

*Présentation du
logiciel PC1D*

III.1 INTRODUCTION :

Dans cette partie on va présenter les résultats de notre travail de simulation numérique des cellules solaires à hétérojonctions du type TCO/Si. La simulation numérique a été faite par le logiciel PC1D (Personnel Computer One Dimensionnel). Le but de cette étude est d'étudier et de déterminer les paramètres optimale donnant lieu les meilleures performances d'une cellule solaire photovoltaïques ensuite on va étudier l'influence des paramètres de la cellule sur les performances de la cellule photovoltaïques tels que l'épaisseur de couche d'oxyde transparent conducteur, le dopage ainsi que de la réflexion sur les paramètres photovoltaïques de ces cellules.

III.2 Présentation du logiciel PC1D :

Le logiciel PC1D, a été développé au centre de recherche de microélectronique de l'université de New South Wales en Australie. C'est l'un des simulateurs largement répandu pour la modélisation des cellules photovoltaïque [52].

Le PC1D est un logiciel qui résout les équations non linéaires de transport quasi-unidimensionnel des électrons et des trous dans dispositifs à semi-conducteur, notamment dans les dispositifs photovoltaïques à une dimension par l'utilisation de la méthode de éléments finis [53][54].

Le programme PC1D fournit des résultats sous forme d'affichages graphiques montrant des valeurs physiquement significatives tel que :

Courbes courant-tension I-V : En polarisation directe de l'échantillon, les courbes I-V permettent de déterminer le courant de saturation le facteur de qualité et la résistance en série. Aux fort courants, on a l'influence de la résistance de la résistance série de la structure qui se traduit par une courbure de la caractéristique $h(I) = f(V)$. L'effet de la résistance série est important, elle provoque un courant direct opposé au photocourant engendrant une baisse du rendement.

L'exploitation de la partie linéaire de la courbe $\ln(I) = f(V)$ donne la valeur du facteur du qualité de la structure. Ce facteur traduit l'écart par rapport à une diode, ou la conduction se fait uniquement par diffusion, il traduit aussi l'existence des défauts cristallographiques.

Le rendement quantique interne $IQE(\lambda)$: Le rendement quantique interne représente le rapport entre le nombre de porteurs collectés et le nombre de photons traversant la surface du dispositif. Ce rendement est calculé numériquement par le logiciel PC1D en fonction de la longueur d'onde λ .

Longueur de diffusion des porteurs minoritaires : Sous l'effet de l'éclairement il se produit une diffusion des porteurs minoritaires qui vont se déplacer vers les régions où leurs concentrations

sont plus faibles .Ainsi le PC1D permet de tracer la longueur de diffusion des porteurs minoritaires en fonction de la position.

Densité de courant : La variation de la densité de courant (Ampère par centimètre carré) des électrons et des trous est tracée en fonction de la position. Ainsi, on peut déduire la densité de courant total qui est la somme du courant des électrons et les trous [55].

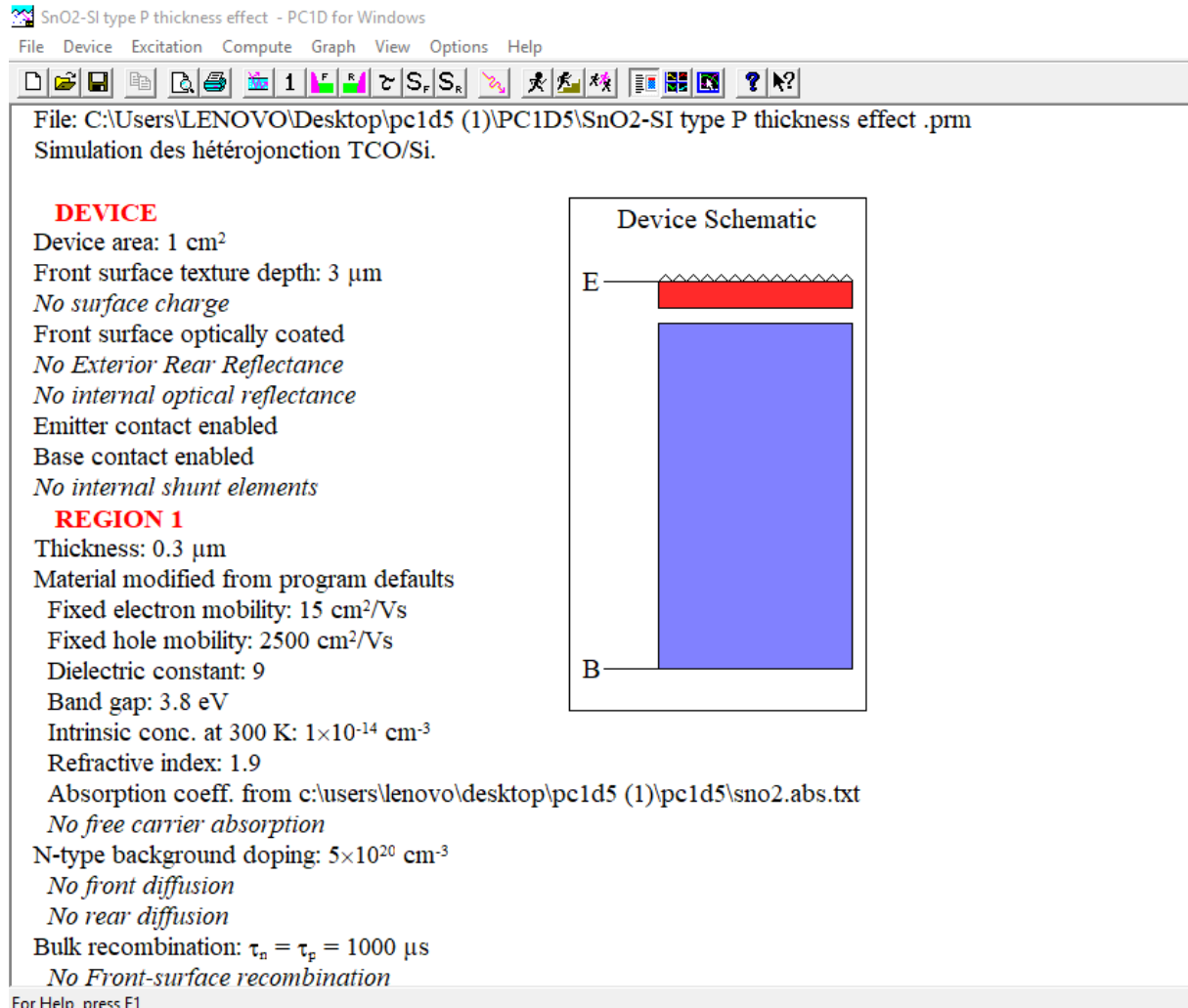


Figure.III.1 : Fenêtre du logiciel PC1D utilisé en simulation numérique.

III.3 La structure de la cellule solaire simulée :

Dans notre travail on a fait une simulation sur trois types des cellules :

1-Si (N+)-Si(P) : Cellules solaires constituées silicium type N déposée sur du silicium de type P munies d'électrodes collectrices, en face avant et arrière, permettant leur connexion au circuit électrique extérieur.

2-SnO₂-Si(P) : Cellules solaires constituées d'une couche d'oxyde d'étain SnO₂ déposée sur du silicium de type P munies d'électrodes collectrices, en face avant et arrière, permettant leur

connexion au circuit électrique extérieur. La couche de SnO_2 , en sa qualité de TCO, est une couche antireflet.

3- SnO_2 -Si(N⁺)-Si(P) : Cellules solaires constituées d'une couche d'oxyde d'étain SnO_2 déposée sur la cellule Si (N⁺)-Si(P).

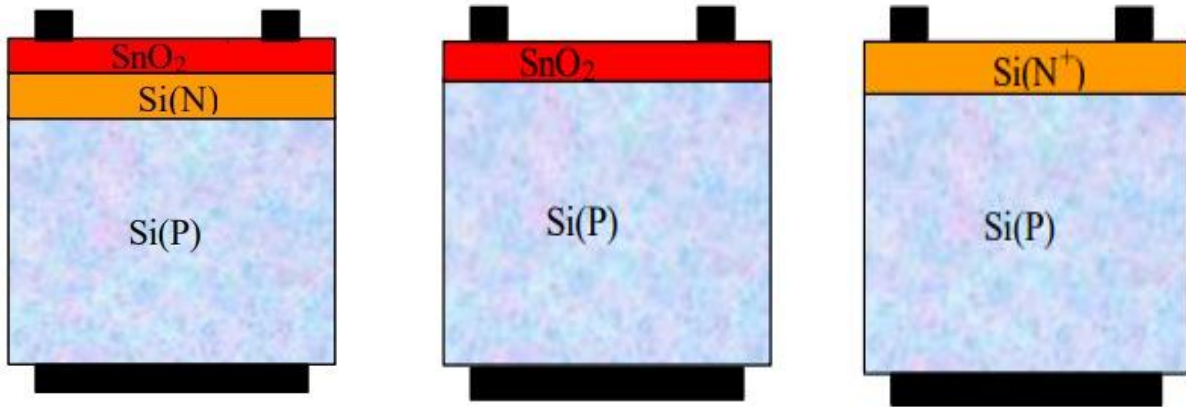


Figure.III.2 : Cellules solaires simulées sous PC1D.

