

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET

FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUEES
DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Département : Génie Electrique

Spécialité : Electronique des Systèmes Embarqués

THÈME

Analyse des performances des cellules solaires de type P-I-N

Préparé par :
KADRI Fatima Zahra

Devant le Jury :

Nom et prénoms	Grade	Qualité
A. ABDICHE	Pr.	Président
R. OTMANI	MAA	Examinateur
Y .BELHADJI	MCB	Encadreur

PROMOTION 2019 /2020

Remerciement

Avant tout Je remercie Allah tout-puissant pour la volonté et le pouvoir qui m'ont permis d'achever ce travail, ainsi que l'audace pour dépasser toutes les difficultés.

Un grand merci s'adresse a mes parents, sans leur soutien à tous les niveaux, tout simplement cela ne serait pas possible.

J'exprime mes sincères remerciements à monsieur « Youcef BELHADJI » l'expression de ma profonde gratitude, pour l'aide précieuse, les conseils éclairés et de m'avoir dirigé durant la réalisation de ce travail.

Je remercie messieurs « Ahmed ABDICHE » et « Radouane OTMANI » d'avoir accepté de siéger dans le jury de ce mémoire.

Enfin, je remercie tous Les enseignants du département de génie électrique.

Merci à tous...

Dédicace

Une sincère gratitude à mon cher père qui m'a accompagné tout au long de ma carrière avec un soutien moral et matériel. Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation.

À la paupière de mes yeux, ma mère, qui m'affligeait de sa tendresse et m'accompagnait de ses appels, je la remercie beaucoup pour ses sacrifices. Je te dédie ce travail en témoignage de mon profond amour. La prunelle de
mes yeux

Un salut sincère à ma seule sœur «sabrine » et mes chers frères « Amine
et Youcef »

Une dédicace spécial pour mon cher grand-père « KADRI Hadj Mohamed »

Que dieu ait pitié de lui, que j'aurais aimé avoir avec moi

Je remercie aussi beaucoup ma meilleure copine « Nidal » pour son soutien.

TABLE DES MATIERES

Remercîment

Dédicace

Table des figures

Liste des tableaux

INRODUCTION GENERALE

Chapitre1 : Fonctionnement et Technologies de cellules solaires

Introduction	1
1.2. L'énergie solaire	3
1.2.1. L'énergie thermique	3
1.2.2. L'énergie lumineuse	4
1.3. Effet photovoltaïque et cellule solaire	4
1.3.1. Effet photovoltaïque	4
1.3.2. Cellule solaire	4
1.4. Spectre solaire et conversion photovoltaïque	8
1.5. La courbe courant-tension	10
1.6. Types de cellules photovoltaïques.....	14
1.6.1. Les cellules monocristallines	14
1.6.2. Les cellules poly-cristallines	14
1.6.3. Les cellules amorphes	15
1.7 Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque	16
Références bibliographiques	19

Chapitre 2 : Théorie des Cellules PIN

2.1. Introduction	21
2.2 L'historique de la première cellule solaire de type PIN	21
2.2.1 Des premières cellules solaires aux produits industriels	21
2.3 Fonctionnement de la cellule solaire pin	22
2.3.1 Structure	22
2.3.2. Principe de fonctionnement.....	24
2.3.3. Modélisation du fonctionnement.....	25

2.4.Types des structures des cellules PIN	27
2.4.1. Cellules organiques	27
2.4.2. Cellules solaires à base de pérovskite	29
2.4.3. Structure à base du silicium amorphe	30
2.5. Pertes optiques d'une cellule solaire p-i-n à base de silicium en couches minces	32
2.6. Caractérisation électrique I(V) sous éclairage des cellules solaires pin	32
2.7. Comparaison entre la structure PN et PIN	34
Références bibliographiques	36

Chapitre 3 : Etude comparative des performances des cellules PN et PIN en couches minces

3.1. Introduction	41
3.2. Les cellules en couche minces	41
3.3. Les cellules PV à base de silicium amorphe	42
3.3.1. Le silicium amorphe	42
3.3.2 .Progrès technologiques	43
3.4. Structure de la cellule PIN à base de silicium amorphe	43
3.5. Etude comparatif	45
3.5.1. Effet du changement du niveau d'éclairage (intensité lumineuse)	47
3.5.2. Effet de la température	50
3.5.3. Effet de l'épaisseur de la couche P.....	54
3.5.4. Effet de l'épaisseur intrinsèque (PIN).....	58
3.5.5. Effet de dopage	60
3.5.5.1. Dopage de la couche P	60
3.5.5.2. Effet de dopage de la couche TCO.....	63
3.5.6. Effet de l'épaisseur de la couche TCO.....	66
Références bibliographiques	69
Conclusion générale	71

Table des figures

Chapitre 1 : Fonctionnement et Technologies de cellules solaires

Fig. 1.1. Exploitation des énergies renouvelables dans le monde	1
Fig. 1.2. Exploitation des panneaux solaires	3
Fig. 1.3 Représentation en coupe d'une cellule photovoltaïque	4
Fig. 1.4 Représentation de la création de pair électron/trou par le photon incident.....	5
Fig. 1.5 Représentation du gap d'énergie par rapport à la bande de conduction et la bande de valence.....	6
Fig. 1.6 Représentation du gap direct et indirect du GaAs et du Si	6
Fig.1.7 Dopage de type N.....	7
Fig.1.8 Dopage de type P	8
Fig.1.9 Spectre électromagnétique	8
Fig.1.10 Evolution du coefficient d'absorption en fonction de la longueur d'onde (dans le vide) pour certains semi-conducteurs à 300K	10
Fig.1.11 Densité de courant en fonction de la tension d'une cellule PV dans l'obscurité et sous illumination	12
Fig.1.12 Caractéristiques de divers types de cellules solaires développées pour de applications terrestres et spatiales	16
Fig.1.13 Schéma électrique simplifié de la cellule PV	17
Fig. 1.14 Caractéristique $I_p = f(V_p)$	18

Chapitre 2 : Théorie des Cellules PIN

Fig. 2.1 Structure PIN	22
Fig. 2.2 Structure type d'une cellule solaire PIN à base d'InGaN	23
Fig. 2.3 Principe de fonctionnement d'une cellule solaire à structure PIN.....	23
Fig. 2.4 Structure de la cellule solaire à couche mince organique de type jonction p-i-n.....	27
Fig. 2.5 Trois structures typiques de cellules solaires à pérovskite:(a) mésoscopique, (b) structure planaire régulière, et (c) structure planaire inversée	29
Fig. 2.6 Empilement de couches typiques de cellules solaires à jonction unique avec des couches absorbantes de silicium amorphe hydrogéné en configuration PIN.....	30
Fig. 2.7 la courbe $I(V)$ d'une p-i-n à base de silicium amorphe, épaisseur de i-a Si : H=300nm.....	32
Fig. 2.8 la courbe $I(V)$ d'une p-i-n à base de silicium amorphe, épaisseur de i-a Si : H =500 nm.....	32

Fig. 2.9 Caractéristiques courant-tension de la cellule solaire PN et de la cellule PIN obtenues avec les paramètres optimaux	33
---	----

Chapitre 3 : Etude comparative des performances des cellules PN et PIN en couches minces

Figure. 3.1 Structure d'une cellule de type PIN au silicium amorphe avec verre en superstrat	39
Figure. 3.2 Cellule PN.....	40
Figure. 3.3 Cellule PIN	40
Figure 3.4 Caractéristiques J-V pour la cellule PN en fonction du niveau d'éclairage	42
Figure 3.5 Caractéristiques J-V pour la cellule PIN en fonction du niveau d'éclairage	43
Figure 3.6 Caractéristiques J-V pour la cellule PN en fonction du niveau d'éclairage	44
Figure 3.7 Caractéristiques J-V pour la cellule PIN en fonction du niveau d'éclairage	44
Figure 3.8 Caractéristiques J-V pour la cellule PN en fonction de la température	46
Figure 3.9 Caractéristiques J-V pour la cellule PIN en fonction en fonction de la température.....	46
Figure 3.10 Caractéristiques J-V pour la cellule PN en fonction en fonction de la température.....	47
Figure 3.11 Caractéristiques J-V pour la cellule PIN en fonction en fonction de la température.....	48
Figure 3.12 Caractéristiques J-V pour la cellule PN pour différentes valeurs de l'épaisseur de la couche P	49
Figure 3.13 Caractéristiques J-V pour la cellule PIN pour différentes valeurs de l'épaisseur de la couche P	50
Figure 3.14 Caractéristiques J-V pour la cellule PN pour différentes valeurs de l'épaisseur de la couche P	51
Figure 3.15 Caractéristiques J-V pour la cellule PIN pour différentes valeurs de l'épaisseur de la couche P	51
Figure 3.16 Caractéristiques J-V pour la cellule PIN pour différentes valeurs de l'épaisseur de la couche intrinsèque.....	53
Figure 3.17 Caractéristiques J-V pour la cellule PIN pour différentes valeurs de l'épaisseur de la couche intrinsèque.....	54
Figure3.18 Caractéristiques J-V pour la cellule PN pour différentes valeurs du dopage de la couche P	55
Figure3.19 Caractéristiques J-V pour la cellule PIN pour différentes valeurs du dopage de la couche P	56
Figure 3.20 Caractéristiques J-V pour la cellule PN pour différentes valeurs du dopage de la couche P	57

Figure 3.21	Caractéristiques J-V pour la cellule PIN pour différentes valeurs du dopage de la couche P	57
Figure 3.22	Caractéristiques J-V pour la cellule PN pour différentes valeurs du dopage de la couche ZnO	58
Figure 3.23	Caractéristiques J-V pour la cellule PIN pour différentes valeurs du dopage de la couche ZnO	59
Figure 3.24	Caractéristiques J-V pour la cellule PN pour différentes valeurs du dopage de la couche SnO2	60
Figure 3.25	Caractéristiques J-V pour la cellule PIN pour différentes valeurs du dopage de la couche SnO2	60
Figure 3.26	Caractéristiques J-V pour la cellule PN pour différentes valeurs de l'épaisseur de la couche ZnO	61
Figure 3.27	Caractéristiques J-V pour la cellule PIN pour différentes valeurs de l'épaisseur de la couche ZnO	62
Figure 3.28	Caractéristiques J-V pour la cellule PN pour différentes valeurs de l'épaisseur de la couche SnO2.....	63
Figure 3.28	Caractéristiques J-V pour la cellule PIN pour différentes valeurs de l'épaisseur de la couche SnO2.....	63

Liste des tableaux

Tableau.1.1 Statistiques sur la production d'électricité d'origine renouvelable	2
Tableau.2.1 Intervalles de tolérance pour chaque paramètre optimal de la cellule solaire	34
Tableau 3.1 paramètres des couches : PIN	41
Tableau 3.2 paramètres des couches : p-ZnO, P-SnO2	41
Tableau 3.3: Les paramètres de sortie des cellules PN et PIN (η , FF, J_{sc} , V_{co}) en fonction du niveau d'éclairage	42
Tableau 3.4: Les paramètres de sortie des cellules PN et PIN (η , FF, J_{sc} , V_{co}) en fonction du niveau d'éclairage	43
Tableau 3.5: Les paramètres de sortie des cellules PN et PIN (η , FF, J_{sc} , V_{co}) en fonction de la température	45
Tableau 3.6: Les paramètres des cellules PN et PIN (η , FF, J_{sc} , V_{co}) en fonction de la température	47
Tableau 3.7 les paramètres de sortie des cellules PN et PIN (η , FF, J_{sc} , V_{co}) en fonction de l'épaisseur de la couche p	49
Tableau 3.8: Les paramètres de sortie des cellules PN et PIN (η , FF, J_{sc} , V_{co}) en fonction de l'épaisseur de la couche p	50
Tableau 3.9: Les paramètres de sortie de la cellule PIN (η , FF, J_{sc} , V_{co}) en fonction de l'épaisseur de la couche intrinsèque	52
Tableau 3.10: Les paramètres de sortie de la cellule (η , FF, J_{sc} , V_{co}) en fonction de l'épaisseur de la couche intrinsèque	53
Tableau 3.11: Les paramètres de sortie des cellules (η , FF, J_{sc} , V_{co}) en fonction du dopage de la couche p	55
Tableau 3.12: Les paramètres de sortie des cellules (η , FF, J_{sc} , V_{co}) en fonction du dopage de la couche p	56
Tableau 3.13: Les paramètres de sortie des deux cellules (η , FF, J_{sc} , V_{co}) en fonction de dopage de la couche ZnO	58
Tableau 3.14: Les paramètres de sortie des deux cellules (η , FF, J_{sc} , V_{co}) en fonction du dopage de la couche SnO2	59
Tableau 3.15: Les paramètres de sortie des cellules (η , FF, J_{sc} , V_{co}) en fonction de l'épaisseur de la couche ZnO	61
Tableau 3.16: Les paramètres de sortie des cellules (η , FF, J_{sc} , V_{co}) en fonction de l'épaisseur de la couche SnO2	62

Liste des abréviations

ENR : Energies renouvelables.

PV : Photovoltaïque

CPV : Cellule photovoltaïque

Eg : Energie de la bande interdite (eV)

I_{ph} : Le photo courant (A)

I_s : courant de saturation

i : facteur d'idéalité

T : Température (K)

I_d : courant de diode (A)

I_{cc} : Courant de court-circuit (A)

FF :Le facteur de forme %

V_{co} : Tension de circuit ouvert (V)

η : Le rendement %

EQE : Le rendement quantique %

P_{in} : puissance lumineuse incidente (W/cm²)

P_{max} : la puissance maximale fournie par la cellule (W)

E : Energie de photon (eV)

λ : la longueur d'onde (m)

v : la fréquence(Hz)

I(V) : Le courant fournit par la cellule (A)

CAR : Couche antireflet

I_m : Courant correspondent à la puissance maximale fournie (A)

V_m : Tension correspondant à la puissance maximale fournie (V)

Principales constantes

La charge électrique d'un électron (en valeur absolue) $q=1.60281 \times 10^{-19} \text{C}$

La constante de Boltzmann $K_B=1.38066 \times 10^{-23} \text{ J/K} = 8.61400 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$

La vitesse de la lumière dans le vide $C=2.99792 \times 10^8 \text{ m/s}$

Introduction générale

Introduction générale

Selon l'Agence Internationale de l'Énergie, la consommation énergétique mondiale a quasiment doublé entre 1973 et 2007, en passant de 5.4×10^4 à 9.6×10^4 TWh par an. Plus de 15% de cette énergie est aujourd'hui consommée sous forme d'électricité. Au niveau mondial, plus de 80% de l'électricité est produite à partir de combustibles fossiles (67%) et fissiles (15%) non renouvelables. A ce rythme de consommation, les réserves des combustibles fossiles seront épuisées dans une centaine d'années.

Le secteur électrique mondial est en pleine mutation du fait de la libération des marchés et de la prise de conscience des effets induits des filières de production sur l'homme et son environnement. Comme l'effet de serre qui confronte la planète aux phénomènes de réchauffement climatique. Les filières vertes comme l'éolien, l'hydroélectricité et le solaire photovoltaïque présentent pour les années à venir les meilleurs potentiels de réduction des gaz à effet de serre. La filière solaire photovoltaïque représente théoriquement le plus grand potentiel [01]

En pratique, la technologie de fabrication des cellules solaires a toujours été coûteuse et elle l'est encore. En effet, au début de son développement, le silicium monocristallin était utilisé vu sa qualité et sa disponibilité. Il est à noter, au passage, que 50% du coût de la cellule vient du coût du matériau utilisé dans sa fabrication [02]. Pour cette principale raison, de grands efforts ont été faits par les chercheurs pour préparer les matériaux avec les propriétés requises et à bas coûts. Bien que le silicium, sous forme amorphe, figure parmi les matériaux sélectionnés pour les applications photovoltaïques, mais il n'est pas considéré comme matériau idéal pour la conversion photovoltaïque à cause de sa faible absorption des radiations solaires, ce qui nécessite une couche épaisse pour obtenir des résultats satisfaisants [03]. Les cellules au silicium amorphe (a-Si) sont apparues en 1976. Elles marquent une transition importante entre les structures de première génération et de deuxième génération. Ces entités se composent toujours de silicium, mais sur une épaisseur d'environ $1 \mu\text{m}$ seulement [04]

Le silicium intégré dans les cellules a-Si n'a pas fait l'objet d'une cristallisation. Ses atomes sont donc agencés sans réelle organisation, ce qui leur permet de mieux capter la lumière (par rapport au silicium cristallin). Problème : les charges générées ont plus de difficulté pour se déplacer à cause de la désorganisation de la matière, ce qui se traduit par un mauvais coefficient de conversion. Par conséquent, leur rendement est faible.

Introduction générale

La désorganisation atomique a d'autres conséquences. Les électrons de valence des atomes de Si ne forment pas toujours des liaisons covalentes au sein du semi-conducteur. Il apparaît alors des liaisons pendantes qui peuvent dénaturer les propriétés électroniques du matériau. Pour limiter ce phénomène, les couches de silicium sont régulièrement passivées avec de l'hydrogène (a-Si:H). Des atomes d'hydrogène établissent des liaisons avec les électrons restés libres, et réduisent ainsi le nombre de liaisons pendantes. L'établissement d'une jonction nécessite une troisième couche de silicium, qualifiée d'intrinsèque (i, non dopé), à insérer entre les strates n et p. Les cellules au silicium amorphe ont donc des jonctions p-i-n

L'une des possibilités d'améliorer cette absorption est d'intercaler une couche intrinsèque entre P et N, ce qui donne une cellule solaire à base d'une structure PIN [06]. L'objectif de notre travail est l'étude numérique de cette cellule à structure PIN en comparaison avec une cellule PN et pour deux cas de TCO : ZnO et SnO₂. La simulation est réalisée en utilisant logiciel SCAPS -1D

Le mémoire est composé de trois chapitres et il est organisé comme suit :

- ✚ Le premier chapitre est consacré aux cellules solaires en générale. on présente leurs principe fonctionnement et leurs technologie ainsi les caractéristiques électriques
- ✚ Le deuxième chapitre est consacré à la cellule solaire à base d'une structure PIN où on présente son principe de fonctionnement, sa caractéristique courant-tension et les paramètres qui gouvernent son fonctionnement.
- ✚ Le troisième et dernier chapitre, est consacré à la simulation numérique du comportement de la cellule solaire de structure PIN à base de silicium amorphe. Les résultats obtenus sont présentés, commentés et comparés aux valeurs expérimentales tirées de la littérature.
- ✚ Conclusion générale

Introduction générale

[01] Pepin Magloire, TchouateHeteu « Les certificats verts et électricités renouvelables », UCL presse universitaire de louvain, 2004.

[02] Cristians chittich «construire en verre », presse polytechnique et universitaire romandes.

[03] A.Goetzberger, V.U.Hoffmann « photovoltaic solar energy generation » Springer Series in optical sciences, 2005.

[04] http://fr.wikipedia.org/wiki/Cellule_photovolta%C3%AFque.

[05] DUT GEii1 « Composants Semi-Conducteurs De Puissance », Université Joseph Fourier 2ème année Module MC-ET2.

Chapitre 01

Fonctionnement et Technologies de cellules solaires

1.1 Introduction

L'énergie est dite renouvelable lorsqu'elle provient de sources naturellement et continuellement renouvelables, par opposition à une énergie non renouvelable dont les stocks s'épuisent. Les énergies renouvelables proviennent de 2 grandes sources naturelles : le Soleil : à l'origine du cycle de l'eau, des marées, du vent et de la croissance des végétaux et la Terre : qui dégage de la chaleur. Surnommées « énergies propres » ou « énergies vertes », leur exploitation engendre très peu de déchets et d'émissions polluantes mais leur pouvoir énergétique est beaucoup plus faible que celui des énergies non renouvelables[1].

On donne ci-dessous quelques statistiques actuelles sur l'exploitation des énergies renouvelables

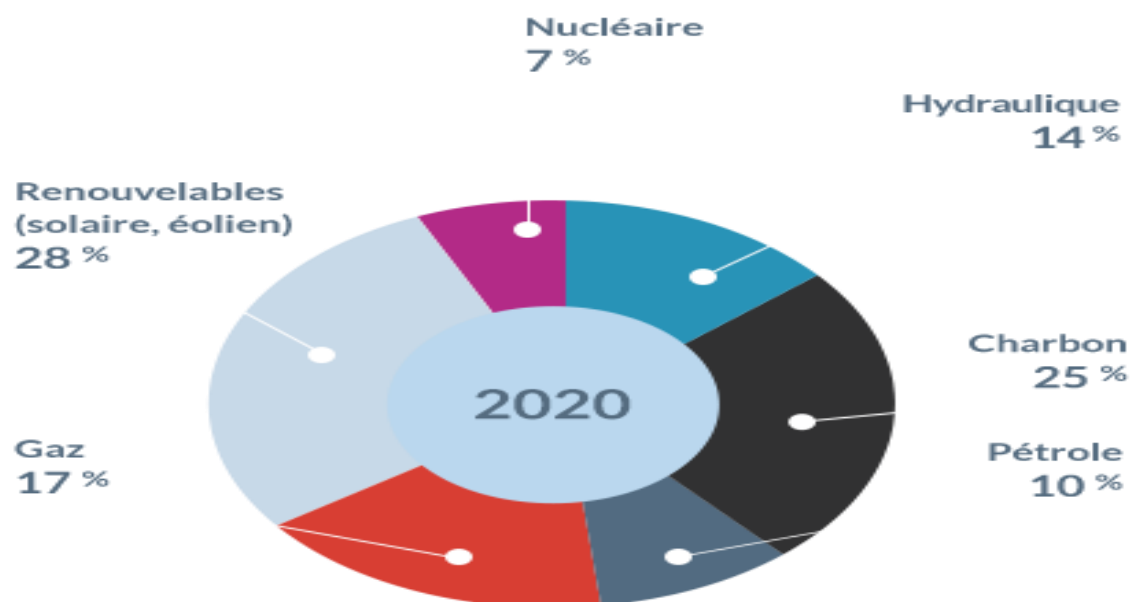


Fig. 1.1. Exploitation des énergies renouvelables dans le monde [4]

Objectifs de puissance installée de production d'électricité d'origine renouvelable - PPI 2009

	2006	2012	Objectif 2020
Hydroélectricité	67 TWh/an		70 TWh/an
Éolien terrestre	1 600 MW	10 500 MW	19 000 MW
Éolien en mer	0 MW	1 000 MW	6 000 MW
Solaire photovoltaïque	0 MW	1 100 MW	5 400 MW
Biomasse yz biogaz et part EnR IUOM	460 MW	980 MW	2 760 MW

Tab.1.1 Statistiques sur la production d'électricité d'origine renouvelable [4]

- **Avantage des sources d'énergies renouvelables**

De manière générale, les énergies renouvelables sont :

- ✚ Plus propres que les énergies fossiles et fissiles actuellement exploitées dans le monde entier.
- ✚ Elles sont plus écologiques, disponibles en masse autour du globe et sont « gratuites » une fois les installations de production rentabilisées.
- ✚ Largement approuvée dans le secteur énergétique et se développe à grande vitesse.
- ✚ Production d'électricité grâce au photovoltaïque, mais aussi de chauffage grâce aux panneaux solaires thermiques
- ✚ Exploitation à grande échelle dans des parcs prévus à cet effet ou à petite échelle chez les particuliers.

1.2 L'énergie solaire

Elle est issue directement de la captation du rayonnement solaire. On utilise des capteurs spécifiques afin d'absorber l'énergie des rayons solaires et de les rediffuser selon deux principaux modes de fonctionnement :

- Solaire photovoltaïque (panneaux solaires photovoltaïques) : l'énergie solaire est captée en vue de la production d'électricité.
- Solaire thermique (chauffe-eau solaire, chauffage, panneaux solaires thermiques) : la chaleur des rayons solaires est captée et rediffusée, et plus rarement sert à produire de l'électricité.[2]



Fig. 1.2. Exploitation des panneaux solaires.

1.2.1 Energie thermique

Elle est issue de l'utilisation de l'énergie thermique du rayonnement solaire dans le but d'échauffer un fluide (liquide ou gaz). L'énergie reçue par le fluide peut être ensuite utilisée

- Directement : eau chaude, chauffage, etc.
- Indirectement : production de vapeur d'eau, production du froid, etc.

1.2.2 Energie lumineuse (photovoltaïque)

C'est l'énergie diffusée par le rayonnement du Soleil. Des ondes radio aux rayons gamma en passant par la lumière visible, tous ces rayonnements sont constitués de photons, les composants fondamentaux de la lumière et les vecteurs de l'énergie solaire. [5]

1.3 Effet photovoltaïque et cellule solaire

1.3.1 Effet photovoltaïque

Le terme « photovoltaïque » désigne le processus physique qui consiste à transformer l'énergie lumineuse en énergie électrique par le transfert de l'énergie des photons aux électrons d'un matériau semi-conducteur.

1.3.2 Cellule solaire

La cellule PV, aussi appelée cellule solaire, constitue l'élément de base de la conversion photovoltaïque. Il s'agit d'un dispositif à semi-conducteur qui transforme en énergie électrique l'énergie lumineuse fournie par une source d'énergie inépuisable, le soleil. Une simple structure d'une cellule solaire est une jonction PN.

