

Modélisation à 3-D de l'influence de la taille des grains et de la vitesse de recombinaison aux joints de grain sur une photopile au silicium poly cristallin sous éclairnement concentré

M. Zoungrana^{1*}, I. Zerbo¹, F.I. Barro², R. Sam³,
F. Touré², M.L. Samb² and F. Zougmore¹

¹ Laboratoire des Matériaux et Environnement, Département de Physique,
UFR-SEA, Université de Ouagadougou, 03 B.P. 7021, Burkina Faso

² Laboratoire des Semi-conducteurs et d'Energie Solaire, Département de Physique
FST/UCAD, B.P. 5005, Dakar-Fann, Sénégal

³ Institut des Sciences Exactes et Appliquées (ISEA),
Université Polytechnique de Bobo Dioulasso,
01, B.P. 1091, Bobo-Dioulasso 01, Burkina Faso

(reçu le 06 Juillet 2011 – accepté le 26 Décembre 2011)

Résumé - Dans cet article, nous présentons une modélisation à 3 dimensions de l'influence de la taille de grains, de la vitesse de recombinaison aux joints de grain et du champ électrique de gradient de concentration sur la distributions des porteurs de charge (électrons), les paramètres électriques (J_{ph} , V_{ph} , P_{el}) et électronique (S_b) d'une photopile au silicium polycristallin soumise à un éclairnement multispectral intense. En effet, la prise en compte du champ électrique de gradient de concentration dans un modèle d'étude à 3-D nous a permis non seulement d'établir de nouvelles expressions de l'équation de continuité, du photo courant, de la photo tension, de la vitesse de recombinaison en face arrière de la base et de la puissance électrique, mais aussi elle nous a permis d'étudier l'influence de la taille de grain et de la vitesse de recombinaison en face arrière de la base sur ces paramètres précédemment cités.

Abstract - In this article, we present a 3 Dimensional modelling of the influence of grains size, grain boundary recombination velocity and carrier concentration gradient electric field on carriers (electrons) distribution, electric (J_{ph} , V_{ph} , P_{el}) and electronic (S_b) parameters of a polycrystallin silicon solar cell under an intense multispectral light. Indeed, the hold in account of the electron concentration gradient electric field in a 3-D study model permitted us not only to establish new expressions of continuity equation, photocurrent, photo voltage, back surface recombination velocity, the electric power but also it permit us to study the influence of grain size and grain boundary recombination velocity on these parameters previously quoted.

Mots clés: Silicium polycristallin - Champ électrique - Eclairnement intense – Photo courant – Photo tension - Vitesse de recombinaison - Puissance électrique.

1. INTRODUCTION

La qualité d'une cellule solaire est étroitement liée à ses propriétés électriques et électroniques, caractérisées entre autres par les vitesses de recombinaison, les joints de grain, la taille des grains, le photo courant, la photo tension et la puissance électrique. De même, certains facteurs externes comme le champ électrique [1], l'intensité de l'éclairnement [2] peuvent influencer sur la qualité de la photopile. A ces facteurs externes

* zmartial@univ-ouaga.bf, zmartial2003@yahoo.fr

peuvent s'ajouter des facteurs internes, tels que: le champ électrique de gradient de concentration des porteurs dans la base [2] et le champ cristallin.

Ainsi, les nombreuses recherches menées de nos jours sur les photopiles ont pour objet la réduction des effets défavorables de ces paramètres sur leurs rendements. Pour cela, on s'emploie à trouver des technologies de fabrication ou des conditions de fonctionnement qui minimisent les facteurs limitant les performances des photopiles.

Ces facteurs sont les recombinaisons des porteurs minoritaires photo générés en volume (Shockley-Read-Hall, Auger et radiatives), et en surface, les pertes de photo courant et de photo tension, les effets d'ombrage, les pertes résistives,...

Dans cet article, nous présentons une étude à trois dimensions (3-D) de l'influence de la taille de grains, de la vitesse de recombinaison aux joints de grain et du champ électrique de gradient de concentration sur la distribution des porteurs de charge (électrons), les paramètres électriques (photo courant, photo tension, puissance électrique) et électronique (vitesse de recombinaison en face arrière) d'une photopile au silicium polycristallin sous éclairement multi spectral intense [2] (plus de 50 soleils).

L'éclairement étant intense, on a de forte photo génération dans le volume de la base et de ce fait, le modèle prend également en compte le champ électrique de gradient de concentration des électrons dans le volume de la base.

2. MODELISATION

Notre étude porte sur une photopile à base de silicium polycristallin. L'étude est faite à trois dimensions (3-D) et nous modélisons les grains comme des parallélépipèdes, chaque grain ayant une surface de base de section $g_x = g_y$ et une profondeur H comme l'indique la figure 1.

Les plans de recombinaison sont les surfaces adjacentes de deux grains et sont localisées aux positions $x = \pm \frac{g_x}{2}$ et $y = \pm \frac{g_y}{2}$, et respectivement perpendiculaires aux axes Ox et Oy dans le système de coordonnées cartésien (O, x, y, z) [3]. Les joints de grain sont perpendiculaires à la jonction et la vitesse de recombinaisons en leur sein, symbolisée par S_{gb} est supposée constante.

La cellule est excitée sur sa surface émettrice par une lumière concentrée d'intensité de plus de 50 soleils. La lumière pénètre dans la base par la jonction placée à la position $z = 0$ (jonction émetteur-base) et la limite arrière de la base est située à $z = H$ (jonction base-zone arrière).

Ainsi, le taux d'absorption de la lumière le long de la base diminue progressivement de la jonction ($z = 0$) à la zone arrière ($z = H$). Le gradient d'absorption de la lumière dans le volume de la base crée une répartition graduelle des porteurs minoritaires de charge excédentaires le long de la profondeur de la base et par delà un champ électrique.

Nous prenons également en compte, le champ électrique $E(z)$ résultant du gradient de concentration des porteurs le long de l'axe Oz dans le volume de la base.

Nous supposons une répartition uniforme des porteurs le long des axes Ox et Oy à chaque niveau de la profondeur de la base. Par conséquent, il n'existe pas de courant de conduction le long de ces axes: $E(x) = E(y) = 0$.