III.4 Paramètres de simulation :

Les simulations ont été effectuées sous un spectre solaire AM.1.5 avec $P = 1000 \text{ W/m}^2$. Le tableau suivant regroupe les principaux paramètres des couches de silicium et de SnO_2 utilisés dans la simulation.

Superficiel du dispositif	1 cm^2
1^{ère} région du dispositif SnO_2	
Epaisseur	$0.3 \mu\text{m}$
Mobilité des électrons	$15 \text{ cm}^2/\text{Vs}$
Mobilité des trous	$2500 \text{ cm}^2/\text{Vs}$
Constante diélectrique	9
Energie de gap	3.8 eV
Concentration intrinsèque des porteurs à 300K	10^{-14} cm^{-3}
Indice de réfraction	1.9
Coefficient d'absorption	$\text{SnO}_2.\text{abs}$ (courbe expérimentale)
Dopage type n	5×10^{20}
Recombinaison dans le volume	$\mu_n = 1000 \mu\text{s}$; $\mu_p = 1000 \mu\text{s}$
2^{ème} région du dispositif $\text{Si(N}^+)/\text{Si(P)}$	

Epaisseur	350 μm
Mobilité des électrons	A partir du modèle interne pour le Silicium
Mobilité des trous	
Constante diélectrique	11.9
Energie de gap	1.124 eV
Concentration intrinsèque des porteurs à 300K	10^{10} cm^{-3}
Indice de réfraction	1.9
Coefficient d'absorption	A partir du modèle interne pour Si du PC1D
Free carrier absorption	A partir du modèle interne pour Si du PC1D
Dopage du substrat type p	$1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$
Dopage du substrat type n	$1.85 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$
Recombinaison dans le volume	$\mu_n = 1000 \mu\text{s}$; $\mu_p = 100 \mu\text{s}$

Tableau.III.1 : Paramètres de simulation.

III.5 Résultats de simulation :

III.5.1 Cellule de type : Si (N+)-Si(P) :

III.5.1.1 Caractéristique courant-tension de la cellule solaire :

La caractéristique I-V de la cellule solaire Si(N)/Si(P) simulée sous PC1D est représentée sur la Figure.III.3.

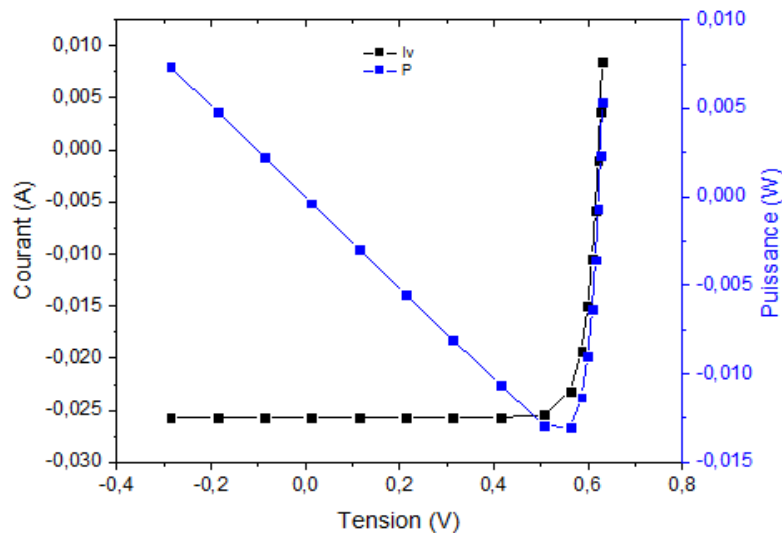


Figure.III.3 : La caractéristique I(V) de Si(N)-Si(P) sous PC1D.

La caractéristique I(V) de la jonction Si(N)-Si(P), sous un éclairement à AM_{1,5} (1000W/m²) nous donne un courant de court-circuit I_{cc} =25,7 mA, une tension de circuit ouvert V_{co} = 622.4 mV, un facteur de forme FF=0.825 et un rendement photovoltaïque η= 13.2%.

III.5.1.2 Influence des Paramètres sur les performances de cellule solaire :

a. Influence de la réflexion du Si (N+) :

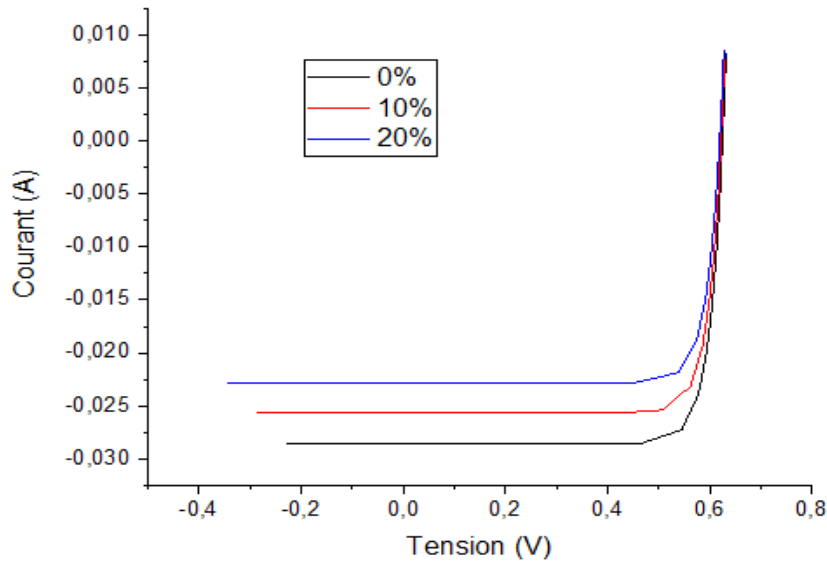


Figure.III.4 : Influence de la réflexion sur la caractéristique I(V) du Si(N+)-Si(P).

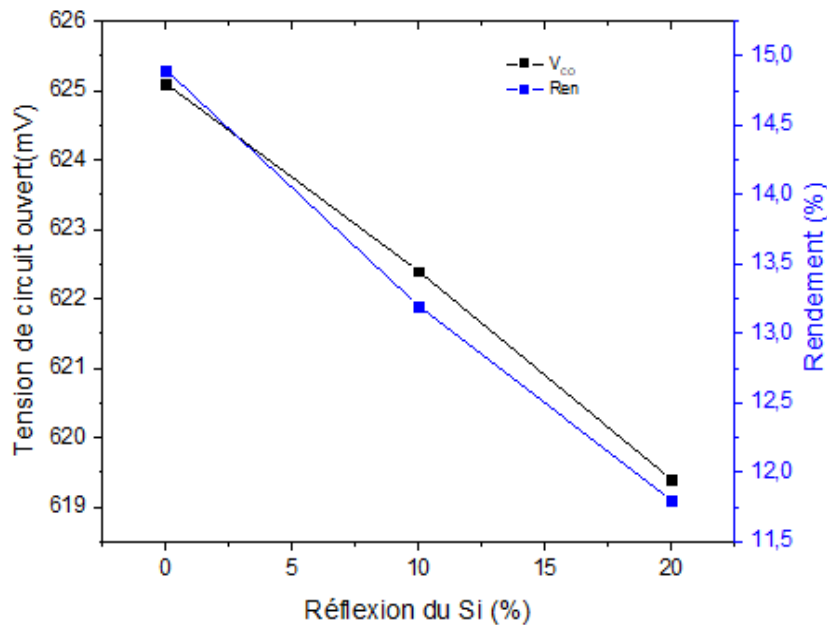


Figure.III.5 : Variations de V_{co} et η en fonction de la réflexion du Si(N+).

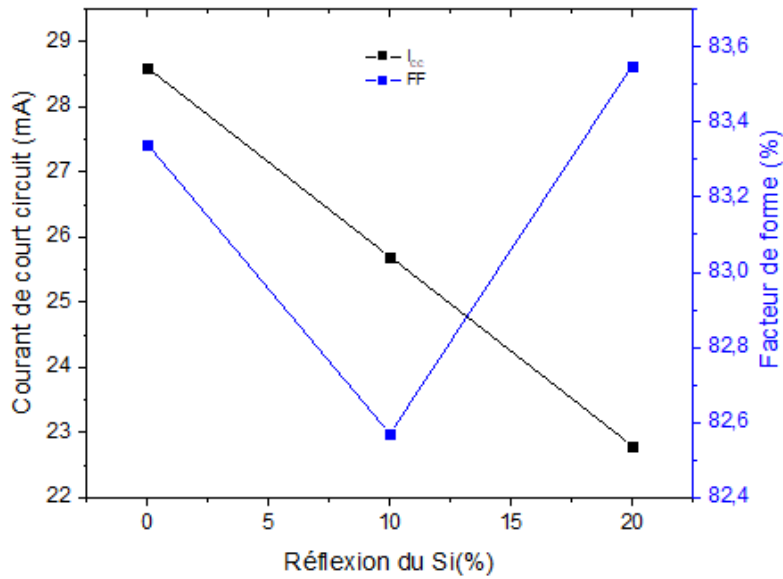


Figure III.6 : Variations de I_{cc} et FF en fonction de la réflexion du Si(N+).

D'après les résultats représentés sur les Figures (III.4) ;(III.5) ;(III.6) on remarque qu'à chaque fois la réflexion augmente la tension du circuit ouvert et du courant de court-circuit diminue, et par suite le rendement diminue. Ceci s'explique par l'état du silicium qui réfléchit plus de 35% de la propagation lumineuse produite [27]. La mauvaise absorption dans le silicium revient au gap qui donne une influence considérable sur la performance des cellules photovoltaïques ; tout en augmentant la réflexion le rendement diminue.

