

# Etude et simulation d'une cellule solaire photovoltaïque à base de silicium polycristallin

GHENNOU Souad

Laboratoire : Réseaux Intelligents & Energies Renouvelables  
Université Tahri Mohamed Bechar  
Bechar, Algeria  
s\_ghennou@yahoo.fr

TANDJAOUI Mohamed Nasser

Laboratoire : Réseaux Intelligents & Energies Renouvelables  
Université Tahri Mohamed Bechar  
Bechar, Algeria  
tanjaoui\_@yahoo.fr

**Résumé**— La filière silicium polycristallin en couches minces suscite un intérêt majeur dans l'industrie photovoltaïque puisqu'elle permet une réduction du coût matière. Notre contribution consiste à optimiser les paramètres physiques et technologiques de la cellule à base de silicium polycristallin. Aussi doit-on trouver les meilleures performances de sortie ( $I_{cc}$ ,  $V_{co}$ ,  $\eta$  et  $FF$ ) de la structure. Ces travaux sont effectués en utilisant le logiciel de simulation numérique des cellules solaires à une dimension : PC-1D.

**Mots clés** : Silicium polycristallin, Cellule solaire photovoltaïque, paramètres physiques, simulation, PC-1D.

## I. Introduction

Le silicium polycristallin (polySi) en couche mince ( $< 3 \mu\text{m}$  d'épaisseur) est utilisé pour ses propriétés optoélectroniques dans l'industrie des semi-conducteurs pour des applications telles que la microélectronique et le photovoltaïque. Malgré l'avancée actuelle de ses applications le polySi a encore une place dans le domaine de la recherche en vue d'améliorer en particulier ses performances électriques. En effet, suivant le procédé de fabrication adopté, le polySi résultant diffère par la densité de défauts présents qui altère ses propriétés optoélectroniques. Les défauts de structure tels que les joints de grains constituent des sites de recombinaison des porteurs de charge majoritaires et minoritaires, entraînant une diminution de leur longueur de diffusion et par conséquent de leur durée de vie dans le matériau. La densité de ces pièges à porteurs de charge est fortement liée à la taille des grains.

## II. Etude théorique du silicium polycristallin

### A. Silicium solaire

Le silicium, à la base de toute l'industrie électronique moderne, est obtenu par réduction de la silice dans un four électrique, ce qui fournit le matériau dit "métallurgique" dont la pureté est de 98 % environ. Celui-ci est purifié à son tour, sous forme de gaz trichlorosilane ou silane. Après pyrolyse de ces derniers, le matériau obtenu sert de produit de départ pour la croissance.

### B. Le silicium polycristallin

La structure du silicium polycristallin se situe entre celle du silicium monocristallin et celle du silicium amorphe. Elle est constituée de grains dont la taille varie de quelques centaines de nanomètres à quelques millimètres suivant les conditions d'élaboration, séparés entre eux par des joints de grains. Les joints de grains délimitant des grains d'orientations différentes constituent des zones désordonnées, souvent assimilées à du silicium amorphe. La figure 1 représente la densité d'états dans la bande interdite du silicium polycristallin, similaire à celle du silicium amorphe.

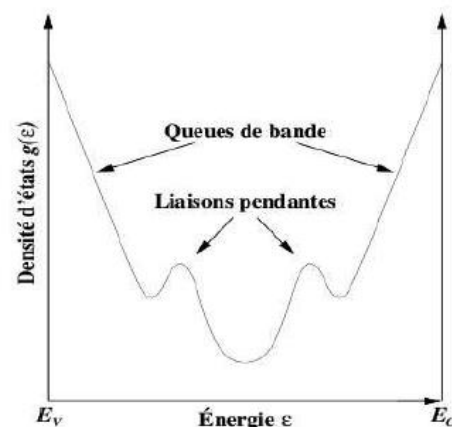


Fig. 1 : Densité d'états en échelle logarithmique dans la bande interdite du silicium polycristallin en présence de défauts ( $E_v$  : bande de valence,  $E_c$  : bande de conduction) [1].

Le désordre induit par les joints de grains et la distorsion des liaisons entre les atomes de silicium provoquent une distribution des états électroniques. Cela se traduit par l'apparition d'états localisés dans la bande interdite au niveau des bandes de conduction et de valence sous forme de queues de bande. Les liaisons pendantes (liaisons non satisfaites) introduisent quant à elles deux états électroniques au milieu du gap.

