

Modélisation à 3D des effets des pertes d'électrons à la jonction d'une cellule PV au silicium polycristallin sur ses performances

[3D modelling of the effects of electrons losses at the junction of a polycrystalline silicon PV cell on its performance]

Ramatou Saré¹, Mamoudou Saria¹, Dioari Ulrich Combari², Idrissa Sourabié³, Vinci De Dieu Bokoyo Barandja⁴, Martial Zoungrana¹, and Issa Zerbo¹

¹Laboratoire d'Energies Thermiques REnouvelables (L.E.T.RE), Ecole Doctorale Sciences et Technologies, Université Joseph KI-ZERBO, Ouagadougou, Burkina Faso

²Ecole Polytechnique de Ouagadougou, Ouagadougou, Burkina Faso

³Laboratoire de Chimie Analytique, de Physique Spatiale et Énergétique (L@CAPSE), Ecole Doctorale Sciences et Technologies, Université Norbert ZONGO, Koudougou, Burkina Faso

⁴Département de Physique, Université de Bangui, Bangui, Central African Republic

Copyright © 2023 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: This work investigated, using a 3-D modelling, the influence of electrons losses on the performance of a polycrystalline silicon PV cell.

The electrons transport equations have been solved by taking into account the rate of electrons lost at the junction (Sf_0) to find the expression of the electrons' density which allowed to derive the expressions of the electrical parameters (J_{ph} , V_{ph} , P) then those of the performance parameters (η , R_{sh}) of the PV cell grain. Then we analyzed, from a numerical simulation, the effects of the rate of electrons lost at the junction (Sf_0) on the performance parameters (η , R_{sh}) found from the curves of output power (P_T) -diffusion velocity (Sf_j).

Results of simulation showed that, in open circuit, there is a leakage current at the junction of the PV cell grain whose density increases from 0 mA.cm⁻² à 58.80 mA.cm⁻² resulting in a drastic drop in the shunt resistance from infinity to 4.273 Ω .cm² and a drop in the conversion efficiency of 34.376%. Considering the manufacturers' standards, 20% drop in efficiency, so for $Sf_0 = 1,790 \times 10^4$ cm.s⁻¹ the PV cell is degraded.

KEYWORDS: PV cell, degradation, leakage current, loss of electrons, performance.

RESUME: L'objectif de ce travail est d'étudier, à 3-D, l'influence des pertes d'électrons sur les performances d'une cellule PV au silicium polycristallin.

Les équations de transport des électrons ont été résolues en prenant en compte le taux d'électrons perdus à la jonction (Sf_0) afin d'obtenir l'expression de la densité des électrons qui a conduit à la détermination des expressions des paramètres électriques (J_{ph} , V_{ph} , P) puis celles des paramètres de performance (η , R_{sh}) du grain de cellule PV. Ensuite nous avons analysé, à partir d'une simulation numérique, les effets du taux d'électrons perdus à la jonction (Sf_0) sur les paramètres de performance (η , R_{sh}) obtenus à partir des courbes de puissance électrique transmise en fonction de la vitesse de diffusion P_T (Sf_j).

Les résultats des simulations ont montré qu'en circuit ouvert on a une fuite de courant à la jonction du grain de cellule PV dont la densité croît de 0 mA.cm⁻² à 58,80 mA.cm⁻² entraînant une chute drastique de la résistance shunt de l'infini à 4,273 Ω .cm²

et une baisse du rendement de conversion de 34,376%. En considérant les normes des fabricants, 20% de baisse du rendement, alors pour $Sf_0 = 1,790 \times 10^4 \text{ cm.s}^{-1}$ la cellule PV est dégradée.

MOTS-CLEFS: Cellule PV, dégradation, courant de fuite, perte d'électrons, performance.

1 INTRODUCTION

La problématique de l'énergie est au centre de l'actualité mondiale. Avec une consommation et une demande croissantes liées au développement industriel, la production de l'énergie est une question centrale de notre société avec des implications économiques, géopolitiques, environnementales et sociales.

La production mondiale d'énergie est largement dominée par les énergies fossiles non renouvelables et responsables de la majorité des émissions de gaz à effet de serre avec pour conséquence le réchauffement climatique. Ainsi, pour réduire la part des énergies fossiles dans le mix énergétique afin de lutter contre le dérèglement climatique, il est nécessaire d'aller vers une transition énergétique soutenable avec une part croissante de l'électricité produite à partir des énergies non carbonées au rang desquelles l'énergie solaire PV.

La majorité des recherches du secteur photovoltaïque se focalise sur l'amélioration du rendement d'une façon optimale en se basant sur la réduction maximale des différentes pertes. Car tout au long de leur durée de vie et en fonction de leur localisation, les modules/cellules PV sont exposés à différentes conditions météorologiques telles que le rayonnement solaire, l'humidité, la température, la chaleur, le vent, les fortes pluies, la neige, la grêle..., qui accentuent à moyen ou à long terme leur vieillissement et/ou dégradation entraînant donc une baisse de leurs performances [1]. Les fabricants considèrent qu'un module photovoltaïque est dégradé lorsque sa puissance de sortie atteint un niveau inférieur à 80 % de sa valeur initiale [2,3].

Si la chaleur peut diminuer la puissance d'un module/cellule PV conventionnel, la corrosion due à l'humidité peut aussi le dégrader et le rendre inefficace car elle provoque une augmentation des courants de fuite et une perte de performance de la cellule PV.

Plusieurs chercheurs se sont intéressés à l'étude du vieillissement et/ou dégradation des cellules/modules PV.

Alves dos Santos et al. [4] ont montré dans leurs travaux que le vieillissement et la dégradation de modules/ cellules PV, qui dépendent du type de technologie, ont un impact négatif sur le rendement de conversion et les résistances parasites (R_s , R_{sh}). Les auteurs ont expliqué que la baisse de la résistance shunt (R_{sh}) était due à l'existence de chemins parallèles à travers la jonction et qui sont la cause d'importantes pertes de porteurs donnant naissance à un courant shunt ou courant de fuite. Polverini et al. [5] ont étudié le vieillissement de modules/cellules PV et ses effets sur leur performance. Ils ont mesuré les paramètres électriques des modules/cellules PV et ont montré que le vieillissement de modules PV au silicium polycristallin, fonctionnant sur site réel pendant vingt (20) ans, a entraîné une baisse de la puissance électrique maximale P_{max} . Quant à Doumane et al. [6], ils ont simulé l'évolution des paramètres électriques d'un module PV au silicium monocristallin en fonction du vieillissement (temps) en utilisant le modèle de circuit équivalent à une diode. Les résultats de simulation, réalisées dans les conditions STC et sur 25 ans de fonctionnement du système, ont montré une dégradation de la résistance shunt (R_{sh}) due à l'altération des propriétés électriques de la jonction p-n du silicium et des électrodes.

L'ensemble des travaux cités ont montré que le vieillissement et/ou la dégradation des cellules/modules PV entraîne une baisse du rendement de conversion et de la résistance shunt. La baisse de la résistance shunt est due à l'altération des propriétés électriques de la jonction p-n du silicium ce qui donne lieu à l'existence de chemins parallèles à travers cette jonction occasionnant d'importantes pertes de porteurs ou encore de courant de fuite ou courant shunt. Aussi, la plupart des travaux de modélisation du phénomène de vieillissement et/ou dégradation des cellules/modules PV ont été effectués en considérant soit le circuit équivalent du modèle à une diode d'une cellule PV soit celui à deux diodes. Or ces modèles précédemment cités ne permettent pas d'étudier l'impact des pertes de porteurs à la jonction de cellules PV alors que nous l'avons déjà fait dans une approche à une dimension (1D) [7]. Compte tenu des limites de la modélisation à une dimension (1D), la présente étude est menée à trois dimensions (3D) afin d'étudier l'influence des pertes d'électrons sur les performances d'une cellule PV au silicium polycristallin.

