

Techniques de détermination des paramètres de recombinaison et le domaine de leur validité d'une photopile bifaciale au silicium polycristallin sous éclairage multi spectral constant en régime statique

I. Ly¹, O.H. Lemrabott², B. Dieng³,
I. Gaye³, S. Gueye³, M.S. Diouf³ and G. Sissoko^{3*}

¹ Département Génie Electromécanique, Ecole Supérieure Polytechnique, Centre de Thiès, Sénégal

² Ecole Supérieure Multinationale de Télécommunications, Dakar, Sénégal

³ Laboratoire des Semi-conducteurs et d'Energie Solaire,
Département de Physique, FST/UCAD, B.P. 5005, Dakar-Fann, Sénégal

(reçu le 27 Novembre 2011 – accepté le 28 Juin 2012)

Abstract - *The aim of this paper is to present some technical determination of the bifacial solar's recombination parameters with its range of validity, under polychromatic illumination for static regime. From the continuity equation, theoretical expressions of the bifacial polycrystalline solar cell under real operating conditions and for three illumination modes are calculated. Based on theoretical and experimental studies, three methods giving the effective diffusion length, junction and back side recombination velocities of the excess minority carriers density are presented. Studying uncertainties of the effective diffusion length determination we show that these methods could give some discrepancies which don't correspond to their limits of applicability.*

Résumé - *Nous présentons dans cet article, des techniques de détermination des paramètres de recombinaison et le domaine de leur validité d'une photopile bifaciale au silicium poly cristallin sous éclairage multi spectral constant en régime statique. Partant de l'équation de continuité et suivant différents modes d'éclairages (faces avant et arrière, puis simultanément sur les deux faces), nous avons obtenu un certain nombre d'expressions théoriques de la photopile. A partir des études théorique et expérimentale, on déduit trois techniques donnant la longueur de diffusion effective L_{eff} , les vitesses de recombinaison intrinsèques à la jonction S_{fa} et à la face arrière S_{ba} des porteurs minoritaires de charge pour les différents modes d'éclairage. Une étude des incertitudes sur la détermination de la longueur de diffusion effective a été présentée et elle a montré les limites d'applicabilité de ces techniques de caractérisation des photopiles.*

Keywords: Bifacial – Recombination velocities – Polychromatic – Static regime – Diffusion length.

1. INTRODUCTION

Le rendement modeste de 10 à 20 % et la complexité des procédés de fabrication des cellules solaires entraînent des coûts relativement élevés qui freinent la production à grande échelle de l'énergie photovoltaïque.

Pour relever ce défi, la recherche s'est accentuée sur plusieurs techniques de caractérisation du matériau semi-conducteur et en particulier sur la fabrication et la

* gsissoko@yahoo.com

conception (substrat, réduction des tailles et formes) des cellules solaires [1-9]. Et cette recherche a pour objectif d'évaluer les effets des différentes imperfections (impuretés non contrôlées, dislocations, dosage et profil d'impuretés) qui sont à l'origine de divers processus de recombinaisons [10-13] des porteurs minoritaires de charges photo générés.

Ces recombinaisons sont caractérisées par des paramètres électriques (résistances série et shunt, et inductance équivalente de la cellule) [11, 14, 15] et électroniques (longueur de diffusion, durée de vie des porteurs minoritaires, vitesses de recombinaison à la jonction et à la face arrière).

A partir des études théorique et expérimentale, nous proposons dans cet article, trois techniques de détermination des paramètres de recombinaison et le domaine de leur validité d'une photopile bifaciale au silicium poly cristallin sous éclairement multi spectral constant en régime statique.

2. ETUDE THEORIQUE

2.1 Généralités

Le fonctionnement de la photopile est intimement lié aux phénomènes de transfert de porteurs minoritaires de charges photo générés. C'est la raison pour laquelle, nous utilisons l'équation de continuité qui régit ces porteurs minoritaires de charges selon les trois modes d'éclairement.

La résolution de cette équation permettra de déterminer la densité des porteurs minoritaires et autres paramètres liés à cette dernière, tels que les densités de courants. Connaissant la densité des porteurs minoritaires, la relation de Boltzmann nous permet de définir les différentes tensions.

Cependant, dans cet article, nous faisons un certain nombre d'approximations et en particulier:

- l'étude porte exclusivement sur les densités (photo courant, photo tension) des porteurs minoritaires de charge dans la base étant donné que la contribution de l'émetteur est négligeable (épaisseur très faible : de l'ordre de $1\mu\text{m}$) par rapport à celle de la base [16];
- seul le champ au niveau de la jonction sera pris en compte car on considère que le champ cristallin qui existe au sein de la base est nul (théorie Q.N.B Quasi Neutral Base);
- le modèle traité est unidimensionnel avec comme origine la jonction de la photopile.