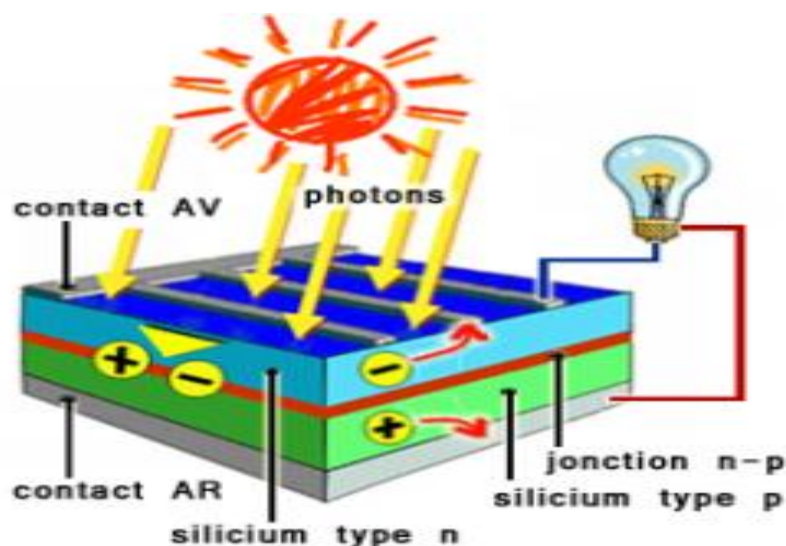


Fig. 1.3 Représentation en coupe d'une cellule photovoltaïque [6]

L'effet photovoltaïque se manifeste quand un photon est absorbé par un matériau semi-conducteur dopé **p (positif)** et/ou **n (négatif)**, dénommé comme jonction p-n. Sous l'effet du dopage, un champ électrique est présent dans le matériau de manière permanente (comme un aimant possède un champ magnétique permanent). Quand un photon incident interagit avec les électrons du matériau, il cède son énergie $E_{\text{photon}}=h\nu$ à l'électron qui se retrouve libéré de sa bande de valence et subit donc le champ électrique intrinsèque. Sous l'effet de ce champ, l'électron migre vers la bande supérieure laissant place à un trou qui migre en direction inverse. Des électrodes placées sur les faces supérieure et inférieure permettent de récolter les électrons et de leur faire réaliser un travail électrique pour rejoindre le trou de la face antérieure [6]

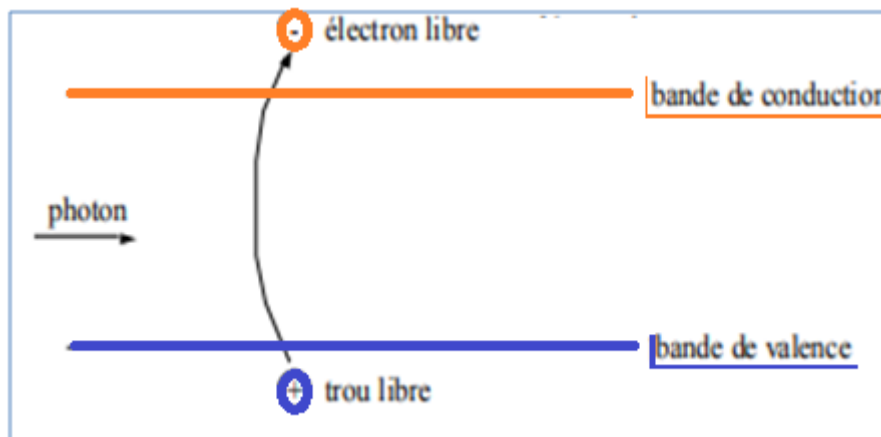


Fig. 1.4 Représentation de la création de paire électron/trou par le photon incident.

a. Notions de bande de conduction (BC) et bande de valence (BV)

On représente l'évolution de l'énergie de l'électron par la courbe $E(k)$ en forçant le vecteur d'onde k à demeurer dans une direction remarquable de l'espace des k , c'est à dire une direction cristallographique du réseau réciproque. Le diagramme d'énergie $E(k)$ permet de comprendre les propriétés électriques et optiques du matériau semi-conducteur.

À partir de ce diagramme on peut aussi déduire le paramètre clé pour le choix d'un semi-conducteur pour une application et notamment pour une cellule solaire. Ce paramètre est le gap d'énergie E_g .

Le gap d'énergie est différence entre le minimum de la bande de conduction E_c et le maximum de la bande de valence E_v : $E_g = E_c - E_v$ (voir figure 1.5).

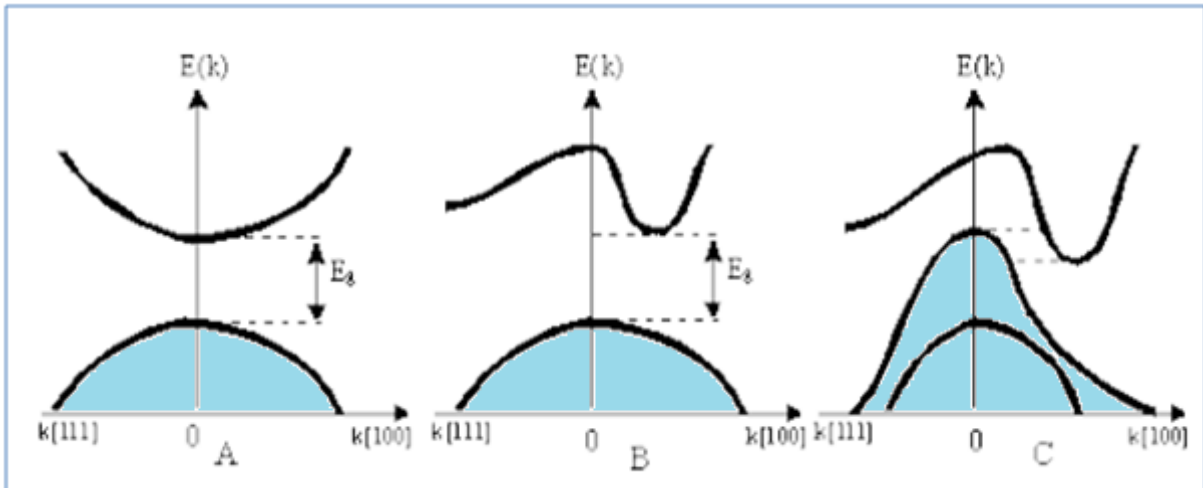


Fig. 1.5 Représentation du gap d'énergie par rapport à la bande de conduction et la bande de valence.

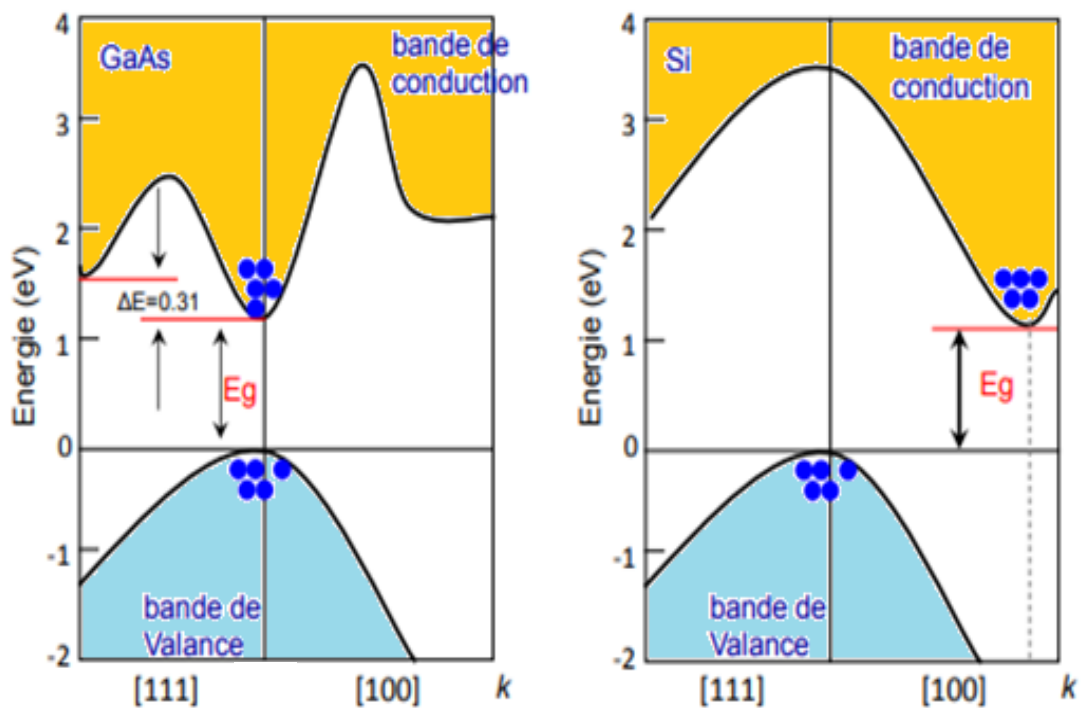


Fig. 1.6 Représentation du gap direct et indirect du GaAs et du Si.

Selon la position du maximum de la BC et le minimum de la BV, on distingue

- Semi-conducteur à gap direct : si le minimum de la BC correspond au même vecteur d'onde que le maximum de la BV (figure 1.5.A);
- Semi-conducteur à gap indirect : si le minimum de la B ne correspond pas au même vecteur d'onde que le maximum de la BV (figure 1.5.B) ;
- Dans le cas de la figure 1.5.C, il y a recouvrement de la BV par BC, il n'y a pas de bande interdite. Dans ce cas, tous les niveaux d'énergie sont permis [8]

Dans la figure 1.6 on donne un exemple du gap direct et indirect du GaAs et du Si.

Très souvent, seuls les électrons situés dans la bande au voisinage immédiat de la bande interdite sont envisagés.

On note que E_g dépend de la température selon la loi empirique suivante :[9]

$$E_g(T) = E_{g0} - \frac{AT^2}{(T+B)} \quad (1.1)$$

L'augmentation de température libère des électrons de leurs liaisons.

b. Notion de dopage

Le dopage signifie l'introduction d'impuretés dans un matériau semi-conducteur intrinsèque dans le but de modifier ses propriétés électriques notamment sa conductivité ainsi que ses propriétés cristallographiques et optique. Selon la nature des impuretés introduites, on distingue deux types de dopages :

- Dopage de **type N**, qui consiste à apporter une forte densité d'électrons, donc des porteurs de charges **négativement** chargés

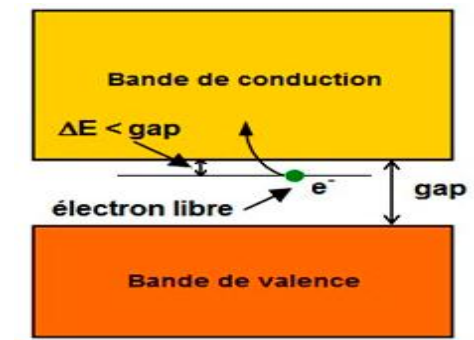
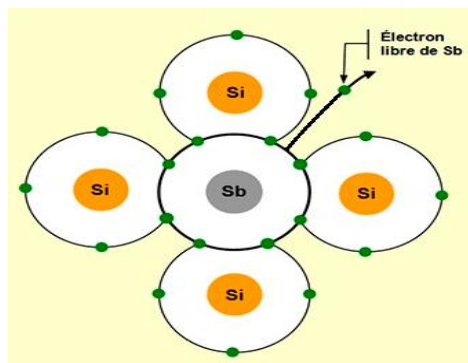


Fig.1.7 Dopage de type N

- Le dopage de **type P**, qui consiste à installer un déficit d'électrons, donc un excès de trous positivement chargés.

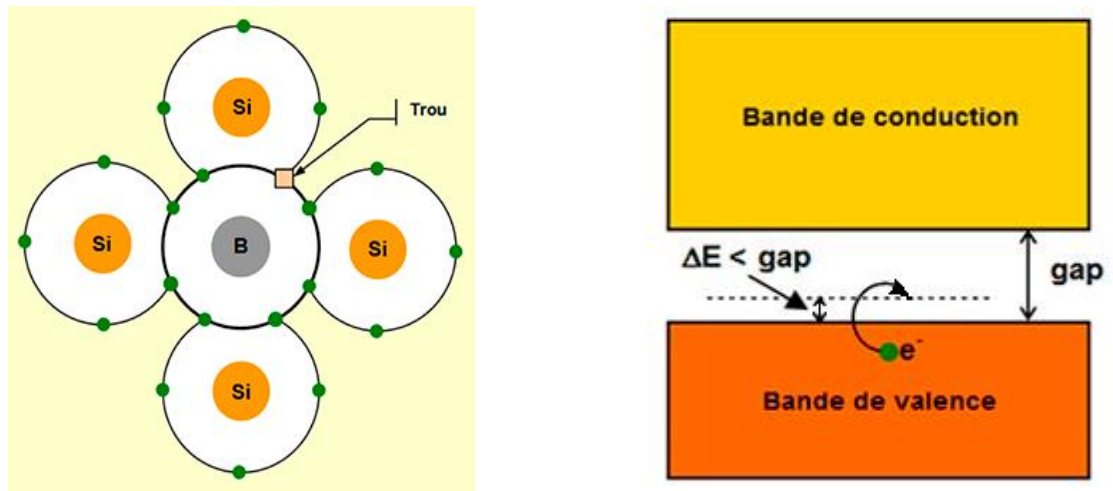


Fig.1.8 Dopage de type P

1.4 Spectre solaire et conversion photovoltaïque

Les photons ayant une énergie supérieure au gap du semi-conducteur ($E > E_{\text{gap}}$) pourront créer une paire électron-trou et par la suite génération du courant électrique. L'énergie excédentaire sera perdue, elle est liée à la longueur d'onde de la lumière.

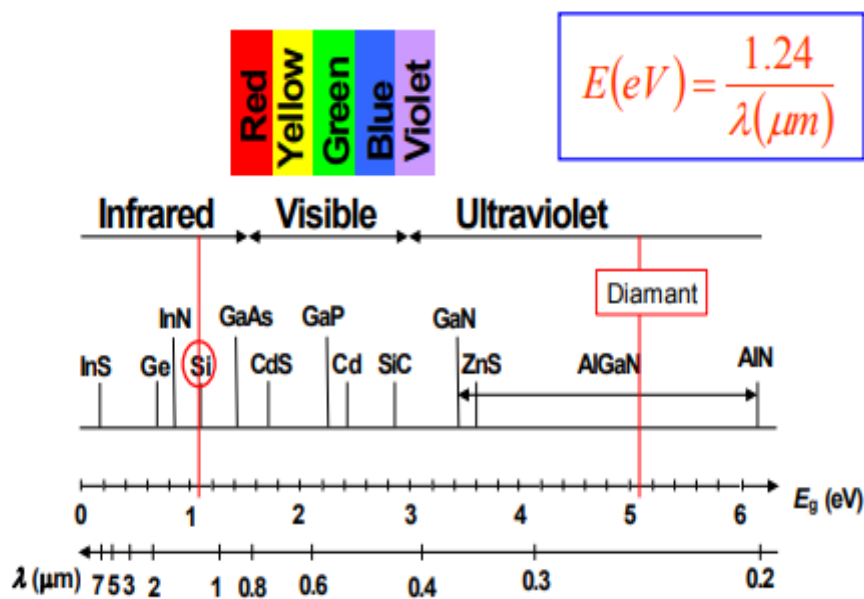


Fig.1.9 Spectre électromagnétique

Tout rayonnement électromagnétique (figure 1.9), y compris le rayonnement solaire, est composé de particules énergétiques appelées photons. Un photon, caractérisé par sa longueur d'onde et donc son énergie grâce à la relation ($E = hc / \lambda$), peut-être, soit transmis, soit réfléchi, soit absorbé, lorsqu'il rencontre un matériau. [18]

Avec,

- h : constante de Planck.
- λ : longueur d'onde [m].
- ν : fréquence [Hz]

Le rayonnement lumineux composé de plusieurs couleurs (photons d'énergies différentes) aura donc une plage de longueurs d'onde.

Par conséquent, une partie du spectre lumineux sera transmise, une partie réfléchie et une autre partie absorbée lorsque la lumière rencontrera le matériau :

✚ La partie réfléchie dépend de l'indice de réfraction (n) des matériaux traversés. Cet indice dépend lui-même de la longueur d'onde du rayonnement mais aussi des caractéristiques du milieu. Il en découle un coefficient de Fresnel pour la réflexion. Le coefficient de réflexion à l'interface entre deux matériaux d'indice n_1 et n_2 respectivement, s'écrit comme suite[19] :

$$R = \left(\frac{n_2 - n_1}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad 1.2$$

Par exemple, le silicium a un indice entre 3 et 4, ce qui correspond à un coefficient de réflexion compris entre 0.25 et 0.36, s'il était en contact direct avec l'air ($n = 1$). Plusieurs couches, d'indices intermédiaires, sont placées entre l'air et le silicium pour diminuer la partie réfléchie du rayonnement incident.

✚ La partie absorbée est celle qui permettra la transformation de l'énergie lumineuse en électricité. La lumière est absorbée par le matériau suivant la loi de Beer-Lambert :

$$E = E_{inc} \cdot e^{-\alpha d} \quad 1.3$$

E_{inc} représente l'intensité lumineuse incidente ($W m^{-2}$), α le coefficient d'absorption (cm^{-1}) et d l'épaisseur traversée (cm). Le coefficient d'absorption dépend du matériau et de la longueur d'onde de l'énergie incidente, comme représenté sur la Figure 1.9

- ✚ La partie transmise correspond aux photons qui traversent le matériau sans interaction, leur énergie étant trop faible, le matériau est transparent pour ces photons. Nous nous intéresserons tout particulièrement au phénomène d'absorption car c'est grâce à lui qu'une partie du flux lumineux sera restituée sous forme d'électricité. [21]

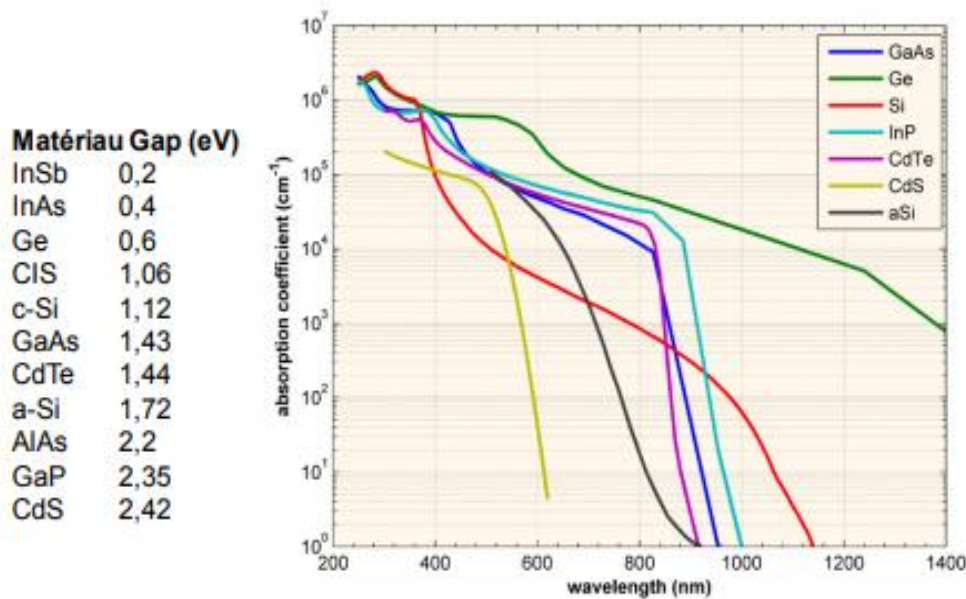


Fig.1.10 Evolution du coefficient d'absorption en fonction de la longueur d'onde (dans le vide) pour certains semi-conducteurs à 300K [21]

1.5 La courbe courant-tension

Un appareil électrique à semi-conducteurs qui convertit la lumière directement en électricité à courant continu de caractéristiques tension-courant qui sont fonction des caractéristiques de la source lumineuse et des matériaux et de la conception de l'appareil. Pour modéliser le fonctionnement de la cellule solaire, les équations de base à résoudre sont :

$$p + N_D^+ = n + N_A^- \tag{1.4}$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\frac{1}{q} \nabla \cdot J_n + U_n \quad 1.5$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{1}{q} \nabla \cdot J_p + U_p \quad 1.6$$

$$J_n = qn(x)\mu_n E(x) + qD_n \frac{dn}{dx} \quad 1.7$$

$$J_p = qp(x)\mu_p E(x) - qD_p \frac{dp}{dx} \quad 1.8$$

La résolution des équations ci-dessus nous permet de tracer la caractéristique courant-tension I(V). La cellule photovoltaïque possède une caractéristique I(V) non linéaire (Figure 1.10). La caractéristique balaie 3 quadrants sur les 4 existants. Dans le 3ème quadrant, la cellule fonctionne en récepteur dont la résistance varie fortement avec l'éclairement, c'est la photorésistance. Dans le 4ème quadrant, la cellule fonctionne en générateur dont le courant de court-circuit est proportionnel à l'éclairement et dont la tension à vide est celle de la diode en polarisation directe (0.5 à 0.8 Volts pour Si) c'est la cellule photovoltaïque à jonction PN, dans cette région le produit (V. I) est négatif [23]. Nous avons vu dans la partie précédente que la jonction servant de base à la cellule solaire est une simple diode. La jonction p-n dans l'obscurité suit donc la relation caractéristique d'une diode [12] :

$$I_{obs} = I_s \left[\exp\left(\frac{v}{v_t}\right) - 1 \right] \quad 1.9$$

Avec :

v : Tension appliquée à la diode(V)

$v_t = kT/q$: potentiel thermodynamique

(v) k : constante de Boltzmann (J.K-1)

Q : charge de l'électron (C)

T : température absolue (K)

I_s : Courant de saturation de la diode (A)

I_{obs} : Courant d'obscurité (A)

Le courant délivré sur une charge par une cellule photovoltaïque éclairée s'écrit $I = I_{ph} - I_{obs}$

Soit :

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{v}{v_t}\right) - 1 \right] \tag{1.10}$$

I_{ph} est le photo-courant généré, c'est-à-dire la contribution due à l'éclairement (indépendante de la tension aux bornes de la jonction). Elle est proportionnelle à la quantité de lumière reçue par la cellule :

$$I_{ph} = I_{ph0} \cdot I_r \cdot I_{r0} \tag{1.11}$$

Où I_r est l'intensité lumineuse éclairant la cellule (Wm^{-2}), I_{r0} , l'intensité des conditions standard ($1\ 000\ W\ m^{-2}$) et I_{ph0} , le photo-courant mesuré dans les conditions standards.

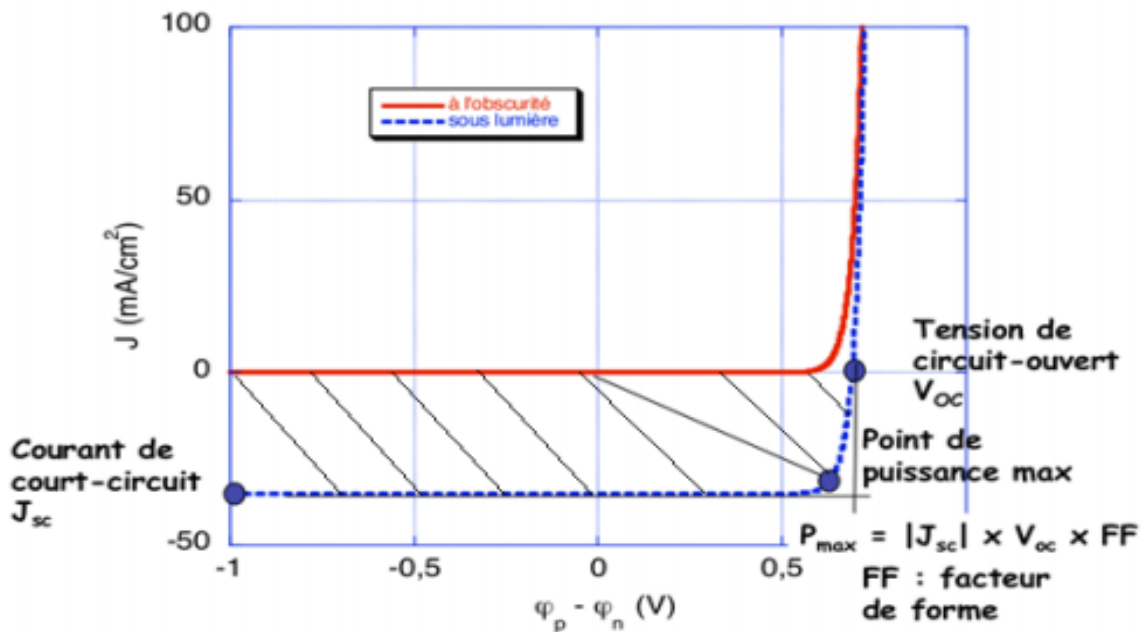


Fig.1.11 Densité de courant en fonction de la tension d'une cellule PV dans l'obscurité et sous illumination

A partir de cette courbe on peut déduire les points suivants :

- ✚ Sous éclairement on observe un déplacement de la courbe I-V dans le 4ème quadrant où la cellule représente un générateur de puissance. Le courant est décalé d'une valeur de J_{sc} dite courant de court-circuit. Ce point représente le courant délivré par le panneau lorsque celui-ci est en court-circuit, autrement dit lorsqu'il fournit le maximum de courant. La valeur de J_{sc} est proportionnelle à la quantité de la lumière d'absorbée.
- ✚ La tension de circuit-ouvert V_{oc} : c'est la tension débitée par le panneau lorsque celui-ci ne délivre aucun courant. La partie hachuré est l'intégration de la courbe sous lumière et représente la puissance délivrée par la cellule.
- ✚ La puissance maximale délivrée par la cellule P_{max} : elle est associée aux points V_{max} et I_{max} :

$$P_{max} = V_{max} \cdot I_{max} \quad 1.12$$

De l'équation (Eq11), on déduit en $V=0$ que $I_{sc} \approx I_{ph}$ et en $V=V_{oc}$, pour $I_{ph} \gg I_s$, l'équation (Eq1 ; 13) : [16]

$$V_{oc} = V_t \cdot I_{in} \left(\frac{I_{ph}}{I_s} \right) \quad 1.13$$

On remarque que V_{oc} augmente avec le logarithme d' I_{ph} et varie linéairement avec la température.

I_{in} Représente le courant incidence

Avec : $v_t = kT/q$: potentiel thermodynamique

- ✚ Le facteur de forme : est un paramètre important pour définir la qualité d'une cellule. C'est le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule et la puissance formée par le rectangle $J_{sc} \times V_{oc}$.

Le facteur de forme (FF) est défini par : [17]

$$FF = \frac{I_{max} V_{max}}{I_{sc} V_{oc}} \quad 1.14$$

✚ Rendement énergétique :

Le rendement énergétique de la cellule est calculé comme suit :

$$\tau = \frac{I_{sc}V_{oc}FF}{P_{in}} \quad 1.15$$

Avec :

P_{in} : Représente la puissance incidente

Afin d'améliorer l'efficacité de conversion des cellules solaires, il faut prendre en compte chaque facteur dans l'équation.

1.6 Types de cellules photovoltaïques

Les cellules solaires sont constitués de divers matériaux, notamment le silicium, sulfure de cadmium, tellure de cadmium, arséniure de gallium..., et en un seul forme cristalline, multi-cristalline ou amorphes.

1.6.1 Les cellules monocristallines

Elles sont issues d'un seul bloc de silicium fondu, elles sont donc très "pures". Elles offrent le meilleur rendement (entre 13 et 19%), mais sont aussi plus chères à la production, donc à la vente. Ces cellules sont en général octogonales et d'une couleur uniforme foncée (bleu marine ou gris). Ces cellules sont plus performantes et permettent de constituer des panneaux performants c'est-à-dire ceux qui produisent plus d'énergie avec de surfaces réduites.

1.6.2 Les cellules poly-cristallines

Elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Vues de près, on peut voir les orientations différentes des cristaux. Elles ont un rendement de 11 à 15%, mais leur coût de production est moins élevé que les cellules monocristallines. Elles sont en général de forme rectangulaire et sont couleur bleu nuit avec des reflets. [22]

1.6.3 Les cellules amorphes

Elles sont produites à partir d'un "gaz de silicium", qui est projeté sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide. La cellule est gris très foncé. C'est la cellule des calculatrices et des montres dites « solaires », car ce type de cellule est bon marché et la technologie est utilisable sur de nombreux supports, notamment des supports souples. Le problème c'est que son rendement est 2 à 3 fois plus faible que les cellules monocristallines.

Ci-dessous nous donnons une comparaison entre différents types de cellules solaires.