Pour améliorer la compétence (performance) des cellules solaires, il est préférable d'utiliser SnO_2 comme couche opposante à la réflexion.

b. Influence de l'épaisseur du silicium :

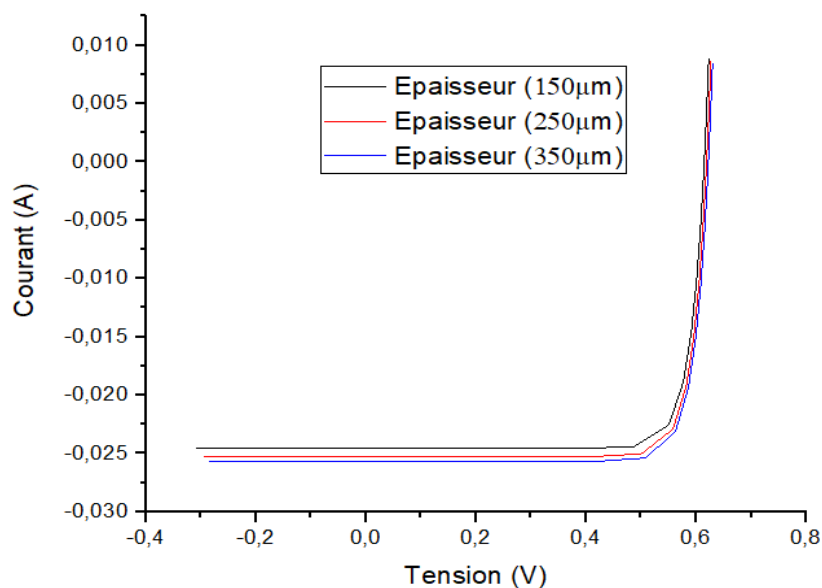


Figure III.7 : Influence de l'épaisseur sur la caractéristique $I(V)$ du Si (N+)-Si(P).

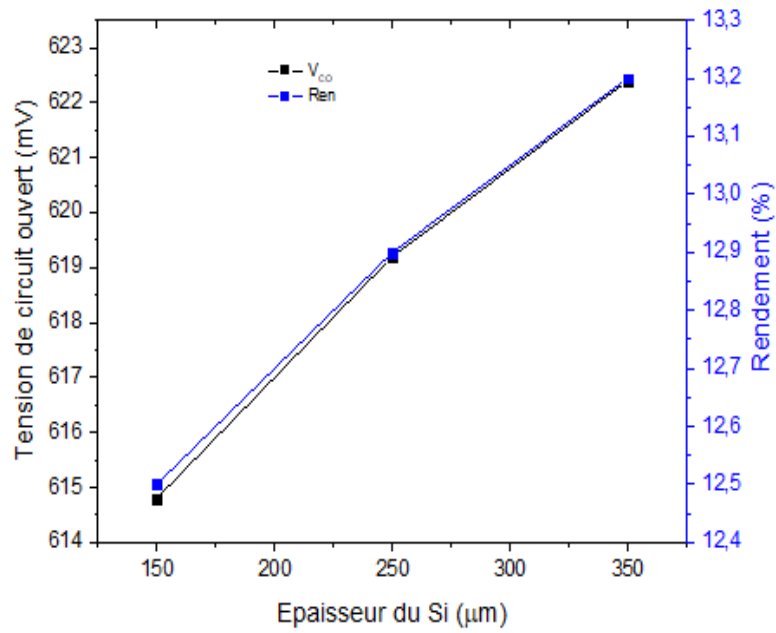


Figure.III.8 : Variations de V_{co} et η en fonction de l'épaisseur du Si.

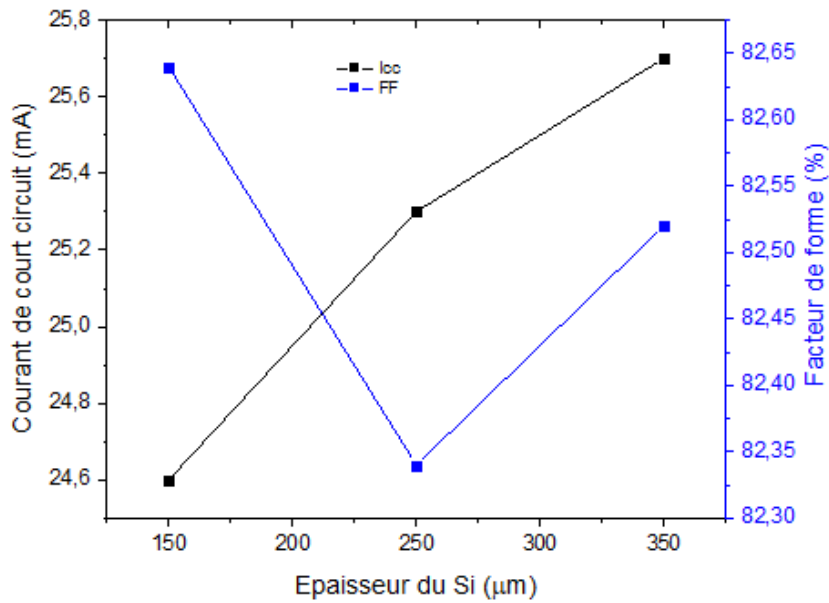


Figure.III.9 : Variations de I_{cc} et FF en fonction de l'épaisseur du Si.

En augmentant l'épaisseur du silicium, chacun de la tension de circuit ouvert et du courant de court-circuit augmente, ce qui améliore la performance de transformation des cellules d'énergie solaire. L'augmentation de substrat s'explique par une absorption meilleure de telle sorte que les photons se produisent beaucoup plus en paires électron-trous générés.

III.5.2 Cellule de type SnO₂-Si(P) :

III.5.2.1 Caractéristique courant-tension de la cellule solaire :

La caractéristique I-V de la cellule solaire SnO₂-Si(P) simulée sous PC1D est représentée sur la Figure.III.10.

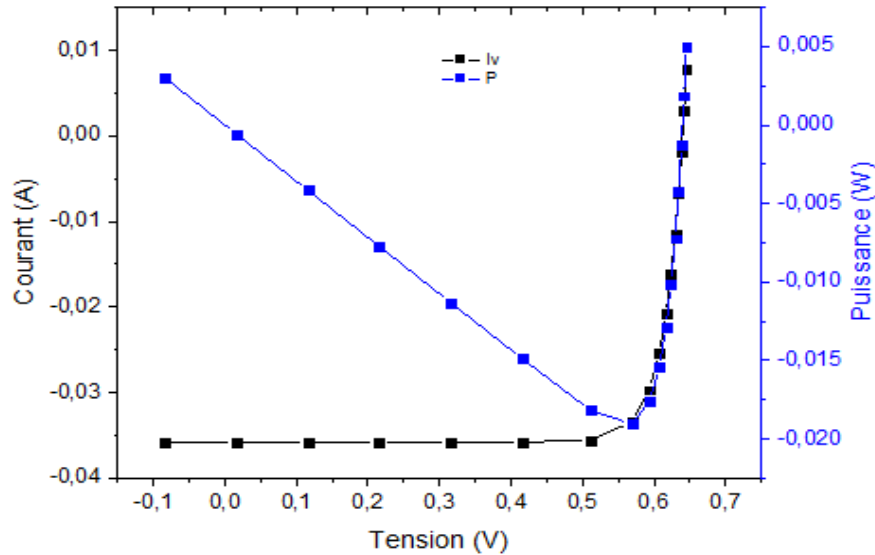


Figure.III.10 : La caractéristique I(V) de SnO₂-Si(P) sous PC1D.

La caractéristique I(V) de la jonction SnO₂-Si(P), sous un éclairage de AM_{1,5} (1000W/m²) nous donne un courant de court-circuit I_{cc}=35.8 mA, une tension de circuit ouvert V_{co} = 639.9 mV, un facteur de forme FF=0.832 et un rendement photovoltaïque η= 19%.

III.5.2.2 Influence des Paramètres sur les performances de la cellule solaire :

a.Influence de la réflexion du SnO₂ :

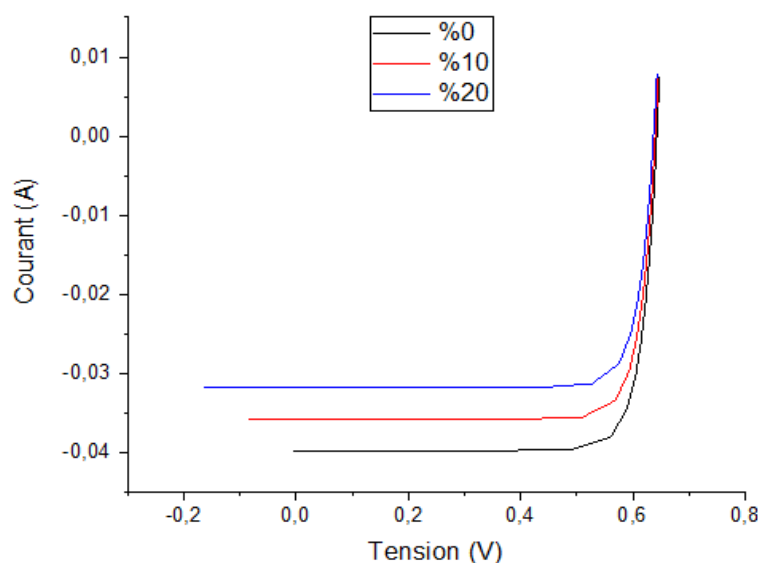


Figure.III.11 : Influence de la réflexion sur la caractéristique I(V) du SnO₂-Si(P).

