.
- Par ailleurs, l'influence de la durée de vie en volume des porteurs minoritaires qui favorisent le bon fonctionnement de la cellule solaire mais avec des valeurs limites pour le rendement.

References bibliographiques

- [1] B.M. Abdurakhmano and al, “Change in Electrical Activity of Grain Boundaries on Heat Treatment and its Effect on Properties of Film Polycrystalline Silicon Solar Cells,” *Appi.Solar. Ener*, vol. 32, p. N°4, 1996.
- [2] Amer HAMZAOUI, “Effet de l’illumination sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires au silicium polycristallin, mémoire de magister,” Université ferhat abbas – SETIF, 2012.
- [3] MERAD Faiza, “Conception d’un programme de calcul du rayonnement solaire, cas particulier de la région de Mostaganem, Mémoire Magister,” Université Abdel Hamid Ibn Badis de Mostaganem, 2013.
- [4] M. MEFTAH, “Nouveau regard sur quelques caractéristiques physiques du Soleil, thèse de doctorat,” Université Paris-Saclay, 2017.
- [5] A. Ricaud Jan, “Gisement solaire et transferts énergétiques . Mémoire de master,” Université de CERGY-PONTOISE, 2011.
- [6] Mihi Sana, “Comparaison par simulation numérique entre les caractéristiques électriques d’une cellule solaire en Si et une autre en Si intégré sur un substrat en GaAs, mémoire de magister,” Université Mohamed Khider – Biskra, 2012.
- [7] BENYAGOUB Amel, “Simulation des propriétés électriques et optiques de la cellule solaire à base de silicium amorphe, mémoire de master,” Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem, 2016.
- [8] BENYETTOU Fethi, “Etude et Modélisation d’une cellule photovoltaïque au silicium polycristallin à l’aide de PSpice, mémoire de magister,” L’Université Abdel Hamid Ibn Badis de Mostaganem, 2013.
- [9] Rouabah Amina et Zine Aldjia, “Etude et modélisation du procédé d’élaboration du silicium polycristallin pour la fabrication des cellules photovoltaïques, mémoire de master,” universite mohamed boudiaf - M’SILA, 2019.
- [10] E. Z. O. Kada, “Simulation et Modélisation des Caractéristiques électrique C(V) et I(V) d’une Jonction p-n: Application à la cellule solaire organique à base de

- ITO/MoO₃/CuPc/C60/Alq₃/MoO₃/Al/Se . thèse de doctorat,” université d’oran, 2015.
- [11] M. R. Yaiche and A. Bouhanik, *Atlas solair Algérien*. 2002.
- [12] H. M. A.Mefti, M.Y. Bouroubi, “Evaluation du potentiel énergétique solaire,” *Bull. des énergies renouvelables*, vol. 2, p. 12, 2002.
- [13] ROUAG Ilyas, “Etude de comportement de la capacité d’une diode tude de comportement de la capacité d’une diode polycristallinne latérale polycristallinne latérale Proposé, mémoire de master,” Université mohamed boudiad - M’SILA, 2016.
- [14] F. MECHAI, “Etude et simulation des structures photovoltaïques à base de chalcogénures de métaux de transition MX₂ (M = W, Mo; X = S, Se), MEMOIRE DE MAGISTER,” universite mouloud mammeri de TIZI-OUZOU, 2016.
- [15] OUZEROUHANE MARYAMA, “Simulation et modélisation de l’effet de la température sur les caractéristiques électriques (I-V-T) dans la structure métal/semi-conducteur ‘ β -Ti/n-GaAs’, Mémoire de Master,” Université A.MIRA-BEJAIA, 2020.
- [16] ABDI Zohir, “Etude comparative par simulation numérique des cellules photovoltaïques à simple jonction à base de silicium, mémoire de master,” Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen, 2017.
- [17] Mme BENSMAN Asmaa, “Investigation de l’ingénierie de bandes des cellules solaires à hétérojonction a_Si :H/cSi : Modélisation et simulation numérique, thèse de Doctorat,” universite Djillali liabes de SIDI BEL ABBES, 2018.
- [18] Mme BERROUBA TANI née KADDOURI Nadéra, “optimisation des parametres geometrisues et physiques de cellules photovoltaïques a contacts arriere interdigites,thèse de Doctorat,” Université Abou-Bakr Belkaïd-Tlemcen, 2015.
- [19] B. Mhenna and G. Ferhat, “Alimentation d’un moteur à courant continu par une source photovoltaïque, mémoire de master,” Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou Faculté, 2018.
- [20] Arras Aida, “(Caractérisation des cellules photovoltaïques à base d’hétérojonction de silicium a-Si/c-Si, mémoire de master,” Université abou-bekr belkaid - TLEMEN, 2018.