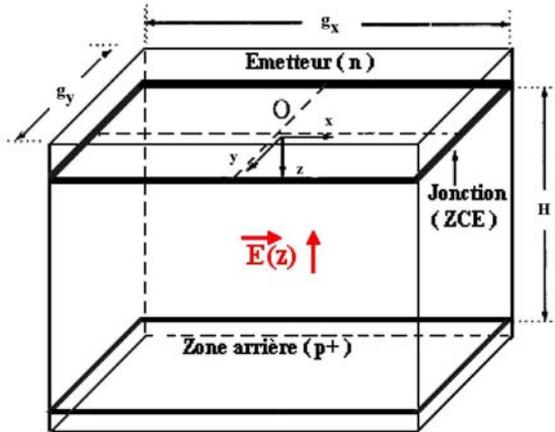


Fig. 1: Illustration d'un grain du modèle d'étude

Dans ces conditions, l'équation de continuité de la distribution des électrons le long de l'axe Oz dans un modèle à 3-D a pour expression [2, 9]:

$$D_n \times \frac{\partial^2 \delta(x, y, z)}{\partial z^2} + \mu_n \times \frac{\partial (E(z) \times \delta(x, y, z))}{\partial z} - \frac{\delta(x, y, z)}{\tau_n} = -C \times G(z) \quad (1)$$

$E(z)$ représente le champ électrique lié au gradient de concentration des porteurs le long de l'axe Oz et son expression est donnée par:

$$E(z) = \frac{D_p - D_n}{\mu_p + \mu_n} \times \frac{1}{\delta(x, y, z)} \frac{\partial \delta(x, y, z)}{\partial z} \quad (2)$$

D_n et μ_n représentent respectivement le coefficient de diffusion et la mobilité des électrons, $\delta(x, y, z)$ la densité des porteurs minoritaires photo générés en un point $M(x, y, z)$ dans la base de la photopile, τ_n la durée de vie de ces porteurs et C le niveau d'éclairement (nombre de soleil).

En prenant en compte l'expression du champ électrique de gradient de concentration donnée par l'équation (2), l'équation de distribution des porteurs de charge minoritaires excédentaires dans la base du modèle de la figure 1 est donnée par l'équation (3):

$$\frac{\partial \delta(x, y, z)}{\partial t} = \frac{1}{e} \vec{\nabla} \times \vec{J}_n + G(z) - R(z) \quad (3)$$

$G(z)$ représente le taux de génération des porteurs minoritaires à la position z :

$$G(z) = C \times \sum_{i=1}^3 a_i \times e^{-b_i z}$$

a_i et b_i sont des coefficients relatifs à la prise en compte de toutes les radiations du spectre solaire [4].

$R(z)$ est le taux de recombinaison des porteurs minoritaires à la côte z et s'écrit:

$$R(z) = \frac{\delta(x,y,z)}{\tau_n}$$

\vec{J}_n se déduit de l'équation du phénomène de transport [5] et est la somme du courant de conduction $\vec{J}_c = e \times \mu_n \times \delta_n(x,y,z) \times \vec{E}$ et du courant de diffusion $\vec{J}_d = e \times D_n \times \vec{\nabla} \delta_n(x,y,z)$: $\vec{J}_n = \vec{J}_d + \vec{J}_c$. Son expression est donnée par l'équation (4):

$$\vec{J}_n = e \times D_n \times \vec{\nabla} \delta_n(x,y,z) + e \times \mu_n \times \delta_n(x,y,z) \times \vec{E} \tag{4}$$

Le courant de conduction étant nul le long des axes Ox et Oy, on a:

$$\frac{\partial J_c}{\partial x} = \frac{\partial J_c}{\partial y} = 0 \tag{5}$$

En tirant les composantes du produit scalaire $\vec{\nabla} \times \vec{J}_n$ et en les intégrant dans l'équation de distribution {éq. (3)} en régime permanent $\partial \delta(x,y,z) / \partial t = 0$, on obtient l'équation différentielle suivante:

$$C_x \times \frac{\partial^2 \delta(x,y,z)}{\partial^2 x} + C_y \times \frac{\partial^2 \delta(x,y,z)}{\partial^2 y} + \frac{\partial^2 \delta(x,y,z)}{\partial z^2} + \frac{G(z)}{D^*} - \frac{\delta(x,y,z)}{L^{*2}} = 0 \tag{6}$$

Avec,

$$C_x = \frac{D_n (\mu_p + \mu_n)}{2D_n \times \mu_n + D_n \times \mu_p - \mu_n \times D_p} \text{ et } C_y = \frac{D_n (\mu_p + \mu_n)}{2D_n \times \mu_n + D_n \times \mu_p - \mu_n \times D_p}$$

$$D^* = \left(D_n - \mu_n \times \frac{D_p - D_n}{\mu_p + \mu_n} \right); \quad L^{*2} = \tau_n \times D^* \text{ et } R(z) = \frac{\delta(x,y,z)}{\tau_n}$$

3. SOLUTION DE L'EQUATION DE CONTINUTE

L'équation (6) est une équation différentielle aux dérivées partielles dont la solution générale est de la forme:

$$\partial \delta(x,y,z) = \sum_j \sum_k Z_{j,k}(a) \times \cos(C_x j \times x) \times \cos(C_y k \times y) \tag{7}$$

où $Z_{jk}(z)$ est la solution d'une équation différentielle du second ordre [6]:

$$Z_{jk}(z) = A_{jk} \cosh\left(\frac{z}{L_{j,k}}\right) + B_{jk} \sinh\left(\frac{z}{L_{j,k}}\right) - \sum_{i=1}^3 K_i \times e^{-b_i \cdot z} \tag{8}$$

Avec,
$$K_i = C \times \frac{a_i \times L_{jk}^2}{D_{j,k} \times [b_i^2 \times L_{j,k}^2 - 1]}; \quad \frac{1}{L_{j,k}} = \left[C_j^2 + C_j^2 + \frac{1}{L_n^2} \right]$$

$$\frac{1}{D_{j,k}} = \frac{16 \sin\left(C_{xy} \times \frac{g_x}{2}\right) \times \sin\left(C_{yk} \times \frac{g_y}{2}\right)}{D^* \times \left[\sin(C_{xj} \times g_x) + C_{xj} \times g_x\right] \times \left[\sin(C_{yk} \times g_y) + C_{yk} \times g_y\right]}$$