Dans un premier temps, nous avons résolu les équations de transport (équation de densité des courants et équation de continuité) qui ont conduit à la détermination des expressions des paramètres électriques (J_{ph} , V_{ph} , P) et celles des paramètres de performance (η , R_{sh}) du grain de cellule PV en fonction du taux d'électrons perdus à la jonction Sf_0 .

Ensuite, nous avons analysé à partir d’une simulation numérique les effets du taux d’électrons perdus à la jonction (S_{f_0}) sur les paramètres de performance (η , R_{sh}) obtenus à partir des courbes de puissance électrique en fonction de la vitesse de diffusion P (S_{f_j}).

2 ETUDE THÉORIQUE

Cette étude est menée dans la base d’un grain de cellule PV au silicium polycristallin de type $n^+ - p - p^+$.

Les solides polycristallins, comme le silicium polycristallin, sont constitués par l’association de morceaux de monocristaux de très petites tailles (typiquement de dimensions micrométriques). Ces monocristaux sont séparés par des zones de transition qui sont les joints de grains. Les joints de grain sont de grands centres de recombinaison des porteurs de charge, qui influencent les paramètres macroscopiques et microscopiques de la cellule PV [8]. Ainsi, le silicium polycristallin qui a une forme particulière et une structure désordonnée est constitué de grains de tailles et de formes diverses. La réalité physique de cette structure étant différente de sa réalité géométrique et même analytique [8] alors pour les besoins de la modélisation nous avons considéré des grains de forme parallélépipédique bien qu’il existe des grains de forme cubique et cylindrique.

Alors, la cellule PV au silicium polycristallin est modélisée comme un arrangement régulier de grains de forme parallélépipédique connectés entre eux en parallèle [9]. Ainsi, les grains sont arrangés de manière régulière de sorte que le grain soit considéré comme une structure élémentaire de la cellule PV. Le grain ayant les mêmes caractéristiques électroniques et électriques que la cellule PV [9, 10] alors l’étude est menée sur un grain et les résultats seront extrapolés à la cellule PV au silicium polycristallin.

La figure 1 présente les différentes étapes qui permettent d’extraire un grain de la cellule PV polycristalline en passant du modèle réel au modèle idéal.

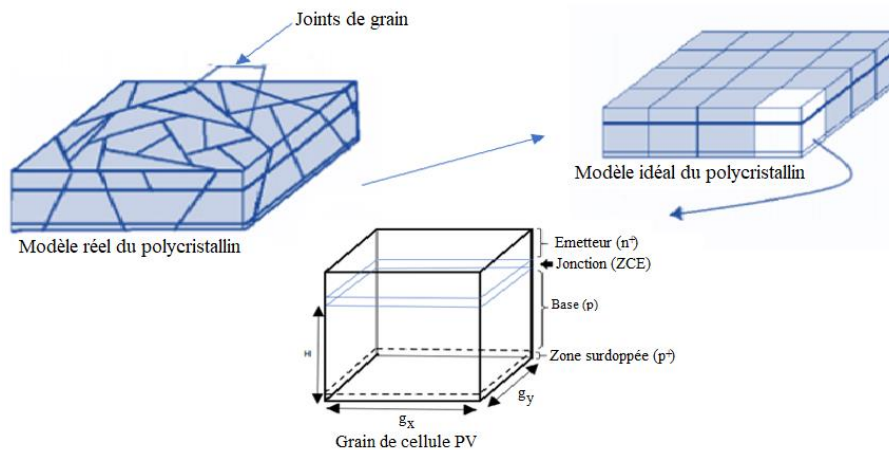


Fig. 1. Modélisation d’une cellule PV polycristalline

L’étude est menée dans la base du grain de la cellule PV en considérant les mêmes hypothèses suivantes:

- Les recombinaisons aux faces latérales du grain de la cellule PV sont caractérisées par les vitesses de recombinaisons aux joints de grain (S_{gb}) constantes et indépendantes de l’éclairement [10].
- La base faiblement dopée par rapport à l’émetteur est quasi-neutre, ainsi le champ cristallin dans la base du grain de cellule PV sera négligé [11].
- La concentration des électrons photogénérés dans la base de type p est très faible par rapport au taux de dopage de cette base. Par conséquent le niveau d’injection est faible.
- La génération et la distribution des électrons dans la base sont uniformes suivants les axes (O_x) et (O_y).
- L’épaisseur de la base est $H = 0,03$ cm et les valeurs des paramètres électroniques sont:

$$S_b = 10^4 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}, S_{gb} = 10^3 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}, L_n = 0,015 \text{ cm}, D_n = 26 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}, g_x = g_y = 1,5 \times 10^{-2} \text{ cm}$$

2.1 EQUATION DE DENSITÉ DE COURANT DES ELECTRONS

Le grain d'une cellule PV au silicium polycristallin soumis à un éclairage constant est représenté à la Figure 2.

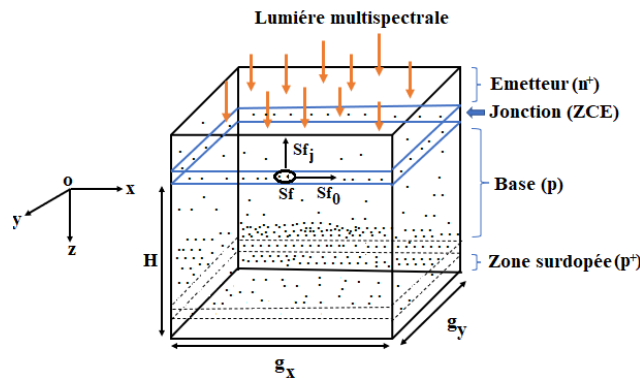


Fig. 2. Grain de cellule PV au silicium polycristallin sous éclairage solaire constant

Lorsque le grain de la cellule PV au silicium polycristallin est éclairé par une lumière solaire, les photons d'énergie suffisante ($0,4 \mu\text{m} < \lambda < 1,1 \mu\text{m}$) sont absorbés. En supposant que le rendement quantique interne est égal à l'unité ($\text{IQE} = 1$), chaque photon absorbé génère une paire électron-trou dans la base de type p. La génération des électrons en excès est non uniforme dans la base, le long de l'axe Oz, avec un maximum d'électrons créés loin de la jonction ce qui entraîne l'existence d'un gradient de concentration des électrons. En supposant que la génération des électrons excédentaires est uniforme dans le plan (xOy), le gradient positif de concentration des électrons donne lieu à une diffusion de ces électrons des régions de forte concentration vers celles de faible concentration le long de l'axe Oz. Ainsi, les électrons diffusent vers la jonction ($z = 0$) où leur gradient de concentration est positif. Ceux qui atteignent la jonction y sont collectés et le paramètre électronique (S_f) qui représente la vitesse dynamique à la jonction, est le taux d'électrons collectés à la jonction. Quant aux électrons qui diffusent vers les bords du grain ($x = g_x/2$; $y = g_y/2$) et ceux générés près des bords du grain, ils y sont recombinés avec un taux de recombinaison appelé vitesse de recombinaison aux joints de grain (S_{gb}). Les électrons générés près de la face arrière du grain de la cellule PV au silicium polycristallin ($z = H$), où leur gradient de concentration est négatif, y sont également recombinés et leur taux de recombinaison est appelé vitesse de recombinaison à la face arrière (S_b). Lors de leur diffusion, une partie des électrons en excès est recombinée dans le volume de la base et ces recombinaisons sont prises en compte par la longueur de diffusion (L_n) ou la durée de vie (τ_n). Aussi, la diffusion des électrons en excès dans la base de type p du grain de la cellule PV crée un courant de diffusion.