### C. Les défauts cristallographiques

- Les joints de grains

Les joints de grains délimitent des grains d'orientations différentes. Ils constituent des zones désordonnées, souvent assimilées à du silicium amorphe. Comme ce dernier, les joints de grains contiennent une forte densité de liaisons pendantes. Ces défauts introduisent des niveaux localisés dans la bande interdite qui ont pour effet de piéger les porteurs de charges minoritaires. En effet, les liaisons pendantes attirent les porteurs majoritaires.

- Les défauts intragranulaires

Parmi les défauts intragranulaires du silicium, nous distinguons les dislocations, les sous-joints et les joints de macle.

– Les dislocations sont des défauts linéaires, créées à partir d'un glissement de certains plans atomiques par rapport à d'autres ou de la distorsion de deux régions adjacentes l'une par rapport à l'autre dans la structure cristalline [2].

– Les sous-joints séparent à l'intérieur d'un cristal des zones d'orientation proche. En général, l'angle de désorientation est inférieur à 15°. Ces joints sont actifs électriquement à cause de la présence de dislocations.

Le réseau de coïncidence (CSL : Coïncidence Site Lattice) correspond aux sites atomiques communs entre deux grains. Il est possible d'attribuer aux joints de grains un indice de coïncidence en fonction  $\Sigma$  de la désorientation [3]. Plus cet indice est bas, plus le nombre de nœuds communs est grand. Il est calculé à partir de l'expression :

$$\Sigma = \text{Volume de la maille de coïncidence} / \text{Volume de la maille du réseau} \quad \text{Eq. 1}$$

Les sous-joints ont un indice de coïncidence  $\Sigma=1$ .

– Les joints de macle ont un indice de coïncidence de type  $\Sigma 3n$  et correspondent à l'interface séparant une association de cristaux en croissance simultanée. Ils divisent donc un grain en plusieurs cristallites d'orientation cristallographique proche. Les joints de macle  $\Sigma 3$  sont cohérents et sont associés aux plans (111). La désorientation entre les deux grains formant la macle est de 60°.

Ces joints de macle ne présentent pas de défauts intrinsèques tels que les dislocations. Par conséquent, ils ne sont pas ségrégatifs. Par ailleurs, Valassiades et al et Maurice [4,5] ont montré que ce type de joints de grains n'est pas actif électriquement. Les joints de macle d'ordre supérieur ( $\Sigma 9$  et  $\Sigma 27$ ) sont quant à eux incohérents et sont formés à partir des joints de macle de premier ordre si ces derniers se terminent dans les grains [6]. Dans le cas contraire, ils n'induisent pas de défauts électriquement actifs dans le grain mais peuvent diviser le grain en plusieurs cristallites. Les joints de macle  $\Sigma 9$

{112} et  $\Sigma 27$  ({110} ou {210}) sont formés respectivement par la rencontre entre deux joints de macle  $\Sigma 3$  et par la rencontre entre les joints  $\Sigma 3$  et  $\Sigma 9$  [7]. Ces joints de macle d'ordre supérieur provoquent l'apparition de dislocations et donc de liaisons pendantes, fortement ségréгатives et recombinantes [8, 9,10].

Notons qu'un recuit par irradiation laser permet de réduire les défauts intragranulaires sans modifier la taille des grains formes [11].

Les propriétés électriques du silicium polycristallin sont fonction des défauts intergranulaires mais aussi de ceux contenus dans les grains. Nous allons voir dans le prochain paragraphe l'effet de la présence d'impuretés dans la couche.

- Les défauts chimiques

Par défauts chimiques, nous entendons les impuretés incorporées dans le silicium polycristallin soit dans la chambre du dépôt, soit lors du processus de cristallisation, ou alors intentionnellement pour la passivation des défauts ou pour le dopage de la couche. Dans cette section, nous n'abordons pas les impuretés servant pour le dopage de la couche [12].