Les expressions des coefficients A_{jk} et B_{jk} s'obtiennent par insertion de l'équation (7) et des conditions aux limites dans l'équation différentielle (6) [6]:

$$A_{jk} = \frac{\sum_{i=1}^3 K_i \times \frac{1}{L_{j,k}} \times \left(\frac{S_f}{D^*} - bi\right) \times \exp(-bi \times H) + \beta_{j,k} \times \left(\frac{S_f}{D^*} + bi\right)}{\frac{S_f}{D^*} \times \beta_{j,k} + \frac{1}{L_{j,k}} \times \alpha_{j,k}}$$

Et

$$B_{jk} = \frac{\sum_{i=1}^3 K_i \times \frac{S_f}{D^*} \times \left(\frac{S_b}{D^*} - bi\right) \times \exp(-bi \times H) - \alpha_{j,k} \times \left(\frac{S_f}{D^*} + bi\right)}{\frac{S_f}{D^*} \times \beta_{j,k} + \frac{1}{L_{j,k}} \times \alpha_{j,k}} \tag{9}$$

Avec,

$$\alpha_{j,k} = \frac{1}{L_{j,k}} \times \sinh\left(\frac{H}{L_{j,k}}\right) + \frac{S_b}{D^*} \times \cosh\left(\frac{H}{L_{j,k}}\right) \text{ et}$$

$$\beta_{j,k} = \frac{1}{L_{j,k}} \times \cosh\left(\frac{H}{L_{j,k}}\right) + \frac{S_b}{D^*} \times \sinh\left(\frac{H}{L_{j,k}}\right)$$

La connaissance des coefficients A_{jk} et B_{jk} nous permet d'avoir une solution finale de l'équation de continuité.

4. INFLUENCE DE LA TAILLE DES GRAINS ET DE LA VITESSE DE RECOMBINAISON AUX JOINTS DE GRAIN SUR LA VITESSE DE RECOMBINAISON EN FACE ARRIERE

L'expression de la vitesse de recombinaison à la face arrière de la base (S_b) s'obtient à partir de la résolution de l'équation (10) ci-dessous [7, 8, 11]:

$$\left[\frac{\partial J_{ph}}{\partial S_f} \right]_{S_f \rightarrow \infty} = 0 \tag{10}$$

Avec $J_{ph} = q \times D^* \times \sum_j \sum_k R_{jk} \times \left[\frac{B_{jk}}{L_{j,k}} + \sum_{i=1}^3 K_i \times b_i \right]$

La solution de l'équation (10) est donnée par l'équation (11) ci-après:

$$S_b = D^* \times \frac{\sum_j \sum_k \frac{R_{jk}}{L_{j,k}^2} \sum_{i=1}^3 K_i \times \left[b_i e^{-b_i H} + \frac{1}{L_{j,k}} \times \sinh\left(\frac{H}{L_{j,k}}\right) - b_i \cosh\left(\frac{H}{L_{j,k}}\right) \right]}{\sum_j \sum_k \frac{R_{jk}}{L_{j,k}^2} \sum_{i=1}^3 K_i \times \left[b_i L_{j,k} \times \sinh\left(\frac{H}{L_{j,k}}\right) + e^{-b_i H} - \cosh\left(\frac{H}{L_{j,k}}\right) \right]}$$

4.1 Effet des recombinaisons aux joints de grain sur la vitesse S_b

La courbe de la figure 2 tracée à l'échelle semi-logarithmique met en évidence l'influence des recombinaisons aux joints de grain sur la vitesse de recombinaison en face arrière de la base.

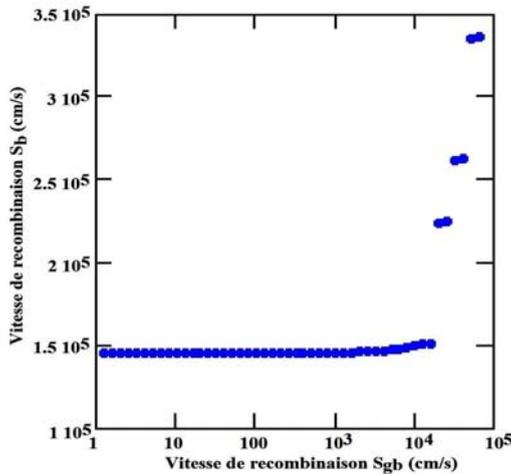


Fig. 2: Influence des recombinaisons aux joints de grain sur la vitesse de recombinaison en face arrière de la base, $g_x = g_y = 3 \times 10^3 \text{ cm}$, $C = 200 \text{ soleils}$, $H = 0.03 \text{ cm}$, $L_n = 0.02 \text{ cm}$, $D_n = 26 \text{ cm}^2/\text{s}$

On observe sur cette figure, que les faibles valeurs des recombinaisons aux joints de grain ($S_{gb} < 10^3 \text{ cm/s}$) n'ont pas d'influence sur la vitesse de recombinaison en face arrière. Par contre, au delà de $S_{gb} = 10^3 \text{ cm/s}$, on constate que la vitesse de recombinaison en face arrière de la base augmente.

Pour une photopile donnée et pour un niveau d'éclairement fixé, une augmentation de la vitesse de recombinaison aux joints de grain suppose une augmentation des joints de grain. De ce fait, les porteurs photo générés en zone arrière ont plus de pièges à surmonter avant d'atteindre la jonction et sont donc exposés à de très grandes probabilités de recombinaison aux joints de grain.

L'augmentation des recombinaisons en zone arrière avec l'augmentation des recombinaisons aux joints est donc en réalité une des conséquences de l'augmentation des recombinaisons aux joints de grain en zone arrière de la base.

4.2 Effet de la taille des grains sur la vitesse S_b

La courbe de la figure 3 illustre à l'échelle semi-logarithmique, la variation de la vitesse de recombinaison en face arrière de la base en fonction de la taille des grains.