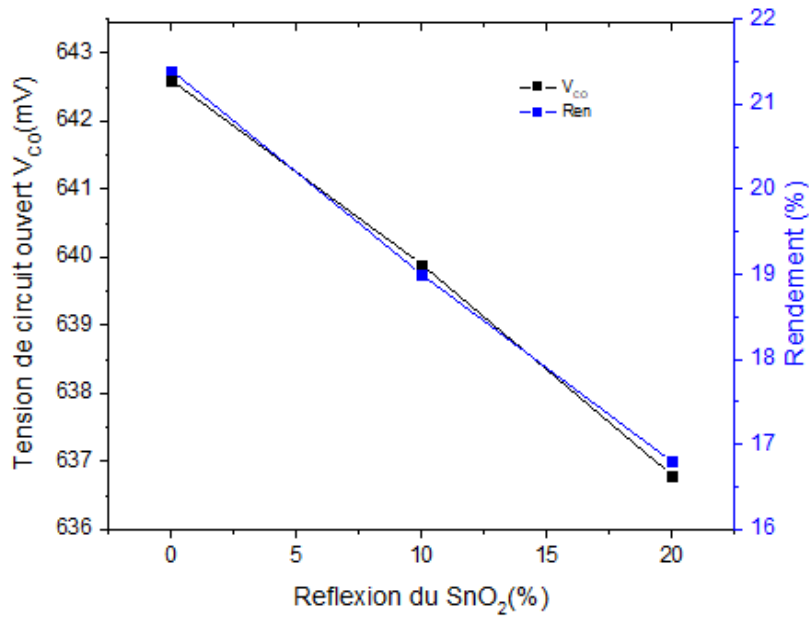


Figure.III.12 : Variations de V_{co} et η en fonction de la réflexion du SnO₂.

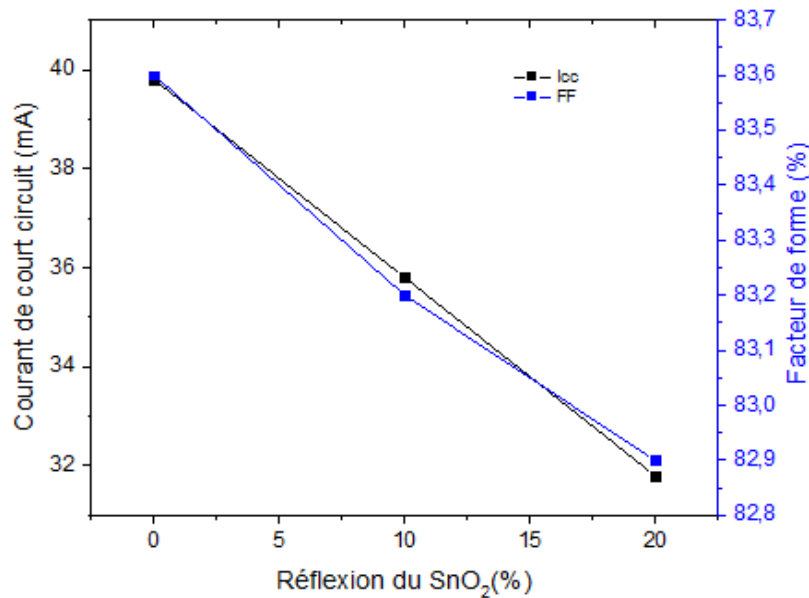


Figure.III.13 : Variations de I_{cc} et FF en fonction de la réflexion du SnO₂.

Pour avoir un bon rendement photovoltaïque dans l'hétérojonction SnO₂/Si(P), il faut transmettre le maximum de rayonnement lumineux à travers la couche du TCO vers la couche active, et donc réduire la réflexion du TCO.

En augmentant la réflexion, chacun des I_{cc} ; V_{co} ; FF diminue, d'où le rendement de transformation des cellules d'énergie solaires diminue. Ceci s'explique par le fait que lorsque la concentration de l'électron libre dans la couche TCO augmente entraîne une variation de l'indice de réfraction, ce qui provoque l'augmentation de la réflexion, et donc la diminution de

la transmission des couches de TCO. Ce qui peut expliquer la diminution de V_{co} , I_{cc} et le rendement photovoltaïque lorsque la réflexion du TCO augmente.

b. Influence de l'épaisseur de silicium :

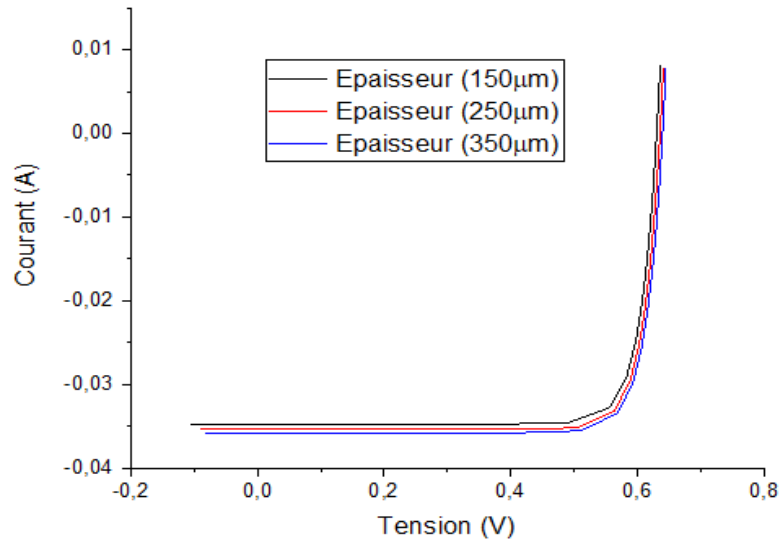


Figure.III.14 : Influence de l'épaisseur du Si sur la caractéristique $I(V)$ du $SnO_2-Si(P)$.

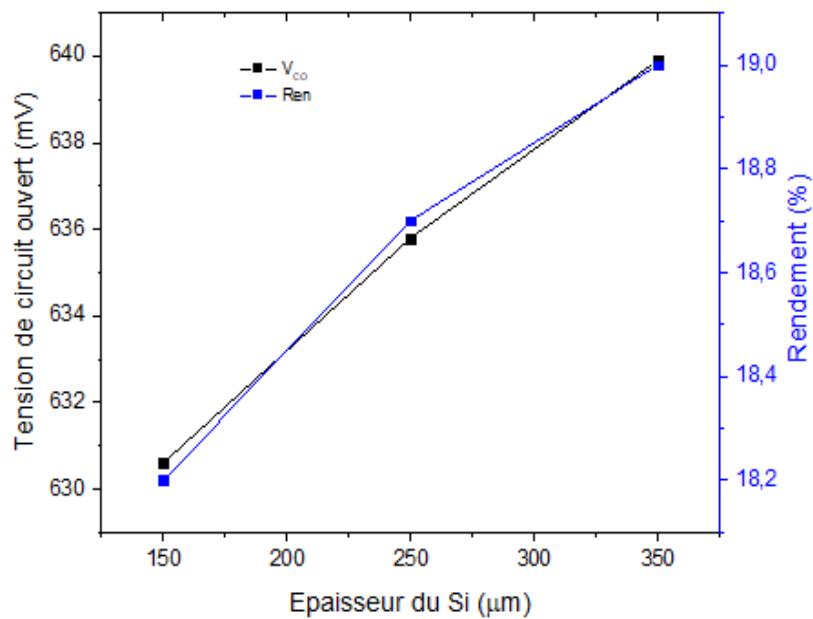


Figure.III.15 : Variations de V_{co} et η en fonction de l'épaisseur du Si.

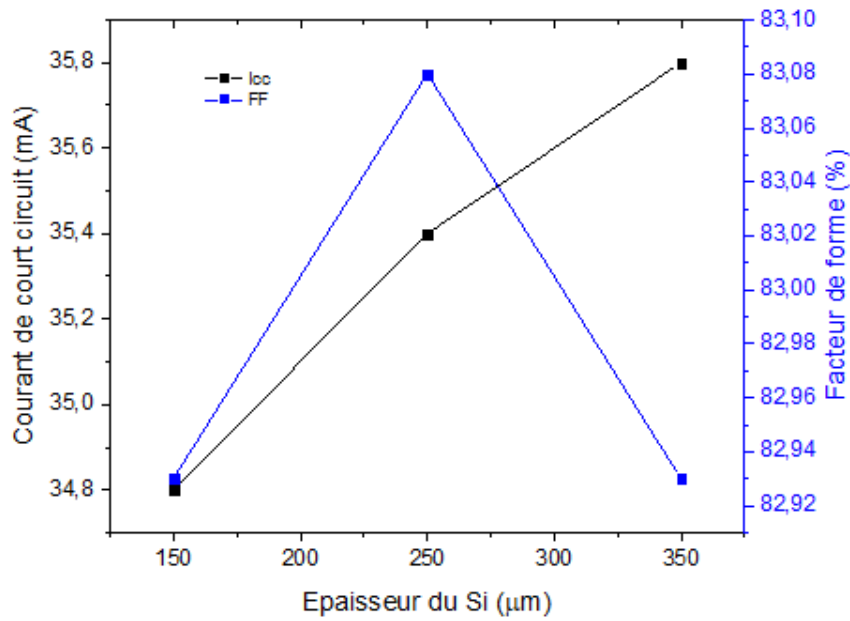


Figure.III.16 : Variations de I_{cc} et FF en fonction de l'épaisseur du Si.