	Materials	Conversion Efficiency (%)	Efficiency Potential (%)	Radiation Resistance	Reliability	Cost	Application Area
1	Single crystal Si	25.0	28.9	Fair	Good	Fair	Terrestrial Space
	Poly crystal Si	20.4	28.9	Fair	Good	Fair	Terrestrial
2	Amorphous Si	14.5	17.5	Fair	Fair	Fair	Terrestrial
	Micro-crystal Si	15.2	23.5	Fair	Fair	Fair	Terrestrial
	CdTe	16.7	20	Fair	Fair	Fair	Terrestrial
	CuInGaSe ₂	20.3	23.5	Excellent	Fair	Fair	Terrestrial
3	Concentrator 3-5 Tandem	41.6	> 50	Fair	Good	Fair	Terrestrial
Space	GaAs	27.6	30	Good	Good	Expensive	Space
	InP	22.1	30	Excellent	Good	Expensive	Space
	3-5 Tandem	35.8	> 40	Good	Good	Expensive	Space
New	Dye-sensitized	11.2	17.5	?	Poor	?	?
	Organic	8.3	16	?	Poor	?	?

Fig.1.12Caractéristiques de divers types de cellules solaires développées pour des applications terrestres et spatiales [23].

1.7 Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque

Une cellule PV est en fait un composant électronique bien connu que l'on appelle "DIODE", composant qui laisse passer le courant électrique dans un sens (avec une chute de tension de l'ordre de 0,6 volt) et qui bloque son passage dans l'autre sens. Dans le cas de la cellule PV, on s'arrange pour que la surface de la jonction soit la plus grande possible pour collecter le maximum d'énergie solaire.

Le schéma électrique équivalent simplifié de la cellule PV est le suivant :

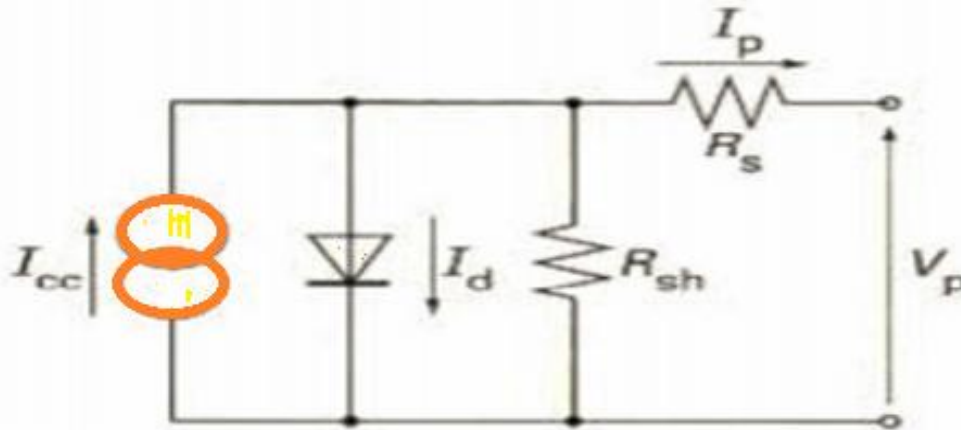


Fig.1.13 Schéma électrique simplifié de la cellule PV

Dans ce schéma, en parallèle avec la diode traversée par le courant I_d , se trouve :

- ✚ Le générateur de courant I_{CC} qui correspond au flux d'électrons généré par le flux de photons de la lumière (solaire ou autre) au sein de la jonction de la diode.
- ✚ La résistance R_{sh} (Résistance shunt) qui correspond aux pertes directes à travers la jonction et en série vers l'utilisation V_p et I_p .
- ✚ La résistance R_s (Résistance série) correspondant entre autre aux pertes joules dans les conducteurs.

Aux deux bornes de la photopile PV, l'énergie électrique se récupère sous forme d'une tension V_p et d'un courant I_p .

L'équation entre I_p et V_p est la suivante :

$$I_P = I_{CC} - I_S \left(e^{\frac{V_P + I_P R_S}{KT/q}} - 1 \right) - \frac{V_P I_P R_S}{R_{Sh}} \quad 1.16$$

Où :

I_{CC} = courant généré variable suivant l'irradiance lumineuse

T = température en K = $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K (constante de Boltzmann)

q = $1,6 \cdot 10^{-19}$ C (charge de l'électron)

I_s = quelques nA (caractéristique propre à charge diode)

Le tracé de l'équation $I_p = f(V_p)$ est de la forme suivante :

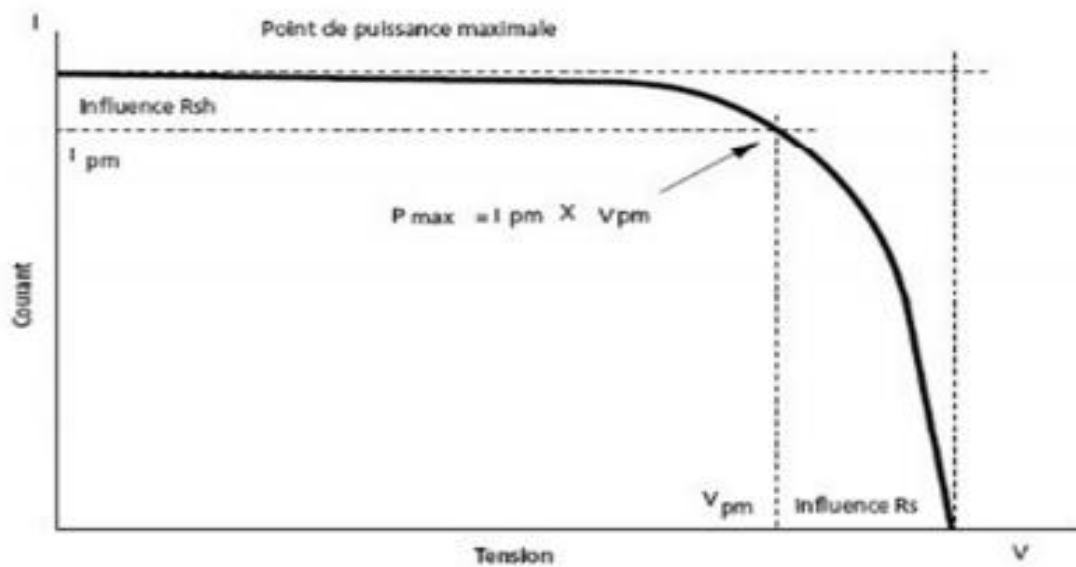


Fig. 1.14 Caractéristique $I_P = f(V_p)$

Sur cette courbe, on peut reconnaître la courbe de la diode (vers le bas du fait du signe – dans l'équation) et décalé vers le haut de la valeur I_{CC} du courant généré par l'irradiance lumineuse. [24]

Bibliographie

- [1] <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/le-developpement-durable/qu-est-ce-qu-une-energie-renouvelable>
- [2] <https://youmatter.world/fr/definition/energies-renouvelables-definition/>
- [3] <https://www.quelleenergie.fr/magazine/energies-renouvelables/energies-renouvelables-avantages-inconvenients-46047/>
- [4] Étude du potentiel de production d'électricité d'origine solaire en Hérault
- [5] <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/energie-solaire-exploitation>
- [6] Poignant Serge, L'énergie photovoltaïque, rapport d'information de la commission des affaires économiques, Assemblée Nationale, déposé le 16 juillet 2009, disponible sur < <http://www.assemblee-nationale.fr/13/rap-info/i1846.asp> >
- [7] <Http://www.polytech-lille.fr/cours-atome-circuit-integre/>
- [8] <http://www.energie-solaire.info>
- [9] <http://www.energie-solaire.info>
- [10] https://www.researchgate.net/publication/281176663_Developpement_de_cellules_photovoltaïques_a_heterojonction_de_silicium_et_contacts_interdigites_en_face_arriere
- [11] Chloé Alder. Etude de la déformation de la croûte et du manteau terrestres à partir de l'anisotropie sismique des modèles tomographiques. Sciences de la Terre. Université de Lyon, 2020. Français
- [12] M.A. Green: Third Generation photovoltaic: Advanced Solar Electricity Generation. Springer. Berlin, 75,2003.
- [13] C. Longeaud. Brevet pour le système de réponse spectrale
- [14] A.S.H. van der Heide, A. Schönecker, J.H. Bultman and W.C. Sinke, Explanation of High Solar Cell Diode Factors by Nonuniform Contact Resistance, Progress in Photovoltaic, Vol. 13, N°1, pp. 3 – 16, 2005
- [15] J.H. Smith and L.R. Reiter, An In-Depth Review of Photovoltaic System Performance Models, The American Society of Mechanical Engineers, 84-WA/Sol-12, 8 p, 1984.
- [16] Mazer JA. Solar cells: an introduction to crystalline photovoltaic technology. Boston: Kluwer Academic, 1997.
- [17] J. Hubin and A. V. Shah, Effect of recombination function on the collection in a p-i-n solar cell, Philos. Mag. B, vol. 72, no. 6, pp.589–599, 1995
- [18] A. Wagner, Peak-Power And Internal Series Resistance Measurement under Natural Ambient Conditions, EuroSun Conference, 2000 Copenhagen, June 19-22, 2000.

[19] D.L. King, Photovoltaic Module and Array Performance Characterization Methods for All System Operating Conditions, Proceeding of NREL/SNL Photovoltaic Program Review Meeting, Lakewood, Colorado, November 18-22, 2000.

[20] A. Ricaud, Photopiles solaires: de la physique de la conversion photovoltaïque aux filières, matériaux et procédés, Presses polytechniques et universitaires romandes, p. 199, 1997.

[21] Thomas Mambrini. Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implantation et en fonction des différentes technologies. Météorologie. Université Paris Sud - Paris XI, 2014. Français.

[22] https://www.ecolodis_solaire.com/conseils/panneau-solaire-photovoltaique-fonctionnement-et-description-les-differents-types-de-panneaux-solaires-photovoltaiques-1

[23] Henry Mathieu Hervé Fanet, « Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques », 6ème édition Dunod.

[24] Yan Wang. « Les compétences culturelles et interculturelles dans l'enseignement du chinois en contexte secondaire français ». Education. Université Sorbonne Paris Cité, 2017. Français.

Chapitre 02

Théorie des Cellules PIN

2.1 Introduction

Le fonctionnement d'une jonction PN constitue la base pour les cellules solaires pour lequel il est important de maximiser l'absorption de la lumière au sein du matériau [1]. Dans le chapitre précédant nous avons discuté les bases du fonctionnement de la cellule solaire et l'intérêt de la zone de charge d'espace dans la photo-génération des porteurs de charges et par la suite la création du photo-courant [2]. En intercalant une région très légèrement dopée (intrinsèque) entre les régions de type n et de type p, nous obtenons une structure PIN où la zone de déplétion s'étend sur tout le volume de cette partie de la cellule [3]. Dans ce chapitre nous allons étudier la structure universelle des cellules solaires savoir la structure PIN. Nous allons aussi voir comment l'incorporation d'une couche intrinsèque I ou faiblement dopée P ou dopée N, améliore considérablement le rendement de la cellule solaire.

2.2 L'historique de la première cellule solaire de type PIN

La première diode à jonction PIN a été rapportée en 1962, et était faite en germanium, depuis ; ce type de construction a virtuellement éliminé la jonction standard PN polarisée en inverse. Avec l'introduction de semi-conducteurs comme dispositifs de photo détection, la diode PIN a vu son utilisation augmentée comme photo détecteur. Sa grande surface d'épuisement était idéale pour son utilisation dans cette application. On augmente artificiellement la ZCE en intercalant une région très légèrement dopée (intrinsèque) entre les régions de type n et de type p, la zone de déplétion s'étend sur tout le volume de cette partie du dispositif

2.2.1 Des premières cellules solaires aux produits industriels

La découverte de l'a-Si: H en tant que matériau désordonné, qui pourrait être dope [4], a été surprenante et a rapidement conduit aux premières cellules solaires a-Si: H [5] et à la commercialisation de cellules solaires à interconnexion monolithique [6] de cellules solaires individuelles en petits modules pour des applications telles que calculatrices de royal, Sharp, Casio et teal.

Alors que la recherche sur les cellules solaires a-Si :H était principalement menée au début par les laboratoires RCA et l'université d'Osaka, la recherche a été menée plus tard par l'école des mines Colorado [7], état de Pennsylvanie université [8], laboratoire national des énergies renouvelables (NREL)[9], école pennsylvanien (Palaiseau) [10], Helmholtz Zentrum Berlin (HZB) [11], Forschungs zentrum (FZ) Jülich [12], Université d'Utrecht [13], Université

de technologie d'Eindhoven (TU Eindhoven) [14], Delft Université de technologie (TU Delft) [15], École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) [16], Tokyo Institute of Technology [17], l'Institut national des sciences et technologies industrielles avancées (AIST) [18] au niveau institutionnel, ARCO Soler, Solaire, Oerlikon Solar (plus tard Tokyo Electron), United Solar Systems corps Kaneka, Sharp et LG au niveau industriel.

De nombreuses entreprises ont produit des panneaux solaires a-Si: H dans différentes configurations. Bien que la plupart des modules solaires ont été produits en configuration PIN sur verre, jonction simple ou tandem avec un dessus a-Si: H et un silicium microcristallin ($\mu\text{-Si: H}$), il y a des exceptions: Schott solaire a produit des cellules solaires en tandem a-Si:H/ a-Si :H avec verre avant et arrière , United Solar Systems Corp. produit des cellules solaires flexibles à triple jonction en configuration NIP avec une cellule supérieure de a-Si: H et les cellules du milieu et du bas de silicogermanium amorphe hydrogéné alliages (a-SiGe: H) autres empilements de couches, y compris $\mu\text{-Si: H}$ ont fait l'objet d'une enquête mais n'ont pas été transférés à la production [19]. Hyet solaire utilise une approche combinée, en déposant une cellule solaire tandem (a-Si: H / $\mu\text{Si: H}$) en configuration PIN, en ne le transférant qu'après dépôt sur un transporteur flexible.

2.3 Fonctionnement de la cellule solaire PIN

2.3.1 Structure

Il existe plusieurs types de structures des cellules PIN: simple, double, triple ou multiple jonctions. D'une façon simplifiée, la structure P.I.N est équivalente à celle d'une jonction en série avec une résistance de très forte valeur constituée par la zone intrinsèque. Dès que l'anode est polarisée positivement, un courant I_d apparait du fait que des trous passent de la zone P + à la zone I et des électrons de la zone N + à la zone I. On dit que des porteurs libres sont injectés dans la zone intrinsèque. Cette région, qui était pratiquement vide de porteurs donc très résistive, se trouve maintenant envahie par des porteurs libres et sa résistance chute.

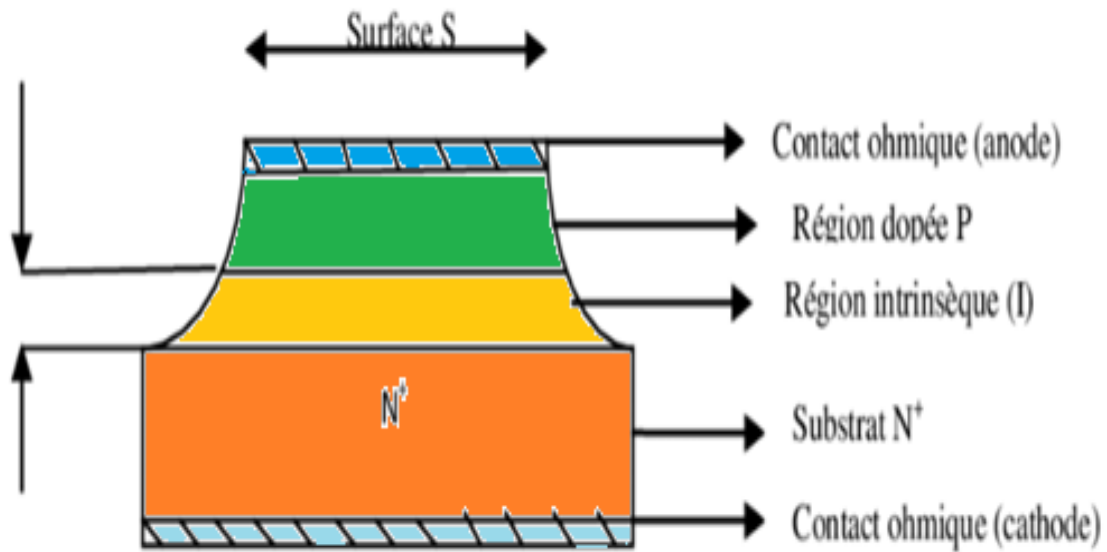


Fig. 2.1 Structure PIN [20]

Pour réduire le coefficient de réflexion de la première face éclairée de la cellule, il est préférable de la recouvrir par une couche d'oxyde transparente et conductrice (TCO), ce qui permet son utilisation comme contact électrique en avant de la cellule. Le dépôt chimique en phase vapeur (CVD) est utilisé pour obtenir une couche antireflet [21]. La recombinaison à la surface peut être un facteur contrôlant le court-circuit, et par conséquent l'efficacité de la cellule solaire. Pour une cellule solaire à couche mince efficace, il est essentiel que la passivation empêche les pertes des porteurs par recombinaison aux surfaces externes et internes [22].

Dans la figure 2.2 nous donnons un exemple de structure du cellule solaire PIN à base de matériau ternaire : InGaN. Nous pouvons observer qu'elle se différencie de la structure PN par une couche InGaN supplémentaire (intrinsèque) pris en sandwich entre la couche P et la couche N. Le nombre de paramètres d'optimisation est donc plus élevé que pour la structure PN tels que : les épaisseurs des différentes couches, leurs dopages, l'illumination, etc.

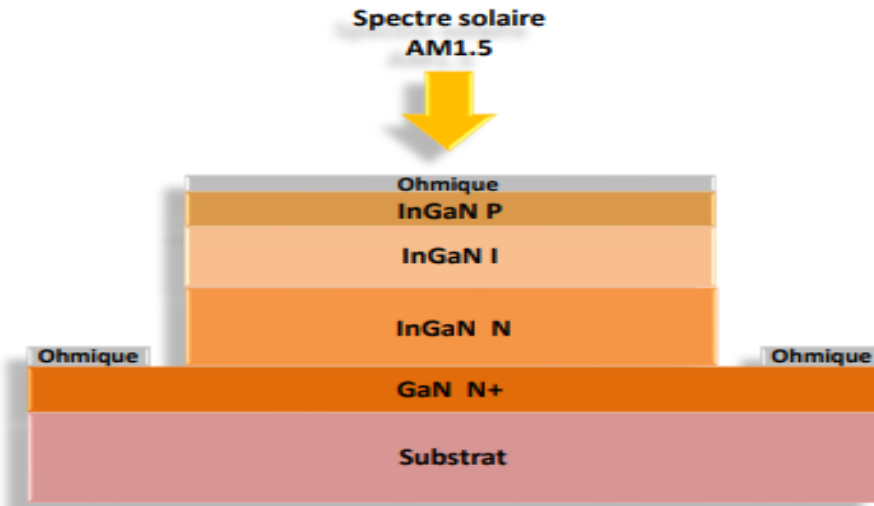


Fig. 2.2 Structure type d'une cellule solaire PIN à base d'InGaN [23]

2.3.2. Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire photovoltaïque est illustré sur Fig. 2.3, qui représente le fonctionnement d'une cellule PIN où la zone de charge d'espace

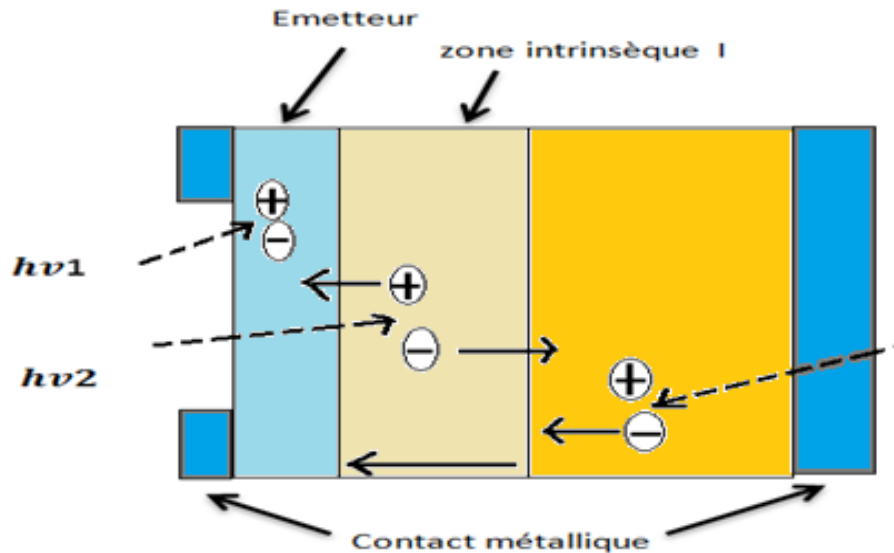


Fig. 2.3 Principe de fonctionnement d'une cellule solaire à structure PIN [24]

Créé est une région intrinsèque. Les photons incidents créent des porteurs dans chacune des régions P, I, N, et leur comportement diffère suivant la région de la jonction où ils sont créés [25].

a) Dans les régions électriquement neutres P et N :

Les photos porteuses minoritaires diffusent, ceux qui atteignent la zone de charge d'espace sont propulsés par le champ électrique, dirigé de la partie chargée positivement à la partie chargée négativement (voir figure 2.3), vers la région où ils deviennent majoritaires [2]. Il y a donc une séparation des porteurs dans la ZCE vers les régions p et n. Ces photo-porteurs contribuent donc au courant par leur diffusion, ils créent une photo courant de diffusion

b) Dans la zone de charge d'espace :

Les paires électrons-trous créées par les photons sont dissociées par le champ électrique, l'électron est propulsé vers la région type N et le trou vers la région de type P. Ces porteurs donnent naissance à une photo courant de génération.

2.3.3. Modélisation du fonctionnement

Le photo-courant généré par la cellule est directement proportionnel au flux incident. Le nombre de photons incidents peut être calculé sur la surface de la cellule à partir de la puissance incidente.

$$F_0 = \frac{P_{in}}{E} \quad 2.1$$

Où E est l'énergie du photon qui dépend de la fréquence

$$\rho E = h\nu \quad 2.2$$

Le mode électromagnétique transverse du champ électrique incident :

$$E = E_0 e^{-ikx} \quad 2.3$$

L'équation de poisson est appliquée au calcul de la génération du champ électrique, qui dépend de la densité des porteurs de charges tel que :

$$\frac{\partial E}{\partial x} = \frac{\rho(x)}{\varepsilon} \quad 2.4$$

Où $\rho(x)$ est la densité de charge.

$$\rho = q(-n + P + N_d - N_a) \quad 2.5$$

Où N_a et N_d sont la concentration du donneur et de l'accepteur. La dérivé totale et le courant de diffusion peuvent être calcules par

$$J = J_{drift} + J_{diffusion} \quad 2.6$$

Où

$$J_n = q\rho_n\mu_n E + qD_n \frac{\partial n}{\partial r} \quad 2.7$$

$$J_p = q\rho_p\mu_p E - qD_p \frac{\partial p}{\partial r} \quad 2.8$$

Où μ_n et μ_p sont respectivement la mobilité de l'électron et du trou. D_n et D_p sont le coefficient de diffusion de l'électron et trou respectivement. Le courant de sortie peut être trouve comme

$$J_{out} = (G - U) \quad 2.9$$

Où la génération (G) peut être trouvée comme

$$G = \alpha F_0 e^{-\alpha z} \quad 2.10$$

Où α est le coefficient d'absorption, F_0 est le flux de photons à la surface par unité de la surface, et Z est la profondeur de pénétration dans le matériel. Nous avons considéré salle de lecture shockley assiste par piège et la recombinaison de surface qui peut être donne comme

$$U_{SRH} = \frac{np - n_i^2}{\tau_p(n+n_0) + \tau_n(p+p_0)} \quad 2.11$$

Où n et p sont les nombres d'électrons et de trous, n_0 et p_0 sont le nombre d'électrons et de trous dans l'équilibre. Les LT porteuses dans la recombinaison bande à bande peuvent être trouvées sous la forme.

$$\tau = \frac{C}{N_{doping}} \quad 2.12$$

Où C 'est une constante. La valeur de C pour les matériaux à bande interdite directe est 10^{10} s.cm⁻³ [26, 27].

$$U_{Sp} \delta z = S_n(n_s - n_0) \quad 2.13$$

$$U_{S_n} \delta z = S_p (p_s - p_0) \quad 2.14$$

Tandis que n_0 et p_0 sont le nombre d'électrons et de trous en équilibre, tandis que n_s et p_s sont l'électron et densités de trous à la surface.

$$n_s = n_p = n_i \exp\left(\frac{eV}{KT}\right) \quad 2.15$$

Les S_{RV} (c'est quoi S_{rv}) pour les électrons et les trous sont respectivement S_n et S_p et peuvent être donné par :

$$S_n = v_n \sigma_n N_n \quad 2.16$$

$$S_p = v_p \sigma_p N_p \quad 2.17$$

$N_a = N_p$ (10^{11} cm^{-2}) pièges de surface au niveau d'énergie E_s (qui est considéré comme l'énergie au niveau intrinsèque) par unité de surface dans une couche δz , v_n et v_p sont les vitesses thermique de l'électron du trou respectivement, $\sigma_n = 1.4 * 10^{-16} \text{ cm}^2$ et $\sigma_p = 1.4 * 10^{-18} \text{ cm}^2$ sont les sections efficaces de capture du piège pour les électrons et les trous [28-29]. La densité de courant totale peut être trouve comme

$$J_D = J_n + J_p \quad 2.18$$

La tension de sortie dans ce cas sera

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{J_L}{J_D} + 1\right) \quad 2.19$$

L'efficacité peut être trouvée comme

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{V_m I_m}{P_{in}} \quad 2.20$$

2.4 Types des structures des cellules PIN

Selon les matériaux utilisés et l'empilement des différentes couches, nous distinguons plusieurs de structures des cellules PIN.

2.4.1 Cellules organiques

Ce type de cellules est basé sur l'utilisation de matériaux organique comme : le pétrole, les êtres vivants possèdent tous cet élément chimique. Ces exemples sont dits d'origine naturelle car ils ont tous été créés dans la nature. Les cellules solaires organiques sont une

voie prometteuse vers systèmes photovoltaïques de grande superficie et à bas prix. Les principaux avantages sont la facilité de préparation, les basses températures de processus, matériaux et technologies de traitement à faible coût et possibilité de produire des dispositifs flexibles sur des substrats en plastique. Les cellules solaires organiques sont donc des candidats pour de nombreuses applications, y compris des solutions à faible coût pour de très petits systèmes comme montres et calculatrices de poche, fenêtres semi-transparentes pour production d'énergie et systèmes flexibles sur rouleaux. Jusqu'à maintenant, le rendement énergétique des cellules solaires organiques est faible par rapport aux cellules solaires en silicium, bien qu'à la fois polymères et petits les dispositifs à base de molécules ont atteint des rendements de conversion d'énergie d'environ 3% ces dernières années [30, 31].