### D. Propriétés de transport des porteurs dans le silicium polycristallin

La concentration en porteurs libres (trous et électrons) dans le silicium polycristallin est inférieure à celle dans le silicium monocristallin. La figure 2 montre la variation de la résistivité du silicium polycristallin en fonction de la concentration du dopage pour différentes tailles de grains par rapport au silicium monocristallin. Sur cette figure, nous pouvons remarquer que la résistivité du silicium polycristallin est supérieure à celle du silicium monocristallin sauf pour les fortes concentrations en éléments dopants ( $\sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ) pour lesquelles les résistivités deviennent identiques. Plus les grains sont larges, plus la résistivité du Si polycristallin se rapproche de celle du monocristallin pour les faibles concentrations de dopage. [13]

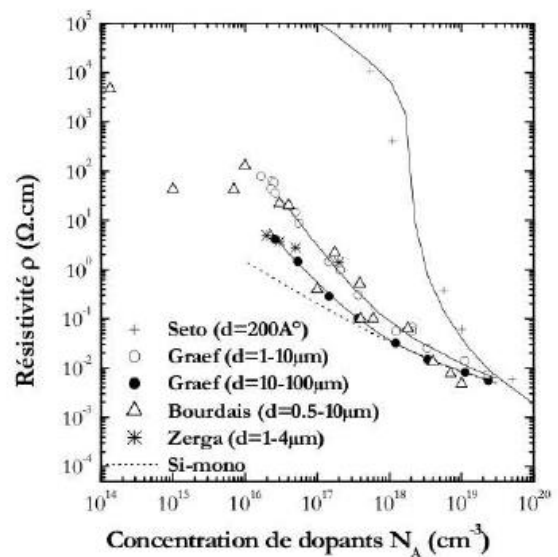


Fig. II.2 : Variation de la résistivité du silicium monocristallin et polycristallin (avec différentes tailles de grains d) en fonction du dopage : Seto [14], Graef [15,16], Bourdais [17], Zerga [18], [19].

### III. Logiciel de Simulation des caractéristiques électriques

Avec l'augmentation de la complexité dans tous les dispositifs électroniques, il est devenu nécessaire pour les ingénieurs de conception, de prédire le comportement de ces systèmes avec des modèles rigoureux. La simulation a donc été largement utilisée dans le domaine photovoltaïque afin de déterminer les paramètres les plus importants pour le fonctionnement des cellules solaires, de minimiser les pertes et d'optimiser les paramètres physiques et géométriques de la cellule en vue d'obtenir un rendement maximum. La difficulté majeure réside dans le grand nombre de paramètres influençant le rendement.

Les logiciels les plus utilisés pour la simulation numérique sont PC1D, ISE TCAD Silvaco et Afors-het. Nous avons utilisé le premier pour la simulation de notre cellule.

#### A. Logiciel PC-1D

PC-1D est un logiciel de simulation électrique commercialisé qui résout les équations décrivant le transport des électrons et des trous dans une dimension dans les dispositifs à matériaux semi-conducteurs cristallins. Ce logiciel est plus particulièrement conçu pour la simulation des dispositifs photovoltaïques.

#### B. Aperçu du logiciel

Le logiciel de simulation numérique des cellules solaire PC1D à une réputation internationale dans la recherche photovoltaïque, il a été développé à l'université « New South Wales de Sydney » en Australie ; qui est l'une des pionnières dans ce domaine. Son utilisation est très pratique, il permet de simuler n'importe quelle structure photovoltaïque, selon les matériaux disponibles en fichiers data, en jouant sur les paramètres variables (largeur, surface, dopage, etc...). Les résultats de la simulation, sont très proches des résultats expérimentaux, donc c'est un gain de temps et d'argent.

La fenêtre du logiciel PC1D est présentée sur la figure III.1, ce logiciel se divise en quatre parties, les trois premières sont pour la programmation ; où il faut introduire les paramètres du dispositif, des régions et de l'excitation. La quatrième partie concerne les résultats de la simulation.