Lorsque l'épaisseur du substrat augmente, le rendement de la cellule solaire augmente. Ceci revient à l'augmentation du circuit ouvert et du courant du court-circuit, de telle sorte que lorsque l'épaisseur du substrat augmente l'absorption des photons augmente d'où l'augmentation dans les paires électron-trous générés.

c. Influence du dopage de silicium :

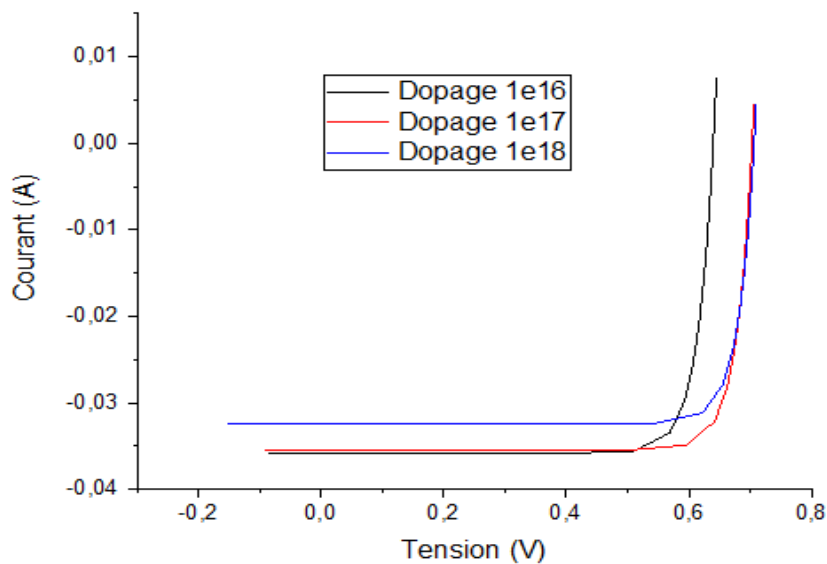


Figure.III.17 : Influence de dopage sur la caractéristique $I(V)$ du $SnO_2-Si(P)$.

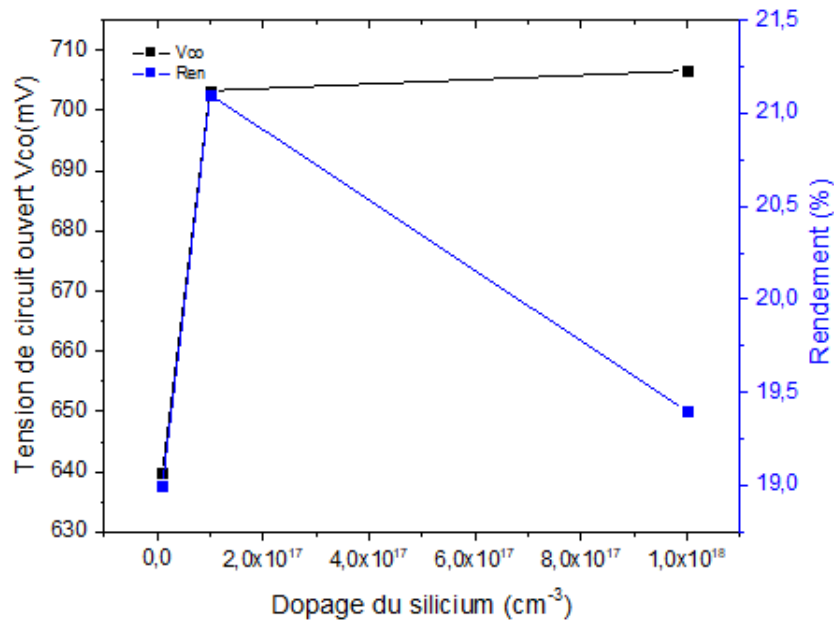


Figure.III.18 : Variations de V_{co} et η en fonction de dopage du Si.

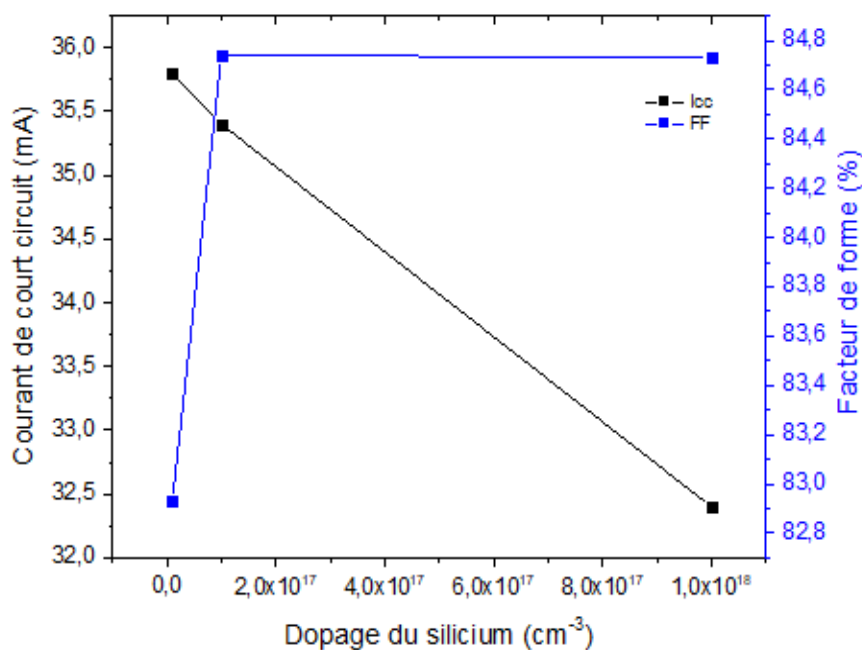


Figure.III.19 : Variations de I_{cc} et FF en fonction de dopage du Si.

On observe qu'au de dessous du taux de dopage 10^{17} une augmentation de la tension de circuit ouvert V_{co} ainsi que le rendement. Par contre le courant de court-circuit I_{cc} diminue.

On explique l'augmentation de rendement et la tension par l'augmentation des porteurs de charge jusqu'il atteint la valeur 10^{17} .

Au-dessus de la valeur 10^{17} du taux de dopage on observe une diminution du rendement cela s'explique par la dégénérescence du semi-conducteur.

Les faibles dopages du silicium type p permettent l'augmentation de la barrière de potentiel entre le semi-conducteur et le TCO. La relation illustre la dépendance de la barrière de potentiel

avec le dopage du silicium (travail de sortie). Plus le travail de sortie du silicium est élevé, plus la barrière de potentiel est importante.

$$V_d = \phi_M - \phi_{Sc} = \chi + \frac{E_c + E_{F,P}}{q} - \phi_M$$

d. Influence de l'épaisseur de la couche antireflet (SnO₂) :

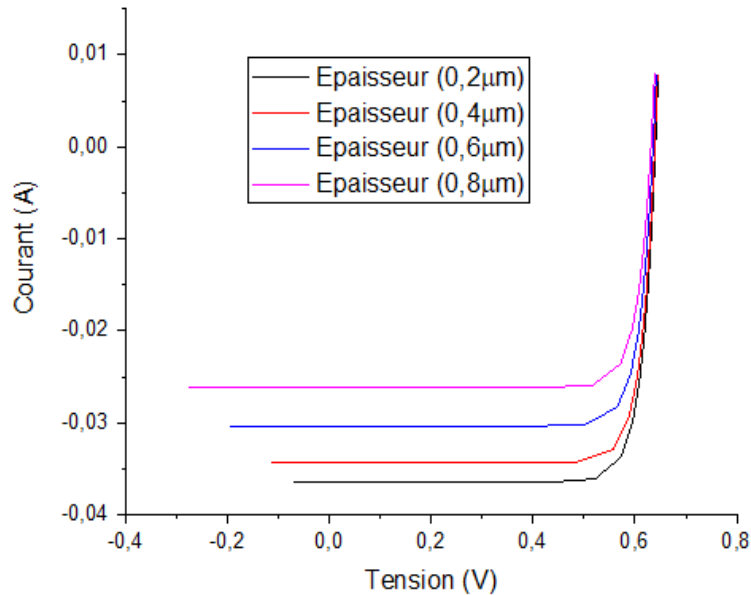


Figure.III.20 : Influence de l'épaisseur du SnO₂ sur la caractéristique I(V) du SnO₂-Si(P).