Tous les électrons collectés à la jonction la traverseront s'il n'y a pas de pertes d'électrons à cette jonction; c'est le cas d'une cellule PV idéale. Par contre, pour une cellule PV non idéale, certains électrons collectés à la jonction y seront perdus, donnant naissance à un courant shunt ou un courant de fuite et les autres électrons traverseront la jonction. Le paramètre électronique (S_{f_0}) est utilisé pour quantifier la perte d'électrons à la jonction du grain de la cellule PV. Ainsi, S_{f_0} est la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction, c'est aussi le taux d'électrons perdus à la jonction p-n. La fuite d'électrons à la jonction p-n donne naissance à un courant shunt ou courant de fuite. Ce courant de fuite entre les deux matériaux p et n du grain de la cellule PV est pris en compte dans le modèle de circuit à une diode de la cellule PV par une résistance shunt. Ainsi, la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction est liée à la qualité de la jonction p-n. Quant au taux d'électrons qui traversent la jonction et diffusent à travers la charge externe, il est caractérisé par le paramètre (S_{f_j}) appelé vitesse de diffusion. La vitesse de diffusion (S_{f_j}) est liée au point de fonctionnement du grain de la cellule PV. Ainsi, le taux d'électrons collectés à la jonction p-n, vitesse dynamique à la jonction (S_f), est la somme des électrons qui traverseront la jonction et ceux qui seront perdus à cette même jonction comme l'indique la Figure 2.

L'Equation (1) donne l'expression du taux d'électrons collectés à la jonction p-n:

$$S_f = S_{f_j} + S_{f_0} \quad (1)$$

Le mouvement des électrons excédentaires observé dans la base du grain de cellule PV donne naissance à un courant de diffusion. L'Equation (2) donne l'expression du courant de diffusion par unité de surface ou densité de courant de diffusion:

$$\vec{j}_n = eD_n \vec{\nabla} \delta(x, y, z) \quad (2)$$

Dans l'équation (2), est le vecteur densité de courant de diffusion des électrons; $\delta(x, y, z)$ est la densité des électrons; D_n est le coefficient de diffusion des électrons et e est la charge élémentaire de l'électron.

Les composantes du vecteur densité de courant suivant les différents axes du repère sont:

$$\vec{j}_n = eD_n \vec{\nabla} \delta(x, y, z) \quad (3)$$

Les composantes du vecteur densité de courant obtenu à l'Equation (3), nous permettront d'établir l'équation de l'évolution dans le temps et dans l'espace des électrons excédentaires générés dans la base du grain de cellule PV appelée équation de continuité.

2.2 EQUATION DE CONTINUITÉ DES ÉLECTRONS

L'équation de continuité des électrons est une équation qui régit les variations de la concentration des électrons et permet d'analyser ainsi le mouvement de ces électrons. En régime statique, la variation temporelle de la concentration des électrons étant nulle alors l'équation de continuité des électrons générés dans la base p du grain de cellule PV est donnée par l'Equation (4):

$$\frac{1}{e} \vec{\nabla} \cdot \vec{j}_n + G_n(z) - \frac{\delta(x, y, z)}{\tau_n} = 0 \quad (4)$$

La grandeur physique $G_n(z)$ représente le taux de génération des paires électrons-trous suivant l'axe (Oz) croissant. Dans le cas d'un éclairage multispectral, $G_n(z)$ est donnée par l'Equation (5):

$$G_n(z) = \sum_{i=1}^3 a_i \exp(-b_i z) \quad (5)$$

Avec a_i et b_i des constantes obtenues à partir des valeurs tabulées du rayonnement solaire et de la dépendance du coefficient d'absorption du silicium avec la longueur d'onde dans les conditions standards Air Mass 1,5.

En remplaçant le vecteur densité de courant par les expressions de ses différentes composantes, Equation (3) dans l'Equation (4) et en effectuant les différentes dérivées partielles, nous obtenons l'équation de continuité donnée par l'Equation (6):

$$\frac{\partial^2 \delta(x, y, z)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \delta(x, y, z)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \delta(x, y, z)}{\partial z^2} - \frac{\delta(x, y, z)}{L_n^2} = -\frac{G_n(z)}{D_n} \quad (6)$$

L'Equation (6) est une équation aux dérivées partielles du second ordre avec second membre dont la solution générale est donnée par l'Equation (7):

$$\delta(x, y, z, S_{f_j}, S_{f_0}) = \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \left[A_{jk} \cosh\left(\frac{z}{L_{j,k}}\right) + B_{jk} \sinh\left(\frac{z}{L_{j,k}}\right) - \sum_{i=1}^3 K_{j,k} \exp(-b_i z) \right] \cos(C_{jx} x) \cos(C_{ky} y) \quad (7)$$

Avec:

$$K_{jk} = \frac{a_i L_{jk}}{D_{jk} \left[(b_i L_{jk})^2 - 1 \right]}, \quad L_{jk} = \left(C_{jx}^2 + C_{ky}^2 + \frac{1}{L_n^2} \right)^{-1/2}, \quad D_{jk} = \left[\frac{16 \sin\left(\frac{C_{xj} g_x}{2}\right) \sin\left(\frac{C_{yk} g_y}{2}\right)}{D_n \left[(C_{xj} g_x + \sin(C_{xj} g_x)) (C_{yk} g_y + \sin(C_{yk} g_y)) \right]} \right]^{-1}$$

Les valeurs des constantes C_{xj} et C_{yk} sont obtenues en résolvant les équations relatives aux conditions aux limites aux joints de grain.

Dans le paragraphe (2.1), l'analyse du mouvement des électrons dans la base du grain de cellule PV a montré que les électrons diffusent vers les bords du grain de la cellule PV respectivement en $x = +g_x/2$ et $x = -g_x/2$ d'une part et d'autre part en $y = +g_y/2$ et $y = -g_y/2$. Ainsi, nous obtenons deux courants respectivement suivant l'axe (Ox) et suivant l'axe (Oy) dont les expressions sont données par les Equations (8.1) et (8.2):

$$2D_n \left[\frac{\partial \delta(x, y, z)}{\partial x} \right]_{x=\pm \frac{g_x}{2}} = \mp S_{gb} \delta \left(\pm \frac{g_x}{2}; y; z \right) \quad (8.1)$$

$$2D_n \left[\frac{\partial \delta(x, y, z)}{\partial y} \right]_{y=\pm \frac{g_y}{2}} = \mp S_{gb} \delta \left(x; \pm \frac{g_y}{2}; z \right) \quad (8.2)$$

Les équations précédentes peuvent se mettre sous la forme des Equations (9.1) et (9.2):

$$\left[\frac{\partial \delta(x, y, z)}{\partial x} \right]_{x=\pm \frac{g_x}{2}} = \mp \frac{S_{gb}}{2D_n} \delta \left(\pm \frac{g_x}{2}; y; z \right) \quad (9.1)$$

$$\left[\frac{\partial \delta(x, y, z)}{\partial y} \right]_{y=\pm \frac{g_y}{2}} = \mp \frac{S_{gb}}{2D_n} \delta \left(x; \pm \frac{g_y}{2}; z \right) \quad (9.2)$$

Les Equations (9.1) et (9.2) montrent que le gradient de concentration des électrons est positif en bordure de grain aux positions $x = -g_x/2$ et $y = -g_y/2$ tandis qu'il est négatif aux positions $x = +g_x/2$ et $y = +g_y/2$.

Le coefficient deux (2) qui se trouve dans les équations précédentes prend en compte la diffusion des électrons des deux côtés du grain le long de chaque axe (Ox) et (Oy) car la recombinaison des électrons se fait vers les bordures du grain de la cellule PV [10].