Une cellule solaire à couche mince organique de type PIN est préparée par un procédé de dépôt sous vide. La couche intrinsèque est formée par Co-dépôt avec un rapport volumique contrôlé à [Zn PC]: [C60]. L'épaisseur de trois couches de semi-conducteur organique est de 5 nm pour la couche p (phthalocyanine derivative (Zn PC)), 15 nm pour la couche i et 30 nm pour la couche n (semi-conducteur organique : fullerene (C₆₀)), totalisant 50 nm. Une couche tampon organique est insérée entre chaque électrode et l'interface semi-conductrice organique pour établir un bon contact (voir Figure 2.4).

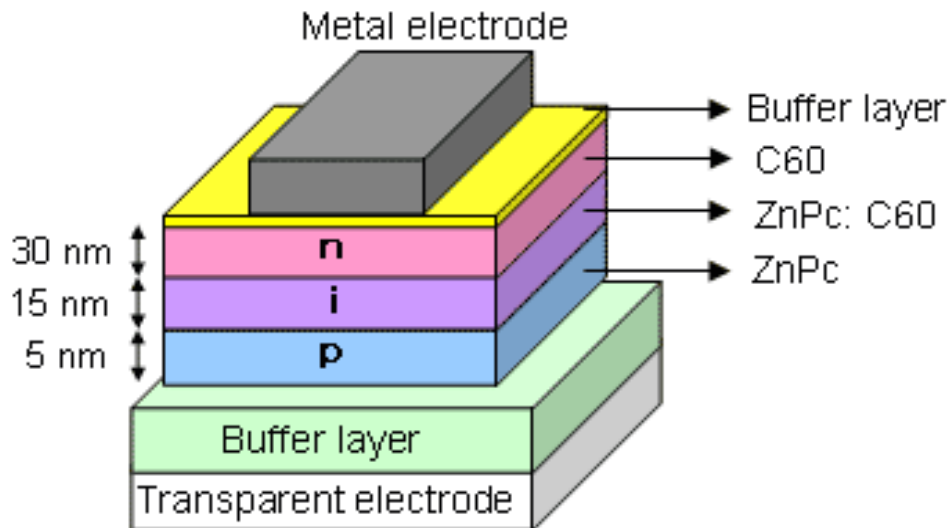


Fig. 2.4 Structure de la cellule solaire à couche mince organique de type jonction PIN [32]

2.4.2 Cellules solaires à base de pérovskite

La pérovskite est considérée actuellement comme l'un des matériaux prometteurs pourrait remplacer le silicium. La pérovskite peut être déposée en solution, cela permet la réalisation des cellules photovoltaïques de grandes surfaces. La commercialisation des cellules à pérovskites repose sur l'amélioration du coût de l'installation par rapport aux technologies silicium et organiques. Avec l'utilisation de matériaux absorbeur de lumière et matériaux d'électrodes déposés avec des techniques basses températures, telles que la pulvérisation, impression [33], rouleau à rouleau (roll to roll) et le spin casting[34]. Les pérovskites ont récemment attiré beaucoup d'attention en raison de leur coefficient d'absorption élevé, grande mobilité de porteurs de charges, une longueur de diffusion de porteurs élevée et rendement important. La formule générale de la pérovskite est ABX_3 . Une cellule solaire à pérovskite est constituée d'un substrat verre/FTO sur lequel est déposé l'oxyde d'étain dopé au fluor FTO, et sur FTO est déposé le dioxyde de titane TiO_2 . Le TiO_2 sert à améliorer le transport d'électrons. La couche active est constituée d'un matériau pérovskite.

Pour améliorer le transport de trous, une couche de spiro-OMeTAD est déposée entre l'électrode en Or et la couche active. Dans la figure ci-dessous nous présentons trois structures typiques de cellules solaires à pérovskite. La structure PIN est dérivée de la cellule solaire organique et généralement plusieurs couches de transport de charge utilisées dans les cellules solaires organiques ont été transférées avec succès dans la pérovskite cellules solaires [35]

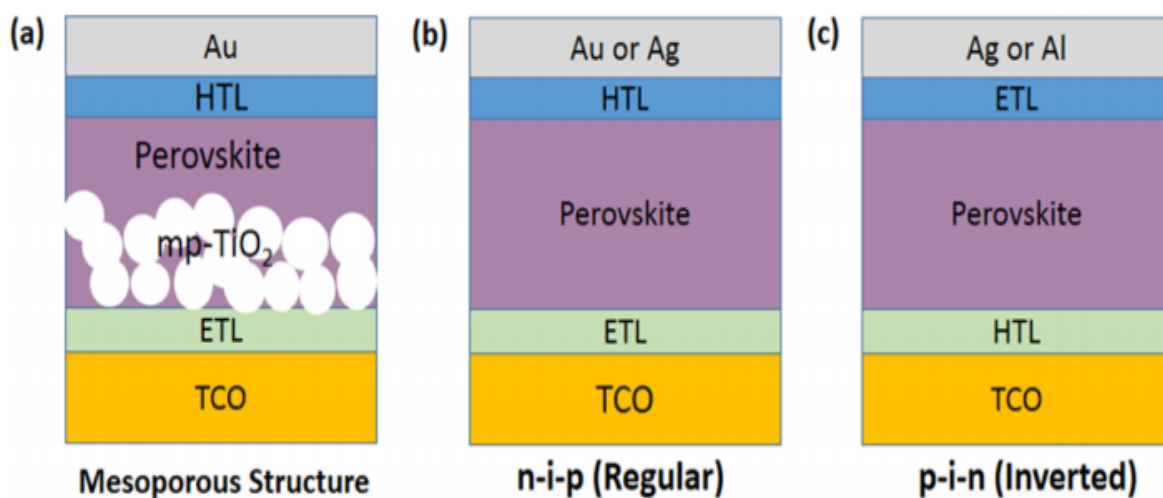


Fig. 2.5 Trois structures typiques de cellules solaires à pérovskite : (a) mésoscopique, (b) structure plane régulière, et (c) structure plane inversée [36]

Les matériaux pérovskite aux halogénures organométalliques ont fait des progrès extrêmement rapides dans les applications des cellules solaires; passant de 3,5% d'efficacité en 2009 [37] à 22,1% en 2016. Cette amélioration rapide peut être attribuée à leur capacité à être traitée en solution à basse température, à une qualité de matériau élevée et à des architectures simples qui permettent une flexibilité en ce qui concerne la conception des cellules solaires pérovskite dans les applications autonomes et en tandem.

2.4.3 Structure à base du silicium amorphe

Les cellules solaires en silicium à couche mince (TF-Si) sont une réponse possible à la demande croissante d'énergie d'aujourd'hui.

Le silicium amorphe hydrogéné (a-Si: H) y joue un rôle crucial - depuis des décennies déjà des couches absorbantes intrinsèques avec des couches dopées pour construire des jonctions PIN, et dans une mesure de plus en plus importante en combinaison avec cristallin plaquettes de silicium en cellules solaires à hétérojonction (HIT). La découverte que l'a-Si: H en tant que matériau désordonné pourrait être dopé [38] a été surprenant et a rapidement conduit aux premières cellules solaires a-Si: H [39]. De nombreuses compagnies ont produit des panneaux solaires à base a-Si: H sous différentes configurations. Alors que la plupart des modules solaires ont été produits en configuration PIN sur verre (jonction simple ou tandem avec un dessus a-Si: H et un silicium microcristallin ($\mu\text{c-Si: H}$), il y a des exceptions: Schott Solar a produit des cellules solaires en tandem a-Si: H / a-Si: H avec verre avant et arrière, United Solar Systems Corp. [40]

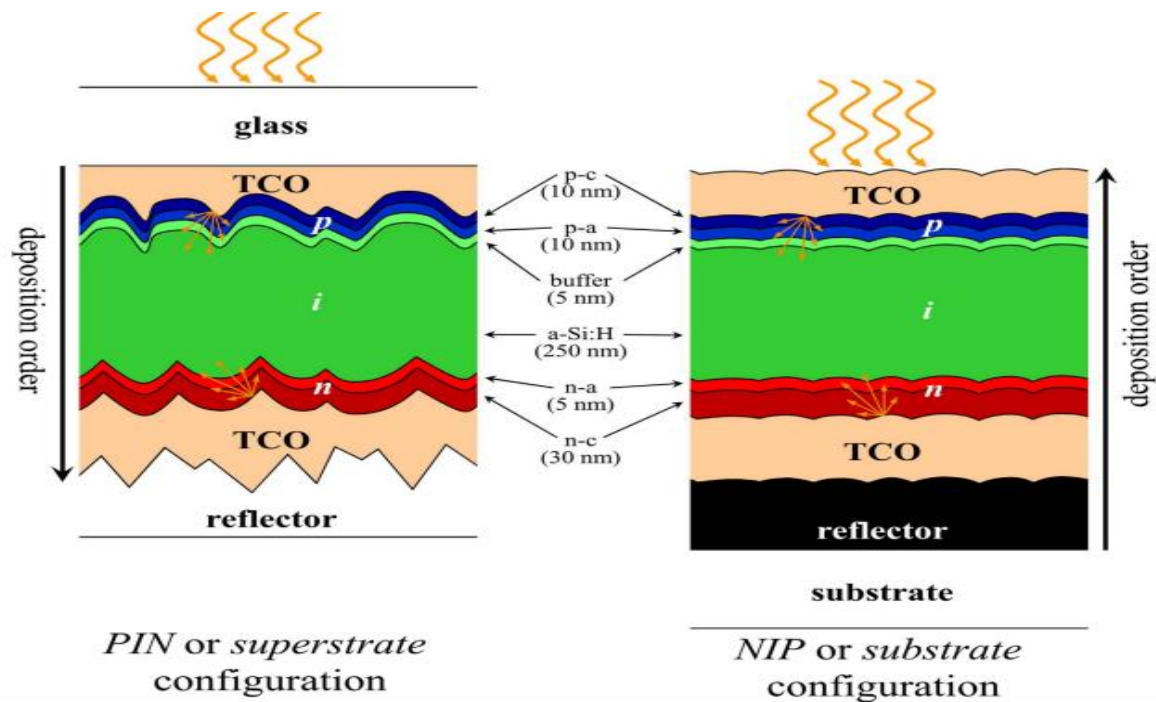


Fig. 2.6 Empilement de couches typiques de cellules solaires à jonction unique avec des couches absorbantes de silicium amorphe hydrogéné en configuration PIN [40]

Les cellules solaires en silicium amorphe sont les cellules solaires à couches minces les plus développées. La structure a généralement le type de dualité PIN(ou NIP), où la couche p et la couche n sont principalement utilisées pour établir un champ électrique interne (couche i) comprenant du silicium amorphe.

Le silicium amorphe ayant une capacité d'absorption élevée, la couche i a généralement une épaisseur de 0,2 à 0,5 μm . Sa fréquence d'absorption est comprise entre 1,1 et 1,7 eV, ce qui est différent de celui de la plaquette de silicium, qui a une fréquence d'absorption de 1,1 eV[41]. Le rendement de conversion des cellules de type PIN à base de silicium amorphe reste encourageant pour les applications photovoltaïques. Plusieurs travaux sont orientés vers l'optimisation du rendement de ces cellules qui dépasse le 11% [42]. Un rendement de 24,7% a été atteint pour cellule HIT à structure PIN de 101,8 cm^2 de surface en totale et une épaisseur de 98 μm . [43]

2.5 Pertes optiques d'une cellule solaire p-i-n à base de silicium en couches minces

Généralement, les pertes dans une cellule solaire PIN sont de nature optique ou électrique. Les pertes électriques comprennent les résistances parasites qui résultent de la résistance du matériau et des contacts résistifs. C'est un problème distinct aux fortes densités de courant . Les raisons majeures des pertes optiques sont les réflexions sur la face avant et les pertes sur la face arrière (due aux pertes plasmoniques). En plus, la différence d'indice de réfraction à l'interface Si / air qui conduit sur une réflexion d'environ 40% de la lumière visible incidente sur la face avant d'une cellule solaire c-Si.

Cependant, cet effet peut être minimisé en ajoutant une couche d'antireflet à la face avant de la cellule. Pour les cellules solaires à base d'a-Si et $\mu\text{c-Si}$, une couche d'oxyde conducteur transparent (TCO) est insérée comme contact électrique, et également comme couche antireflet. Par ailleurs, il existe une absorption parasitique de la lumière par les plasmons de polarisation surfacique (PPS) à la face arrière de la cellule solaire ($\mu\text{c-Si}$ / métal) ce qui empêche la lumière de se transformer totalement en courant électrique ; ces mécanismes sont appelés le confinement technique ou le piégeage lumineux [44].

2.6 Caractérisation électrique I(V) sous éclairage des cellules solaires pin

Un exemple de caractérisation électrique : courant-tension I(V) des cellules solaires p-i-n au laboratoire de physique de couches minces et interfaces (PICM) (Ecole polytechnique, Paris) effectué par (cité l'auteur de ce paragraphe) est donné ci-dessous. Le montage expérimental est constitué d'une ampoule halogène (Solex "4700 ° K" de 50 W) alimentée par une source DC variable dont la tension est ajustée afin de reproduire la valeur de court-circuit obtenue à partir des mesures de la réponse spectrale.

La densité de puissance incidente est de 1000 W cm^{-2} à la température de 25°C et un spectre de masse d'air de 1,5 AM (qui correspond à l'irradiation à une altitude de 0 m reçue du soleil étant à un angle de 42° au-dessus de l'horizon, sans aucun nuage). Un appareil type Keitele 2400 Source-Mètre commandé par un ordinateur est utilisé pour fournir des balayages de tension et pour enregistrer le courant. Les Figures montrent les courbes J(V) de deux cellules solaires p-i-n réalisées dans ce travail, les épaisseurs de leur couche intrinsèque est de 300 et 500 nm respectivement.

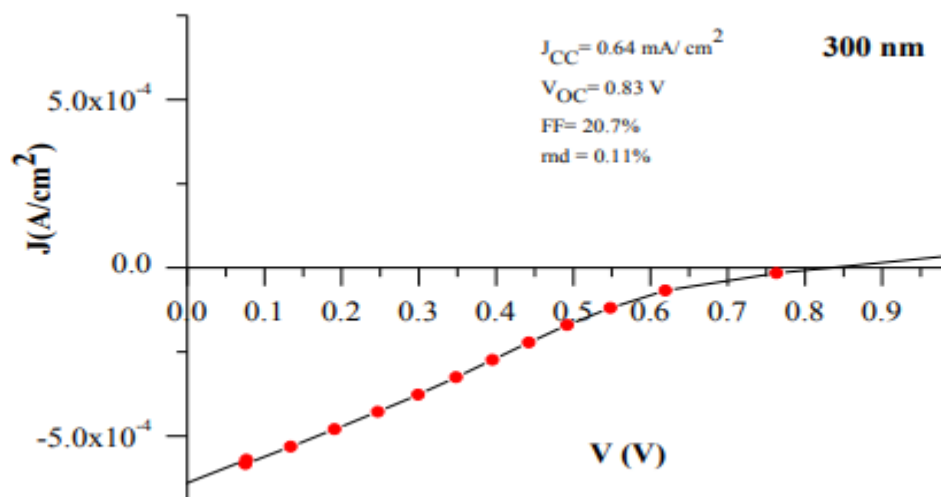


Fig. 2.7 la courbe I(V) d'une p-i-n à base de silicium amorphe, épaisseur de i-a Si : H = 300 nm

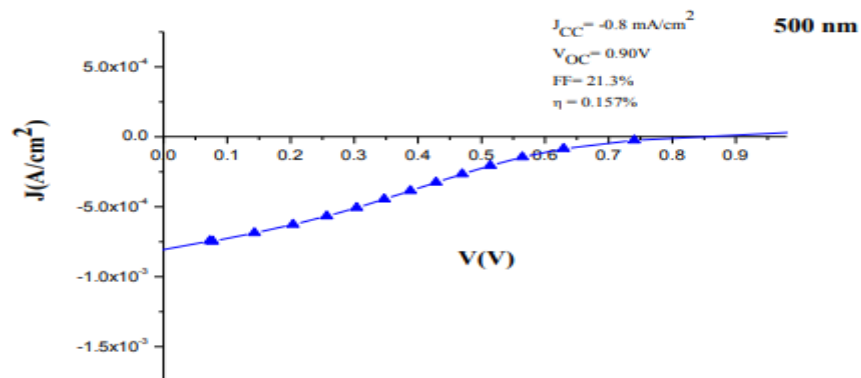


Fig. 2.8 la courbe I(V) d'une p-i-n à base de silicium amorphe, épaisseur de i-a Si : H = 500 nm.

2.7 Comparaison entre la structure PN et PIN

Nous avons présenté sur la figure 2.9, les caractéristiques courant-tension de deux structures obtenues avec les paramètres optimaux. Nous constatons que l'on obtient avec la structure PIN, des performances légèrement supérieures à celles obtenues dans la structure PN, avec un rendement de 19, 0% pour la PIN contre 17, 8% pour la PN. L'écart de performance entre les structures s'explique par le fait que l'on ait, pour la structure PIN, un I_{CC} et un V_{CO} un peu plus élevés que pour la structure PN. En effet, comme pour la structure MIN, la couche intrinsèque de la structure PIN permet d'avoir une plus grande ZCE et améliorer ainsi la génération des paires électron-trou.

L'augmentation d' I_{CC} est donc due à l'augmentation de la concentration des porteurs photo générés et celle du V_{CO} à l'augmentation de la largeur de la ZCE. En outre, nous avons également réalisé une étude de tolérance sur tous les paramètres optimaux de deux structures; rapportée dans le tableau 2.10. On voit dans ce tableau, que les plages de tolérance pour le dopage et l'épaisseur de la couche N sont plus larges dans la structure PIN que dans la structure PN. Ce qui confère à la structure PIN un avantage supplémentaire considérable pour la réalisation pratique de la cellule. Pour l'épaisseur de la couche N, la structure PIN possède un intervalle de tolérance de [0,01 - 1,00] μm , presque deux fois plus large que celui de la structure PN ([0,48 - 1,00] μm). Pour le dopage, la structure PIN permet de réaliser des forts dopages sur la couche N, jusqu'à 1.10^{19}cm^{-3} .

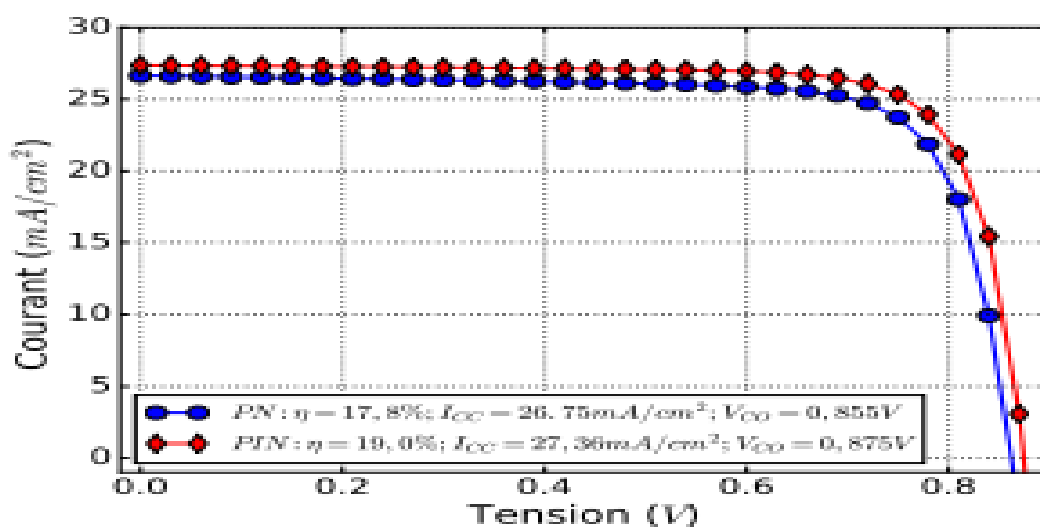


Fig. 2.9 Caractéristiques courant-tension de la cellule solaire PN et de la cellule PIN obtenues avec les paramètres optimaux.

	$N_a(cm^{-3})$	$d_p(\mu m)$	$N_i(cm^{-3})$	$d_i(\mu m)$	$N_d(cm^{-3})$	$d_n(\mu m)$	$X(\mu m)$
PN	1,0.10 ¹⁹ [4,4.10 ¹⁶ –1,0.10 ¹⁹]	0,01 [0,01–0,04]			3,9.10 ¹⁶ [1,0.10 ¹⁶ –3,5.10 ¹⁷]	1,00 [0,48–1,00]	0,56 [0,50–0,72]
PIN	1,0.10 ¹⁹ [4,4.10 ¹⁶ –1,0.10 ¹⁹]	0,01 [0,01–0,04]	5,8.10 ¹⁶ [4, 4.10 ¹⁴ –1,0.10 ¹⁷]	0,54 [0,01–0,04]	5,0.10 ¹⁷ [1,9.10 ¹⁶ –1,0.10 ¹⁹]	0,50 [0,10–1,00]	0,59 [0,47–0,71]

Tableau.2.1 Intervalles de tolérance pour chaque paramètre optimal de la cellule solaire [44].

Chaque intervalle correspond à l'ensemble des valeurs que peut prendre le paramètre tout en gardant le rendement de la cellule à plus de 90% de son maximum. Les autres paramètres d'optimisation sont maintenus à leurs valeurs optimales solaires.

Bibliographie

- [1] Aib Samia « Modelisation D'un Photodetecteur Dans Une Chaîne De Transmission Par Fibre Optique », Application Aux Composants Optohyperfréquences, Université Mentouri Constantine.2015
- [2] Henry Mathieu Hervé Fanet, « Physique des semiconducteurs et des composants électroniques », 6ème édition Dunod
- [3] Chabane houda , « ETUDE D'UNE CELLULE SOLAIRE A BASE DE STRUCTURE PIN » , Université Hadj Lakhdar de Batna, 2014 / 2015
- [4] Spear WE, Comber PG Le. Substitutional doping of amorphous silicon. Solid State Commun 1975;17(9):1193–6.
- [5] Carlson DE, Wronski CR. Amorphous silicon solar cell. Appl Phys Lett 1976;671(11):10–3.
- [6] Hanak JJ. Monolithic solar cell panel of amorphous silicon. Sol Energy 1979;23(2):145–7.
- [7] Colorado School of Mines, Renewable Energy Materials Research Science and Engineering Center (REMRSEC). [Online]. Available: (<http://remrsec.mines.edu/>).
- [8] Pennsylvania State University (Penn State), Center for Thin Film Devices. [Online]. Available: (<http://www.research.psu.edu/capabilities/centers/thin-filmdevices>).
- [9] National Renewable Energy Laboratory (NREL), Photovoltaics Research. [Online]. Available: (<http://www.nrel.gov/pv/>).
- [10] École Polytechnique, Laboratoire de Physique des Interfaces et des Couches Minces (LPICM). [Online]. Available: (<https://portail.polytechnique.edu/lpicm/en>).
- [11] Helmholtz Zentrum Berlin (HZB), Institute SiliconPhotovoltaics. [Online]. Available: (https://www.helmholtz-berlin.de/forschung/oe/ee/si-pv/index_en.html).
- [12] ForschungszentrumJülich (FZ Jülich), Institute of Energy and Climate Research (IEK), Photovoltaics (IEK-5). [Online]. Available: (http://www.fz-juelich.de/iek/iek-5/EN/Home/home_node.html).
- [13] Utrecht University (UU), Nanophotonics. [Online]. Available: (<http://www.uu.nl/en/research/nanophotonics>).
- [14] Eindhoven University of Technology (TU Eindhoven), Plasma and Materials Processing (PMP). [Online]. Available: (<https://www.tue.nl/en/university/departments/applied-physics/>).
- [15] Delft University of Technology (TU Delft), Photovoltaic Materials and Devices (PVMD). [Online]. Available: (<http://www.ewi.tudelft.nl/en/the-faculty/departments/electrical-sustainable-energy/photovoltaic-materials-and-devices/>).

- [16] École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Institute of Microengineering (IMT), Photovoltaics and Thin Film Laboratory (PV-LAB). [Online]. Available: (<http://pvlab.epfl.ch/>).
- [17] Tokyo Institute of Technology (Tokyo Tech), Photovoltaics Research Center (PVREC). [Online]. Available: (http://solid.pe.titech.ac.jp/pvrec/main_frame_e.html).
- [18] National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Research Center for Photovoltaics (RCPV). [Online]. Available: (<https://unit.aist.go.jp/rcpv/cie/index.html>).
- [19] Yang J, Guha S. Status and future perspective of a-Si:H, a-SiGe:H, and nc-Si:H thin film photovoltaic technology [74090C–74090C–14]. Proc SPIE 2009;7409, [74090C–74090C–14]
- [20] A. K. Ghosh, C. Fishman, and T. Feng, J.Appl.Phys. Vol.51, No.1, January 1980, pp 446-454.
- [21] D. E. Carlson, C. Y. Wronski, Appl.Phys.Lett. 28(11), (1976), p 671.
- [22] B. Chatterjee, S.A. Ringel, and R. Hoffman, jr. 25th IEEE, PVCS, Washington, D.C.96 (1996)179
- [23] Abdoulwahab Adaine. Optimisation numérique de cellules solaires à très haut rendement à base d'InGaN. Science des matériaux [cond-mat.mtrl-sci]. Université de Lorraine, 2018. Français.
- [24] Henry Mathieu Hervé Fanet, « Physique des semiconducteurs et des composants électroniques », 6ème édition Dunod
- [25] N. Hamada, S. Sawada et A. Oshiyama, New one-dimensional conductors: graphitic microtubules, Physical Review Letter, 68, (1992),1579
- [26] Wayesh Qarony, Efficient amorphous silicon solar cells: characterization, optimization, and optical loss analysis, Accepted 15 September 2017 Available online 14 November 2017
- [27] Mikio Taguchi, 24.7% Record Efficiency HIT Solar Cell on Thin Silicon Wafer, IEEE JOURNAL OF PHOTOVOLTAICS, VOL. 4, NO. 1, JANUARY 2014
- [28] R. B. Bergmann, R. Brendel, M. Wolf, P. Lolgen, and J.H.Werner; IEEE, PVCS, Washington, D. C. 96(1996).
- [29] K. Coates, S. Morrison, S. Narayanan, Proceeding of 16th European Photovoltaic Solar Energy conference, Glasgow, 2000, p 1279.
- [30] https://www.aist.go.jp/aist_e/list/latest_research/2005/20050302/20050302.html
- [31] C. Tian, A. Mei, S. Zhang, H. Tian, S. Liu, F. Qin, and S. Xie, 'Oxygen management in carbon electrode for high-performance printable perovskite solar cells', Nano Energy, Vol. 53, pp. 160 - 167, 2018.