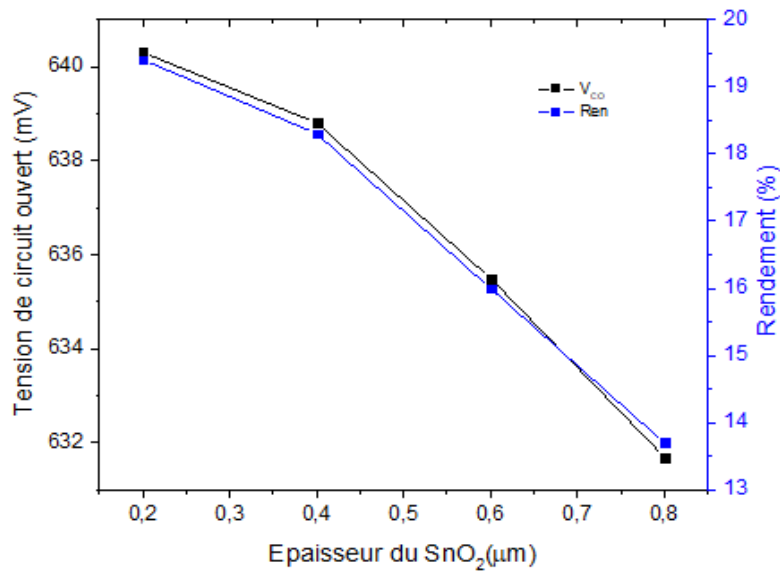


Figure.III.21 : Variations de V_{co} et η en fonction de l'épaisseur du SnO₂.

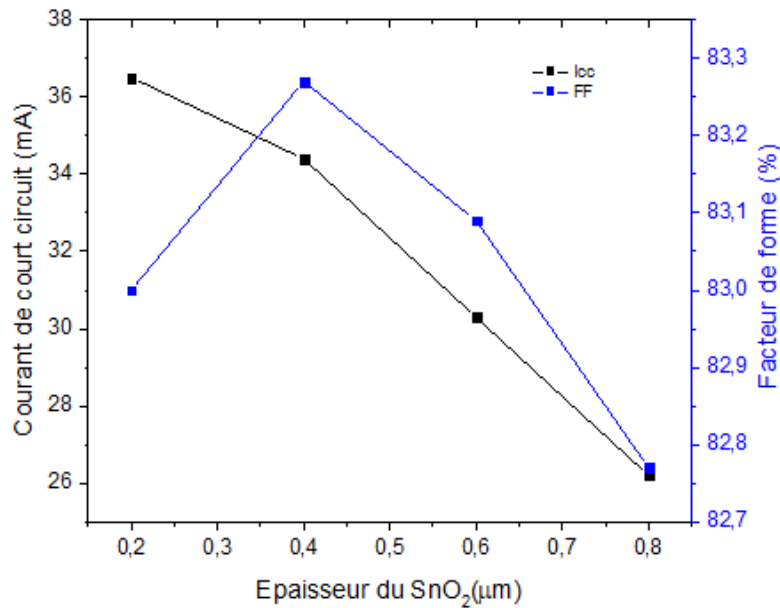


Figure.III.22 : Variations de I_{cc} et FF en fonction de l'épaisseur du SnO₂.

Lorsque l'épaisseur de la couche antireflet augmente on remarque une diminution de I_{cc} ; V_{co} ; FF de telle sorte que l'influence de l'augmentation de l'épaisseur de la couche antireflet (SnO₂) soit négative sur les caractéristiques de la cellule solaire. Cela s'explique par l'augmentation de l'absorption du surplus avant d'arriver à la couche active. Aussi le dépassement d'intervalle spécifique de l'épaisseur peut rendre le TCO impénétrable par la lumière.

III.5.3 Cellule de type SnO₂-Si (N⁺)-Si(P) :

III.5.3.1 Caractéristique courant-tension de la cellule solaire :

La caractéristique I-V de la cellule solaire SnO₂-Si(N)-Si(P) simulée sous PC1D est représentée sur la Figure.III.23.

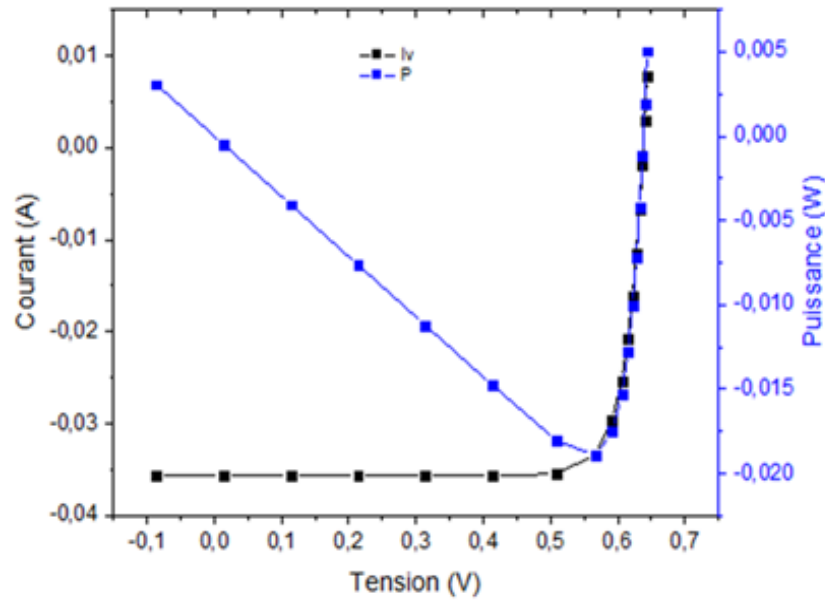


Figure.III.23 : La caractéristique $I(V)$ de $\text{SnO}_2\text{-Si}(N^+)\text{-Si}(P)$ sous PCID.

La caractéristique $I(V)$ de la jonction $\text{SnO}_2\text{-Si}(N^+)\text{-Si}(P)$, sous un éclairage de $\text{AM}_{1.5}$ ($1000\text{W}/\text{m}^2$) nous donne un courant de court-circuit $I_{cc} = 35.7\text{ mA}$, une tension de circuit ouvert $V_{co} = 638.1\text{ mV}$ et facteur de forme $FF = 0.832$ et un rendement photovoltaïque $\eta = 18.9\%$.

III.5.3.2 Influence des Paramètres sur les performances de la cellule solaire :

a. Influence de la réflexion du TCO :

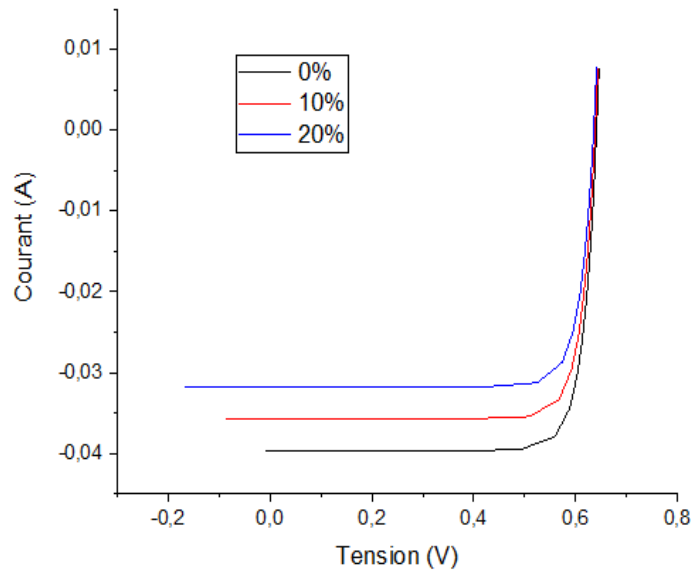


Figure.III.24 : Influence de la réflexion sur la caractéristique $I(V)$ du $\text{SnO}_2\text{-Si}(N^+)\text{-Si}(P)$.

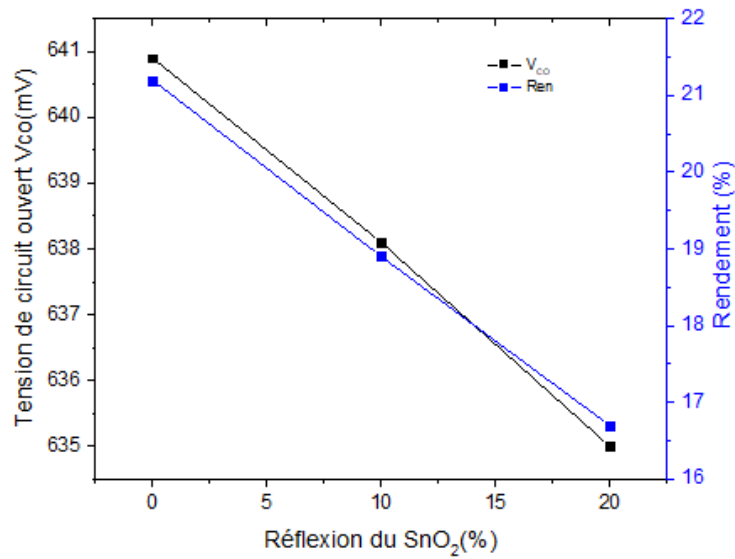


Figure.III.25 : Variations de V_{co} et η en fonction de la réflexion du SnO_2 .

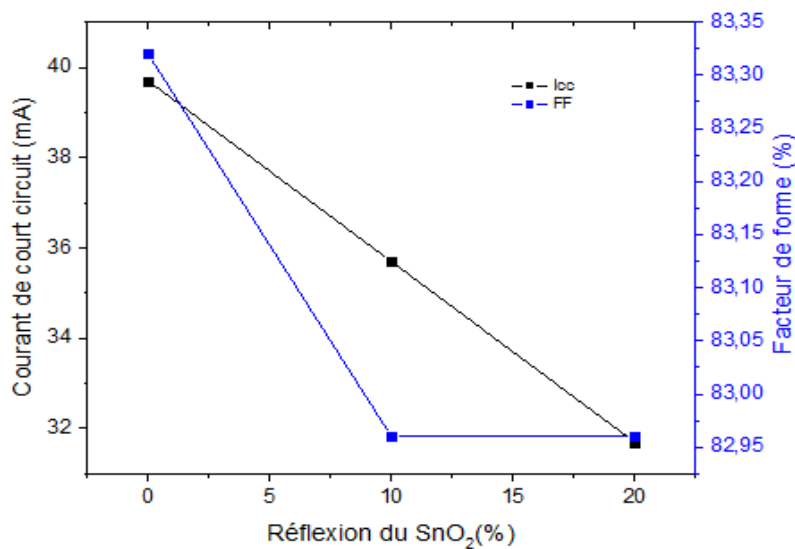


Figure.III.26 : Variations de I_{cc} et FF en fonction de la réflexion du SnO_2 .