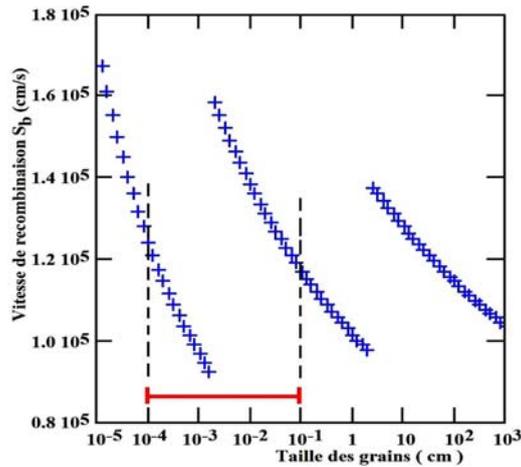


Fig. 3: Influence de la taille de grains sur la vitesse de recombinaison en face arrière de la base, $S_{gb} = 10^{-2}$ cm/s, $C = 200$ soleils, $H = 0.03$ cm, $L_n = 0.02$ cm, $D_n = 26$ cm²/s

On observe, sur cette figure 3, que la courbe décroît par intervalle avec l'augmentation de la taille des grains. Le silicium polycristallin étant notre structure de base, les tailles des grains admissibles pour notre modèle sont celles comprises entre 10^{-4} cm et 10^{-1} cm.

Nous observons sur la courbe ci-dessus, que dans la plage des tailles de grains valides pour la structure polycristalline, la vitesse de recombinaison en face arrière de la base décroît par intervalle.

Tableau 1: Intervalles de variation de la vitesse de recombinaison en face arrière de la base en fonction de la taille de grain

Vitesse S_b (cm/s)	$1,24 \times 10^5$ décroît $9,24 \times 10^4$	$1,59 \times 10^5$ décroît $1,17 \times 10^5$
Taille des grains (cm)	$10^{-4} \rightarrow 1,28 \times 10^{-3}$	$1,99 \times 10^{-3} \rightarrow 1 \times 10^{-1}$

Pour un intervalle donné, la baisse de la vitesse de recombinaison en face arrière de la base avec l'augmentation de la taille des grains est une fois de plus une manifestation des recombinaisons aux joints de grain.

En effet, lorsque nous augmentons les tailles des grains, nous passons progressivement de la structure polycristalline à la structure monocristalline.

Dans ces conditions, les grains sont peu nombreux et ont des volumes plus grands et par conséquent, un nombre moins élevé de joints de grain, ce qui réduit ainsi les possibilités de recombinaison aux joints de grain en zone arrière de la base.

5. INFLUENCE DE LA TAILLE DE GRAIN ET LA VITESSE DE RECOMBINAISON AUX JOINTS DE GRAIN SUR LA PHOTOGENERATION DES PORTEURS DANS LE VOLUME DE LA BASE

Ce paragraphe met en évidence l'influence de la taille de grain et de la vitesse de recombinaison aux joints de grain sur la distribution des porteurs de charges sur une surface carrée de section $2x$ et $2y$ près de la jonction ($z = 0.0001$ cm).

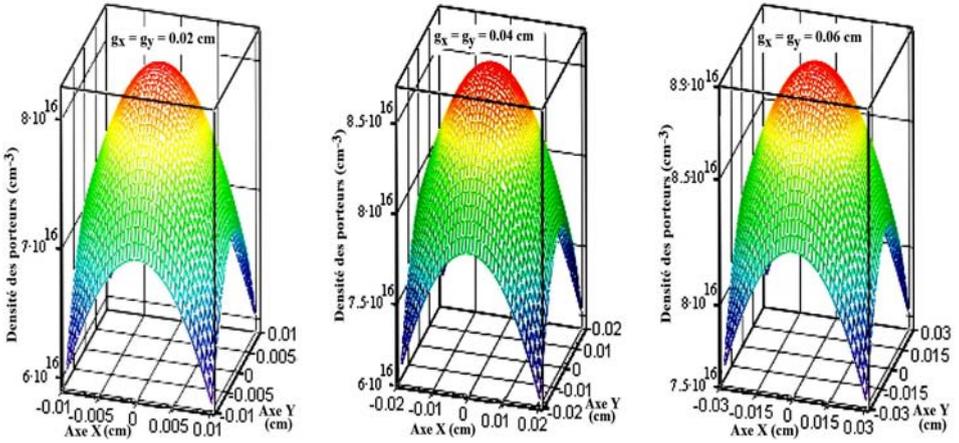


Fig. 4: Influence de la taille du grain sur la photo génération des électrons
 $S_f = 10$ cm/s, $S_b = 10^4$ cm/s, $S_{gb} = 10^2$ cm/s, $C = 200$ soleils,
 $z = 0.0001$ cm, $H = 0.03$ cm, $L_n = 0.02$ cm, $D_n = 26$ cm²/s

On observe sur les courbes de la figure 4, que quelle que soit la taille de grain, la densité des porteurs photo générés sur la surface carrée de section $2x$ et $2y$ n'est pas la même en tout point.

En effet, pour un grain donné, lorsqu'on se déplace le long des axes Ox et Oy , les courbes de densité des porteurs sont des paraboles dont les maxima se trouvent au milieu des axes. On remarque également que les densités sont plus fortes lorsqu'on se déplace vers l'intérieur du grain (centre de la surface considérée).

Ce phénomène s'explique par l'influence des recombinaisons aux joints de grain, car les bords du grain (joints de grain) sont de grands centres de recombinaison.

On observe également sur la figure 4, que lorsque la taille de grain augmente, la densité des porteurs sur la surface augmente. Ce constat est la conséquence de la baisse des recombinaisons en face arrière de la base et aux joints de grains avec l'augmentation de la taille des grains (évolution vers la structure monocristalline). C'est ce que confirme d'ailleurs la courbe de la figure 5.

En effet, on observe sur les courbes de la figure 5 que lorsque nous fixons la taille de grain et nous augmentons la vitesse de recombinaison aux joints de grain, on a une baisse de la densité de porteurs près de la jonction.

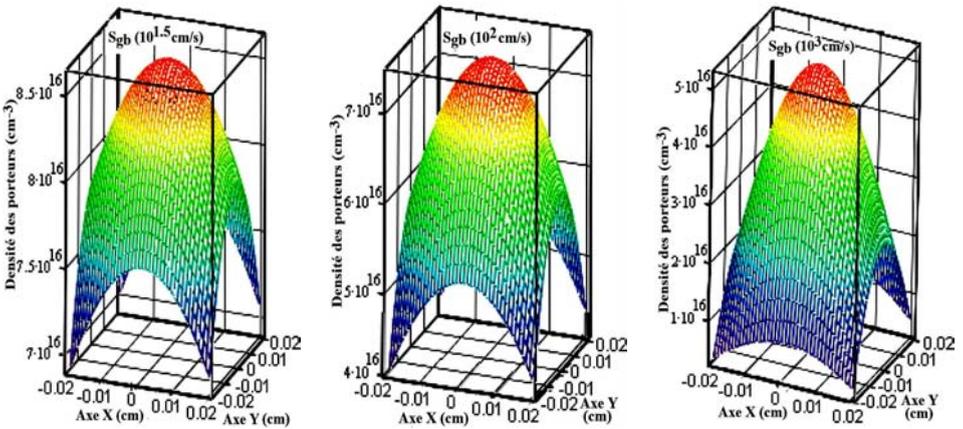


Fig. 5: Influence de la vitesse de recombinaison aux joints de grain sur la photo génération des électrons
 $S_f = 10 \text{ cm/s}$, $S_b = 10^4 \text{ cm/s}$, $C = 200 \text{ soleils}$, $z = 0.0001 \text{ cm}$,
 $g_x = g_y = 3 \times 10^{-3} \text{ cm}$, $H = 0.03 \text{ cm}$, $L_n = 0.02 \text{ cm}$, $D_n = 26 \text{ cm}^2/\text{s}$