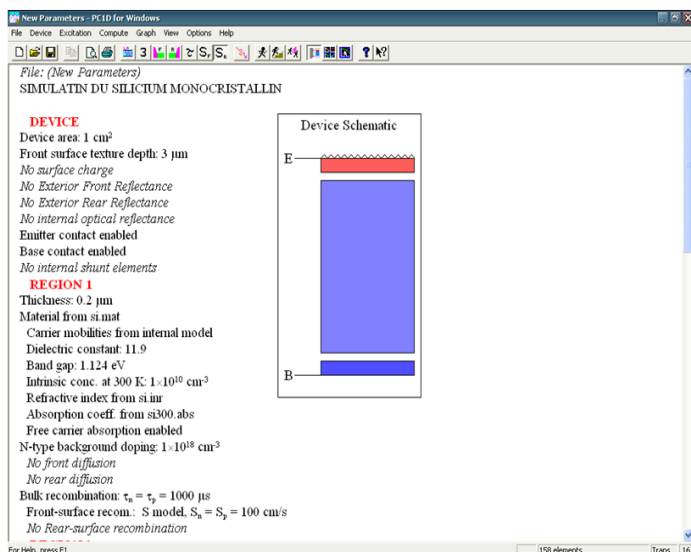


Fig. 3. Fenêtre du logiciel PC1D utilisé en simulation numérique

### IV. Simulation d'une cellule photovoltaïque à base de silicium polycristallin.

Actuellement, la recherche dans le domaine des cellules solaires à base de silicium est orientée vers le silicium polycristallin. Ceci est dû principalement à deux facteurs importants; Le faible prix de revient et le contrôle des propriétés du matériau à travers la taille, l'activité et la composition chimique des grains et l'orientation des joints des grains durant l'élaboration.

- A. Influence des paramètres de la base sur le courant de court circuit  $I_{cc}$ , la tension du circuit ouvert  $V_{co}$  et le rendement  $\eta$  :

- Les démarches suivies pour la simulation :

#### Optimisation des paramètres de la base :

Pour calculer les paramètres de la base donnant un rendement optimal on va fixer les paramètres de l'émetteur et de la couche BSF et on vari ceux de la base. Les paramètres de l'émetteur et du BSF sont tels que :

- Epaisseur de l'émetteur  $X_E=0.01 \mu\text{m}$ .
- Dopage de l'émetteur  $N_D=1.10^{18} \text{cm}^{-3}$ .
- Epaisseur du substrat  $X_{BSF}=0.02 \mu\text{m}$ .
- Dopage du substrat  $N_{BSF}=5.10^{18} \text{cm}^{-3}$ .

Les intervalles correspondent aux paramètres de la base comme suit :

- Epaisseur de la base  $X_B= [1, 15] \mu\text{m}$ .
- Dopage de la base  $N_A= [1.10^{16}, 1.10^{18}] \text{cm}^{-3}$ .

- Etude de l'influence des paramètres de la base :

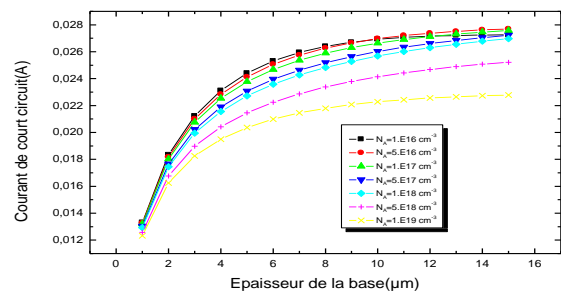


Fig. 6. Variation du courant de court circuit  $I_{cc}$  en fonction de l'épaisseur et le dopage de la base

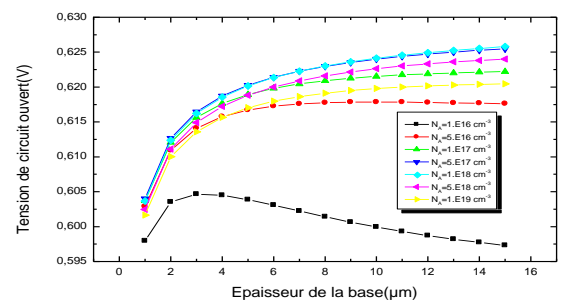


Fig. 7. Variation de la tension du circuit ouvert  $V_{co}$  en fonction de l'épaisseur et le dopage de la base