- [32] P.P. Boix, K. Nonomura, N. Mathews, and S.G. Mhaisalkar, 'Current progress and future perspectives for organic/inorganic perovskite solar cells', *Materials today*, Vol. 17, N°1, pp. 16 - 23, 2014
- [33] You, J.; Yang, Y.; Hong, Z.; Song, T. B.; Meng, L.; Liu, Y.; Jiang, C.; Zhou, H.; Chang, W. H.; Li, G.; Yang, Y. Moisture assisted perovskite film growth for high performance solar cells. *Appl. Phys. Lett.* 2014, 105, 183902
- [34] Lei Meng et al. , Recent Advances in the Inverted Planar Structure of Perovskite Solar Cells, Department of Material Science and Engineering, University of California, Los Angeles, Los Angeles, California 90095, United States
- [35] A. Kojima, K. Teshima, Y. Shirai, and T. Miyasaka, "Organometal halide perovskites as visible-light sensitizers for photovoltaic cells," *J. Am. Chem. Soc.* 131(17), 6050–6051 (2009).
- [36] Spear WE, Comber PG Le. Substitutional doping of amorphous silicon. *Solid State Commun* 1975;17(9):1193–6.
- [37] Carlson DE, Wronski CR. Amorphous silicon solar cell. *Appl Phys Lett* 1976;671(11):10–3.
- [38] Michael Stuckelberger, Review: Progress in solar cells from hydrogenated amorphous silicon, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 76 (2017) 1497–1523
- [39] Shi, D., Guo, Z., & Bedford, N. (2015). *Nanoenergy Materials. Nanomaterials and Devices*, 255–291.
- [40] Wayesh Qarony , Efficient amorphous silicon solar cells: characterization, optimization, and optical loss analysis, Accepted 15 September 2017 Available online 14 November 2017
- [41] Mikio Taguchi, 24.7% Record Efficiency HIT Solar Cell on Thin Silicon Wafer, *IEEE JOURNAL OF PHOTOVOLTAICS*, VOL. 4, NO. 1, JANUARY 2014
- [42] D. L. Stae, C. R. Wronski, *Appl.Phys.Lett*, 31.(1977)292.
- [43] BENLOUCIF NISRINE, « Potentialités de films de silicium polycristallin LPCVD destinés à l'étude d'une cellule solaire multicouches », Université des frères MENTOURI (Constantine),2015
- [44] You, J.; Yang, Y.; Hong, Z.; Song, T. B.; Meng, L.; Liu, Y.; Jiang, C.; Zhou, H.; Chang, W. H.; Li, G.; Yang, Y. Moisture assisted perovskite film growth for high performance solar cells. *Appl. Phys. Lett.* 2014, 105, 183902

Chapitre03

Etude comparative des performances des cellules PN et PIN en couches minces

3.1 Introduction

Comme rappel, une couche mince est une fine couche d'un matériau déposé sur un autre matériau, appelé "substrat" dont l'une des dimensions qu'on appelle l'épaisseur a été fortement réduite de telle sorte qu'elle varie de quelques "nm" à quelques "µm". La différence essentielle entre le matériau à l'état massif et celui en couches minces est liée au fait que dans l'état massif on néglige, généralement avec raison le rôle des limites dans les propriétés, tandis que dans une couche mince ce sont, au contraire, les effets liés aux surfaces limites qui sont prépondérants. En revanche, lorsque l'épaisseur d'une couche mince dépassera un certain seuil l'effet d'épaisseur deviendra minime et le matériau retrouvera les propriétés bien connues du matériau massif.

L'intérêt accordé aux couches minces provient essentiellement de [1]:

- L'utilisation économique des matériaux en rapport avec les propriétés physiques et de la simplicité des technologies mise en œuvre pour leur réalisation.
- Une grande variété de matériaux est utilisée pour produire ces couches minces comme les alliages (binaires, ternaires, quaternaires).
- Quelle que soit la procédure employée pour sa fabrication, une couche mince est toujours solidaire d'un support sur lequel elle est construite. En conséquence, il est impératif de tenir compte de ce fait majeur dans la conception.

3.2 Les cellules en couches minces

Les cellules solaires en couches minces (Thin-film solar cell) sont couramment appelées cellules de seconde génération car elles font historiquement suite aux cellules en silicium cristallin relativement épaisses. Les trois technologies émergentes sont aujourd'hui :

- ✚ Le Silicium amorphe et microcristallin noté TFSi (Thin-Film Silicon en anglais).
- ✚ Le Semi-conducteur Poly-cristallin CdTe (Tellure de Cadmium).
- ✚ L'alliage Cu (In, Ga) Se₂ (Cuivre-Indium/Gallium-Sélénium) noté CIGS.

La technologie a-Si domine actuellement le marché du photovoltaïque en couches minces (La domination du silicium dans ses formes cristallines et amorphes est une écrasante majorité de 99% de l'énergie photovoltaïque totale du marché. La plupart des 1% restant occupé par

Chapitre III : Etude comparative des performances des cellules PN et PIN en couches minces

CdTe, avec CuInSe₂ que récemment commence à apparaître sur la scène commerciale). L'hétérojonction sulfure de cuivre/sulfure de cadmium (CuS /CdS) a été le premier système photovoltaïque en couche mince développé.

Les technologies photovoltaïques en couches minces offrent plusieurs avantages :

- ✚ Une faible épaisseur, est suffisante pour absorber la majorité de la lumière incidente sur la couche absorbante. Celle-ci prédit d'importantes économies dans le coût des matériaux.
- ✚ Utilisation des matériaux rares et coûteux, en raison de la faible dimension du matériau actif de la cellule solaire.
- ✚ Utilisation d'une variété de techniques relativement peu coûteuse de dépôt sous vide pour le traitement de ces cellules. Donc réduction des coûts de traitement.
- ✚ Des films minces peuvent être déposés sur des substrats flexibles ou légers afin de rendre les cellules viables pour une grande variété d'applications

Bien que la technologie PV en films minces soit encore à ses débuts, les technologies CdTe, ainsi que CuInSe₂ semblent particulièrement prometteuses. Le rendement en laboratoire a dépassé 20% pour Cu (In, Ga) Se₂, et 16% pour CdTe, alors que dans le commerce, des modules à couches minces ont montré une efficacité de conversion au voisinage de 10 à 12% [2].

3.3 Les cellules PV à base de silicium amorphe

3.3.1 Le silicium amorphe

La première recherche de silicium amorphe déposée par une décharge de silane a été réalisée par Chittik et al. en 1969 [3.4]. Des travaux ultérieurs effectués sur ce matériau ont prouvé qu'il avait eu une densité de défauts beaucoup plus faible que le silicium amorphe évaporé ou pulvérisé. La capacité de doper ce matériau à la fois de type n et p a été découvert indépendamment par Carlson et Spear et Lecomber [3.4].

Carlson et Wronski ont prouvé que le a-Si a des propriétés optoélectroniques intéressantes, suite à leurs premiers résultats sur les piles solaires a-Si qui ont donné un rendement de conversion de 2% en 1976 [3.4], et celui-ci a été porté à 5% peu de temps après. Ces résultats ont suscité un intérêt mondial non seulement dans les piles solaires a-Si mais également dans

Chapitre III : Etude comparative des performances des cellules PN et PIN en couches minces

d'autres applications. Il est rapidement devenu évident que l'hydrogène joue un rôle important dans la détermination des propriétés optoélectroniques de ces matériaux, et que la couche déposée d'a-Si est en fait un alliage de silicium et d'hydrogène ou silicium amorphe hydrogéné (a-Si : H). Plus tard, de nombreux laboratoires de recherche sont orientés vers l'étude des propriétés optoélectroniques et photovoltaïques intrinsèques d'alliages a-Si:H. En 1977, Staebler et Wronski ont observé de grands changements de la conductivité, de photoconductivité et d'obscurité d'a-Si : H quand le matériau était exposé à la lumière du soleil [3.4].

3.3.2 Progrès technologiques

Des progrès significatifs ont été réalisés au cours des dernières années dans l'amélioration des performances des cellules solaires à base du silicium amorphe (a-Si). Ces progrès ont accéléré la cadence de la production commerciale d'a-Si photovoltaïque (PV), par l'utilisation de différentes techniques de dépôt comme : spray plasma, réactif dépôt chimique en phase vapeur, évaporation assistée par faisceau d'ions, résonance cyclotron à électrons, pulvérisation, dépôt chimique en phase vapeur à haute pression, dépôt par plasma thermique en expansion.

Les progrès réalisés dans la technologie de cellules solaires à base du silicium amorphe a-Si peuvent être attribués aux avancées dans les domaines de matériaux nouveaux, dans le développement des techniques de dépôt sur les grandes surfaces appropriées pour la production de masse et dans les progrès des techniques de caractérisation.

3.4 Structure de la cellule PIN à base de silicium amorphe

La structure est en général de type PIN (figure 3.1). La fabrication d'une cellule p-i-n commence par le dépôt de la « couche fenêtre » de type p ; sur l'oxyde conducteur transparent (TCO). Une couche intrinsèque d'a-Si : H est déposée pour former la région absorbante de la cellule. L'étape finale dans la formation de la cellule à une simple jonction p-i-n est le dépôt de la couche de type N.

Chapitre III : Etude comparative des performances des cellules PN et PIN en couches minces

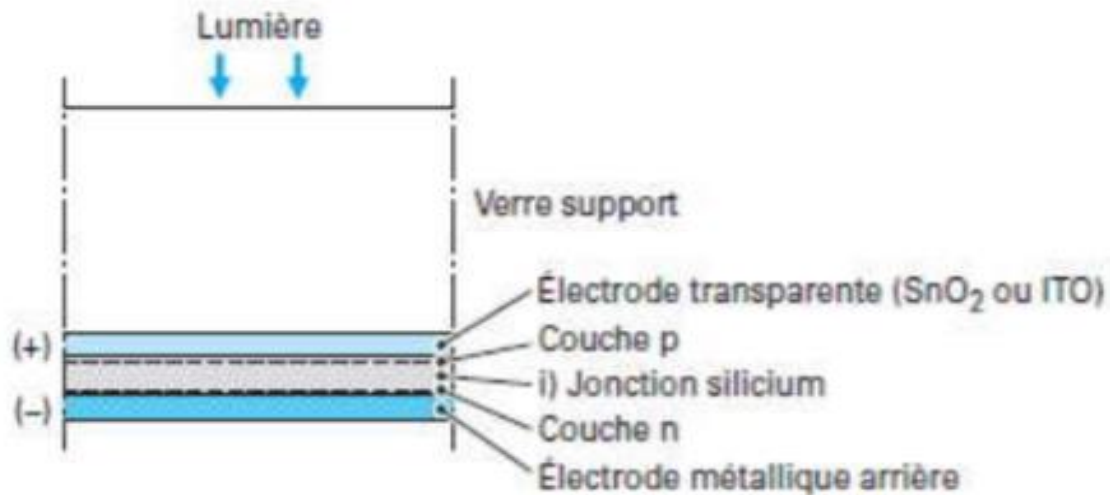


Fig. 3.1 Structure d'une cellule de type PIN au silicium amorphe avec verre en superstrat [5].

Le choix des matériaux TCO est lié à leurs propriétés physiques et optoélectroniques (transmission optique, conductivité et capacité de former un bon contact avec les couches de type p). Le TCO idéal doit avoir une faible résistance de couche et une haute transparence optique dans la gamme de longueurs d'onde 400 à 1000 nanomètres. Si la couche p est trop épaisse les performances du dispositif seront compromises par les pertes dues à l'augmentation du photo-courant d'absorption dans la couche-p [5].

Malgré les rendements de conversion faibles de 6% à 7% (limités par le taux de recombinaisons très élevé), cette filière tend à se développer car le coût de fabrication de ces cellules est plus faible que celui des cellules en Si de première génération. Le silicium amorphe, possédant un fort coefficient d'absorption, n'a besoin que d'une très faible épaisseur de silicium, de l'ordre du micron, ce qui réduit considérablement les coûts de matière première. Pour une cellule à triple jonction de petite surface (0,25 cm²), en laboratoire (United Solar) le rendement de conversion obtenu a été de 13%. C'est le rendement le plus élevé réalisé à ce jour pour une cellule solaire à base d'a-Si. Le rendement initial était de 15,2%. C'est un record pour la cellule solaire à base d'a-Si.

Les cellules à triple jonction présentent généralement une diminution du rendement de conversion de l'ordre de 10-15%, tandis que les cellules tandem présentent environ 12-20% et les cellules à une seule jonction entre 18-30%, selon une variété de paramètres tels que l'épaisseur de couches intrinsèques et les conditions de dépôt.

3.5 Etude comparatif

L'étude du comportement réel des cellules solaires, nécessite une description détaillée du dispositif à simuler et des matériaux utilisés dans sa réalisation. La sélection du type de matériau approprié et sa composition ainsi que ses propriétés électriques et physiques sont très importantes et influent directement sur le rendement des cellules. Dans ce chapitre, nous présenterons les résultats de simulation en utilisant le logiciel unidimensionnel SCAPS-1D pour deux cellules solaires à base de silicium poly-cristallin (Si-poly) et silicium amorphe (Si-amorphe). En plus de l'effet de la variation du niveau d'éclairage et de la température, l'étude sera concentrée sur la variation des paramètres physiques et géométriques des deux cellules :

- ✚ L'épaisseur de la couche absorbante (couche P) et intrinsèque
- ✚ Les deux types du TCO (transparent conductoroxyde) : **p-SnO₂**, et **p-ZnO**
- ✚ Le niveau du dopage de la couche absorbante et des couches **p-SnO₂**, et **p-ZnO**

Les structures des cellulesproposées sont les suivantes :

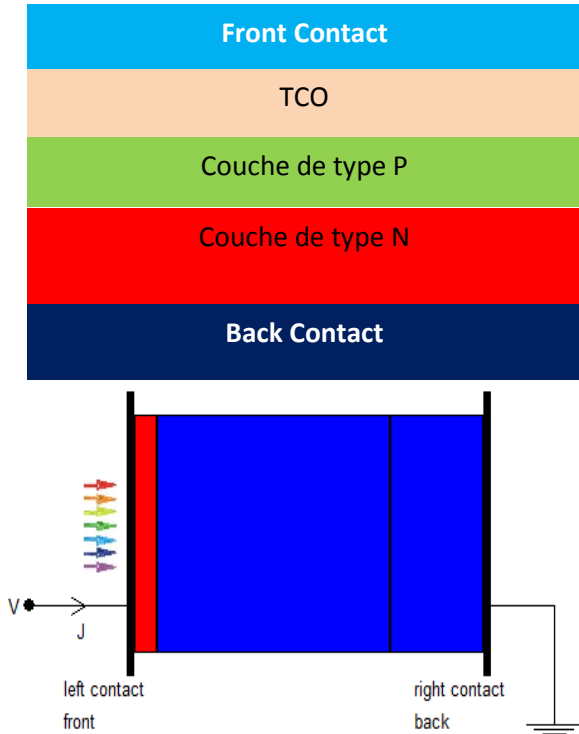


Fig. 3.2 Cellule pn

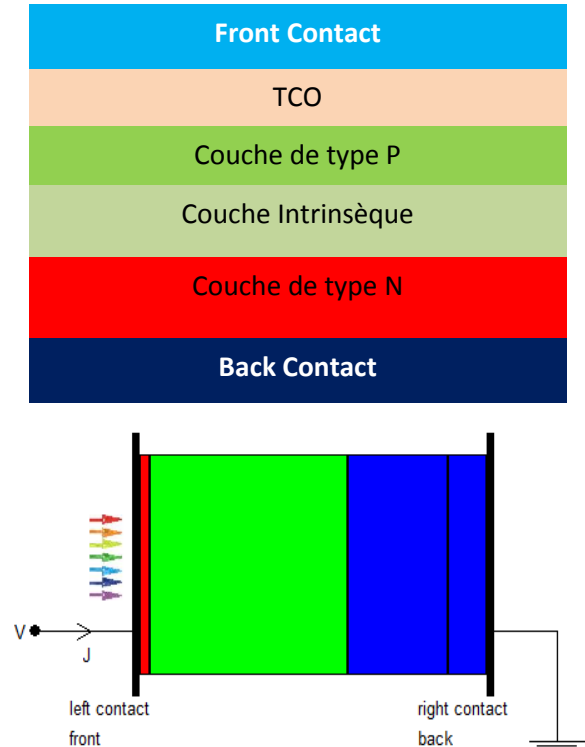


Fig. 3.3 Cellule p-i-n

Chapitre III : Etude comparative des performances des cellules PN et PIN en couches minces

L'utilisation des matériaux ZnO et SnO₂ comme TCO (oxyde conducteur transparent) a un effet remarquable sur les performances des cellules solaires p-i-n en silicium amorphe hydrogéné(a-Si : H) et la cinétique de recombinaison qui seront étudiées. Dans ce contexte, une comparaison des performances des cellules proposées pour les deux types du TCO est présentée. L'effet du changement de certains paramètres physiques et géométrique des deux types de cellules et sous divers niveaux d'éclairage, sur les caractéristiques I-V sera analysé. Les valeurs de la densité de courant de court-circuit (Jsc), la tension en circuit ouvert (Vco), facteur de forme (FF) ainsi que du rendement de conversion (η) seront déterminées à partir des caractéristiques enregistrées. Les paramètres physiques des couches actives des structures considérées sont illustrés dans le tableau 3.1

Paramètres	p-type	Intrinsèque	n-type
Thickness(nm)	9	500	20
Nd (cm^{-3})	1.10^6	1.10^6	1.10^{17}
Na (cm^{-3})	1.10^{17}	1.10^6	1.10^6

Tableau 3.1 paramètres des couches : PIN

Les paramètres physiques des couches TCO (ZnO et SnO₂) sont illustrés dans le tableau 3.2

Paramètres	p-ZnO	p-SnO ₂
thickness	0.02	0.02
E_g (eV)	3.3	3.6
Electron affinity(eV)	4.6	4.5
Dielectric constant	9.00	9.00
N_c (cm^{-3})	$2.2 * 10^{18}$	$2.2 * 10^{18}$
N_v (cm^{-3})	$1.8 * 10^{19}$	$1.8 * 10^{19}$
μ_e (cm^2/V_s)	100	100
μ_{hole} (cm^2/V_s)	25	25
N_D (cm^{-3})	10^{20}	10^{20}
N_A (cm^{-3})	00	00
V_e (cm/s)	$1 * 10^7$	$1 * 10^7$
V_{hole} (cm/s)	$1 * 10^7$	$1 * 10^7$

Tableau 3.2 paramètres des couches : p-ZnO, P-SnO₂

Chapitre III : Etude comparative des performances des cellules PN et PIN en couches minces

3.5.1 Effet du changement du niveau d'éclairage (intensité lumineuse)

Nous présentons dans cette partie les résultats du changement du niveau d'éclairage des cellules solaires pour les deux types de TCO.

a) TCO: ZnO

Les résultats enregistrés sont cités dans le tableau ci-dessous.

Niveau d'éclairage	Cellule PN				Cellule PIN			
	η (%)	FF (%)	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{co} (V)	η (%)	FF (%)	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{co} (V)
100%	5.91	55.75	9.431935	1.1238	9.65	69.41	13.043714	1.0653
90%	5.89	55.77	8.488901	1.1203	9.62	69.53	11.737882	1.0612
80%	5.87	55.79	7.545846	1.1152	9.64	69.75	10.4353	1.0595
65%	5.83	55.81	6.131217	1.1076	9.60	70.10	8.476801	1.0496
40%	5.75	55.95	3.77331	1.0889	9.49	70.81	5.214053	1.0284
30%	5.70	56.06	2.830095	1.0778	9.43	71.24	3.909568	1.0158
15%	5.59	56.52	1.415129	1.0490	9.28	72.29	1.953735	0.9856
9%	5.52	56.94	0.84910038	1.0271	9.17	73.08	1.171825	0.9633

Tableau 3.3 Les paramètres de sortie des cellules PN et PIN(η , FF , J_{sc} , V_{co}) en fonction du niveau d'éclairage

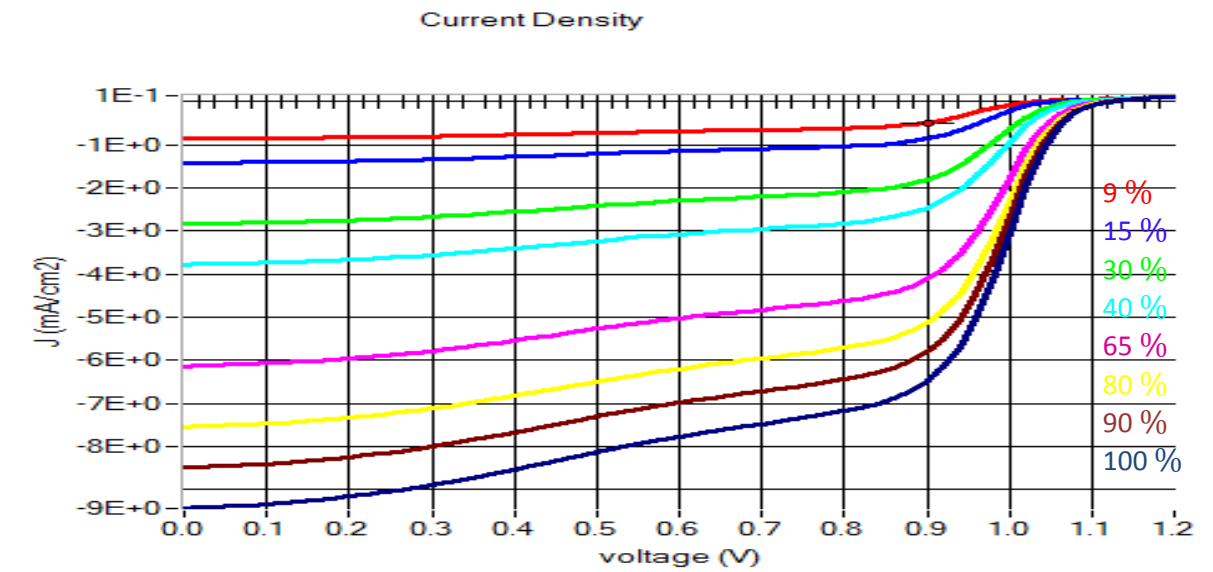


Figure 3.4 Caractéristiques J-V pour la cellule PN en fonction du niveau d'éclairage

Chapitre III : Etude comparative des performances des cellules PN et PIN en couches minces

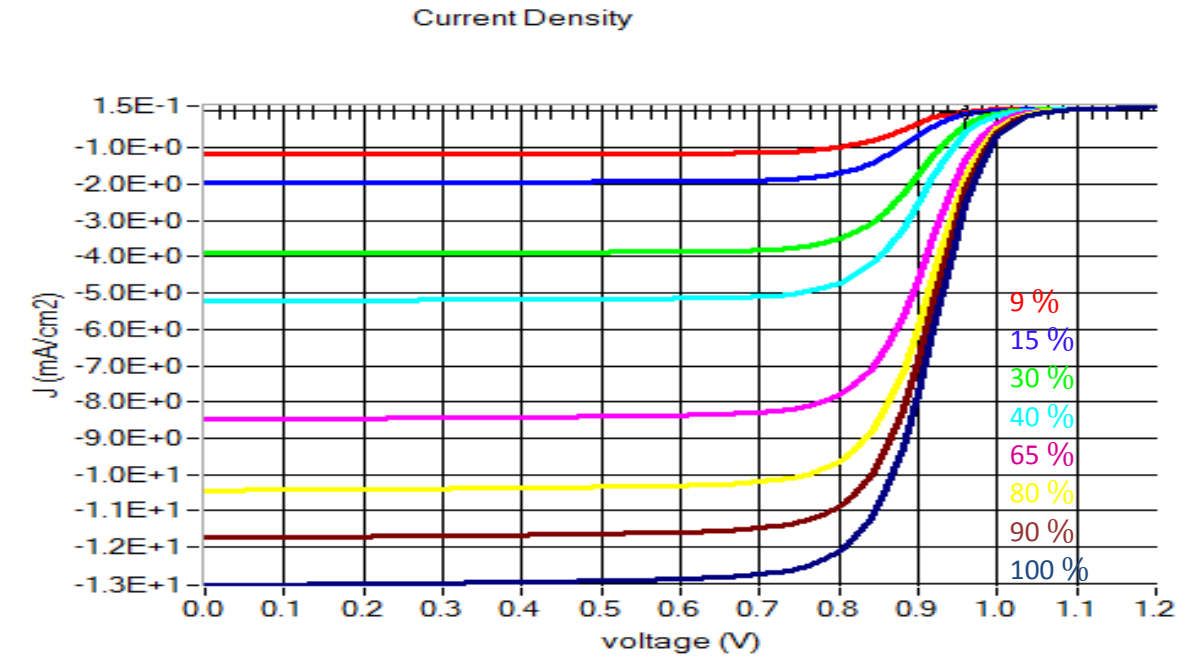


Figure 3.5 Caractéristiques J-V pour la cellule PIN en fonction du niveau d'éclairage

b) TCO : SnO₂

De même que pour le cas des cellules PIN et PN utilisant un TCO de type ZnO, nous présentons les résultats du changement du niveau d'éclairage en considérant le deuxième TCO à savoir le SnO₂.

Niveau d'éclairage	Cellule PN				Cellule PIN			
	η (%)	FF(%)	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{co} (V)	η (%)	FF(%)	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{co} (V)
100%	3.69	12.98	9.489726	2.9942	10.85	77.62	13.064925	1.0695
90%	3.69	13.09	8.540355	2.9670	10.82	77.77	11.757049	1.0448
80%	3.68	13.21	7.590981	2.9372	10.79	77.93	10.449404	1.0596
65%	3.68	13.44	6.166905	2.8843	10.73	78.18	8.488420	1.0507
40%	3.80	15.18	3.793463	2.6388	10.58	78.73	5.221556	1.0294
30%	3.79	15.52	2.844136	2.5723	10.48	79.01	3.915407	1.0167
15%	3.74	16.30	1.420412	2.4256	10.23	79.50	1.956999	0.9862
9%	3.83	17.56	0.8512124	2.3058	10.02	79.69	1.173981	0.9637

Tableau 3.4: Les paramètres de sortie des cellules PN et PIN (η , FF, J_{sc} , V_{co}) en fonction du niveau d'éclairage

Chapitre III : Etude comparative des performances des cellules PN et PIN en couches minces

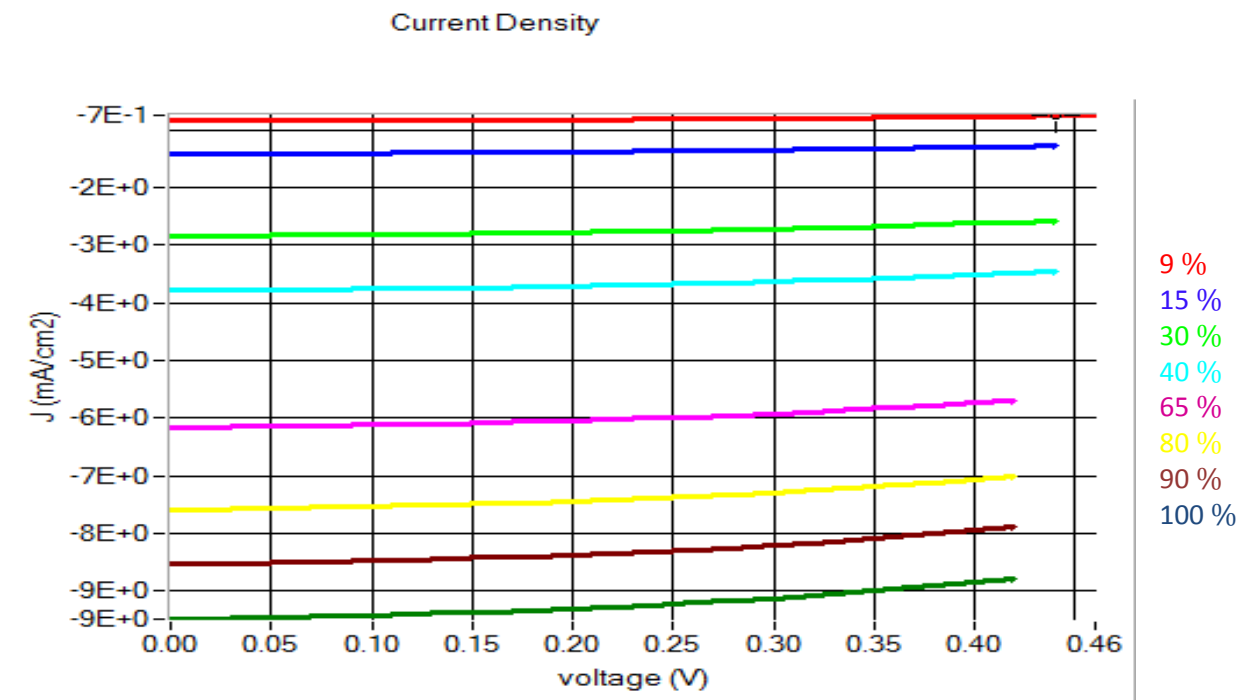


Figure 3.6 Caractéristiques J-V pour la cellule PN en fonction du niveau d'éclairage.