6. INFLUENCE DE LA TAILLE DE GRAIN ET DE LA VITESSE DE RECOMBINAISON AUX JOINTS DE GRAIN SUR LE PROFIL DE LA DENSITE DES PORTEURS

La figure 6 montre que l'augmentation de la taille des grains entraîne non seulement une augmentation des maxima des densités de porteurs, mais aussi le déplacement de ces maxima vers l'intérieur de la base.

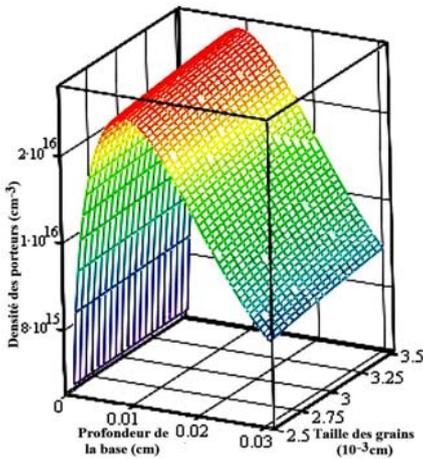


Fig. 6: $S_{gb} = 10^2 \text{ cm/s}$

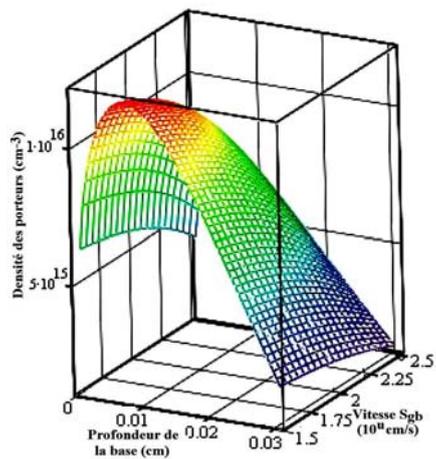


Fig. 7: $g_x = g_y = 3 \times 10^{-3} \text{ cm}$

Influence de la taille des grains et de la vitesse de recombinaison aux joints de grain sur le profil de la densité des porteurs, $S_f = 10 \text{ cm/s}$,
 $S_b = 10^4 \text{ cm/s}$, $C = 200 \text{ soleils}$, $H = 0.03 \text{ cm}$, $L_n = 0.02 \text{ cm}$, $D_n = 26 \text{ cm}^2/\text{s}$

Ces deux phénomènes illustrent non seulement une augmentation de la quantité de porteurs renvoyés à la jonction de la photopile, mais aussi une augmentation du nombre de porteurs qui diffusent à travers la jonction pour participer à la production du photo courant.

Il ressort également à travers cette figure, une augmentation de la densité des porteurs photo générés en zone arrière de la base avec l'augmentation de la taille des grains.

La figure 7 illustre l'influence des recombinaisons aux joints de grain sur le profil de la densité des porteurs. Nous observons sur cette figure, que l'augmentation des recombinaisons aux joints diminue considérablement les valeurs des densités de porteurs dans tout le volume de la base: baisse considérable des maxima des courbes de densité de porteurs et une diminution des pentes de la région à gradient positif (déplacement de ces maxima vers la jonction).

Ces deux phénomènes ont chacun pour effet de réduire considérablement le nombre de porteurs renvoyés à la jonction de la photopile pour participer à la production du photo courant. On observe également sur cette figure, que dans la troisième zone (région à gradient négatif), le nombre de porteurs photo générés en zone arrière de la base diminue avec l'augmentation de la vitesse de recombinaison aux joints de grain.

7. INFLUENCE DE LA TAILLE DE GRAIN ET DES RECOMBINAISONS AUX JOINTS DE GRAIN SUR LE PHOTOCOURANT

L'expression générale de la densité de photo courant est donnée par J. Ducas selon la relation suivante [6, 9,11].

$$J_{ph} = \frac{q \times D^*}{g_x \times g_y} \times \int_{-g_x/2}^{g_x/2} \int_{-g_y/2}^{g_y/2} \left[\frac{\partial \delta(x, y, z)}{\partial z} \right]_{z=0} dx dy \quad (12)$$

Où,

$$\delta(x, y, z) = \sum_j \sum_k Z_{j,k}(z) \times \cos(C_{x,j} \times x) \times \cos(C_{y,k} \times y)$$

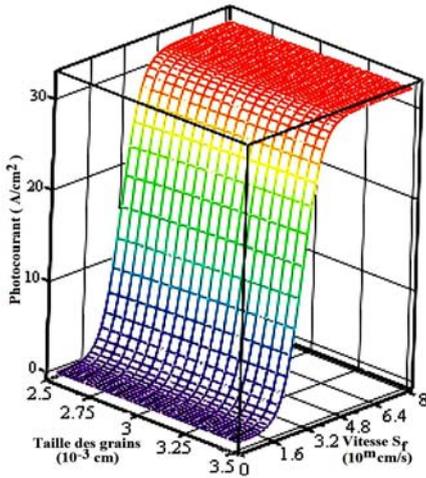
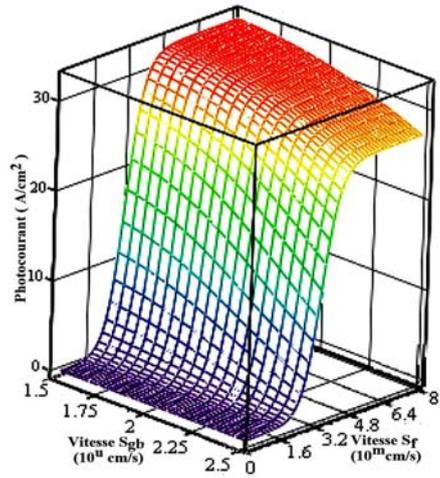
En remplaçant $\delta(x, y, z)$ et les équations (8) et (9) dans la relation (12) et en intégrant, nous obtenons l'expression du photo courant:

$$J_{ph} = q \times D^* \times \sum_j \sum_k R_{jk} \times \left[\frac{B_{jk}}{L_{j,k}} + \sum_{i=1}^3 K_i \times b_i \right] \quad (13)$$

avec,

$$R_{jk} = \frac{4 \sin(C_j \times g_x / 2) \times \sin(C_{y,k} \times g_y / 2)}{g_x \times g_y \times C_j \times C_k}$$