- [21] Nichiporuk Oleksiy, “Simulation , fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités,thèse de doctorat Doctorat,” lyon, 2005.
- [22] KEFIF Kheira, “Elaboration et caractérisation optique des semiconducteurs de carbure de silicium (a-SiC :H, nc-SiC :H),thèse de Doctorat,” université d’oran, 2015.
- [23] Z. Said-bacar, “Elaboration et caractérisations de silicium polycristallin par cristallisation en phase liquide du silicium amorphe,thèse de Doctorat,” universite PARIS SUD, 2012.
- [24] AMIRI Benameur, “Modélisation d ’ une cellule solaire p-i-n à base de silicium amorphe (a-Si : H) et silicium nanocristallin oxydé (nc-SiOx : H), mémoire de magister,” universite d’oran (USTO –MB), 2014.
- [25] 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).
- [26] Raphaël LACHAUME, “Contribution à la caractérisation électrique et à la simulation numérique des cellules photovoltaïques silicium à hétérojonction, thèse de Doctorat,” université de grenole, 2014.
- [27] S. M. Ridha, “Etude par simulation numérique des propriétés électriques d’une cellule solaire en silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H), Mémoire de magister,” Université Mohamed Khider – Biskra, 2015.
- [28] Hocine Belgacem, “Développement d ’ une Nouvelle Technique Spectroscopique de Détermination de la Densité des Etats Localisés dans les Semi-conducteurs à partir de la Photoconductivité Transitoire, thèse de doctorat,” université Hadj Lakhdar- Batna, 2010.
- [29] M.Beddiaf Zaidi, “étude de la conduction électrique dans le matériau silicium polycristallin destiné à des applications photovoltaïques, mémoire de magister,” Univesité de badji mokhtar, 2010.
- [30] I. Lyon and M. D. Bellet, “microstructure des grains dans le silicium multicristallin pour le photovoltaïque, thèse de doctorat,” Université de grenoble, 2007.

- [31] YESREF Djamel, “Optimisation d ’ une cellule solaire à base du silicium polycristallin en couche mince déposé sur un substrat en céramique,Mémoire de Magister,” Université Abou-Bakr Belkaid de Tlemcen, 2013.
- [32] BEDDA NAIMA, “Etude des propriétés physiques des semi-conducteurs :Si,GaAs e et GaAlAs. Simulation des cellules solaires à base de Si et GaAs, mémoire de magister,” Université El Hadj Lakhder de Batna, 2011.
- [33] MEKEMEICHE Abdelkader, “Etude à deux dimensions de cellules solaires en silicium monocristallin à émetteur sélectif à l’aide de PC2D,Mémoire de Magister,” Université Abdel Hamid Ibn Badis de Mostaganem, 2013.
- [34] J. K. and B. V. A. Goetzberger, “Crystalline Silicon Solar Cells, John Wiley & Sons Ltd, Chichester,” 1998.
- [35] M. Stutzmann,D. K. Biegelsen & R. A. Street, “Detailed investigation of doping in hydrogenated amorphoussilicon and germanium. Physical Review B,” vol. 35, no. 11, pp. 5666–5701, 1987.
- [36] R. A. Street, “Doping and the Fermi Energy in AmorphousSilicon. Physical Review Letters,” vol. 49, pp. 1187–1190, 1982.

Résumé

Quelle que soit la structure d'une cellule solaire, une optimisation de ses paramètres est nécessaire pour avoir un rendement optimal. Habituellement, les paramètres à optimiser d'une cellule peuvent être, en général, géométriques, électriques et optiques tels que l'épaisseur de la cellule, le dopage des différentes couches de la cellule, les vitesses de recombinaison des faces avant et arrière etc... .Étant donné que le profil de dopage ainsi que l'épaisseur de la base affectent les propriétés électriques des dispositifs en silicium, en particulier la tension en circuit ouvert (V_{co}) et le rendement, nous faisons, dans ce présent travail, une études comparative de comportement, en fonction de quelques caractéristiques physiques et géométriques (épaisseur, dopage,.....) d'une cellule solaire au silicium polycristallin et d'une cellule solaire au silicium amorphe, des principaux paramètres; le courant de court-circuit, la tension en circuit ouvert ainsi que le rendement énergétique de conversion photovoltaïque.

ملخص

مهما كان هيكل الخلية الشمسية ، فإن تحسين معلماتها ضروري للحصول على الأداء الأمثل. عادة ، يمكن أن تكون المعلمات التي سيتم تحسينها للخلية ، بشكل عام ، هندسية وكهربائية وبصرية مثل سمك الخلية ، وتنشيط الطبقات المختلفة للخلية ، وسرعات إعادة التركيب للوجهين الأمامي والخلفي ، إلخ. ... نظرًا لأن ملف تعريف للمنشطات وكذلك سمك القاعدة يؤثران على الخواص الكهربائية لأجهزة السيليكون، ولا سيما جهد الدائرة المفتوحة و الكفاءة. نقوم في هذا العمل الحالي بدراسة مقارنة للسلوك اعتمادًا على بعض الخصائص الفيزيائية والهندسية (السماعة ، التطعيم ، إلخ) لخلية شمسية من السيليكون متعدد البلورات و خلية شمسية للسيليكون غير المتبلور، من المعلمات الرئيسية ؛ تيار الدائرة القصيرة ، جهد الدائرة المفتوحة وكذلك كفاءة الطاقة للتحويل الكهروضوئي

Abstract

Whatever the structure of a solar cell, optimization of its parameters is necessary to have optimal performance. Usually, the parameters to be optimized of a cell can be, in general, geometric, electrical and optical such as the thickness of the cell, the doping of the different layers of the cell, the recombination speeds of the front and rear faces, etc. ... Since the doping profile as well as the thickness of the base affect the electrical properties of silicon devices, in particular the open circuit voltage (V_{oc}) and the efficiency, we make, in this present work, a comparative study of behaviour, depending on a few physical and geometric characteristics (thickness, doping, etc.) of a poly-crystalline silicon solar cell and an amorphous silicon solar cell, of the main parameters; the short-circuit current, the open-circuit voltage as well as the energy efficiency of photovoltaic conversion.