Les résultats de la simulation de l'effet de la réflexion de la couche antireflet sur le rendement de la cellule montre qu'on augmentant la réflexion le rendement diminue. Lorsque la réflexion augmente les paramètres de la cellule solaire diminuent, mais le rendement reste meilleur que la cellule Si(N⁺)-Si(P), tant que la couche (SnO_2) participe beaucoup plus à faire transmise des photons.

b. Influence de l'épaisseur du silicium :

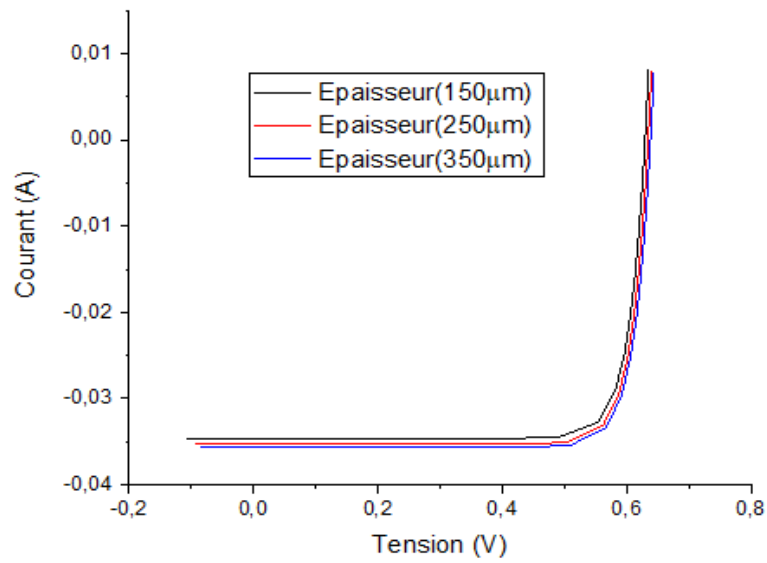


Figure.III.27 : Influence de l'épaisseur du Si sur la caractéristique I(V) du SnO₂-Si(N⁺)-Si(P).

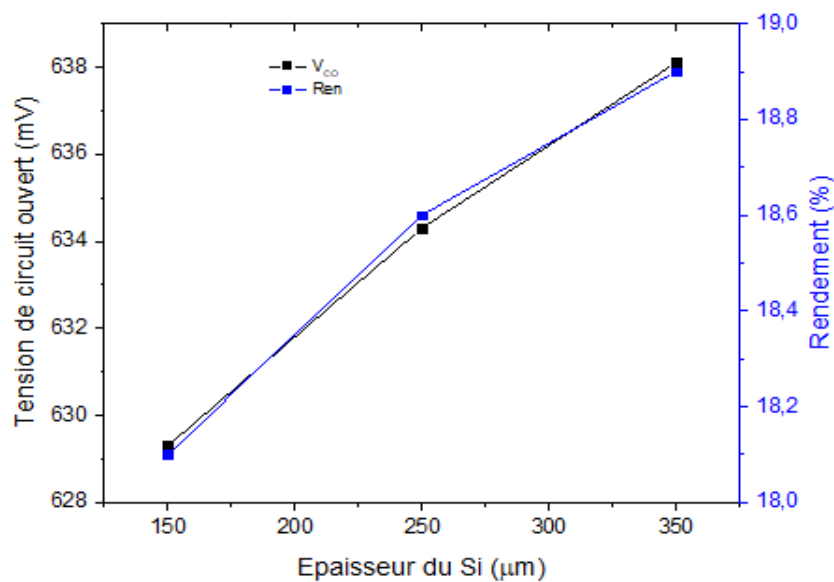


Figure.III.28 : Variations de V_{co} et η en fonction de l'épaisseur du Si.

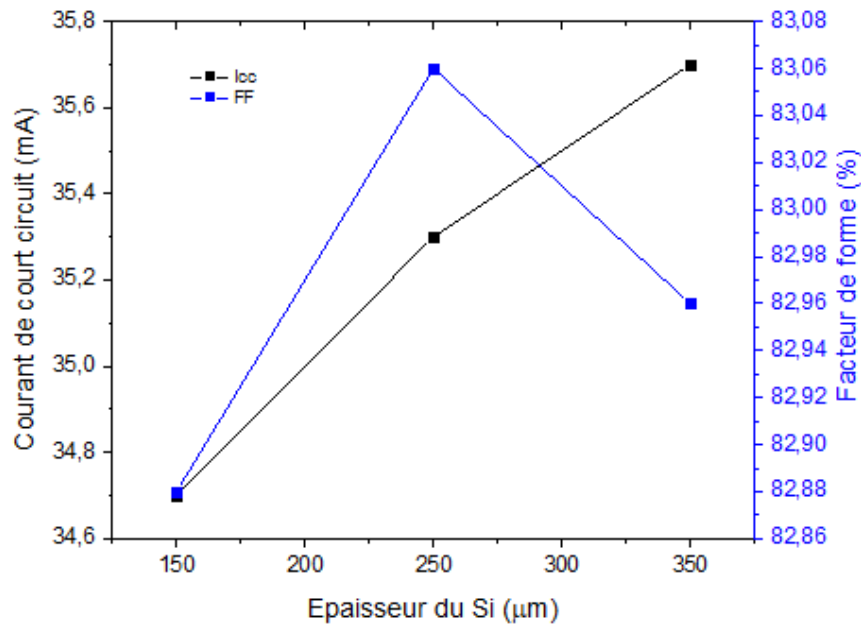


Figure.III.29 : Variations de I_{cc} et FF en fonction de l'épaisseur du Si.

Quand l'épaisseur de substrat augmente le rendement des cellules solaires s'améliorent. Cela s'explique par l'augmentation des défauts du réseau, ce qui en résulte une augmentation de porteurs de charges ; d'où une augmentation du courant de court-circuit I_{cc} et la tension de circuit ouvert V_{co} .

c. Influence de dopage du silicium :

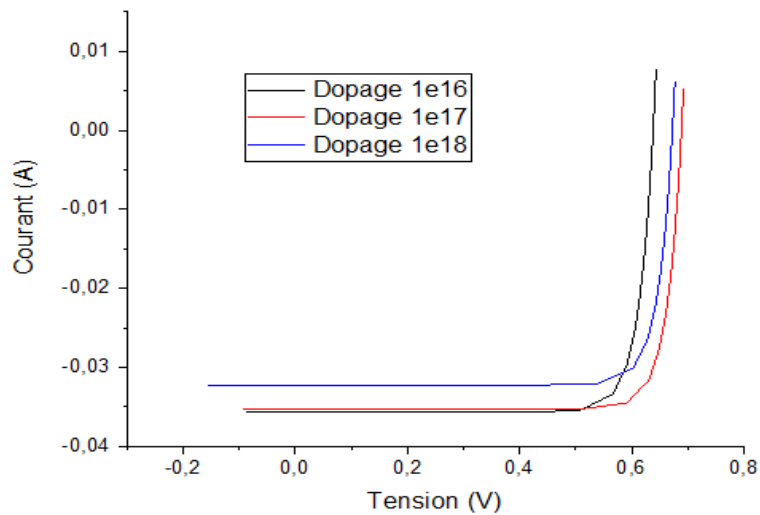


Figure.III.30 : Influence de dopage sur la caractéristique $I(V)$ du $SnO_2-Si(N^+)-Si(P)$.

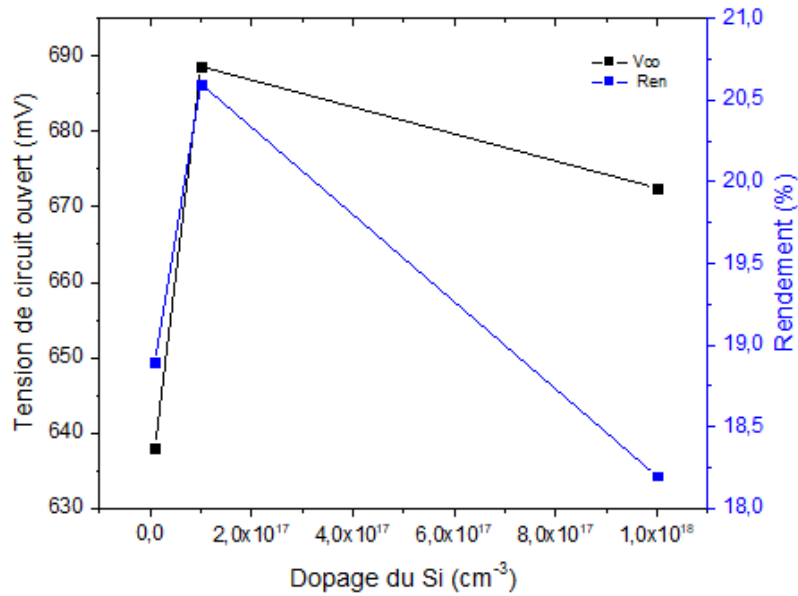


Figure.III.31 : Variations de V_{co} et η en fonction de dopage du Si.