La résolution des équations (9.1) et (9.2) permet d'obtenir les équations transcendantes (10.1) et (10.2):

$$C_{xj} \tan \left(C_{xj} \cdot \frac{g_x}{2} \right) = \frac{S_{gb}}{2D_n} \quad (10.1)$$

$$C_{yk} \tan \left(C_{yk} \cdot \frac{g_y}{2} \right) = \frac{S_{gb}}{2D_n} \quad (10.2)$$

La détermination des coefficients C_{xj} et C_{yk} se fait graphiquement à partir des Equations (10.1) et (10.2).

Quant aux constantes A_{jk} et B_{jk} de l'Equation (7), elles sont obtenues en résolvant les équations relatives aux conditions aux limites à la jonction émetteur-base ($z = 0$) et à la face arrière ($z = H$) de la base du grain de cellule PV. En effet, le mouvement des électrons dans la base le long de l'axe Oz a montré que le gradient de concentration des électrons est positif à la jonction ($z=0$) et négatif à la face arrière de la base ($z=H$).

A LA JONCTION ÉMETTEUR-BASE (z=0)

$$\frac{\partial \delta(x, y, z)}{\partial z} \Big|_{z=0} = \frac{(Sf_0 + Sf_j)}{D_n} \delta(x, y, 0) \quad (11.1)$$

A LA FACE ARRIÈRE DE LA BASE (z=H):

$$\left. \frac{\partial \delta(x, y, z)}{\partial z} \right|_{z=H} = -\frac{S_b}{D_n} \delta(x, y, H) \tag{11.2}$$

Les expressions des constantes A_{jk} et B_{jk} sont données par les Equations (12.1) et (12.2):

$$A_{j,k}(Sf_j, Sf_0) = \sum_{i=1}^3 K_i \frac{\frac{1}{L_{jk}} \left(\frac{S_b}{D_n} - b_i \right) e^{-b_i H} + \beta_{jk} \left(\frac{(Sf_0 + Sf_j)}{D_n} + b_i \right)}{\frac{1}{L_{jk}} \alpha_{jk} + \frac{(Sf_0 + Sf_j)}{D_n} \beta_{jk}} \tag{12.1}$$

$$B_{j,k}(Sf_j, Sf_0) = \sum_{i=1}^3 K_i \frac{\frac{(Sf_0 + Sf_j)}{D_n} \left(\frac{S_b}{D_n} - b_i \right) e^{-b_i H} - \alpha_{jk} \left(\frac{(Sf_0 + Sf_j)}{D_n} + b_i \right)}{\frac{1}{L_{jk}} \alpha_{jk} + \frac{(Sf_0 + Sf_j)}{D_n} \beta_{jk}} \tag{12.2}$$

Quant aux expressions des constantes α_{jk} et β_{jk} , elles sont données par les Equations (12.3) et (12.4):

$$\alpha_{jk} = \frac{1}{L_{j,k}} \sinh\left(\frac{H}{L_{j,k}}\right) + \frac{S_b}{D_n} \cosh\left(\frac{H}{L_{j,k}}\right) \tag{12.3}$$

$$\beta_{jk} = \frac{1}{L_{j,k}} \cosh\left(\frac{H}{L_{j,k}}\right) + \frac{S_b}{D_n} \sinh\left(\frac{H}{L_{j,k}}\right) \tag{12.4}$$

La détermination de la solution de l'équation aux dérivées partielles, Equation (6), qui satisfait aux conditions aux limites nous permettra de déterminer les paramètres électriques tels que la densité de photocourant et la phototension.

2.3 DENSITÉ DE PHOTOCOURANT

En appliquant la loi de Fick à la jonction du grain de cellule PV, nous obtenons l'expression de la densité de photocourant donnée par l'Equation (13.1):

$$J_{ph}(Sf_j, Sf_0) = \frac{eD_{jk}}{g_x g_y} \int_{-\frac{g_x}{2}}^{\frac{g_x}{2}} \int_{-\frac{g_y}{2}}^{\frac{g_y}{2}} \left(\frac{\partial \delta(x, y, z, Sf_j, Sf_0)}{\partial z} \right)_{z=0} dx dy \tag{13.1}$$

Avec g_x et g_y , les dimensions du grain de cellule PV au silicium polycristallin respectivement suivant les axes (Ox) et (Oy).

La résolution de l'équation (13.1) permet d'obtenir l'Equation (13.2) :

$$J_{ph}(Sf_j, Sf_0) = eD_{jk} \sum_j \sum_k R_{j,k} \left[\frac{B_{j,k}(Sf_j, Sf_0)}{L_{jk}} + \sum_{i=1}^3 K_i b_i \right] \tag{13.2}$$

Avec:
$$R_{jk} = \frac{4 \sin\left(\frac{C_{xj} g_x}{2}\right) \sin\left(\frac{C_{yk} g_y}{2}\right)}{g_x g_y C_{xj} C_{yk}}$$

En remplaçant l'Equation (11.1) dans l'Equation (13.1), la densité de photocourant s'écrit :

$$J_{ph}(Sf_j, Sf_0) = J_{ph}(Sf_j, Sf_0)_T + J_{ph}(Sf_j, Sf_0)_F \quad (13.3)$$

Ainsi, la densité de photocourant de fuite à la jonction du grain de cellule PV est donnée par l'Equation (13.4) :

$$J_{ph}(Sf_j, Sf_0)_F = \frac{eD_{jk}Sf_0}{D_n} \sum_j \sum_k R_{j,k} \left[A_{j,k}(Sf_j, Sf_0) - \sum_{i=1}^3 K_i \right] \quad (13.4)$$

Quant à la densité de photocourant transmis à une charge extérieure, elle est donnée par l'Equation (13.5) :

$$J_{ph}(Sf_j, Sf_0)_T = \frac{eD_{jk}Sf_j}{D_n} \sum_j \sum_k R_{j,k} \left[A_{j,k}(Sf_j, Sf_0) - \sum_{i=1}^3 K_i \right] \quad (13.5)$$

La densité de courant de court-circuit est donnée par l'Equation (13.6) :

$$J_{cc} = \lim_{Sf_j \rightarrow +\infty} J_{ph}(Sf_j, Sf_0) = eD_{jk} \sum_j \sum_k \frac{R_{jk}}{L_{jk}} \sum_{i=1}^3 K_i \left[\frac{(S_b - D_n b_i) e^{-b_i H}}{D_n \beta_{jk}} - \frac{\alpha_{jk}}{\beta_{jk}} + b_i L_{jk} \right] \quad (13.6)$$

L'Equation (13.6) montre que la densité de courant de court-circuit ne dépend ni de Sf_j ni de Sf_0 donc c'est une constante.

La densité de courant en circuit ouvert est donnée par l'Equation (13.7) :

$$J_{co}(Sf_0) = \lim_{Sf_j \rightarrow 0} J_{ph}(Sf_j, Sf_0) = eD_{jk} \sum_j \sum_k \frac{R_{jk}}{L_{jk}} \sum_{i=1}^3 K_i \left[\frac{\frac{Sf_0}{D_n} \left(\frac{S_b}{D_n} - b_i \right) e^{-b_i H} - \alpha_{jk} \left(\frac{S_b}{D_n} - b_i \right)}{\frac{1}{L_{jk}} \alpha_{jk} + \frac{Sf_0}{D_n} \beta_{jk}} + b_i L_{jk} \right] \quad (13.7)$$

L'Equation (13.7) montre que la densité de courant en circuit ouvert est une fonction de Sf_0 .

2.4 PHOTOTENSION

L'expression de la phototension, Equation (14.1), est obtenue en appliquant la loi de Boltzmann.

$$V_{ph}(Sf_j, Sf_0) = V_T \ln \left(1 + \frac{N_B}{n_i^2} \int_{-\frac{g_x}{2}}^{\frac{g_x}{2}} \int_{-\frac{g_y}{2}}^{\frac{g_y}{2}} \delta(x, y, z, Sf_j, Sf_0)_{z=0} dx dy \right) \quad (14.1)$$

avec V_T la tension thermique ($V_T = 26\text{mV}$ à $T = 300\text{K}$), N_B le taux de dopage en atomes accepteurs dans la base ($N_B = 10^{16} \text{cm}^{-3}$) et n_i la concentration des porteurs intrinsèques à l'équilibre thermodynamique ($n_i = 10^{10} \text{cm}^{-3}$).