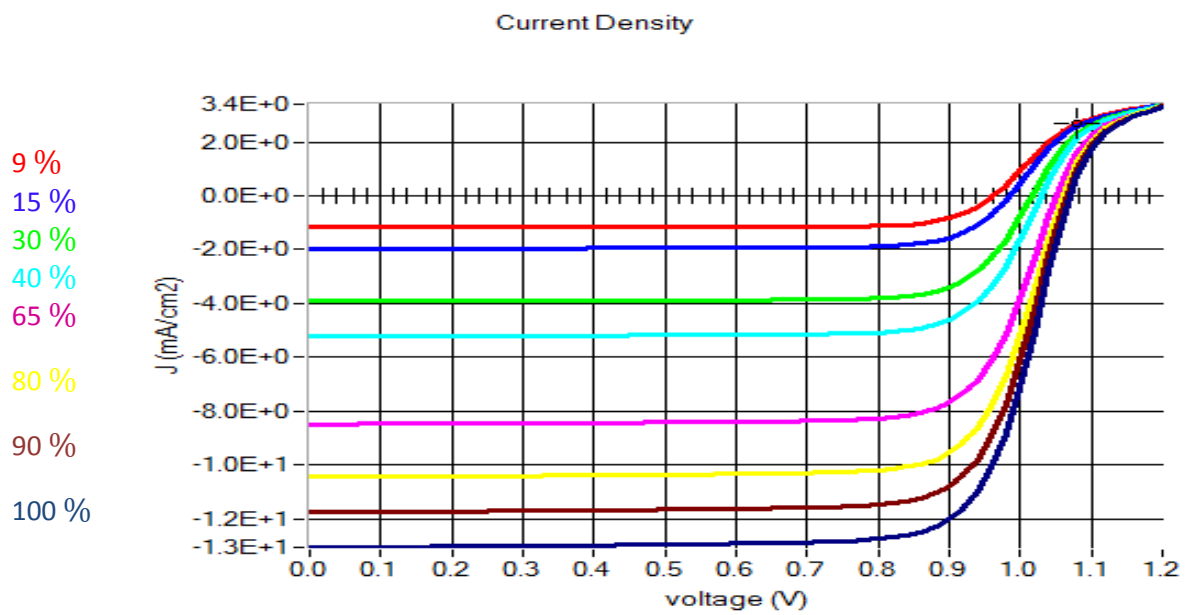


Figure 3.7 Caractéristiques J-V pour la cellule PIN en fonction du niveau d'éclairage

Chapitre III : Etude comparative des performances des cellules PN et PIN en couches minces

En analysant les résultats de l'effet de l'éclairement sur les performances des deux types cellules et plus précisément la cellule PIN, on a constaté que :

- **A fort éclairement** : Quand l'intensité de l'éclairement transmet augmente, l'intensité du courant photovoltaïque croît et les courbes J-V se décalent vers les valeurs croissantes permettant à la cellule de produire une puissance électrique plus importante. L'intensité du courant reste plus importante dans le cas de la cellule PIN utilisant un TCO : SnO_2 . La tension quant à elle croît légèrement par rapport au courant. Cette augmentation du courant est due à la l'augmentation de l'absorption du rayonnement dans le matériau grâce à la forte irradiation induisant ainsi une augmentation du nombre des paires-électrons trous photo-générés dans les deux cas.
- **A faible éclairement** : Quand l'intensité de l'éclairement diminue, l'intensité du courant photovoltaïque décroît, les courbes J-V se décalent vers les valeurs décroissantes, ce qui produit une puissance électrique moins importante, la tension par contre décroît mais elle n'est pas trop dégradée lorsque la lumière baisse.

3.5.2 Effet de la température

La température est un paramètre important dans le comportement des cellules. À plus haute température, des paramètres tels que la concentration des électrons et des trous ainsi que leurs mobilités et le gap d'énergie des matériaux seraient affectés et par la suite une moindre efficacité des cellules. Ci-après nous exposons les résultats enregistrés pour des températures allant de **273.15 K** jusqu'à **323.15 K**.

Chapitre III : Etude comparative des performances des cellules PN et PIN en couches minces

a) TCO: ZnO

Température (K)	Cellule PN				Cellule PIN			
	η (%)	FF(%)	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{co} (V)	η (%)	FF(%)	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{co} (V)
273.15	2.47	8.94	7.435747	2.9403	9.81	68.27	10.308417	1.1012
283.15	–	–	–	–	9.75	69.22	10.308931	1.0790
293.15	5.85	56.02	7.455480	1.1072	9.62	70.14	10.305059	1.0509
303.15	5.81	56.80	7.466650	1.0826	9.46	70.97	10.299441	1.0227
313.15	5.74	57.68	7.467495	1.0519	9.33	71.91	10.295750	0.9954
323.15	5.69	58.52	7.476289	1.0272	9.19	72.81	10.282234	0.9684

Tableau 3.5: Les paramètres de sortie des cellules PN et PIN (η , FF, J_{sc} , V_{co}) en fonction de la température.

Les courbes des caractéristique J_V en fonction de la température sont données dans les figure 3.8 et 3.9

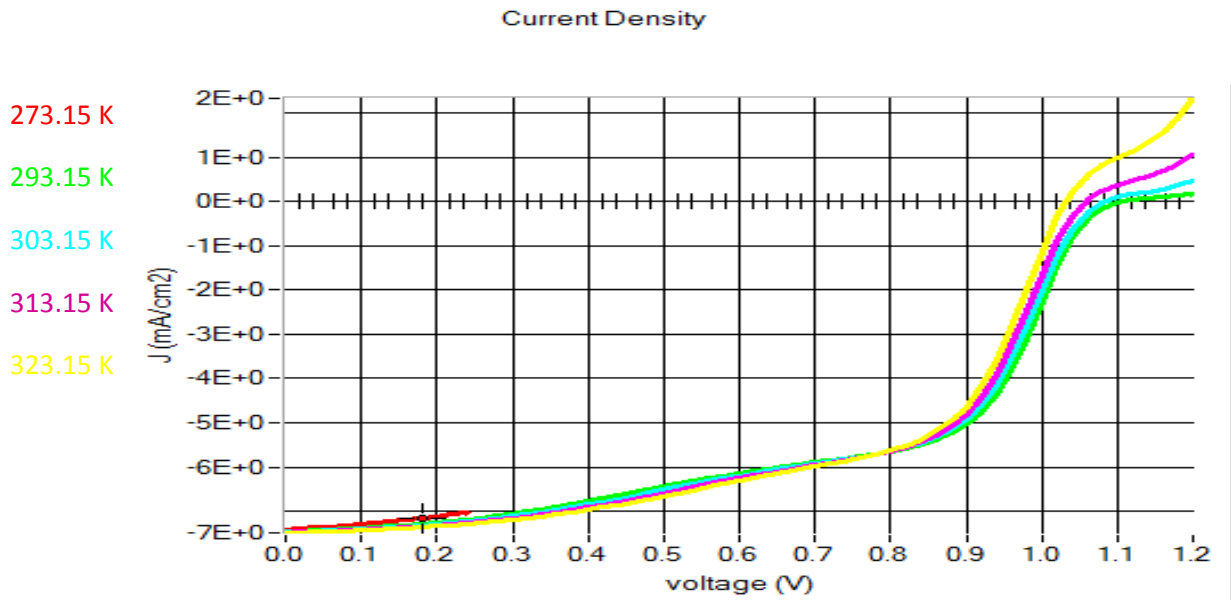


Figure 3.8 Caractéristiques J-V pour la cellule PN en fonction de la température.

Chapitre III : Etude comparative des performances des cellules PN et PIN en couches minces

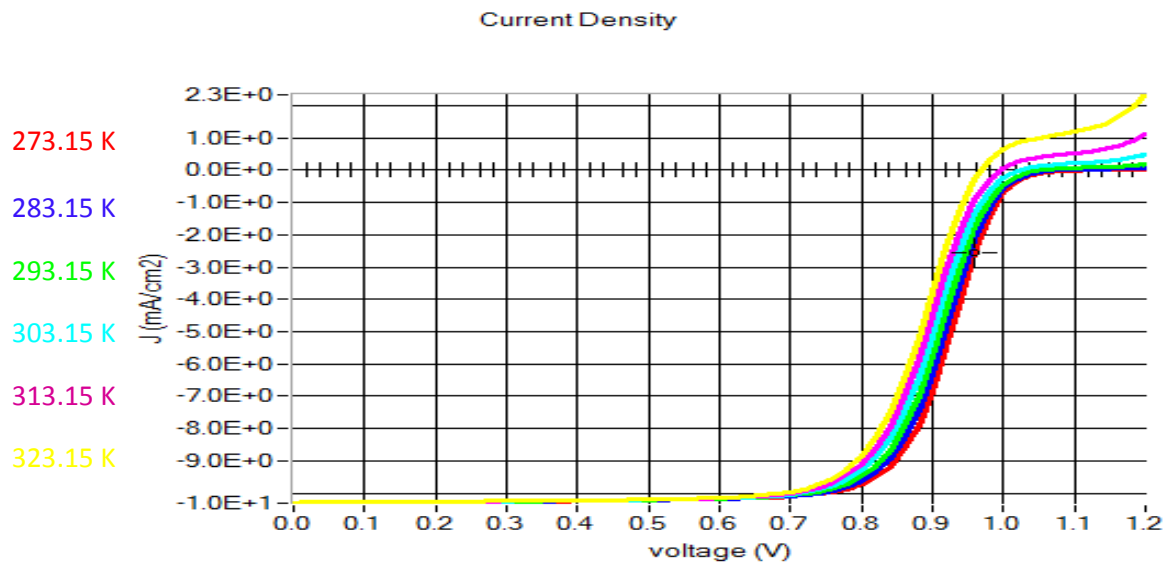


Figure 3.9 Caractéristiques J-V pour la cellule PIN en fonction en fonction de la température

b) TCO : SnO₂

Température (K)	Cellule PN				Cellule PIN			
	η (%)	FF(%)	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{co} (V)	η (%)	FF(%)	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{co} (V)
273.15	6.60	60.32	7.485938	1.1555	11.08	76.59	10.324367	1.1046
283.15	5.82	16.83	7.492859	3.6460	10.92	77.43	10.320797	1.0778
293.15	2.89	8.11	7.487035	3.7532	10.74	78.13	10.317776	1.0507
303.15	1.31	1.48	7.495142	9.3493	10.52	78.60	10.315505	1.0233
313.15	6.20	62.11	7.489261	1.0537	10.26	78.76	10.314085	0.9961
323.15	6.05	62.24	7.481714	1.0265	9.97	78.63	10.313464	0.9689

Tableau 3.6: Les paramètres des cellules PN et PIN (η , FF, J_{sc} , V_{co}) en fonction de la température.

Chapitre III : Etude comparative des performances des cellules PN et PIN en couches minces

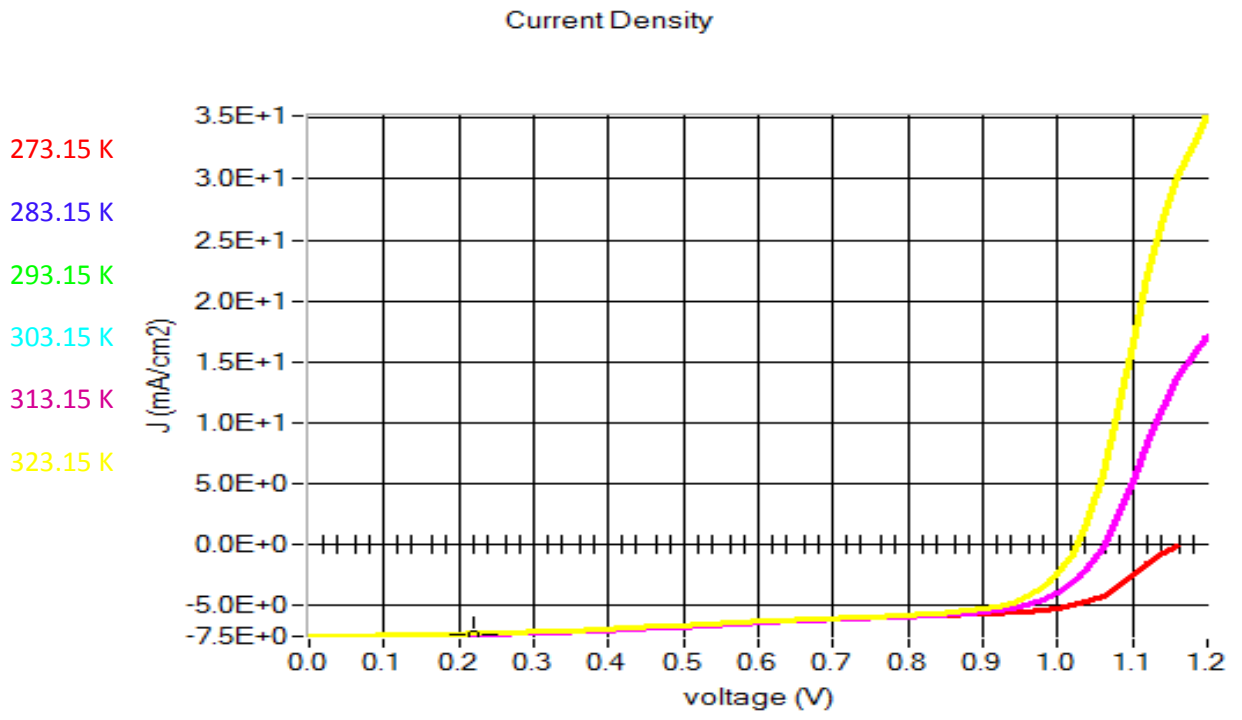


Figure 3.10 Caractéristiques J-V pour la cellule PN en fonction en fonction de la température

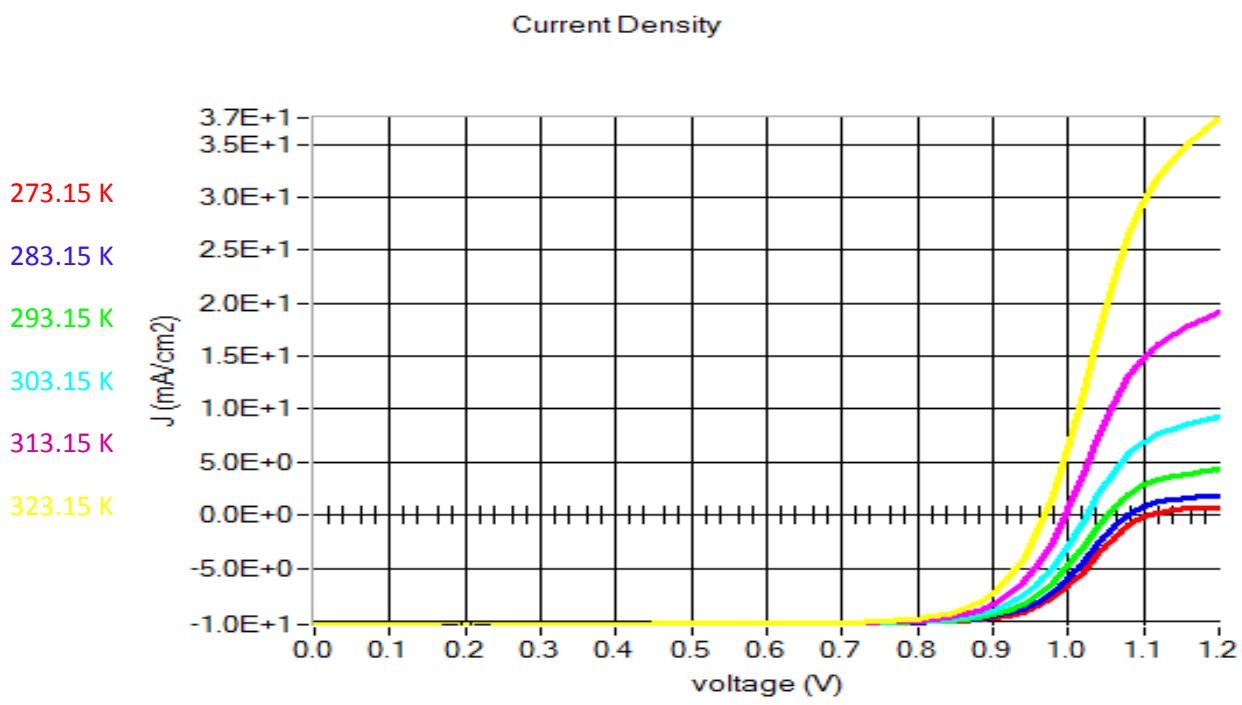


Figure 3.11 Caractéristiques J-V pour la cellule PIN en fonction en fonction de la température

Chapitre III : Etude comparative des performances des cellules PN et PIN en couches minces

- **Pour les températures élevées (supérieures à 25°C)**: L'évolution de la caractéristique J–V en fonction de la température montre que le courant diminue en intensité lorsque la température augmente. D'un autre côté, l'augmentation engendre une décroissance moins prononcée de la tension de circuit-ouvert dont l'effet est négligeable au point de puissance maximal. Par conséquent, la puissance au point de puissance maximal augmente. L'augmentation du courant s'explique par un réarrangement de la structure et une réduction des défauts métastables du silicium amorphe lorsque la température augmente et par conséquent une diminution des centres de recombinaison des porteurs. Le phénomène de l'agitation thermique se favorise sous l'effet de l'augmentation de la température.
- **Pour les basses températures** : L'évolution de la caractéristique J–V e montre que l'intensité du courant décroît légèrement lorsque la température diminue et engendre une légère croissance de la tension de circuit ouvert, ce qui donne une variation des courbes de puissance moins importante.

3.5.3 Effet de l'épaisseur de la couche P

Le choix du matériau pour la couche absorbante et l'optimisation de ses paramètres physiques et géométriques est une étape importante dans la conception de la cellule solaire. Dans ce cadre, l'effet de la variation de l'épaisseur de cette couche sur la caractéristique J-V et les paramètres de sortie de la cellule a été étudié. Les résultats obtenus sont cités ci-après.

a) TCO : ZnO

Epaisseur (nm)	Cellule PN				Cellule PIN			
	η (%)	FF(%)	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{co} (V)	η (%)	FF(%)	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{co} (V)
9	6.27	58.37	7.512134	1.1291	9.71	69.72	10.405617	1.0570
15	6.95	65.49	7.360046	1.1394	9.80	69.57	10.543631	1.0552
30	8.14	73.02	7.693806	1.1453	9.95	68.80	10.848229	1.0533
50	9.37	74.95	8.587660	1.1501	9.86	66.45	11.144844	1.0518
70	10.09	73.85	9.347088	1.1547	9.39	63.18	11.192521	1.0494
100	10.02	66.85	10.189935	1.1616	8.50	61.21	10.489634	1.0454

Tableau 3.7 Les paramètres de sortie des cellules PN et PIN(η , FF, J_{sc} , V_{co}) en fonction de l'épaisseur de la couche p

Chapitre III : Etude comparative des performances des cellules PN et PIN en couches minces

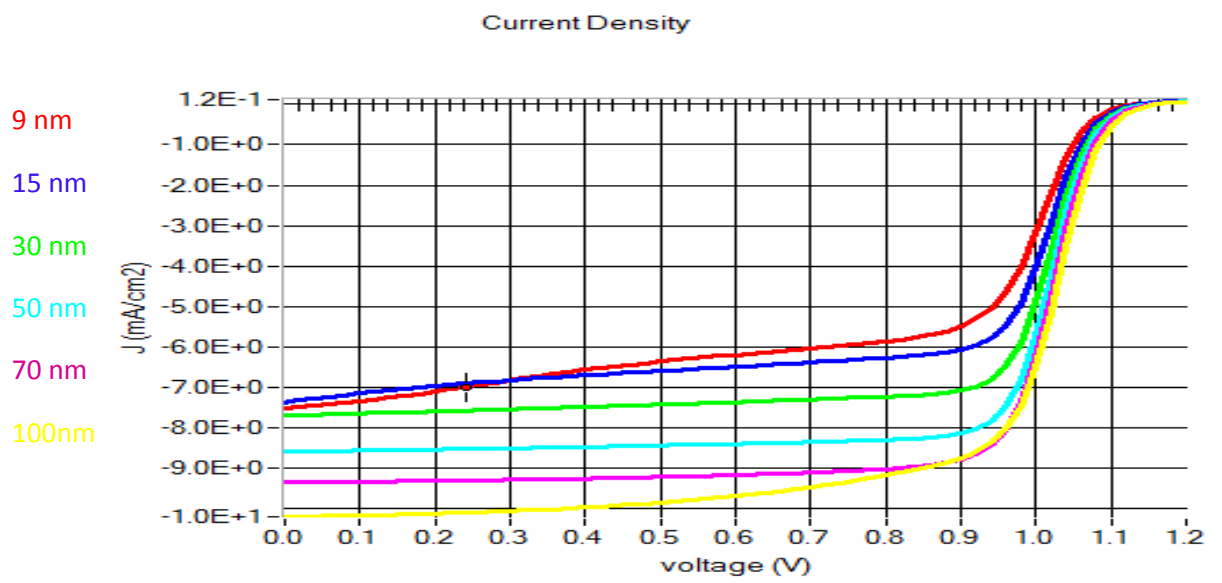


Figure 3.12 Caractéristiques J-V pour la cellule PN pour différentes valeurs de l'épaisseur de la couche P

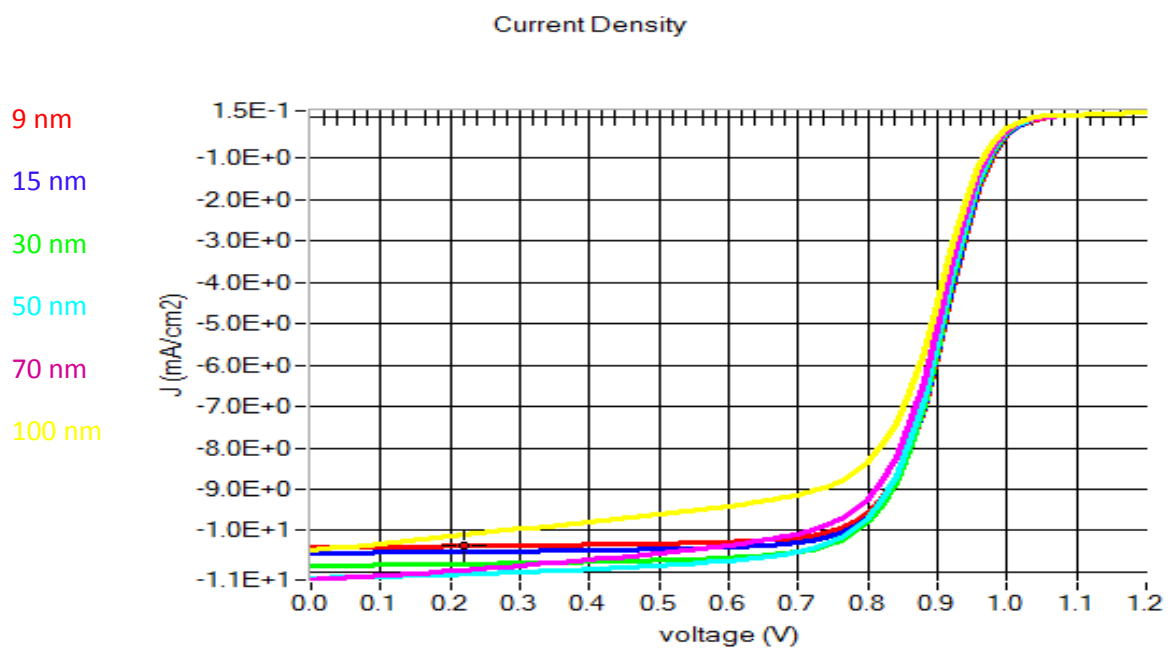


Figure 3.13 Caractéristiques J-V pour la cellule PIN pour différentes valeurs de l'épaisseur de la couche P

Chapitre III : Etude comparative des performances des cellules PN et PIN en couches minces

b) TCO : SnO₂

Epaisseur (nm)	Cellule PN				Cellule PIN			
	η (%)	FF(%)	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{co} (V)	η (%)	FF(%)	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{co} (V)
9	1.85	5.30	7.612341	3.6196	10.86	77.87	10.418746	1.0577
15	7.65	70.33	7.539287	1.1339	10.97	77.72	10.556503	1.0562
30	-	-	-	-	11.15	76.88	10.863267	1.0544
50	10.27	82.39	8.616802	1.1434	11.05	74.21	11.175014	1.0529
70	11.08	81.37	9.367729	1.1481	10.53	70.24	11.275867	1.0505
100	11.04	73.81	10.217295	1.1543	9.52	67.44	10.662893	1.0461

Tableau 3.8: Les paramètres de sortie des cellules PN et PIN (η , FF, J_{sc} , V_{co}) en fonction de l'épaisseur de la couche P