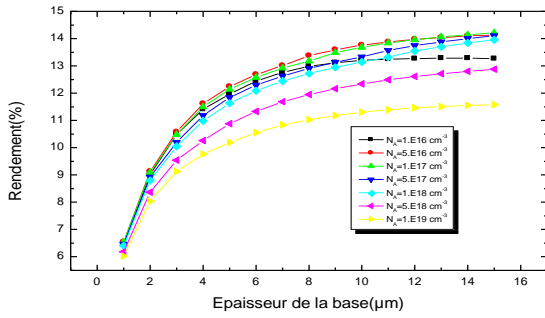


Fig. 8. Variation du rendement  $\eta$  en fonction de l'épaisseur et le dopage de la base

• Interprétation des résultats :

Dans les figures (6,7,8) nous avons présenté la variation du courant de court circuit, la tension du circuit ouvert et le rendement en fonction de l'épaisseur et le dopage de la base.

On remarque que les trois paramètres sont proportionnel aux valeurs croissantes du dopage et en déduit que cette croissance diminue la longueur de diffusion des électrons photogénérés et augmente la recombinaison mais cette variation est peu faible en fonction de l'épaisseur de la base, cette variation est remarquable pour les petites épaisseurs (de 1 jusqu'à 10 $\mu$ m) au delà de cette valeur la variation est presque constante.

La variation du rendement montre que pour une épaisseur de 15 $\mu$ m et un dopage de  $1.10^{17}cm^{-3}$  donne un rendement optimale de  $\eta=14,11\%$  et pour le même dopage et une épaisseur de 10 $\mu$ m on trouve un rendement de  $\eta=13,37\%$ . puisque cette augmentation d'épaisseur (5 $\mu$ m) ne guerre que de 0,74% on choisit l'épaisseur de 15 $\mu$ m.

- Valeurs de l'épaisseur et le dopage de la base pour obtenir un rendement optimale :
  - Epaisseur de la base : 15 $\mu$ m.
  - Dopage de la base :  $1.10^{17} cm^{-3}$

B. Influence des paramètres de l'émetteur sur le courant de court circuit  $I_{cc}$ , la tension du circuit ouvert  $V_{co}$  et le rendement  $\eta$  :

- Les démarches suivies pour la simulation :

Optimisation des paramètres de l'émetteur :

On a intérêt d'avoir une épaisseur de l'émetteur la plus faible possible, pour un bon photocourant et un meilleur rendement. Ceci s'explique par le fait que les porteurs minoritaires photogénérés par les courtes longueurs d'ondes, parviennent facilement à atteindre la zone de charge d'espace, par contre si l'épaisseur de l'émetteur est importante, ces photoporteurs se recombinaient avant même d'atteindre cette zone.

Pour faire cette étude on va fixer les paramètres de la base et de la couche BSF et varié celle de l'émetteur comme suit :

Les paramètres de la base et de la couche BSF sont tels que :

- Epaisseur de la baser  $X_B=15 \mu$ m.
- Dopage de la base  $N_A=1.10^{17} cm^{-3}$ .

- Epaisseur du substrat  $X_{BSF}=0.02\mu$ m.
- Dopage du substrat  $N_{BSF}=5.10^{18} cm^{-3}$ .

Les intervalles correspondant aux paramètres de l'émetteur sont comme suit :

- Epaisseur de l'émetteur  $X_E= [0.01, 0.1] \mu$ m.
- Dopage de l'émetteur  $N_E= [1.10^{17}, 5.10^{19}] cm^{-3}$ .
- Étude de l'influence des paramètres de l'émetteur :

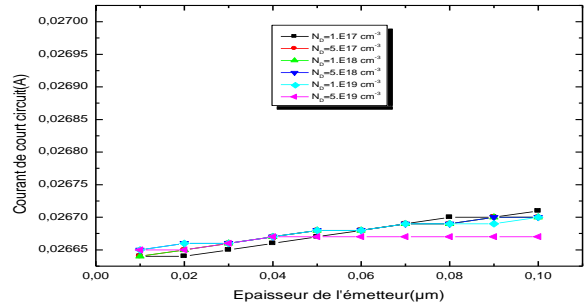


Fig. 9. Variation du courant de court circuit  $I_{cc}$  en fonction de l'épaisseur et le dopage de l'émetteur