La phototension de circuit ouvert est donnée par l'Equation (14.2) :

$$V_{co}(Sf_0) = \lim_{Sf_j \rightarrow 0} V_{ph}(Sf_j, Sf) = V_T \ln \left[1 + \frac{1}{n_0} \sum_j \sum_k R'_{jk} \sum_{i=1}^3 K_i \left[\frac{\frac{1}{L_{jk}} \left(\frac{S_b}{D_n} - b_i \right) e^{-b_i H} + \beta_{jk} \left(\frac{Sf_0}{D_n} + b_i \right)}{\frac{1}{L_{jk}} \alpha_{jk} + \frac{Sf_0}{D_n} \beta_{jk}} \right] - 1 \right] \quad (14.2)$$

$$\text{Avec: } R'_{jk} = \frac{4 \sin\left(\frac{C_{xj} g_x}{2}\right) \sin\left(\frac{C_{yk} g_y}{2}\right)}{C_{xj} C_{yk}}$$

L'Equation (14.2) montre que la tension de circuit ouvert est une fonction de Sf_0 .

2.5 PUISSANCE ÉLECTRIQUE

Généralement, une cellule PV éclairée est considérée comme un générateur de courant qui débite un courant continu J_{ph} [12] avec une tension V_{ph} à ses bornes. Ainsi, la puissance électrique P_{ph} produite par une cellule PV est le produit du photocourant et de la phototension. Son expression est par l'équation (15.1) :

$$P_{ph}(Sf_j, Sf_0) = J_{ph}(Sf_j, Sf_0) \cdot V_{ph}(Sf_j, Sf_0) \quad (15.1)$$

En utilisant l'Equation (13.3), on montre que la puissance électrique s'écrit sous la forme suivante :

$$P_{ph}(Sf_j, Sf_0) = P_{ph}(Sf_j, Sf_0)_T + P_{ph}(Sf_j, Sf_0)_F \quad (15.2)$$

avec $P_{ph}(Sf_j, Sf_0)_T$ la puissance électrique transmise à une charge extérieure et $P_{ph}(Sf_j, Sf_0)_F$ la puissance électrique perdue à la jonction.

2.6 DÉTERMINATION DES PARAMÈTRES DE PERFORMANCE

Les paramètres de performance (rendement de conversion et résistance shunt) sont des paramètres électriques qui permettent d'évaluer les performances d'une cellule PV.

L'expression du rendement de conversion est donnée par l'Equation (16.1) en considérant une puissance lumineuse incidente de 100 mW/cm^2 dans les conditions standards AM 1,5.

$$\eta(Sf_0) = \frac{P_{\max}(Sf_0)}{100 \text{ mW.cm}^{-2}} \quad (16.1)$$

P_{\max} est la puissance électrique maximale obtenue à partir des courbes de puissance électrique transmise en fonction de la vitesse de diffusion $P_T(Sf_j)$.

Quant à l'expression de la résistance shunt, elle est donnée par l'Equation (16.2) :

$$R_{sh}(Sf_0) = \frac{P_{co}(Sf_0)}{J_{co}^2(Sf_0)} = \frac{J_{co}(Sf_0) \cdot V_{co}(Sf_0)}{J_{co}^2(Sf_0)} = \frac{V_{co}(Sf_0)}{J_{co}(Sf_0)} \quad (16.2)$$

P_{co} et J_{co} sont respectivement la puissance électrique et la densité de courant perdues à la jonction alors que V_{co} est la tension de circuit ouvert.

3 RÉSULTATS ET DISCUSSION

A partir des expressions des paramètres électriques (densité de photocourant, phototension et puissance électrique) obtenues, au paragraphe précédent, après la résolution des équations de transport à 3 D, nous effectuerons une simulation afin d'analyser l'impact des pertes d'électrons à la jonction du grain de cellule PV sur ses performances.

3.1 EFFET DES PERTES D'ÉLECTRONS SUR LA DENSITÉ DES ÉLECTRONS

Dans ce point, nous étudierons successivement la densité des électrons en circuit ouvert puis en court-circuit.

3.1.1 DENSITÉ DES ÉLECTRONS EN CIRCUIT OUVERT

Nous présentons à la Figure 3 la densité des électrons en excès dans la base du grain de cellule PV en fonction de la profondeur de cette base et pour différentes valeurs de Sf_0 .

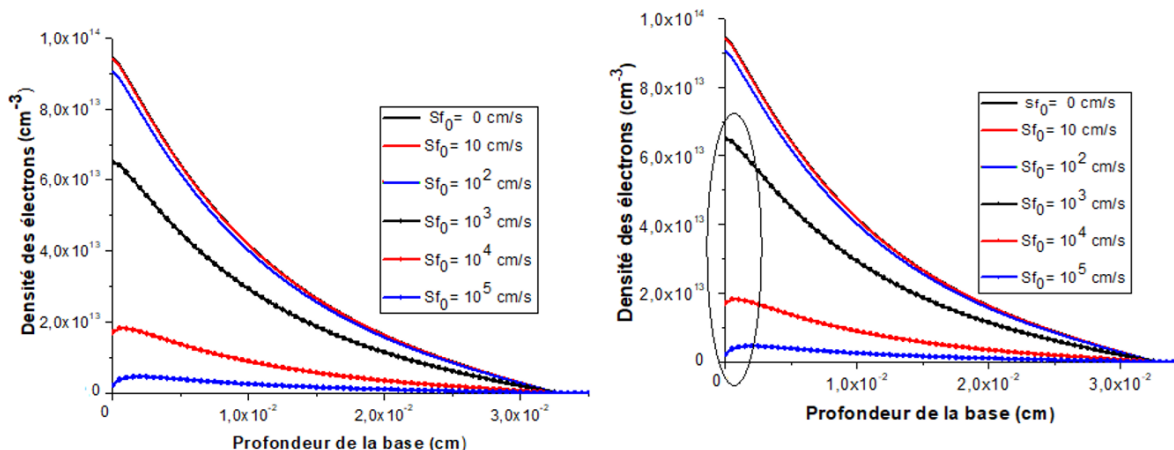


Fig. 3.a.

Fig. 3.b.

Fig. 3. Densité des électrons en fonction de la profondeur de la base pour différentes valeurs de Sf_0 ($Sf_j = 0 \text{ cm.s}^{-1}$)

Pour Sf_0 variant de 0 à 10 cm.s^{-1} les courbes sont confondues et présentent la même allure avec un gradient de densité des électrons négatif à la jonction. Par contre, pour $Sf_0 \geq 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$, les différentes courbes présentent également la même allure (partie encadrée de la Figure 3.b) avec un gradient de densité des électrons positif à la jonction suivi d'un gradient nul et d'un gradient négatif.

Seul le gradient des électrons positif près de la jonction permet aux électrons situés dans cette zone de traverser la jonction et donner naissance à un courant de circuit ouvert appelé courant de fuite. Ce courant de fuite est d'autant plus important que le gradient positif des électrons l'est également. Ainsi, pour Sf_0 variant de 10^3 à 10^5 cm.s^{-1} , on observe un gradient positif des électrons au voisinage de la jonction de plus en plus important indiquant que le courant de fuite sera de plus en plus important. La fuite de courant en circuit ouvert à travers la jonction a pour conséquence la diminution de la densité des électrons stockés à la jonction ce qui entrainera une baisse de la tension de circuit ouvert avec l'augmentation des pertes d'électrons à la jonctions (Sf_0).