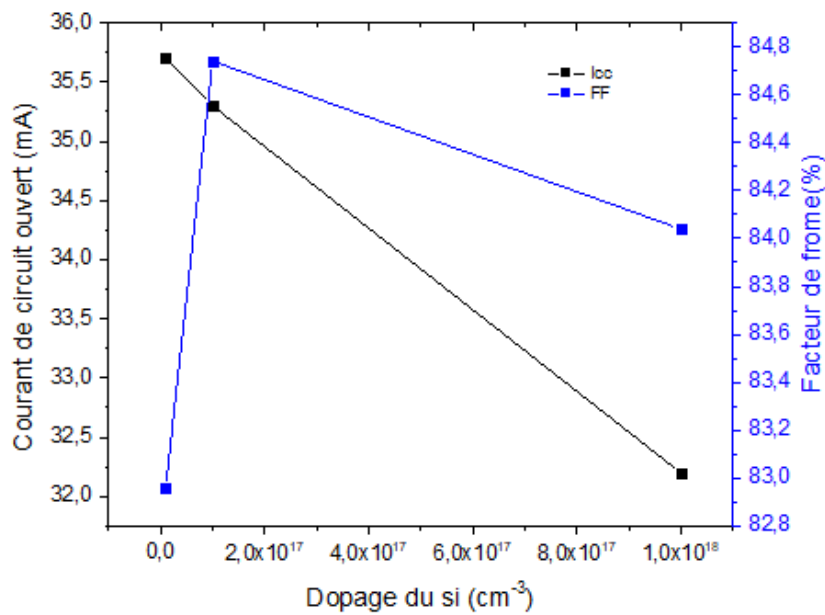


Figure.III.32 : Variations de I_{cc} et FF en fonction de dopage du Si.

Lorsqu'on augmente le dopage du substrat, la tension de circuit ouvert et le courant de court-circuit augmente et par conséquent le rendement croit grâce à l'augmentation de la mobilité des électrons et de la durée de vie des porteurs de charges, ces résultats sont obtenus pour des dopages moyens alors que pour les forts dopages le rendement de la cellule diminue à cause de la croissance des recombinaisons Auger.

d. Influence de l'épaisseur de la couche antireflet (SnO_2) :

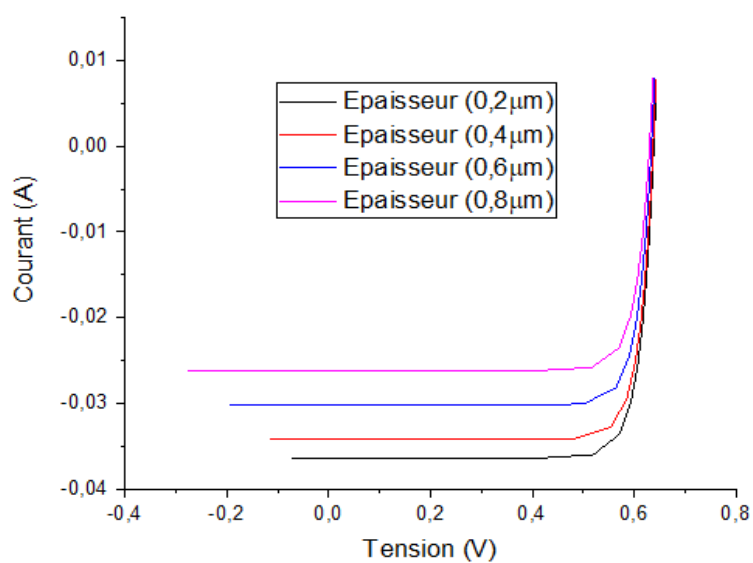


Figure.III.33 : Influence de l'épaisseur du SnO_2 sur la caractéristique $I(V)$ du $\text{SnO}_2\text{-Si(N+)-Si(P)}$.

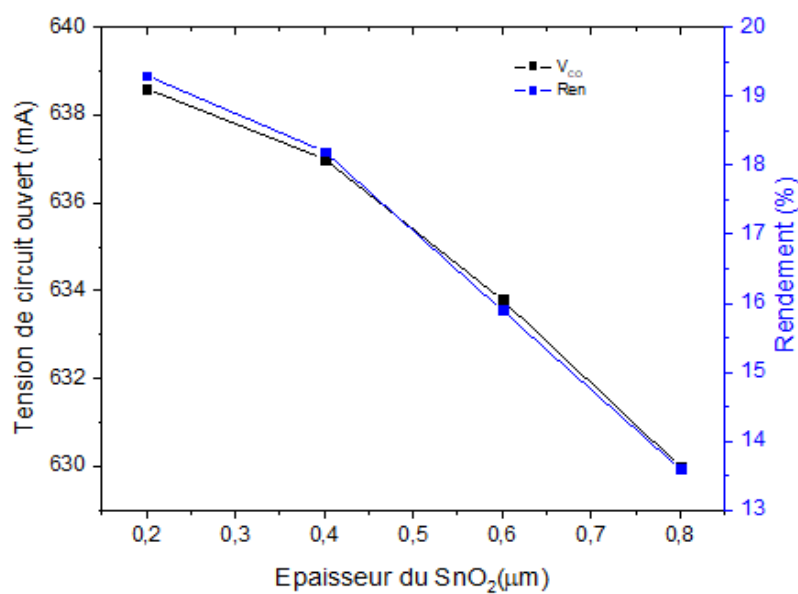


Figure.III.34 : Variations de V_{co} et η en fonction de l'épaisseur du SnO_2 .

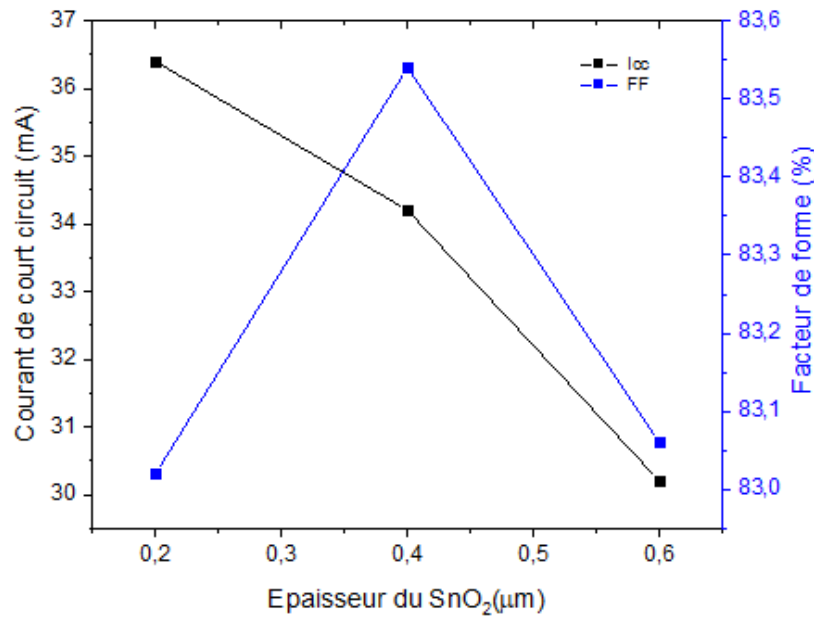


Figure.III.35 : Variations de I_{cc} et FF en fonction de l'épaisseur du SnO_2 .

Comme on peut le voir sur les Figures (III.33 ; III.34 ; III.35), l'augmentation de l'épaisseur de l'émetteur entraîne la décroissance de la tension de circuit ouvert et le courant de court-circuit et par suite le rendement. L'explication de ce résultat est que la couche d'émetteur doit faire passer toute l'intensité de la lumière qu'elle reçoit à la base ce qui empêche ce passage lorsqu'elle sera épaisse.

III.6 Comparaisons des résultats obtenus :

Cellule solaire	Rendement η	V_{co}	I_{cc}	FF
Si(N+)-Si(P)	13.2%	622.4mV	25.7mA	0.825
SnO ₂ - Si(N+)-Si(P)	18.9%	638.1mV	35.7mA	0.829
SnO ₂ - Si(P)	19%	639.9mV	35.8mA	0.832

Tableau.III.2 : Comparaisons des résultats.

Après lecture des résultats récapitulés dans le tableau ci-dessus, on remarque que l'adjonction de l'oxyde d'étain comme fenêtre optique a amélioré le rendement de plus de 5% en augmentant le courant de court-circuit I_{cc} de 10 mA et la tension à circuit ouvert V_{co} de 15.7mV par rapport à une jonction classique du silicium. Ces résultats expliquent le rôle que joue la couche antireflet sur le rendement de la cellule en minimisant de plus en plus la réflexion du flux incident afin de laisser passer la totalité de ce flux vers la couche active.

Néanmoins, on constate que l'effet de SnO_2 est bien plus important comme dans les hétérostructures simples sur un substrat de silicium de type P avec une tension de circuit ouvert

qui dépasse les 639 mV. Par contre ce type d'hétérostructure présente une grande instabilité. D'où son rejet dans les procédés technologiques [56].

*Conclusion
Générale*