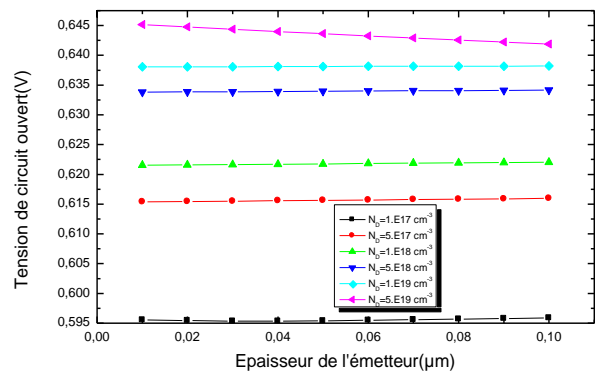


Fig. 10. Variation de la tension du circuit ouvert  $V_{co}$  en fonction de l'épaisseur et le dopage de l'émetteur

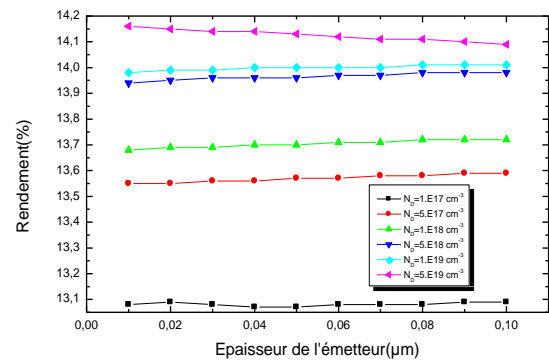


Fig. 11. Variation du rendement  $\eta$  en fonction de l'épaisseur et le dopage de l'émetteur

- Interprétation des résultats :

Comme on peut le voir sur les figures (9,10,11) l'augmentation de l'épaisseur de l'émetteur entraîne une petite augmentation sur 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.

Et d'après les résultats trouvés, l'élévation du dopage de l'émetteur entraîne une augmentation de la tension du circuit ouvert et par conséquent du rendement.

On remarque qu'on a un bon rendement photovoltaïque de  $\eta=14.02\%$  pour une épaisseur  $X_E=0.1\mu\text{m}$  et un dopage de  $5.10^{19}\text{ cm}^{-3}$ .

- Valeurs de l'épaisseur et le dopage de l'émetteur pour obtenir un rendement optimal :

- Epaisseur de l'émetteur:  $0.01\mu\text{m}$ .
- Dopage de l'émetteur:  $5.10^{19}\text{ cm}^{-3}$

Les valeurs des paramètres (épaisseur et dopage) de la base et l'émetteur donnant un rendement optimal de la cellule à base de silicium polycristallin vont montrer dans le tableau suivant :

Epaisseur de la base	$15\ \mu\text{m}$
Dopage de la base	$1.10^{17}\text{ cm}^{-3}$
Epaisseur de l'émetteur	$0.01\mu\text{m}$
Dopage de l'émetteur	$5.10^{19}\text{ cm}^{-3}$

### C. La caractéristique courant/tension :

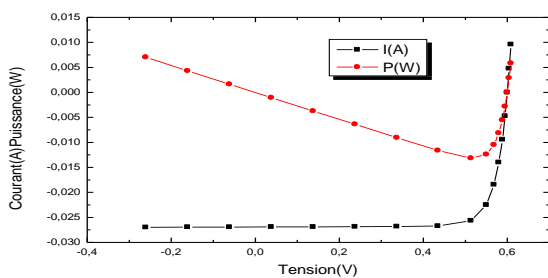


Fig. 4. La caractéristique I-V de la cellule solaire à base de silicium polycristallin

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{cc}=0.0269\text{ A} \\ P_{max}=0.01317\text{ W} \text{ par conséquence} \\ V_{co}=0.5999\text{ V} \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} \eta=13.17\% \\ FF=81.61\% \end{array} \right.$$

### D. La réponse spectrale :

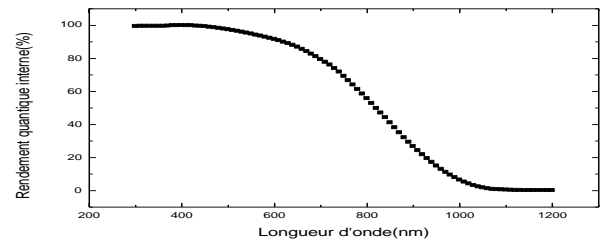


Fig. 5. Variation du rendement quantique pour une cellule solaire à base de silicium polycristallin

### E. Effet de la couche BSF :

La croissance de l'épaisseur du BSF entraîne la diminution de tous les paramètres de la cellule donc l'épaisseur du BSF doit être fine pour réduire la recombinaison dans cette couche en permettant le passage des paires électrons-trous créées au contact arrière.