3.1.2 DENSITÉ DES ÉLECTRONS EN COURT-CIRCUIT

La Figure 4 présente la densité des électrons en excès dans la base du grain de cellule PV en fonction de la profondeur de cette base et pour différentes valeurs de Sf_0 .

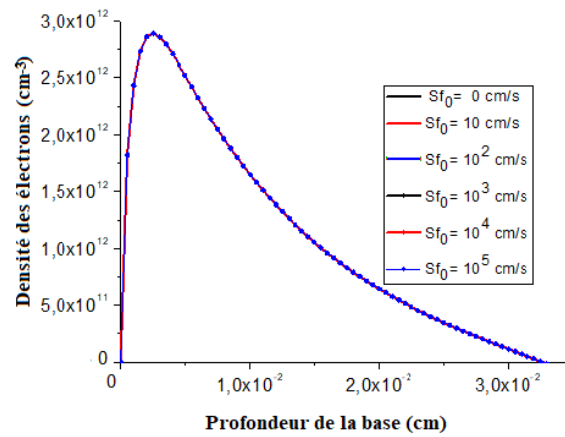


Fig. 4. Densité des électrons en fonction de la profondeur de la base pour différentes valeurs de Sf_0 ($Sf_j = 8 \times 10^8 \text{ cm. s}^{-1}$)

On remarque que, quel que soit la valeur de Sf_0 , les courbes de la Figure 4 sont confondues et par conséquent la densité de courant de court-circuit sera identique. En effet, en fonctionnement en court-circuit, la résistance de charge tend vers zéro ($R_{ch} \rightarrow 0$) et par conséquent le flux d'électrons qui la traverse est maximal et tend vers l'infini ($Sf_j \rightarrow +\infty$). Ainsi, les pertes à la jonction sont masquées par l'important flux d'électrons qui traversent la jonction du grain de cellule PV pour donner naissance au courant ($Sf_j \gg Sf_0$).

Les courbes de densité d'électrons, toutes confondues, présentent trois zones: une première zone à gradient d'électrons positif au voisinage de la jonction, une deuxième zone à gradient nul à une certaine profondeur dans la base puis une troisième zone à gradient négatif qui s'étend jusqu'à la face arrière de la base. Au voisinage de la jonction où le gradient des électrons est positif, les électrons situés dans cette zone traversent la jonction et sont collectés par le circuit extérieur alors que dans la zone à gradient négatif, les électrons sont recombinés soit en volume soit à la face arrière de la base.

3.2 EFFET DES PERTES D'ÉLECTRONS SUR LA DENSITÉ DE COURANT

L'Equation (13.2) permet de tracer en fonction de la vitesse de diffusion les courbes de densité de photocourant total alors que l'Equation (13.7) permet de tracer la courbe de densité de photocourant de fuite en fonction de la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction.

L'allure des différentes courbes de densité de photocourant est présentée à la Figure 5.

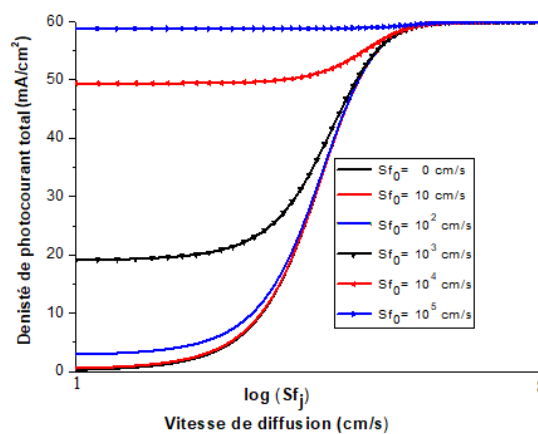


Fig. 5. a. Densité de courant total en fonction de la vitesse de diffusion

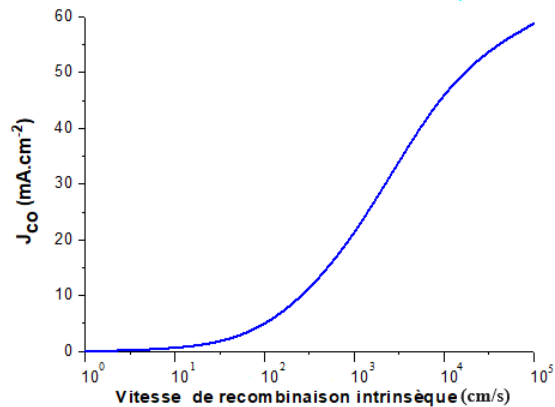


Fig. 5. b. J_{co} en fonction de Sf_0

Les courbes de la Figure 5.a ont la même allure que celles de l'étude à une dimension [7].

En circuit ouvert ($Sf_j \leq 10^2 \text{ cm.s}^{-1}$) et pour $Sf_0 \leq 10 \text{ cm.s}^{-1}$ les courbes des Figures 5.a et 5.b montrent que la densité de courant est pratiquement nulle alors que pour des valeurs de la vitesse de recombinaison intrinsèque telles que ($10^2 \text{ cm.s}^{-1} \leq Sf_0 \leq 10^5 \text{ cm.s}^{-1}$) la densité de courant augmente pour avoisiner la valeur de la densité de courant de court-circuit. Ainsi, la densité de courant de fuite (J_{co}) augmente de 0 mA.cm^{-2} à $58,80 \text{ mA.cm}^{-2}$ avec la variation de Sf_0 de 0 à 10^5 cm.s^{-1} (Figure 5.b).

En court-circuit ($Sf_j \geq 10^6 \text{ cm.s}^{-1}$), quelle que soit la valeur de la vitesse de recombinaison intrinsèque, les courbes de la Figures 5.a montrent que la densité de courant est constante et indépendante des variations de Sf_0 comme cela avait été annoncé lors de l'étude des courbes de densité d'électrons en court-circuit (Figure 4). Ce résultat est également confirmé par le calcul de J_{cc} , Equation (13.6).

En effet, en circuit ouvert, la résistance de charge étant considérée infinie ($R_{ch} \rightarrow +\infty$), alors le flux d'électrons qui la traverse est nul ($Sf_j \approx 0$). Par conséquent, les électrons collectés à la jonction qui ne peuvent pas la traverser, passent dans la résistance shunt ($Sf \approx Sf_0$). Par contre, en court-circuit, la résistance de charge est très faible ($R_{ch} \rightarrow 0$) si bien que le flux d'électrons qui la traverse est très élevé ($Sf_j \rightarrow +\infty$). Dans ce cas, le taux d'électrons perdus à la jonction est négligeable par rapport au taux d'électrons qui traversent la résistance de charge ($Sf \approx Sf_j$).

En circuit ouvert, la densité de courant de fuite, provoquée par la perte d'électrons à travers la jonction, entraîne une baisse du nombre d'électrons stockés à la jonction p-n [7, 13, 14, 15] et donc une réduction de la tension de circuit ouvert.

3.3 EFFET DES PERTES D'ÉLECTRONS SUR LA TENSION

Les courbes de phototension et de la tension de circuit ouvert sont tracées en utilisant respectivement les Equations (14.1) et (14.2).

Dans ce paragraphe, nous analyserons l'effet des pertes d'électrons à la jonction du grain du cellule PV sur la tension de circuit ouvert particulièrement.

La Figure 6.a donne l'allure de la phototension en fonction de la vitesse de diffusion tandis que la Figure 6.b donne l'allure de la tension de circuit ouvert en fonction de la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction.