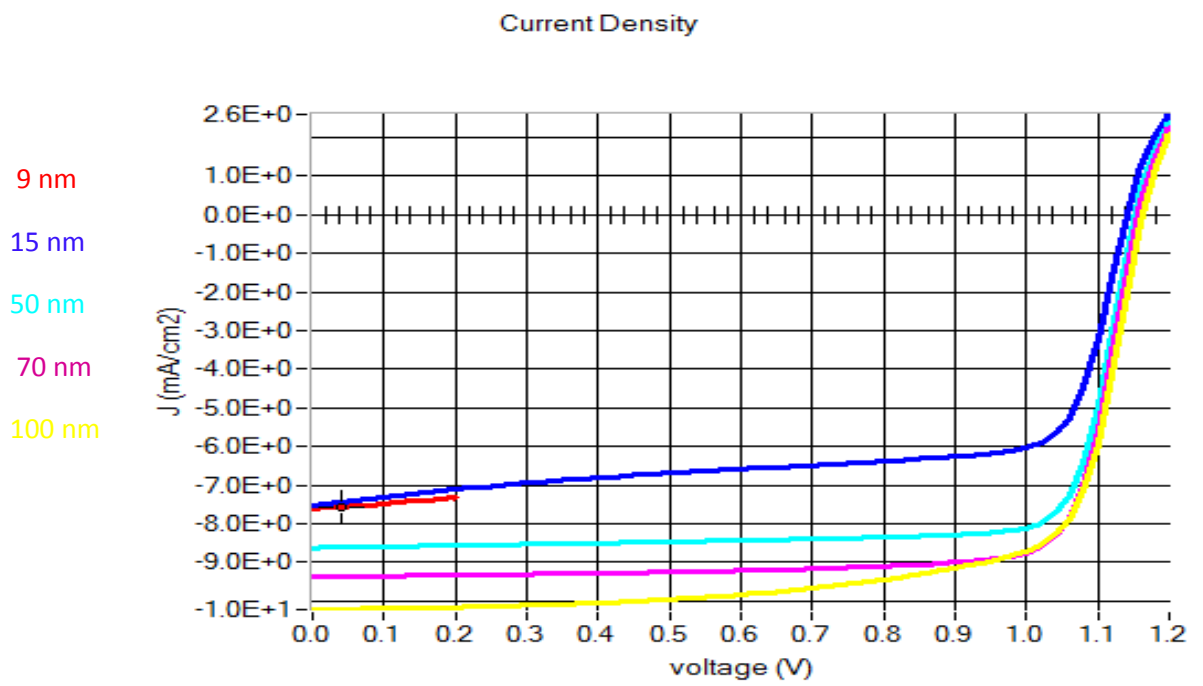


Figure 3.14 Caractéristiques J-V pour la cellule PN pour différentes valeurs de l'épaisseur de la couche P

Chapitre III : Etude comparative des performances des cellules PN et PIN en couches minces

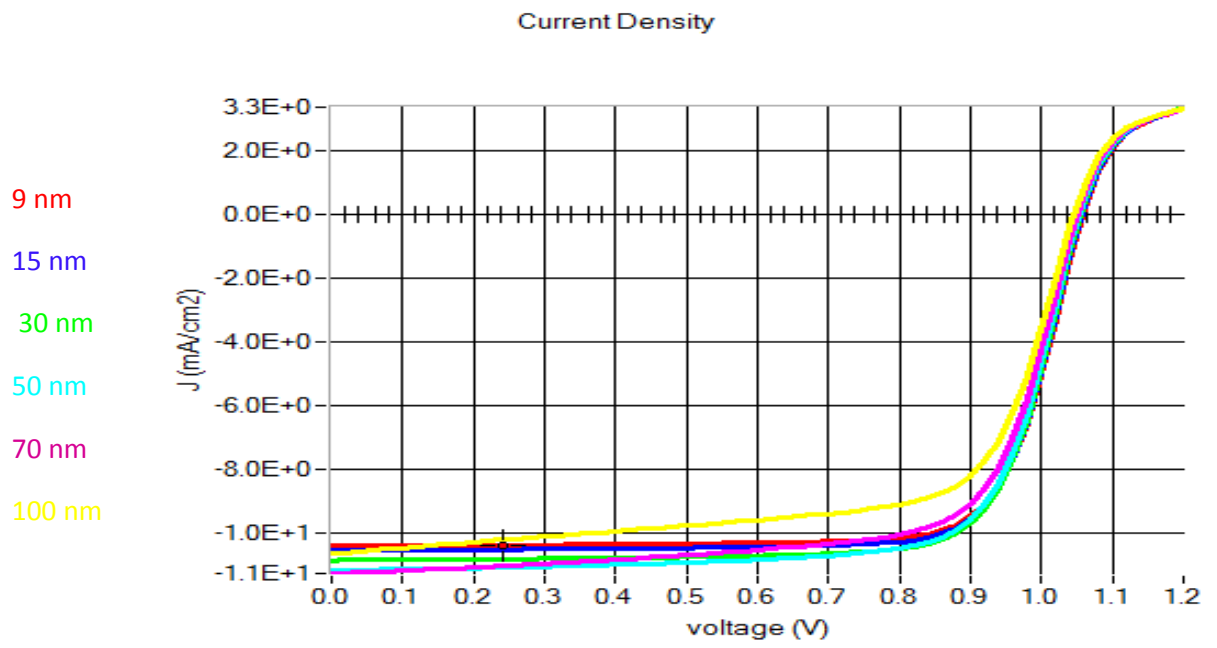


Figure 3.15 Caractéristiques J-V pour la cellule PIN pour différentes valeurs de l'épaisseur de la couche P

D'après les courbes obtenues nous remarquons :

- **La cellule simple PN** : Pour 9 nm d'épaisseur, le taux de recombinaisons était très faible donc une densité de courant de court circuit maximale. Le rendement optimal est obtenu pour 70 nm d'épaisseur.
- **La cellule de type PIN** : Dans ce cas, le courant de court circuit est maximal pour 100 nm d'épaisseur, donc un taux de recombinaisons faible. Le meilleur rendement maximal est obtenu pour **30 nm** d'épaisseur. Ces résultats s'expliquent par le fait que la longueur de diffusion des porteurs photogénérés devient faible par rapport à l'épaisseur de la couche P (l'émetteur), et par conséquent, ils se recombinent avant d'être collectés. Par ailleurs la grande densité de défauts qui existe dans le silicium amorphe hydrogéné contribue grandement à ce fort taux de recombinaison lorsque l'épaisseur de la couche P-a-Si:H augmente.

Chapitre III : Etude comparative des performances des cellules PN et PIN en couches minces

3.5.4 Effet de l'épaisseur intrinsèque (PIN)

Dans les cellules solaires de type PIN, la couche intrinsèque joue un rôle primordial dans la passivation et l'élargissement de la zone de charge d'espace contenant les paire électron-trous phot-générées (voir chapitre 02). Donc l'optimisation de son épaisseur est sollicité afin d'optimiser les paramètres de sortie de la cellule. Dans ce qui suit, nous exposons les résultats enregistrés pour différentes valeur de l'épaisseur de cette couche.

a) TCO: ZnO

Cellule PIN				
Epaisseur (nm)	η (%)	FF (%)	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{co} (V)
9	7.03	67.67	7.432761	1.1041
15	8.42	70.12	8.731734	1.0863
30	9.64	69.79	10.304741	1.0587
50	10.39	67.06	12.008081	1.0195
70	10.44	63.81	12.912093	1.0006
100	10.24	60.93	13.414557	0.9901

Tableau 3.9: Les paramètres de sortie de la cellule PIN (η , FF , J_{sc} , V_{co}) en fonction de l'épaisseur de la couche intrinsèque.

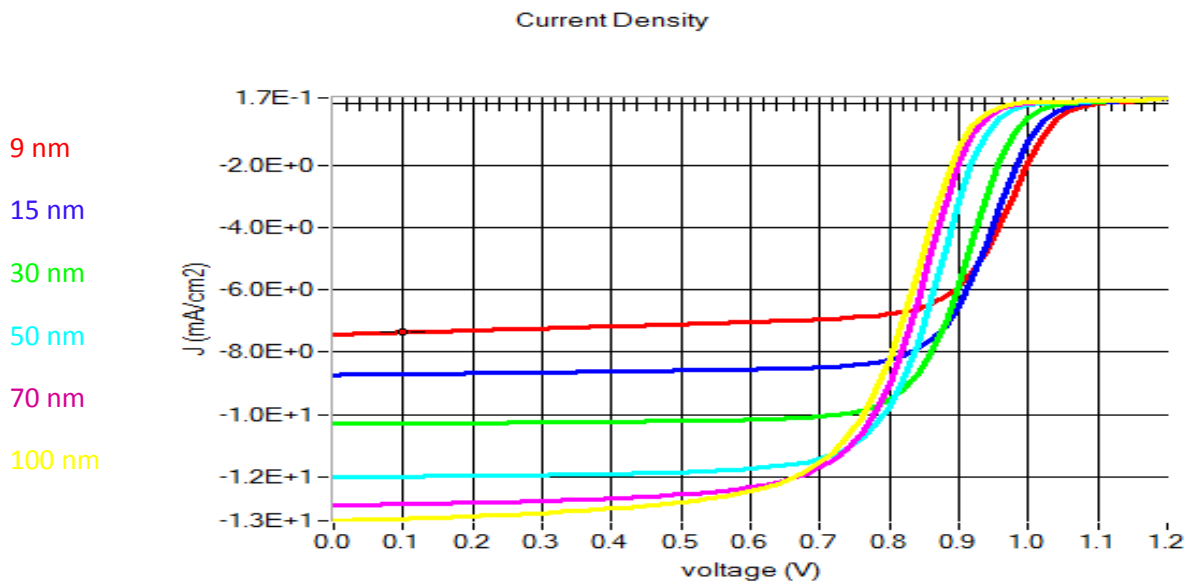


Figure 3.16 Caractéristiques J-V pour la cellule PIN pour différentes valeurs de l'épaisseur de la couche intrinsèque.

Chapitre III : Etude comparative des performances des cellules PN et PIN en couches minces

b) TCO : SnO₂

Cellule PIN				
Epaisseur (nm)	η (%)	FF(%)	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{co} (V)
9	7.80	74.31	7.502373	1.1049
15	9.37	77.76	8.758667	1.0871
30	10.78	77.94	10.318654	1.0591
50	11.71	75.49	12.021269	1.0196
70	11.82	72.11	12.936311	1.0006
100	11.64	68.91	13.462552	0.9911

Tableau 3.10: Les paramètres de sortie de la cellule (η , FF, J_{sc} , V_{co}) en fonction de l'épaisseur de la couche intrinsèque.

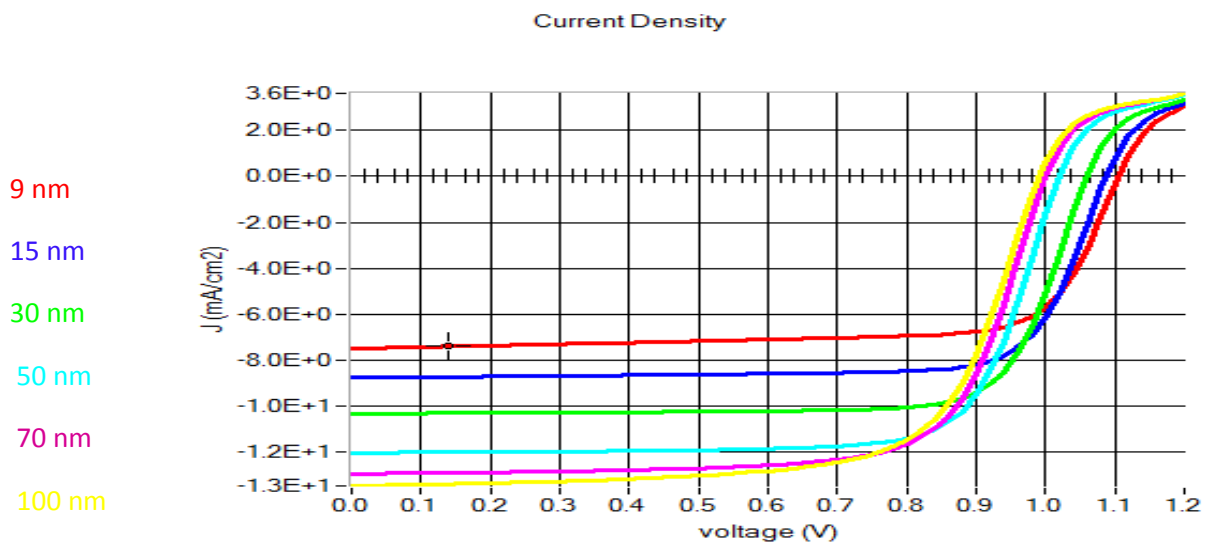


Figure 3.17 Caractéristiques J-V pour la cellule PIN pour différentes valeurs de l'épaisseur de la couche intrinsèque.

Les résultats de simulation sont présentés dans les figures (3.15) et (3.16). Le courant de court-circuit augmente avec l'épaisseur de la couche intrinsèque jusqu'à l'épaisseur de 100 nm. La tension en circuit ouvert et le facteur de forme diminuent progressivement avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche intrinsèque. Le rendement présente une valeur maximale de l'ordre de 10.44 dans le cas de (TCO=ZnO) et 11.82 dans le cas de (TCO=SnO₂) correspondant à une épaisseur de la couche intrinsèque de l'ordre de 70 nm. L'élargissement de la couche intrinsèque conduit à l'élargissement de la région de la génération de photo-porteuses et par conséquent le nombre de photo-porteurs générés sous éclairage augmente et la densité du courant de court-circuit augmente aussi.

Chapitre III : Etude comparative des performances des cellules PN et PIN en couches minces

3.5.5 Effet de dopage

3.5.5.1 Dopage de la couche P

a) TCO : ZnO

Dopage (cm^{-3})	Cellule PN				Cellule PIN			
	η (%)	FF (%)	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{co} (V)	η (%)	FF (%)	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{co} (V)
$1 * 10^{17}$	5.87	55.80	7.411540	1.1147	9.64	69.79	10.304741	1.0587
$2 * 10^{17}$	5.90	55.75	7.463183	1.1209	9.66	69.81	10.304849	1.0610
$3 * 10^{17}$	5.93	55.82	7.469867	1.1229	9.68	69.84	10.306110	1.0620
$1 * 10^{19}$	0.57	-	7.534166	-	9.74	70.26	10.255580	1.0681
$2 * 10^{19}$	1.14	-	7.523103	-	9.75	70.35	10.243513	1.0687
$3 * 10^{19}$	1.51	-	7.511780	-	9.75	70.38	10.239106	1.0689

Tableau 3.11: Les paramètres de sortie des cellules (η , FF , J_{sc} , V_{co}) en fonction du dopage de la couche p

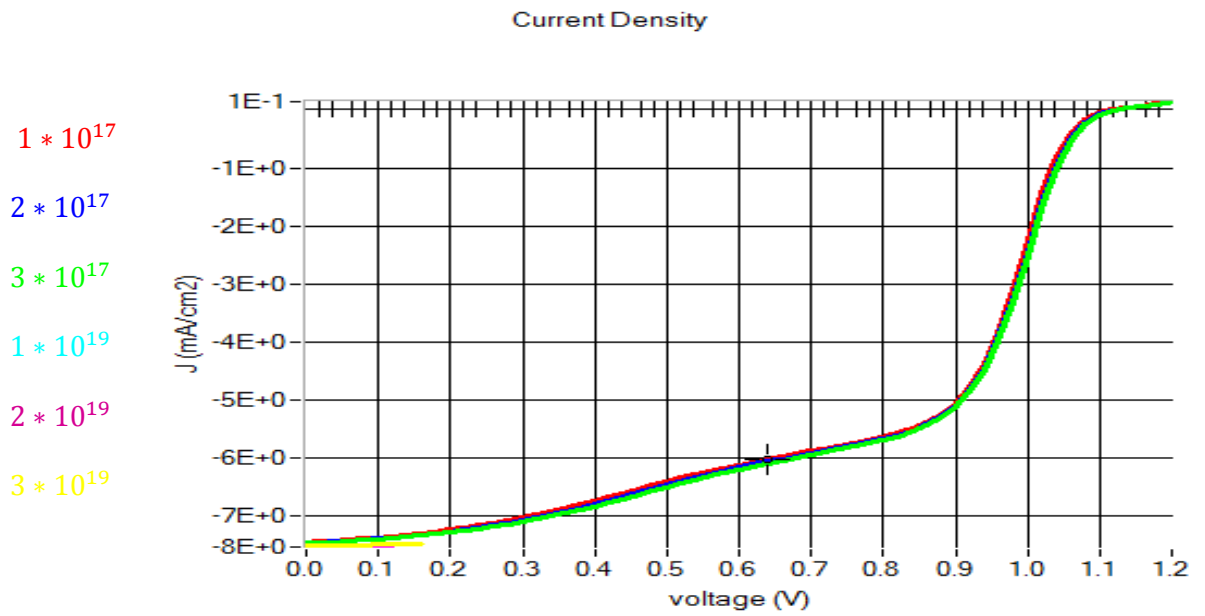


Figure 3.18 Caractéristiques J-V pour la cellule PN pour différentes valeurs du dopage de la couche P.

Chapitre III : Etude comparative des performances des cellules PN et PIN en couches minces

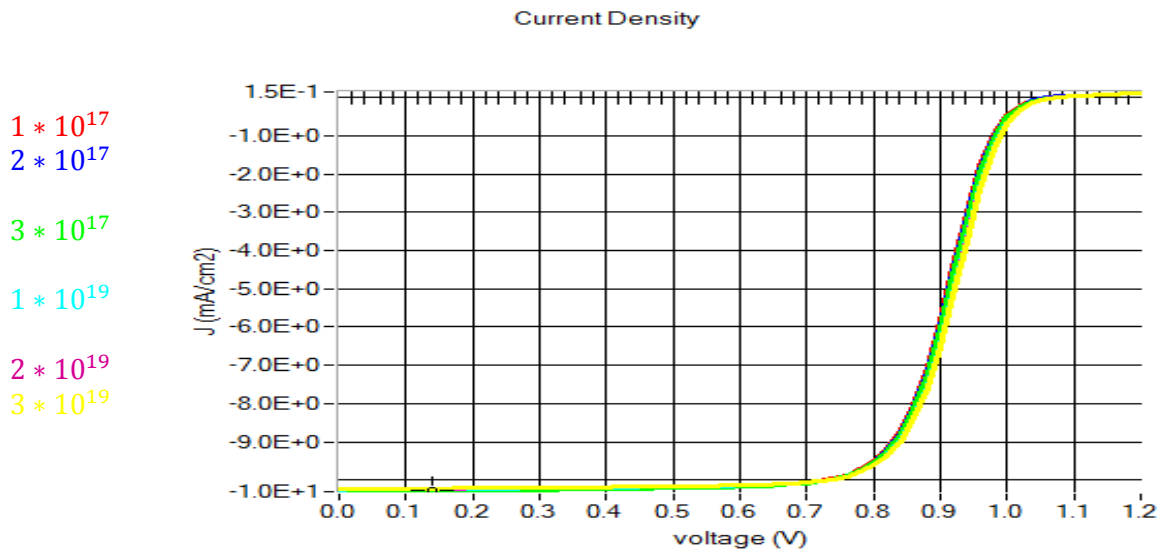


Figure 3.19 Caractéristiques J-V pour la cellule PIN pour différentes valeurs du dopage de la couche P.

b) TCO : SnO₂

Dopage (cm ⁻³)	Cellule PN				Cellule PIN			
	η (%)	FF(%)	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{co} (V)	η (%)	FF(%)	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{co} (V)
1 * 10 ¹⁷	3.68	13.23	7.496039	2.9340	10.78	77.94	10.318654	1.0591
2 * 10 ¹⁷	3.86	13.78	7.503718	2.9463	10.81	77.97	10.319736	1.0611
3 * 10 ¹⁷	4.02	14.57	7.508127	2.9470	10.82	77.99	10.320021	1.0622
1 * 10 ¹⁹	5.91	20.98	7.548182	2.9488	10.89	78.34	10.269440	1.0690
2 * 10 ¹⁹	-	-	-	-	10.89	78.43	10.256458	1.0697
3 * 10 ¹⁹	-	-	-	-	10.89	78.47	10.254658	1.0700

Tableau 3.12: Les paramètres de sortie des cellules (η , FF, J_{sc} , V_{co}) en fonction du dopage de la couche p

Chapitre III : Etude comparative des performances des cellules PN et PIN en couches minces

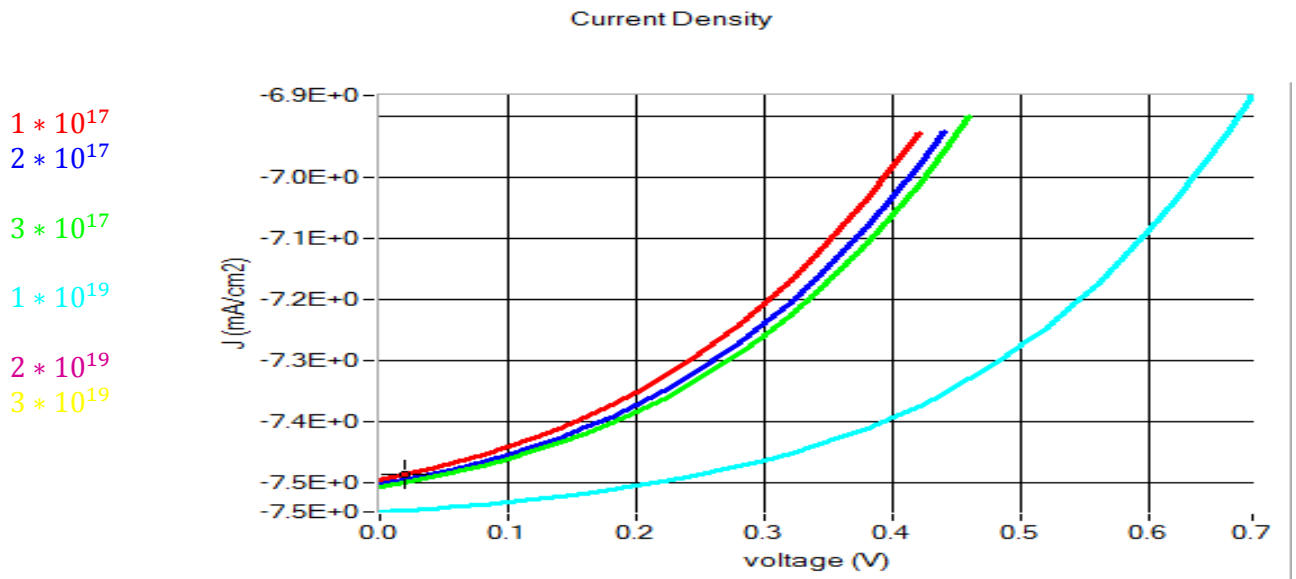


Figure 3.20 Caractéristiques J-V pour la cellule PN pour différentes valeurs du dopage de la couche P.

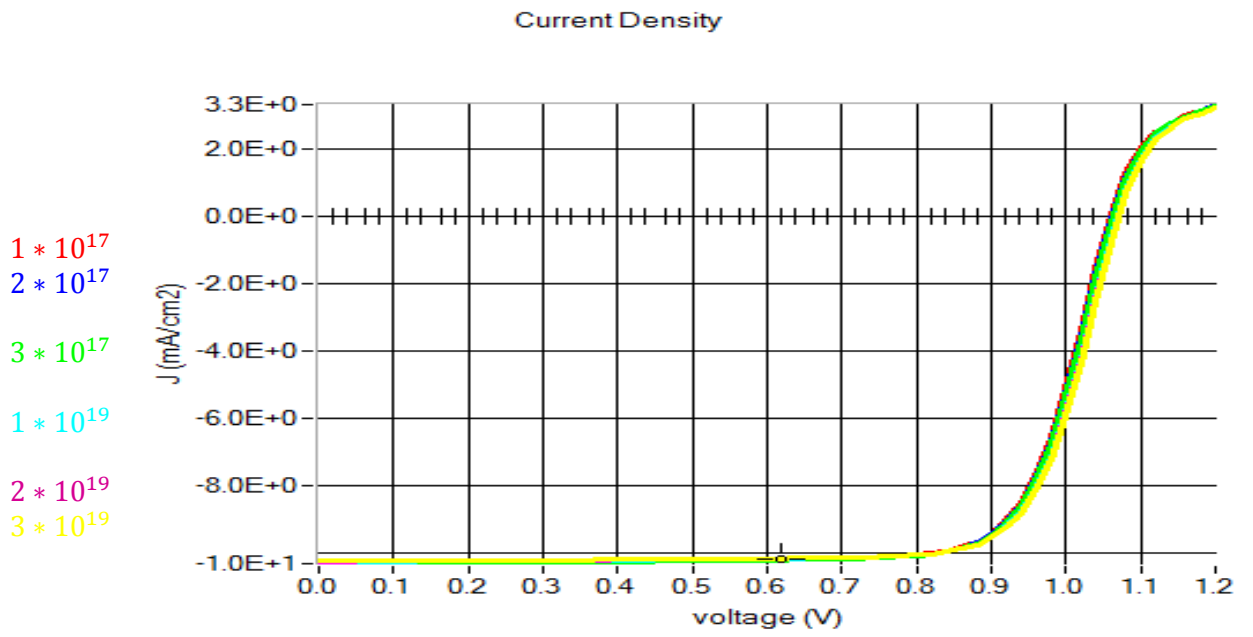


Figure 3.21 Caractéristiques J-V pour la cellule PIN pour différentes valeurs du dopage de la couche P.

Nous remarquons que les performances V_{oc} , FF et η augmentent quand la concentration des dopants Na augmente. Pour le J_{sc} il reste presque constant. D'après ces résultats on a obtenu pour **une cellule de simple PN** ($3 * 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) comme une valeur optimale du dopage. Les figures (3.19 et 3.21), montrent l'effet de la concentration du dopage de la couche a-Si de la **jonction PIN** sur les performances de la cellule étudié.

Chapitre III : Etude comparative des performances des cellules PN et PIN en couches minces

En analysant ces figures, la concentration du dopage influence principalement sur V_{oc} , FF et η , d'autre part J_{sc} reste faiblement influencé. De même, dans le cas de la cellule PIN les performances optimales sont enregistrés pour une concentration du dopage de : $3 * 10^{19} cm^{-3}$.