- Caractéristique I(V) :

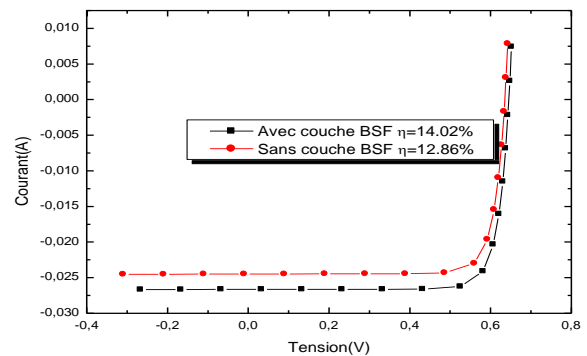


Figure IV.9 La caractéristique I-V de la cellule solaire à base de silicium polycristallin avec et sans couche BSF

- Réponse spectrale :

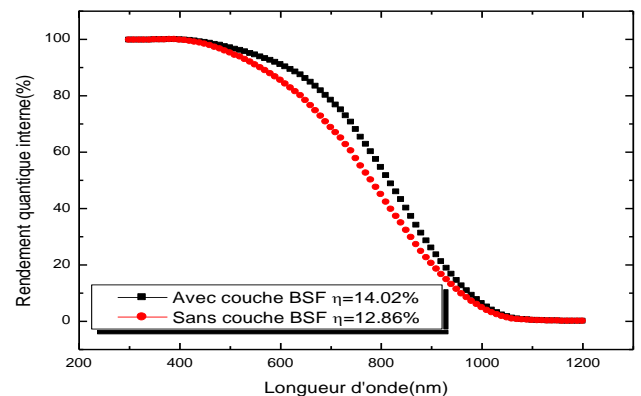


Figure IV.10. Influence de la couche BSF sur la réponse spectrale

## F. Effet de la texturisation :

La texturisation de la surface permet de diminuer la réflectivité de la cellule solaire..

- Caractéristique I(V) :

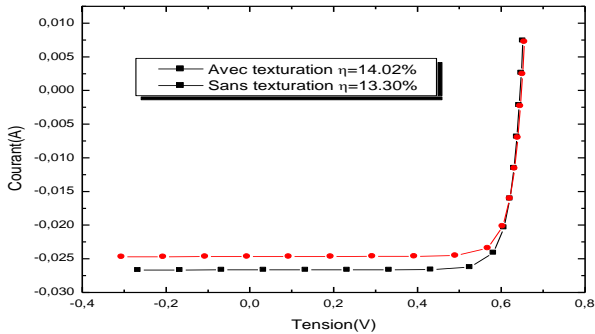


Figure IV.11 La caractéristique I-V de la cellule solaire à base de silicium polycristallin avec et sans texturation

- Réponse spectrale :

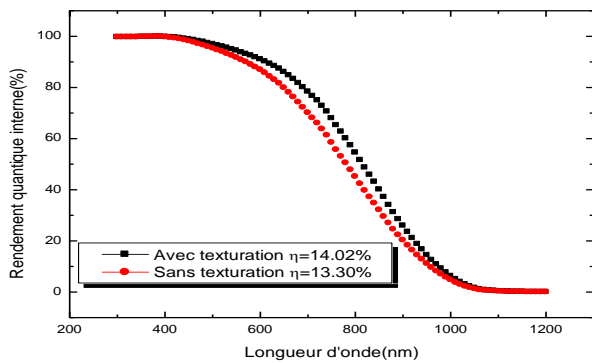


Figure IV.12 Influence de la texturation sur la réponse spectrale

## V. Conclusion:

Ce travail a pour but de présenter les résultats de la simulation numérique par PC 1D d'une cellule solaire à base de silicium polycristallin.