Les figures 8 et 9 mettent en évidence les influences respectives de la taille des grains et des recombinaisons aux joints de grain sur la densité de photo courant.

Fig. 8: $S_{gb} = 10^2$ cm/sFig. 9: $g_x = g_y = 3 \times 10^{-3}$ cm

Influence de la taille des grains et des vitesses de recombinaison

A la jonction et aux joints de grain sur le photo courant

$S_b = 10^4$ cm/s, $C = 200$ soleils, $H = 0.03$ cm, $L_n = 0.02$ cm, $D_n = 26$ cm²/s

On observe sur la figure 8, qu'au voisinage du circuit ouvert, l'augmentation de la taille des grains ne modifie pas le photo courant. Par contre, au voisinage du court-circuit (grandes valeurs de S_F), l'augmentation de la taille de grain entraîne une augmentation du photo courant.

Ce résultat, s'accorde parfaitement avec ceux observés ci-dessus: augmentation de la photo génération des électrons près de la jonction et en volume et baisse des recombinaisons en zone arrière avec l'augmentation des tailles de grain.

Il apparaît sur la figure 9, que l'augmentation de la vitesse de recombinaison aux joints de grains n'influe pratiquement pas sur le photo courant au voisinage du circuit ouvert.

Par contre au delà du circuit ouvert, l'augmentation de la vitesse de recombinaison aux joints de grain entraîne une diminution considérable du photo courant. La baisse du photo courant avec l'augmentation de la vitesse de recombinaison aux joints de grain est en accord avec non seulement la diminution de la quantité de porteurs photo générés dans la base de la photopile, mais aussi avec la baisse du nombre de porteurs qui arrivent à la jonction observé au paragraphe précédent.

8. INFLUENCE DE LA TAILLE DE GRAIN ET DES RECOMBINAISONS AUX JOINTS DE GRAIN SUR LA PHOTOTENSION

L'expression générale de la photo tension est donnée dans l'hypothèse de l'approximation de Boltzmann à trois dimensions par [6, 11]:

$$V_{ph} = V_T \times \ln \left[1 + \frac{N_B}{n_i^2} \int_{-g_x/2}^{g_x/2} \int_{-g_y/2}^{g_y/2} \partial \delta(x, y, z) dx dy \right] \tag{14}$$

Dans cette expression, V_T représente la tension thermique: $V_T = \frac{k_B \times T}{q}$, ($V_T = 26$ mV à $T = 300$ K), et n_0 la densité des électrons à l'équilibre thermodynamique: $n_0 = n_i^2 / N_B$. n_i est la concentration intrinsèque des électrons ($n_i = 10^{10}$ cm⁻³) pour le silicium. N_B est le taux de dopage à la base en impuretés ($N_B = 10^{16}$ cm⁻³) et k_B la constante de Boltzmann.

La résolution de l'équation 14 nous donne l'expression de la photo tension,

$$V_{ph} = V_T \times \ln \left[1 + \frac{N_B}{n_i^2} \times \sum_j \sum_k R_{jk} \times \left[A_{jk} - \sum_{i=1}^3 K_i \right] \right] \tag{15}$$

Les figures 10 et 11 illustrent l'influence de la taille des grains et des recombinaisons aux joints de grain sur la photo tension.

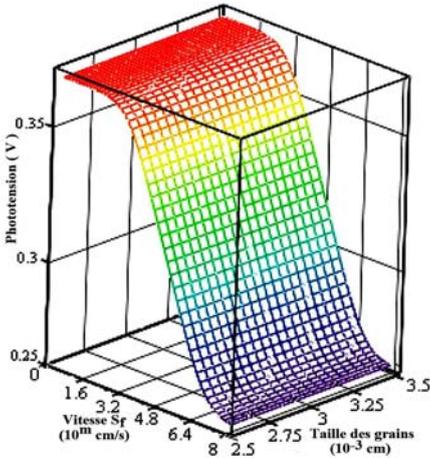


Fig. 10: $S_{gb} = 10^2$ cm/s

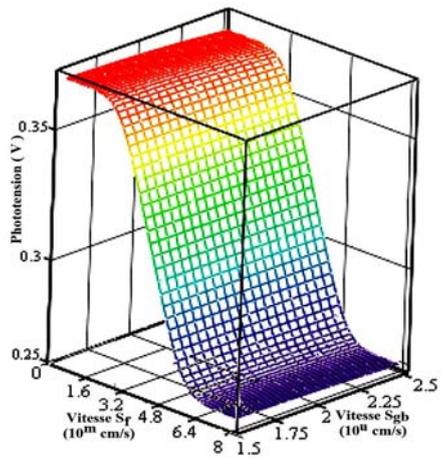


Fig. 11: $g_x = g_y = 3 \times 10^{-3}$ cm

Influence de la taille des grains et des vitesses de recombinaison A la jonction et aux joints de grain sur la photo tension

$S_b = 10^4$ cm/s, $C = 200$ soleils, $H = 0.03$ cm, $L_n = 0.02$ cm, $D_n = 26$ cm²/s

On observe sur les figures 10 et 11, qu'au voisinage du circuit ouvert (faibles valeurs de S_f), la photo tension augmente avec l'augmentation de la taille des grains et diminue avec l'augmentation des recombinaisons aux joints de grain.

Par contre, aux grandes valeurs des vitesses de recombinaison à la jonction, la photo tension est indépendante de l'augmentation de la taille des grains et des recombinaisons

aux joints de grain. Ces résultats sont étroitement liés à l'influence des tailles de grain et des recombinaisons aux joints de grain sur la distribution et la recombinaison des porteurs en volume.