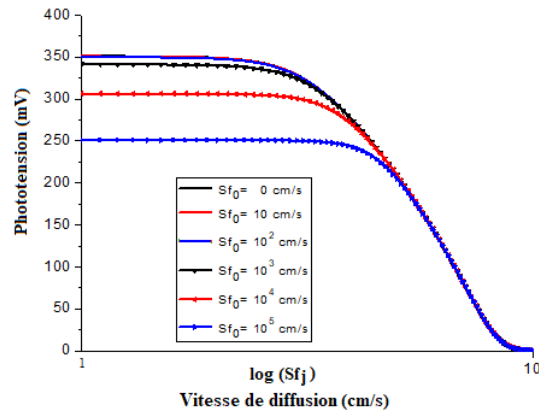


Fig. 6. a. Phototension en fonction de la vitesse de diffusion

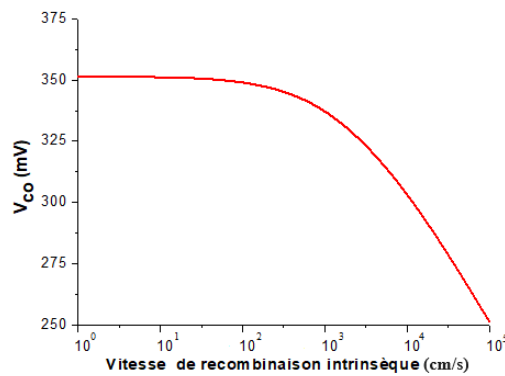


Fig. 6. b. V_{co} en fonction de Sf_0

Les courbes de la Figure 6.a et celles de l'étude à 1D [7] ont les mêmes allures.

Aux faibles valeurs de la vitesse de diffusion, les courbes présentent des plateaux horizontaux. En effet pour $Sf_j \leq 10^2 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$, le grain de cellule PV fonctionne en circuit ouvert et ce point de fonctionnement est celui pour lequel la tension est la plus élevée quelle que soit la valeur de Sf_0 . Ensuite pour $Sf_0 \leq 10^2 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$, les courbes de tension de circuit ouvert sont pratiquement confondues alors qu'elles diminuent, pour $Sf_0 > 10^2 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ en raison de la perte d'électrons à travers la jonction p-n. Ainsi, la tension de circuit ouvert V_{co} , Figure 6.b, passe de 350,98mV à 251,13 mV lorsque Sf_0 varie de 0 à $10^5 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ soit une diminution de 28,45%. Cette diminution de la tension de circuit ouvert est liée à la diminution de la densité d'électrons à la jonction comme indiqué précédemment lors de l'étude de la densité des électrons en circuit ouvert.

3.4 EFFET DES PERTES D'ÉLECTRONS SUR LES PARAMÈTRES DE PERFORMANCE

L'allure des différentes courbes de la puissance électrique totale et de la puissance électrique perdue est présentée respectivement aux Figures 7.a et 7.b.

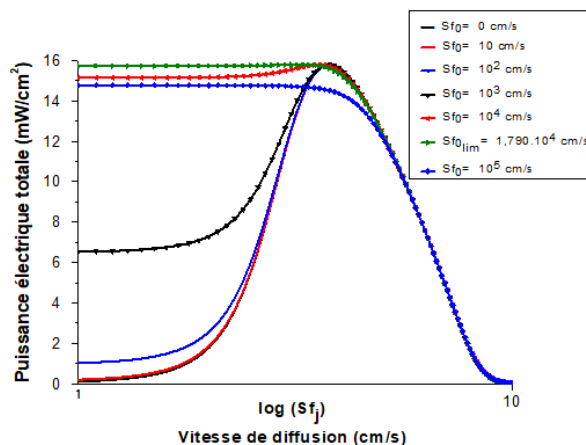


Fig. 7. a. Puissance électrique totale en fonction de Sf_j

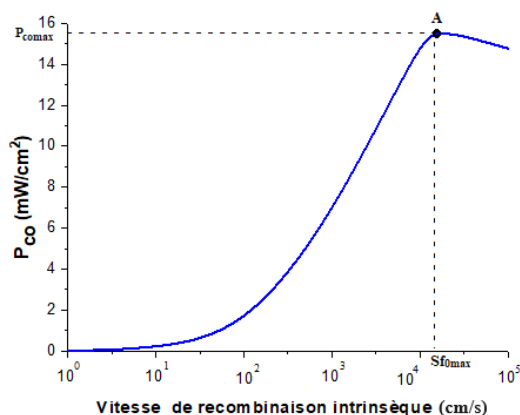


Fig. 7. b. Puissance perdue $P_{co}(Sf_0)$

La Figure 7.c permet de visualiser l'allure des courbes de la puissance électrique transmise.

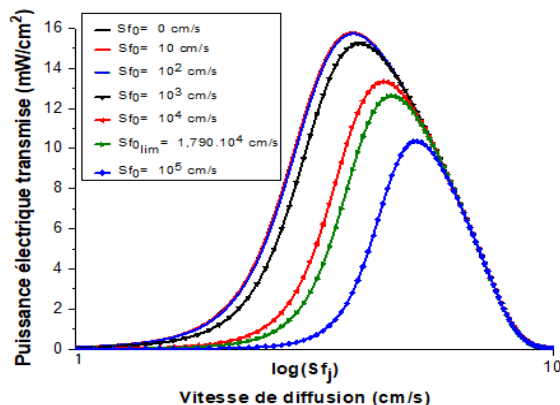


Fig. 7. c. Puissance électrique transmise en fonction de Sf_j

Les courbes de la Figure 7.a ont la même allure que celles de l'étude à une dimension [7].

En circuit ouvert ($Sf_j \leq 10^2 \text{ cm.s}^{-1}$) et pour $Sf_0 \leq 10 \text{ cm.s}^{-1}$, les courbes des Figures 5.a et 5.b montrent que la puissance électrique est pratiquement nulle alors que pour des valeurs de la vitesse de recombinaison intrinsèque telles que ($10^2 \text{ cm.s}^{-1} \leq Sf_0 \leq 10^5 \text{ cm.s}^{-1}$) la puissance électrique augmente pour avoisiner la valeur de la puissance électrique maximale.

La courbe de la Figure 7.b montre que la puissance électrique de circuit ouvert (P_{co}) croit de 0 mW.cm⁻² jusqu'à une valeur maximale égale à 15,773 mW.cm⁻² pour $Sf_{0max} = 1,790 \times 10^4$ cm.s⁻¹ avant de décroître jusqu'à 14,774 mW.cm⁻² avec la variation de Sf_0 de 0 à 10^5 cm.s⁻¹. Cette augmentation de la puissance électrique de circuit ouvert est la conséquence de la fuite de courant à la jonction. Cette puissance électrique de circuit ouvert (P_{co}) représente la puissance perdue à la jonction du grain de cellule PV et elle dépend de Sf_0 comme l'ont montré les Equations (13.7) et (14.2).

Au voisinage du court-circuit ($Sf_j \geq 10^{10}$ cm.s⁻¹), la puissance électrique totale délivrée par la base du grain de cellule PV est nulle.

La Figure 7.c représente les courbes de puissance électrique transmise à une charge extérieure. Ces courbes montrent que la puissance électrique, nulle en circuit ouvert, croit jusqu'à la puissance électrique maximale avant de décroître jusqu'à s'annuler en court-circuit. Pour $Sf_0 \leq 10^2$ cm.s⁻¹, les puissances électriques maximales sont confondues alors qu'elles diminuent pour $Sf_0 > 10^2$ cm.s⁻¹. En outre, on observe également un déplacement de la puissance électrique maximale vers les grandes valeurs de la vitesse de diffusion lorsque les pertes d'électrons (Sf_0) augmentent.

A partir de la Figure 7.c nous déterminons, en fonction de Sf_0 , les valeurs de la puissance électrique maximale délivrée par le grain de cellule PV à une charge extérieure afin de calculer à l'aide de l'Equation (16.1) le rendement de conversion. Quant à la résistance shunt, ses valeurs sont calculées en utilisant l'Equation (16.2).

Les résultats sont consignés dans le Tableau 1.