Dans un premier temps, nous avons simulé la cellule et donné la caractéristique (I-V) et la réponse spectrale. Après cela, nous avons fait une étude sur l'influence des différentes couches sur les performances de cette cellule telles que l'épaisseur de l'émetteur et son dopage ainsi que l'épaisseur et le dopage de la base. Les résultats de simulation ont montré que le rendement est influencé sensiblement par les paramètres de l'émetteur et de la base.

## Références

[1] P. Munster, « Silicium intrinsèque et dope in situ déposé amorphe par SAPCVD puis cristallise en phase solide », Thèse, Université de Rennes 1, Rennes, 2001.

[2] H. E. Ghitani and M. Pasquinelli, S. Martinuzzi, « Influence of dislocations on photovoltaics properties of multicrystalline silicon solar cells », Journal de Physique III 3 (1993)19411946.

[3]V. Randle, « Mechanisms of grain boundary engineering » Acta Mat.54 (2006) 17771783.

[4] O. Valassiadis, C. A. Dimitriadis, L. Papadimitriou, et al., in the Proc. of the Fifth E. C. Photovoltaic Solar Energy Conference 1983, (Greece), edited by W. Palz and F. Fittipaldi, Reidel, Dordrecht, 1043.

[5] P. L. Maurice, Colloq. Phys. Colloque Suppl. 51 (C1) (1990) C1581.

[6]L. Haji, P. Joubert, J. Stoemenos, and N. A. Economou, « Mode of growth and microstructure of polycrystalline silicon obtained by solidphase crystallization of an amorphous silicon film », J. Appl. Phys. 75 (1994) 39443952.

[7] T. Norbygaard, « Studies of Grain Boundaries in Materials Subjected to Diffusional Creep », Master Thesis of the Riso National Laboratory, Roskilde, 2002.

[8] A. Bourret and C. Anterrosches, J. Phys. Colloq. 43, Paris, 1982, CII.

[9] P. L. Maurice, Colloq. Phys. Colloque Suppl. 51 (C1) (1990) C1581.

[10] M. Stemmer and S. Martinuzzi, « Polycrystalline Semiconductors », Springer Proc. in Phys. 54, edited by J. H. Werner and H. P. Strunk, Berlin, 1991, 84.

[11] W Seifert, G Morgenstern and M Kittler, « Influence of dislocation density on recombination at grain boundaries in multicrystalline silicon » Semicond.Sci.Technol.8 (1993)16871691.

[12] J. Degoulange, I. Perichaud, C. Trassy, and S. Martinuzzi, « Multicrystalline silicon wafers prepared from upgraded metallurgical feedstock », Solar Energy Materials and Solar Cells 92 (2008) 12691273.

[13]M. E. Cowher and T. O. Sedgwick,« Chemical Vapor Deposited Polycrystalline Silicon » J. Electrochem.Soc.119 (1972) 15651570.

[14]J.Y.W. Seto « The Electrical Properties of Polycrystalline Silicon Films », J. Appl. Phys. 46 (1975) 52475254.

[15] M. W. M. Graef, L. J. Gilling, and J. Bloem, « Enhanced crystallinity of silicon films deposited by CVD on liquid layers (CVDOLL process): Silicon on thin layers in the presence of hydrogen chloride » J. Appl. Phys. 48 (1977) 39373940.

[16] M. W. M. Graef, J. Bloem, L. J. Gilling, J. R. Monkowski, and J. W. C Maes, « The influence of grain size and dopant concentration on the electrical properties of polycrystalline silicon films » Second European Conference PVSEC, Luxembourg, (1979) 6574.

[17] S. Bourdais « Etude du Depot et des Proprietes Physiques du Silicium Polycristallin obtenu par le procédé RTCVD sur Substrats de Mullite. Application aux Cellules Photovoltaïques en Couches Minces » Thèse de l'Université Louis Pasteur, Strasbourg, 1999.

[18] A. Zerga, « Caractérisation, modélisation et simulation numérique des cellules photovoltaïques a base de silicium polycristallin en couche mince déposée par RTCVD » Thèse de l'Université de Tlemcen, Algerie, 2005.

[19] E. Pihan « Elaboration et caractérisations de silicium polycristallin par cristallisation induite par aluminium de silicium amorphe : application au photovoltaïque » Thèse de l'Université Louis Pasteur, Strasbourg, 2005.