On observe également sur ces deux courbes, qu'avec la prise en compte du champ électrique de gradient de concentration, la photo tension de court-circuit n'est pas nulle, mais plutôt de l'ordre de 0,25 V pour un niveau d'éclairement de 200 soleils.

9. INFLUENCE DE LA TAILLE DE GRAIN ET DES RECOMBINAISONS AUX JOINTS DE GRAIN SUR LA PUISSANCE ELECTRIQUE DELIVREE PAR LA PHOTOPILE A LA CHARGE EXTERIEURE

L'expression de la puissance électrique recueillie par la charge extérieure est le produit du photo courant qui traverse la charge J_{phc} et de la photo tension V_{ph} .

Le photo courant de charge est la différence entre le photo courant total de la photopile J_{ph} et du courant de diode J_d qui traduit les effets de shunt et qui est caractérisé par la vitesse de recombinaison intrinsèque S_{f0} . [10]

$$P_{el} = J_{phc} \times V_{ph} = (J_{ph} - J_d) \times V_{ph} \tag{16}$$

$$\text{avec, } J_d = q \times S_{f0} \times \left[1 + \frac{N_B}{n_i^2} \times \int_{-g_x/2}^{g_x/2} \int_{-g_y/2}^{g_y/2} \left[\frac{\partial \delta(x, y, z)}{\partial z} \right]_{z=0} dx dy \right] \tag{17}$$

Les figures 12 et 13 illustrent l'influence de la taille des grains et des vitesses de recombinaisons à la jonction et aux joints de grain sur la puissance.

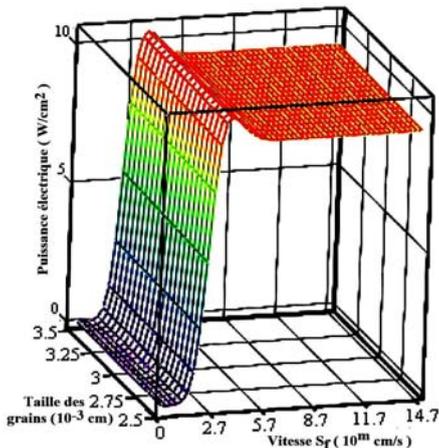


Fig. 12: $S_{gb} = 10^2$ cm/s

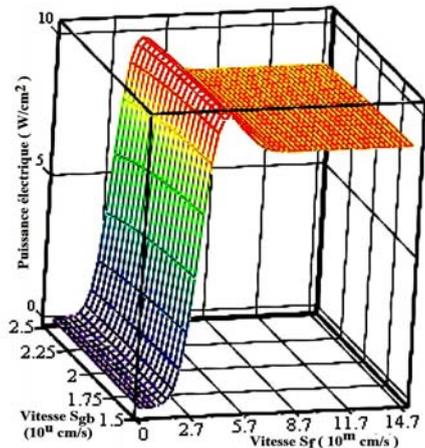


Fig. 13: $g_x = g_y = 3 \times 10^{-3}$ cm

Influence de la vitesse de recombinaison à la jonction et du champ électrique de gradient de concentration sur la puissance électrique de la photopile

$S_b = 10^4$ cm/s, $C = 200$ soleils, $H = 0.03$ cm, $L_n = 0.02$ cm, $D_n = 26$ cm²/s

Il apparaît sur les figures 12 et 13, que la puissance électrique délivrée par la base de la photopile est nulle au voisinage du circuit ouvert ($S_f \rightarrow 0$). Cependant, on observe qu'avec la prise en compte du champ électrique de gradient de concentration sous éclairage intense de la photopile, la puissance au delà du point de fonctionnement intermédiaire (valeurs maximales) est différente de zéro et constante au voisinage du court-circuit ($S_f \rightarrow \infty$).

Ce phénomène s'explique par les résultats du paragraphe précédent où il est ressorti que dans les mêmes conditions d'étude, la photo tension de court-circuit est différente de zéro.

Les courbes des figures 14 et 15, mettent en évidence respectivement l'influence de la taille des grains et de la vitesse de recombinaison aux joints de grain sur la puissance électrique.

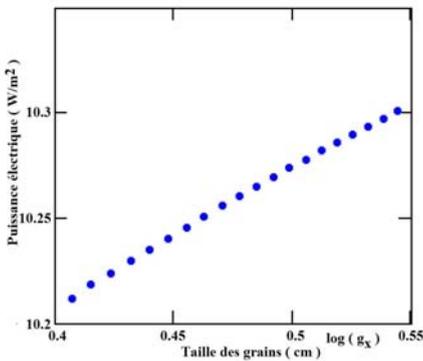


Fig. 14: $S_{gb} = 10^2$ cm/s

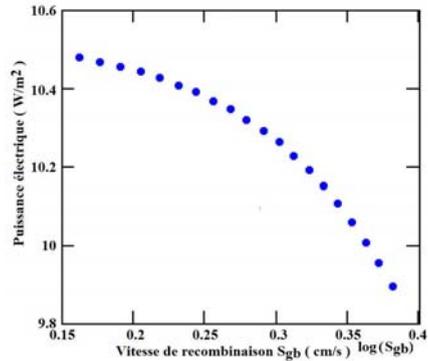


Fig. 15: $g_x = g_y = 3 \times 10^{-3}$ cm

Influence de la taille des grains et de la vitesse de recombinaison à la jonction sur la puissance électrique de la photopile

$$S_b = 10^4 \text{ cm/s}, C = 200 \text{ soleils}, H = 0.03 \text{ cm}, L_n = 0.02 \text{ cm}, D_n = 26 \text{ cm}^2/\text{s}$$

Conformément aux résultats précédents, il apparaît sur la figure 14 que la puissance électrique délivrée par la base de la photopile augmente avec l'augmentation de la taille des grains. De même, il ressort sur la figure 15, que la puissance électrique de la photopile diminue avec l'augmentation des recombinaisons aux joints de grain.

10. CONCLUSION

Dans ce travail, nous avons mené une caractérisation à trois dimensions (3-D) d'une photopile sous éclairage multi spectral intense. Ce modèle prend en compte le champ électrique de gradient de concentration des électrons dans la base en raison du mode d'éclairage intense de la photopile.