3.5.5.2 Effet de dopage de la couche TCO a) TCO : ZnO

Dopage (cm^{-3})	Cellule PN				Cellule PIN			
	η (%)	FF (%)	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{co} (V)	η (%)	FF (%)	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{co} (V)
$1 * 10^{17}$	5.73	54.63	7.431940	1.1148	9.39	67.99	10.301973	1.0589
$2 * 10^{17}$	5.73	54.67	7.432805	1.1148	9.40	68.05	10.302066	1.0589
$3 * 10^{17}$	5.74	54.70	7.433508	1.1148	9.40	68.10	10.302145	1.0589
$1 * 10^{19}$	5.87	55.80	7.451540	1.1147	9.64	69.79	10.304741	1.0587
$2 * 10^{19}$	5.92	56.30	7.457951	1.1147	9.74	70.53	10.305882	1.0587
$3 * 10^{19}$	5.96	56.64	7.451968	1.1146	9.81	71.04	10.306658	1.0587

Tableau 3.13: Les paramètres de sortie des deux cellules (η , FF , J_{sc} , V_{co}) en fonction de dopage de la couche ZnO

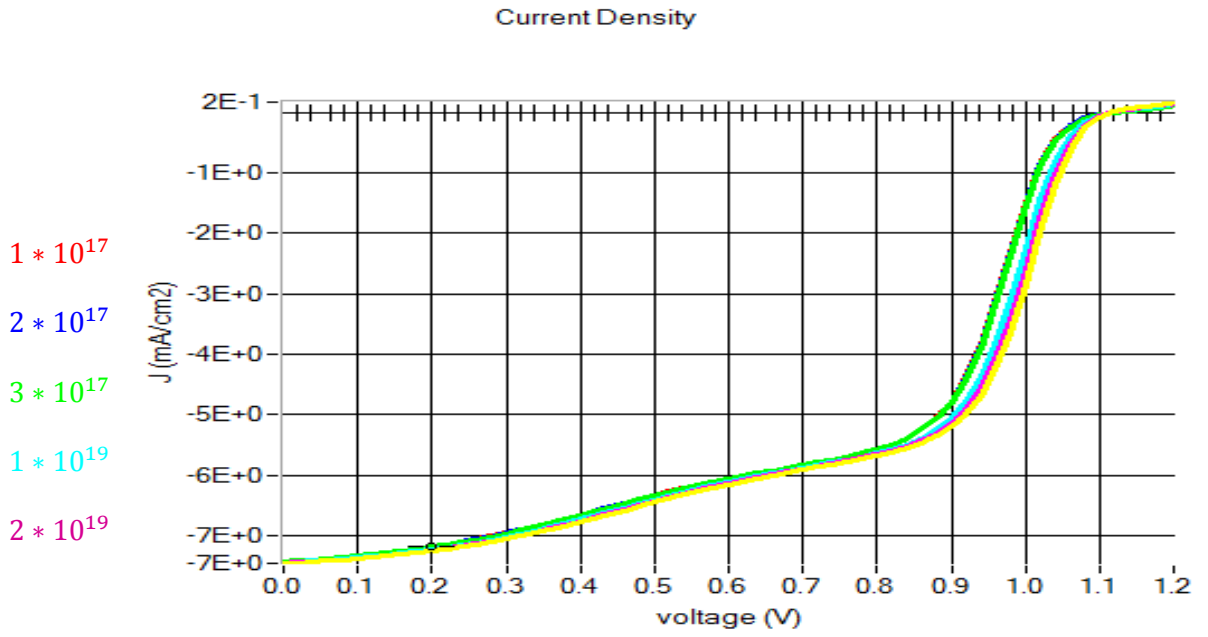


Figure 3.22 Caractéristiques J-V pour la cellule PN pour différentes valeurs du dopage de la couche ZnO.

Chapitre III : Etude comparative des performances des cellules PN et PIN en couches minces

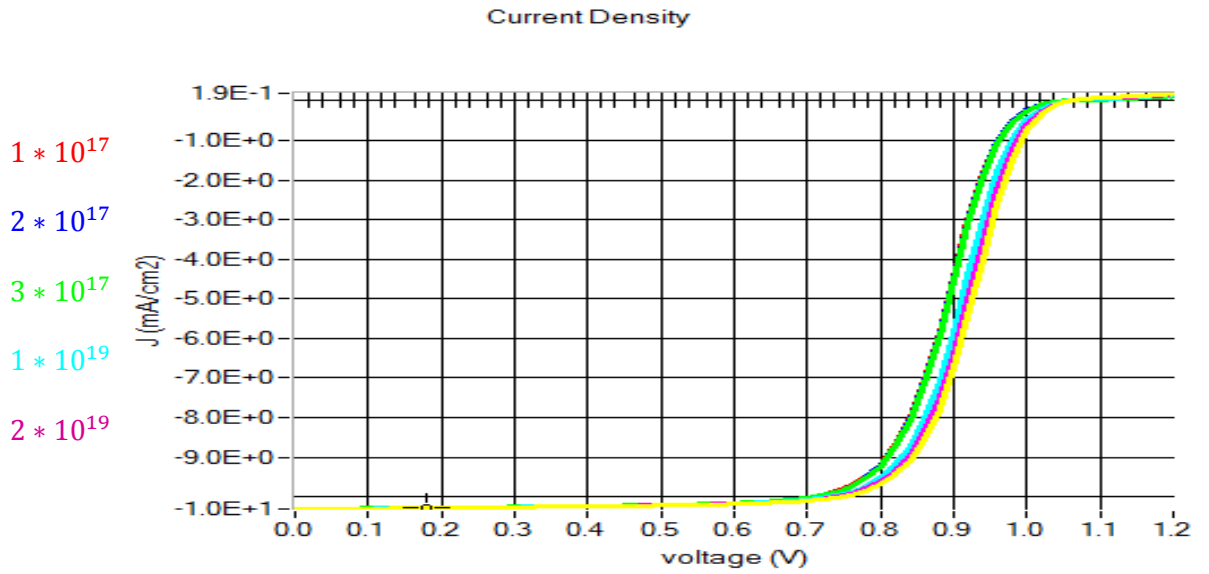


Figure 3.23 Caractéristiques J-V pour la cellule PIN pour différentes valeurs du dopage de la couche ZnO.

Les figures (3.22) et (3.23) montrent la variation du rendement des deux cellules en fonction du dopage de la couche ZnO. Nous remarquons que le rendement dépend fortement de dopage N_d dans la couche ZnO. Lorsque la concentration des dopants augmente, le rendement de la cellule augmente aussi dans les deux cas des cellules (simple PN et PIN)

b) TCO : SnO_2

Dopage (cm^{-3})	Cellule PN				Cellule PIN			
	η (%)	FF(%)	J_{sc} (mA / cm^2)	V_{co} (V)	η (%)	FF(%)	J_{sc} (mA / cm^2)	V_{co} (V)
$1 * 10^{17}$	2.73	6.84	7.486632	4.2039	10.57	76.42	10.315407	1.0591
$2 * 10^{17}$	2.89	7.83	7.487120	3.8953	10.58	76.48	10.315509	1.0591
$3 * 10^{17}$	3.05	8.89	7.487510	3.6233	10.58	76.52	10.315595	1.0591
$1 * 10^{19}$	3.68	13.23	7.496039	2.9340	10.78	77.94	10.318654	1.0591
$2 * 10^{19}$	-	-	-	-	10.86	78.51	10.320183	1.0591
$3 * 10^{19}$	-	-	-	-	10.91	78.87	10.321302	1.0591

Tableau 3.14: Les paramètres de sortie des deux cellules (η , FF, J_{sc} , V_{co}) en fonction du dopage de la couche SnO_2

Chapitre III : Etude comparative des performances des cellules PN et PIN en couches minces

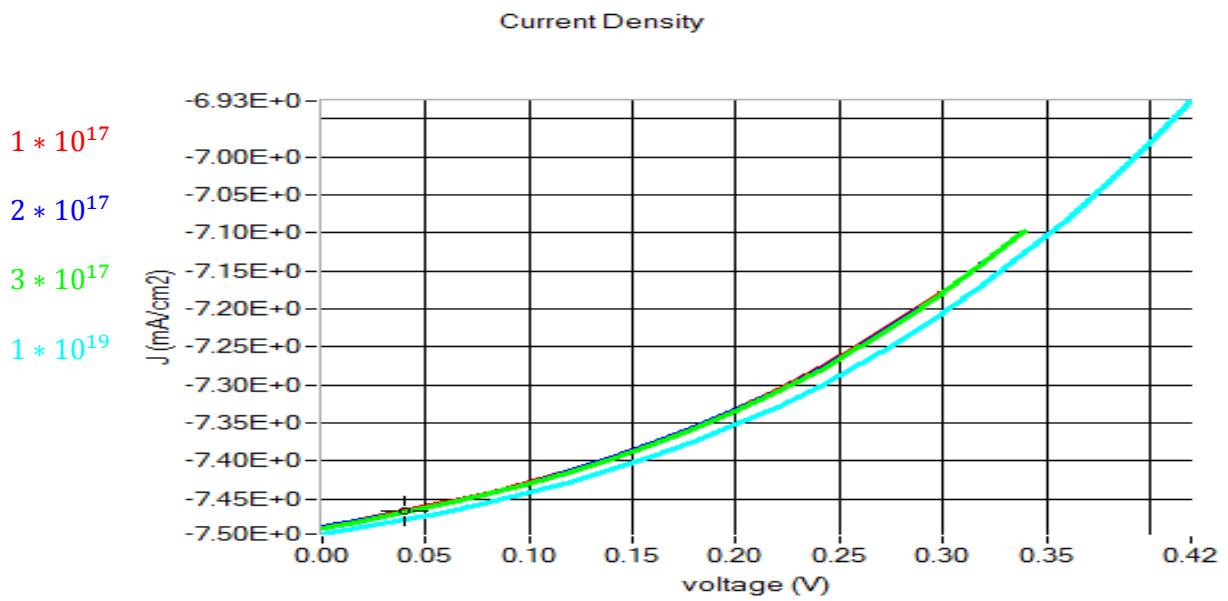


Figure 3.24 Caractéristiques J-V pour la cellule PN pour différentes valeurs du dopage de la couche SnO₂.

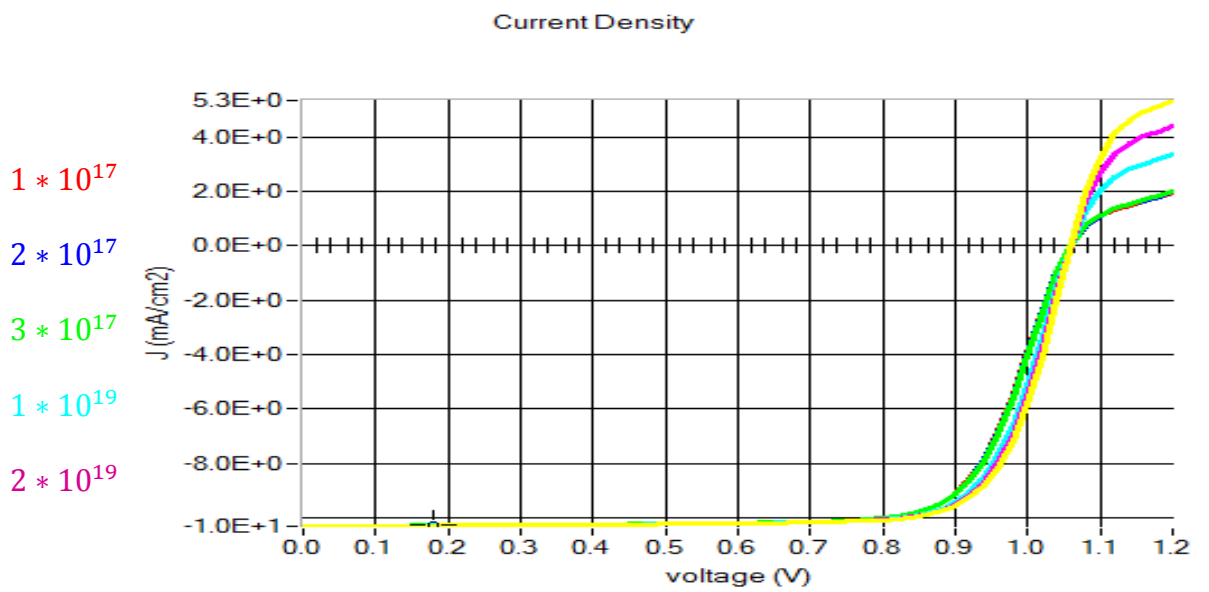


Figure 3.25 Caractéristiques J-V pour la cellule PIN pour différentes valeurs du dopage de la couche SnO₂.

Chapitre III : Etude comparative des performances des cellules PN et PIN en couches minces

Les résultats obtenus montrent une décroissance des paramètres électriques en fonction de décroissance dopage de la couche SnO₂. Dans le cas d'une cellule (simple PN, PIN). D'après les résultats enregistrés on a constaté que les paramètres de sortie sont plus affectés par la variation du dopage de la couche P dans une cellule PIN (TCO= SnO₂) et celui de la couche SnO₂.

3.5.6 Effet de l'épaisseur de la couche TCO

a) TCO : ZnO

Epaisseur (nm)	Cellule PN				Cellule PIN			
	η (%)	FF(%)	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{co} (V)	η (%)	FF(%)	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{co} (V)
20	5.87	55.80	7.451540	1.1147	9.64	69.79	10.304741	1.0587
40	5.87	55.79	7.451851	1.1149	9.64	69.78	10.304740	1.0587
60	5.87	55.78	7.451923	1.1149	9.64	69.78	10.304740	1.0587
100	-	-	-	-	9.64	69.78	10.304739	1.0587
120	-	-	-	-	9.64	69.78	10.304739	1.0587
150	-	-	-	-	9.64	69.78	10.304739	1.0587

Tableau 3.15: Les paramètres de sortie des cellules (η , FF, J_{sc} , V_{co}) en fonction de l'épaisseur de la couche ZnO

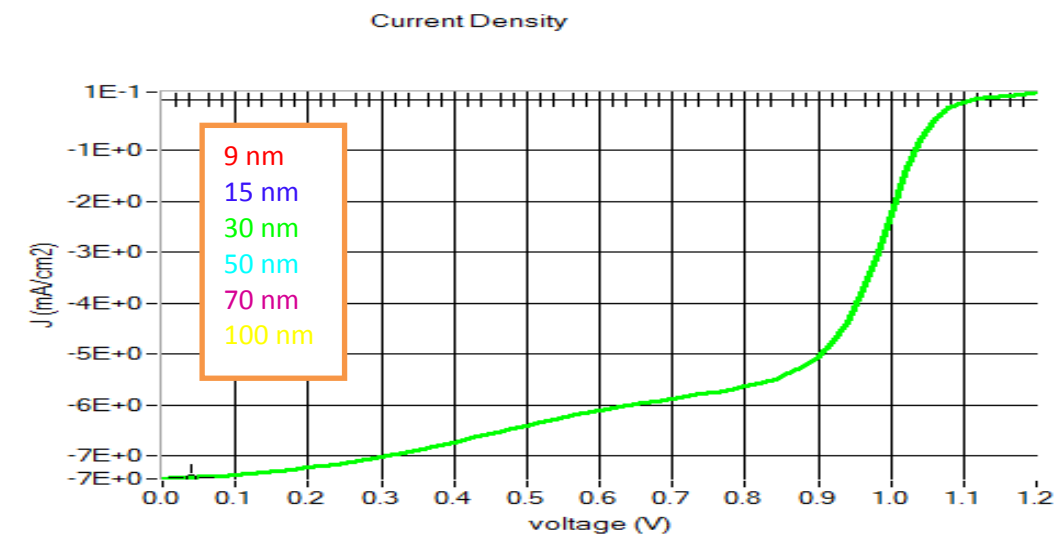


Figure 3.26 Caractéristiques J-V pour la cellule PN pour différentes valeurs de l'épaisseur de la couche ZnO

Chapitre III : Etude comparative des performances des cellules PN et PIN en couches minces

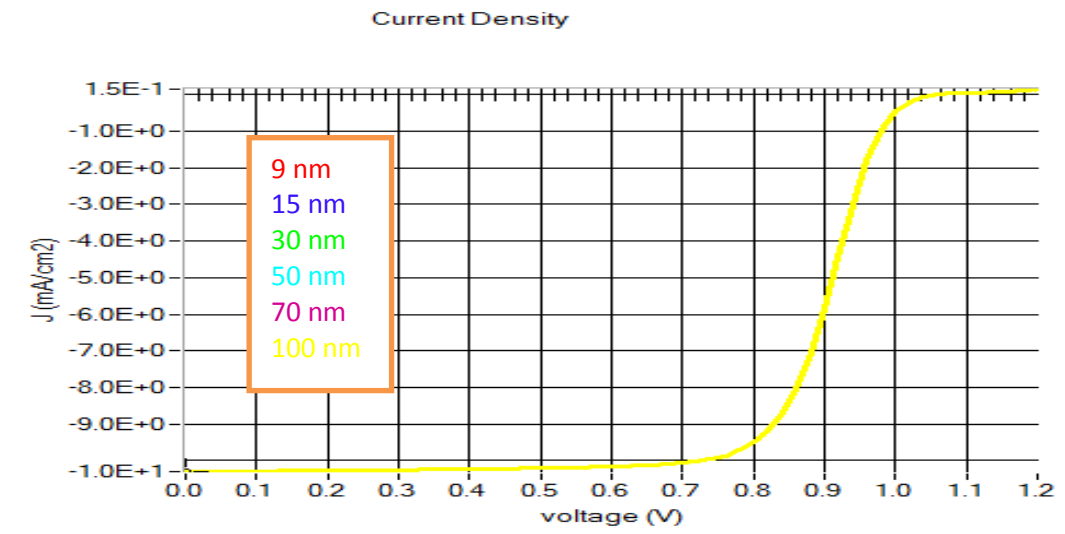


Figure 3.27 Caractéristiques J-V pour la cellule PIN pour différentes valeurs de l'épaisseur de la couche ZnO

Dans ce cas, l'effet de la variation de l'épaisseur des deux couches TCO étudiées c'était limité en comparaison avec celui du dopage. La caractéristique J-V) des cellules, était faiblement affecté par cette variation.

b) TCO : SnO₂

Epaisseur (nm)	Cellule PN				Cellule PIN			
	η (%)	FF(%)	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{co} (V)	η (%)	FF(%)	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{co} (V)
20	3.68	13.23	7.496039	2.9340	10.78	77.94	10.318654	1.0591
40	-	-	-	-	10.78	77.94	10.318653	1.0591
60	-	-	-	-	10.78	77.94	10.318653	1.0591
100	-	-	-	-	10.78	77.94	10.318652	1.0591
120	-	-	-	-	10.78	77.94	10.318652	1.0591
150	-	-	-	-	10.78	77.94	10.318652	1.0591

Tableau 3.16: Les paramètres de sortie des cellules (η , FF, J_{sc} , V_{co}) en fonction de l'épaisseur de la couche SnO₂

Chapitre III : Etude comparative des performances des cellules PN et PIN en couches minces

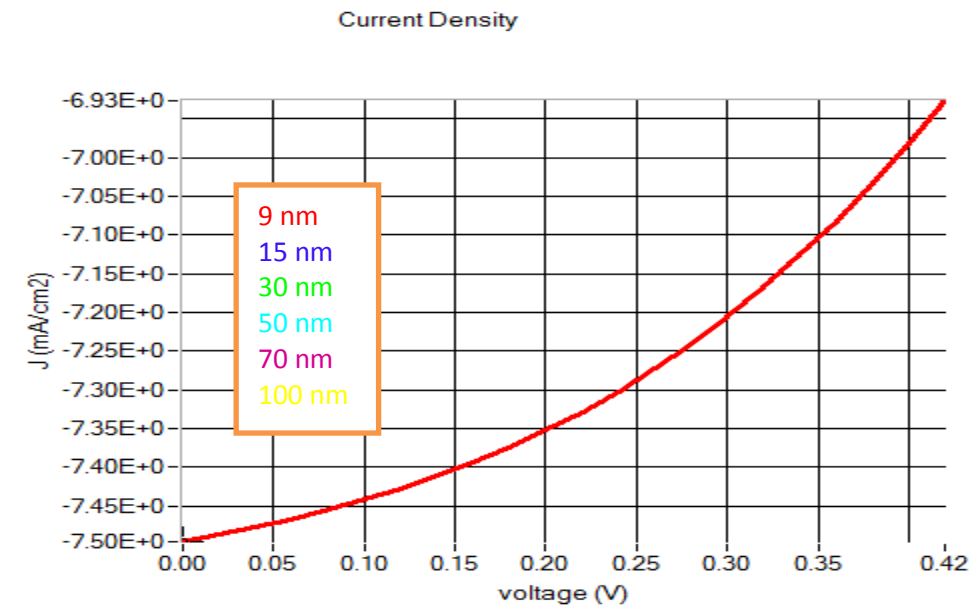


Figure 3.28 Caractéristiques J-V pour la cellule PN pour différentes valeurs de l'épaisseur de la couche SnO_2

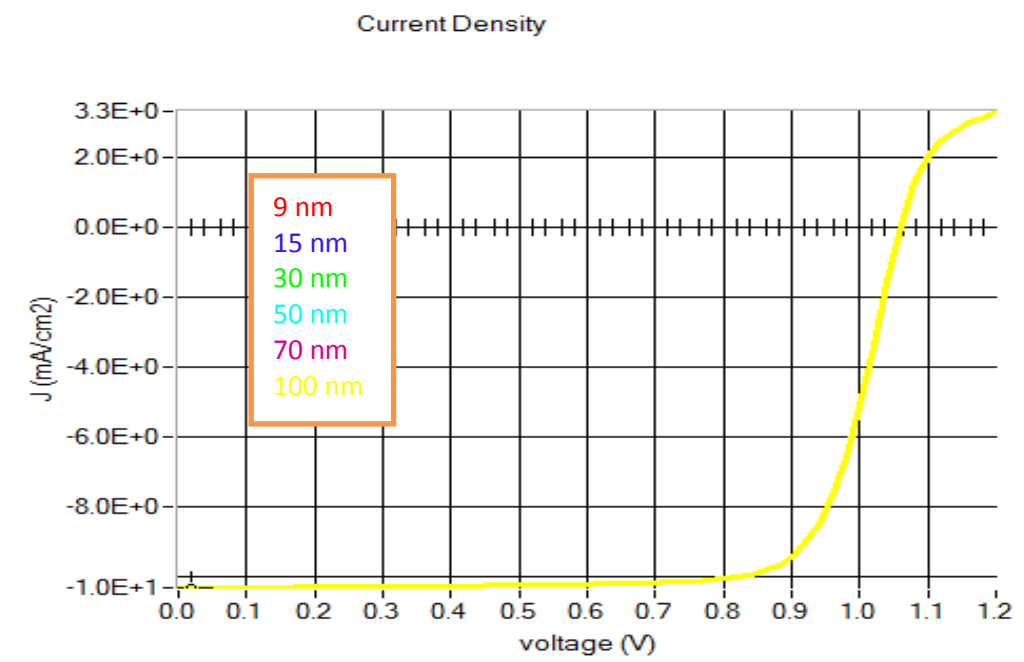


Figure 3.28 Caractéristiques J-V pour la cellule PIN pour différentes valeurs de l'épaisseur de la couche SnO_2

Chapitre III : Etude comparative des performances des cellules PN et PIN en couches minces

Bibliographie chapitre 03

- [1] Sana HARIECH, « Elaboration et caractérisation des couches minces de Sulfure de Cadmium (CdS) préparées par bain chimique (CBD) ». Mémoire de Magistère de l'université Mentouri– Constantine, 2009
- [2] Pushkaraj Panse « Copper Gallium Diselenide Solar Cells: Processing, Characterization and Simulation Studies ». Thèse de doctorat à l'université de South Florida, 2003.
- [3] Tom Markvart et Luis Castaner, « SOLAR CELLS Material, Manufacture and Opération (partie IIa, chapitre 1 : principes of solar cell operation 6-15), First Edition 2005.
- [4] Tom Markvart et Luis Castaner, “Solar Cells Material, Manufacture and Opération” (partie II, chapitre 4: Cu(Ga,In)(S,Se)₂Thin-Films Solar Cells) 305,312,322, First Edition 2005.
- [5] Michael Stuckelberger, “ Progress in solar cells from hydrogenated amorphous silicon” , Renewable and Sustainable Energy Reviews 76 (2017) 1497–1523
- [6] Alain Ricaud, « Module Photovoltaïques, Filières Technologiques», Techniques de l'ingénieur D 3940, 2005.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce travail, nous sommes intéressés à l'étude d'une cellule solaire à base d'une structure PIN en silicium amorphe. Le premier chapitre est consacré aux cellules solaires en générale. On présente leurs principe fonctionnement et leurs technologie ainsi les caractéristiques électriques. Le deuxième chapitre est consacré à la cellule solaire à base d'une structure PIN où on présente son principe de fonctionnement, sa caractéristique courant-tension et les paramètres qui gouvernent son fonctionnement. Le troisième et dernier chapitre, est consacré à la simulation numérique du comportement de la cellule solaire de structure PIN à base de silicium amorphe. Les résultats obtenus sont présentés, commentés et comparés aux valeurs expérimentales tirées de la littérature.

Les simulations ont été réalisées à l'aide du logiciel SCAPS. Nous avons déterminé, dans une première étape, les caractéristique courant-tension d'une cellule à base d'une structure (PN et tiré les paramètres de sortie importants qui reflètent ses performances de fonctionnement (V_{co} , I_{cc} , FF, η). Ensuite, on a intercalé une couche intrinsèque 'I' entre l'émetteur et la base, de la cellule précédente, pour obtenir la cellule PIN qui est la cellule visée par notre étude. A ces deux cellules nous insérer une couche TCO à base de deux matériaux.

Pour aboutir à la structure PIN idéale et déterminer les paramètres optimaux, on a étudié l'effet de la variation de plusieurs paramètres à savoir : la température, l'intensité de l'éclairement, le dopage de la couche P (émetteur), l'épaisseur de la couche intrinsèque ainsi que l'épaisseur et le dopage de la couche TCO. Les résultats obtenus montrent que le photocourant et le rendement dans la cellule à structure PIN sont plus importants que ceux d'une cellule à jonction PN, et que les différents paramètres technologiques (épaisseur zone intrinsèque, dopage de la couche (P et TCO) et épaisseur couche TCO, et environnementaux (éclairement, température) jouent un rôle important. Il est donc primordial de bien choisir les valeurs optimales pour obtenir la cellule solaire la plus performante.

Pour conclure, on peut suggérer pour les futurs travaux :

- ✚ Aborder une étude qui tient compte de l'effet des recombinaisons sur les contacts arrière qui ont un impact important sur les performances des cellules solaires en silicium amorphe.
- ✚ La concentration des défauts et leurs distributions.

Conclusion générale

- ✚ Elargir cette étude à d'autres matériaux tels que les composés III-V et les matériaux pérovskites caractérisées par un rendement remarquable, un prix de fabrication moins cher (environ la température en comparaison avec celui du silicium) et longue durée de vie sous exposition à la lumière.

يمكن تحسين أداء الخلية الشمسية إما عن طريق استخدام مواد شبه موصلة ذات خصائص ضوئية وكهربائية أفضل، أو عن طريق تحسين بنية الخلية نفسها. من بين النماذج الأكثر استعمالاً وعلى نطاق واسع للخلايا الشمسية، لدينا بنية PIN. خلال هذا العمل نقترح تحليل أداء هذا النوع من الخلايا مع تحديد المعلمات الحرجة التي تحد من أدائها.

Résumé

L'amélioration des performances d'une cellule solaire peut se faire soit par l'utilisation des matériaux semi-conducteurs ayant des meilleures propriétés optiques et électriques, soit par l'optimisation de la structure de la cellule elle-même. Parmi les structures largement répondues on a la structure PIN. Au court de ce travail nous proposons d'analyser les performances de ce type de cellule tout en identifiant les paramètres critiques limitant leur rendement.

Abstract

Improving the performance of a solar cell can be achieved either by using semiconductor materials with better optical and electrical properties, or by optimizing the structure of the cell itself. Among the widely answered structures we have the PIN structure. After this work we propose to analyze the performance of this type of cell while identifying the critical parameters limiting their performance.