Tableau 1. Valeur des paramètres de performance du grain de cellule PV

Sf_0 (cm.s ⁻¹)	0	10	10 ²	10 ³	10 ⁴	1,790×10 ⁴	10 ⁵
η (%)	15,796	15,789	15,731	15,248	13,339	12,636	10,366
$\Delta\eta/\eta$ (%)	0	0,044	0,411	3,469	15,555	20,00	34,376
$P_s/P_{Sinitiale}$ (%)	100	99,956	99,589	96,531	84,445	80	65,624
R_{sh} (Ω . cm ²)	$+\infty$	1257,292	132,032	17,998	6,208	5,478	4,273

Les résultats du Tableau 1 montrent que pour $Sf_0 \leq 1,790 \times 10^4$ cm.s⁻¹ le rendement de conversion soit la puissance de sortie du grain de cellule PV est supérieure ou égale à 80 % de sa valeur initiale. Par contre, pour $Sf_0 \geq 1,790 \times 10^4$ cm.s⁻¹ la puissance de sortie atteint un niveau inférieur à 80 % de sa valeur initiale avec pour conséquence une dégradation drastique des performances (rendement et résistance shunt) du grain de cellule PV.

Quant à la résistance shunt, elle est très sensible à la variation du taux d'électrons perdus à la jonction (Sf_0). En effet, pour $Sf_0 \leq 1,790 \times 10^4$ cm.s⁻¹ la résistance shunt passe d'une valeur infiniment grande à 5,478 Ω . cm² soit une fuite de courant à la jonction, en circuit ouvert, dont la densité varie de 0 mA.cm⁻² à 53,591 mA.cm⁻².

4 CONCLUSION

Dans ce travail, nous avons étudié l'influence des pertes d'électrons sur les performances d'une cellule PV au silicium polycristallin dans une analyse à 3 D.

Les résultats des simulations ont montré qu'en circuit ouvert on a une fuite de courant à la jonction du grain de cellule PV dont la densité croit de 0 mA.cm⁻² à 58,80 mA.cm⁻² lorsque le taux d'électrons perdus à la même jonction (Sf_0) varie de 0 à 10^5 cm.s⁻¹. Cette variation de la densité de courant de fuite à la jonction a pour conséquence une baisse de la tension de circuit ouvert de 350,98mV à 251,13 mV soit une diminution de 28,45%.

Les résultats ont également montré que la baisse de la tension de circuit ouvert et l'importante hausse de la densité de courant de fuite ont pour conséquence une chute drastique de la résistance shunt de l'infini à 4,273 Ω . cm². La baisse de la résistance shunt s'accompagne également d'une baisse du rendement de conversion de

34,376% ce qui signifie que la cellule PV délivre une puissance de sortie égale à 65,624 % de sa valeur initiale.

Les causes de la baisse de la résistance shunt sont essentiellement dues au vieillissement et/ou à la dégradation de la cellule PV. Ainsi, en prenant en compte le fait que les fabricants considèrent qu'un module/cellule PV est dégradé lorsque sa puissance de sortie atteint un niveau inférieur à 80 % de sa valeur initiale [2, 3] alors une cellule PV est dégradée lorsque $Sf_0 \geq 1,790 \times 10^4$ cm.s⁻¹. Dans ce cas, la résistance shunt est inférieure ou égale à 5,478 Ω . cm² entraînant une fuite de courant, en circuit ouvert, à la jonction de la cellule PV dont la densité est supérieure ou égale à 53,591 mA.cm⁻².

La méthode P (Sf_j), utilisée dans cette étude, bien qu'elle permette de mettre en évidence les phénomènes qui ont lieu à la jonction à travers l'évaluation du courant et de la puissance perdus (J_{co}, P_{co}) et par conséquent de la résistance shunt, n'est pas exploitable dans le cas d'une étude expérimentale. Ainsi, dans le cas d'une étude expérimentale il serait judicieux d'utiliser la méthode (J-V/P-V) qui est la réponse de la cellule PV à une charge extérieure.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier International Science Program (ISP) qui, à travers le projet BUF 01, soutient leurs travaux de recherche.

REFERENCES

- [1] C. Huang and L. Wang, «Simulation study on the degradation process of photovoltaic modules,» *Energy conversion and management*, vol. 165, pp. 236–243, 2018.
- [2] A. Ndiaye, A. Charki, A. Kobi, C. M. F. Kébé, P. A. Ndiaye, and V. Sambou, «Degradations of silicon photovoltaic modules: A literature review,» *Solar Energy*, vol. 96, pp. 140–151, 2013.
- [3] J. H. Wohlgemuth, D. W. Cunningham, A. M. Nguyen and J. Miller, «Long term reliability of PV modules,» In: *Proceeding of the 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Barcelona, Spain, pp. 1942-1946, 2005.
- [4] S. A. Alves dos Santos, J. P. N. Torres, C.A.F. Fernandes, and R. A. Marques Lameirinhas, «The impact of aging of solar cells on the performance of photovoltaic panels,» *Energy Conversion and Management: X*, vol. 10, 100082, 2021.
- [5] D. Polverini, M. Field, E. Dunlop, and W. Zaaiman, «Polycrystalline silicon PV modules performance and degradation over 20 years,» *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2012.
- [6] R. Doumaneï, M. Balistrrou, P. O. Logerais, O. Riou, J. F. Durastanti, and A. Charki, «A Circuit-Based Approach to Simulate the Characteristics of a Silicon Photovoltaic Module With Aging,» *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 137, 021020, 2015.
- [7] I. Zerbo, M. Zoungrana, A. Ouedraogo, and D. J. Bathiebo, «Effect of junction quality on the performance of a silicon solar cell,» *Journal of Fundamental and Applied Sciences*, vol. 9, no. 2, pp. 1012-1026, 2017.
- [8] L. Priester, «Approche géométrique des joints de grains. Intérêt et limite.», *Revue de physique appliquée*, vol. 15, no. 4, pp. 789-830, 1980.
- [9] B. Ba and M. Kane, «Open circuit voltage decay in polycrystalline silicon solar cells,» *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 37, no. 3-4, pp. 259–271, 1995.
- [10] J. Dugas, «3 D modelling of a reverse cell made with improved multicrystalline silicon wafers,» *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 32, no. 1, pp. 71–88, 1994.
- [11] K. Misiakos, C. H. Wang, A. Neugroschel, and F. A. Lindholm, «Simultaneous Extraction of Minority Carrier Parameters in Crystalline Semiconductors by Lateral Photocurrent,» *Journal of Applied Physics*, vol. 67, no. 1, pp. 321–333, 1990.
- [12] M. A. S. Alshushan and I.M. Saleh, «Power degradation and performance evaluation of PV modules after 31 years of work,» In: *2013 IEEE 39th photovoltaic specialists conference (PVSC)*, Tampa, Florida, USA, pp. 2977-2982, 2013.
- [13] I. Zerbo, M. Zoungrana, A. Ouedraogo, B. Korgo, B. Zouma and D. J. Bathiebo, «Influence of electromagnetic waves produced by an amplitude modulation radio antenna on the electric power delivered by a silicon solar cell,» *Global Journal of Pure and Applied Sciences*, vol. 20, no. 2, pp. 139–148, 2014.
- [14] I. Zerbo, M. Zoungrana, A. D. Seré, and F. Zougmoré, «Silicon solar cell under electromagnetic wave in steady state: effect of the telecommunication source's power of radiation,» *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 29, 012019, 2012.
- [15] V. d. D. B. Barandja, B. M. Pakouzou, E. W. Ramdé, J. M'boliguipa, M. Saria, M. Zoungrana, and I. Zerbo, «Modelling the response of an Illuminated Polysilicon Solar Cell under the influence of Radio Waves, a 3D approach,» *Energy Reports*, vol. 7, pp. 2094–2100, 2021.