Notre modèle nous a conduits à une nouvelle expression de l'équation de continuité des électrons dans la base d'une photopile au silicium poly cristallin. Sur la base de l'équation de continuité, nous avons pu tirer de nouvelles expressions de la densité des porteurs de charges, de la vitesse de recombinaison en face arrière de la base, du photo courant, de la photo tension et de la puissance électrique de la photopile et nous avons

étudié l'influence de la taille des grains et de la vitesse de recombinaison à la jonction sur ces paramètres cités précédemment.

Il est ressorti de cette étude que des vitesses de recombinaison aux joints de grain inférieures à 10^3 cm/s ($S_{gb} < 10^3$ cm/s) n'ont pas d'influence sur la vitesse de recombinaison en face arrière de la base et qu'au delà de 10^3 cm/s, la vitesse de recombinaison en face arrière augmente. De même, il est apparu que la vitesse de recombinaison en face arrière diminue avec l'augmentation des tailles de grain.

Nous avons également mis en évidence que la présence de porteurs dans la région proche de la jonction augmente avec l'augmentation de la taille des grains et diminue avec l'augmentation des recombinaisons aux joints de grain. Ces deux phénomènes se soldent par une augmentation du photo courant, de la photo tension et de la puissance électrique de la photopile avec l'augmentation de la taille des grains et une diminution de ces derniers avec l'augmentation des recombinaisons aux joints de grain.

Il ressorti enfin qu'avec la prise en compte du champ électrique de gradient de concentration des porteurs, la photo tension de court-circuit n'est pas nulle, mais plutôt de l'ordre de 0.25 V pour un niveau d'éclairement de 200 soleils et que cela fait apparaître également une non nullité de la puissance électrique au voisinage du court-circuit.

NOMENCLATURE

A_{jk}, B_{jk} Constantes de $Z_{jk}(z)$	$G(z)$ Taux de génération $f(z)$
a_i, b_i Coefficients tabulés de l'irradiation	H Epaisseur de la base de la photopile
C_j, C_k Solutions des équations transcendentes	J_{phc} Densité de photo courant qui traverse la charge extérieure
D_n, D_p Coefficient de diffusion des porteurs minoritaires dans la base	J_{phv} Densité de photo courant
D^* Coefficient de diffusion des électrons avec la prise en compte du champ E	J_{cc} Densité de photo courant de court-circuit
E Intensité du champ électrique de gradient de concentration	N_B Taux de dopage de la base de la photopile
C Concentration de la lumière	$g_x = g_y$ Taille des grains
P_{el} Puissance électrique	k Constante de Boltzmann
L^* Longueur de diffusion des électrons avec la prise compte du champ E	L_n Longueur de diffusion des porteurs minoritaires dans la base
q Charge élémentaire de l'électron	V_{ph} Photo tension
S_f Vitesse de recombinaison à la jonction	S_b Vitesse de recombinaison - face arrière
S_{f0} Vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction	S_{gb} Vitesse de recombinaisons aux joints de grain
$Z_{jk}(z)$ Densité des porteurs minoritaires photo générés le long de z	$\delta(x, y, z)$ Densité des porteurs minoritaires photo générés dans la base
V_T Tension thermique	μ_p, μ_n Mobilité des trous et des électrons
τ_n Durée de vie moyenne des porteurs minoritaires dans la base	n_i Concentration intrinsèque du matériau silicium

REFERENCES

- [1] S. Erel, 'The Effect of Electric and Magnetic Fields on the Operation of a Photovoltaic Cell', Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 71, N°2, pp. 273 – 280, 2002.
- [2] F. Pelanchon, C. Sudre and Y. Moreau, 'Solar Cells under Intense Light Concentration: Numerical and Analytical Approaches', 11th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Montreux, Suisse, 12-16 October, 1992.
- [3] B. Ba, M. Kane and J. Sarr, 'Modelling Recombination Current in Polysilicon Solar Cell Grain Boundaries', Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 80, N°2, pp. 143 – 154, 2003.
- [4] S.N. Mohammad, 'An Alternative Method for the Performance Analysis of Silicon Solar Cells', Journal of Applied Physics, Vol. 61, N°2, pp. 767 – 772, 1987.
- [5] Y. Betsler, D. Ritter, G. Bahir, S. Cohen and J. Sperling, 'Measurement of the Minority Carrier Mobility in the Base of Heterojunction Bipolar Transistors using Magnetotransport Method', Applied Physics Letters, Vol. 67, N°13, pp. 1883 – 1884, 1995.
- [6] J. Dugas, '3D Modelling of a Reverse Cell Made with Improved Multicrystalline Silicon Wafers', Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 32, N°1, pp. 71 – 88, 1994.
- [7] F.I. Barro, E. Nanéma, A. Werème, F. Zougmore and G. Sissoko, 'Bulk and Surface Recombination Parameters Measurement in Silicon Double Sided Surface Field Solar Cell under Constant White Bias Light', Proceedings of 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Munich, Germany, pp. 368 – 371, 2001.
- [8] F.I. Barro, E. Nanéma, A. Werème, F. Zougmore and G. Sissoko, 'Recombination Parameters Measurement in Silicon Double Sided Surface Field Solar Cell', Journal des Sciences, Vol. 1, N°1, pp. 76 – 80, 2001.
- [9] M. Zoungrana, M. Thiame, A. Dioum, S. Raguilnaba and G. Sissoko, '3-D Study of a Bifacial Silicon Solar Cell under Intense Light Concentration and under External Constant Magnetic Field: Recombination and Electric Parameters Determination', Proceedings of the 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Milan, Italy, pp. 447 – 453, 2007.
- [10] A. Dieng, N. Thiam, M. Zoungrana, S. Diallo, F.I. Barro and G. Sissoko, 'Etude à 3-D d'une Photopile Polycristalline au Silicium: Influence de la Taille de Grain et de la Vitesse de Recombinaison aux Joints de Grain sur les Paramètres Electriques', Journal des Sciences, Vol. 9, N°1, pp. 51 – 63, 2009.
- [11] M.L. Samb, M. Zoungrana, R. Sam, M.M. Dione, M.M. Deme and G. Sissoko, 'Etude en Modélisation à 3-D d'une Photopile au Silicium en Régime Statique Placée dans un Champ Magnétique et sous Eclairage Multi Spectral: Détermination des Paramètres Electriques', Journal des Sciences, Vol. 10, N°4, pp. 23 – 38, 2010.