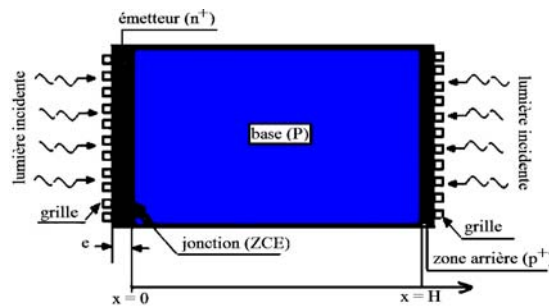


Fig. 1: Structure d'une cellule solaire bifaciale

La structure d'une cellule bifaciale polycristalline au silicium à champ arrière 'BFS' de type $n^+ - p - p^+$ est présentée à la figure 1 ci-dessus.

2.2 Densités des porteurs minoritaires en excès en fonction de la profondeur x dans la base

L'équation de continuité pour une étude unidimensionnelle à laquelle obéissent ces porteurs minoritaires de charge dans la base à l'abscisse x en régime statique s'annonce comme suit [12]:

$$\frac{\partial^2 \delta_{\alpha}(x)}{\partial x^2} - \frac{\delta_{\alpha}(x)}{L^2} = -\frac{1}{D} \times G_{\alpha}(x) \quad (1)$$

avec:

- $\delta_{\alpha}(x)$: Densité des porteurs minoritaires en excès en fonction de la profondeur x dans la base suivant les différents modes d'éclairement;
- L : Longueur de diffusion des porteurs minoritaires de charges dans la base;
- D : Coefficient de diffusion des porteurs minoritaires dans la base;
- $G_{\alpha}(x)$: Taux de génération des porteurs minoritaires.

Le taux de génération $G_{\alpha}(x)$ exprimé en fonction de la profondeur x d'absorption de la lumière dans la base peut être écrit sous la forme suivante:

$$G_{\alpha}(x) = n \sum_{i=1}^3 \alpha_i \times \xi_{\alpha} \times \exp(-b_i x) + \chi_a \times \exp\{b_i (H - x)\} \quad (2)$$

Pour i supérieur à trois, cette série est négligeable telle que cela a été défini à partir de la modélisation du spectre d'absorption lumineuse [15].

Les termes de l'équation du taux de génération sont définis comme suit:

- H : Epaisseur de la base;
- a_i, b_i : Coefficients obtenus à travers des valeurs tabulées de l'éclairement solaire.

Pour un éclairement se faisant sous AM 1.5 donné ces valeurs sont:

$$a_1 = 6.13 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}\text{s}^{-3}; \quad a_2 = 0.54 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}\text{s}^{-3}; \quad a_3 = 0.0991 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}\text{s}^{-3}$$

$$b_1 = 6630 \text{ cm}^{-1}; \quad b_2 = 10^3 \text{ cm}^{-1}; \quad b_3 = 130 \text{ cm}^{-1};$$

- n : Nombre de soleil liant la puissance incidente réelle à la puissance de référence pour un spectre solaire donné. Ce terme permet de connaître les conditions d'éclairement de la photopile.

l est défini comme suit:

$$n = I_{cci} / I_{cco} \quad (3)$$

avec:

I_{cci} , le courant de court-circuit correspondant au fonctionnement de la photopile sous un A.M donné; et I_{cco} , le courant (référentiel) de court-circuit mesuré d'un éclairement donné.

- Les paramètres ξ_{α} et χ_{α} sont définis suivant les modes d'éclairement ci-dessous:

Mode d'éclairément	ξ_α	χ_α
Eclairément sur la face avant	1	0
Eclairément sur la face arrière	0	1
Eclairément simultané sur les deux faces	1	1

- α symbolise le mode d'éclairément:

$\alpha = 1$, $\alpha = 2$ et $\alpha = 3$ pour un éclairément respectivement sur la face avant, sur la face arrière et simultanément sur les deux faces de la photopile.

L'équation de continuité (1) est une équation différentielle du second ordre à coefficients constants. Par conséquent, suivant les différents modes d'éclairément, les densités des porteurs minoritaires en excès en fonction de la profondeur x dans la base peuvent être mises sous les formes suivantes:

- Pour un éclairément face avant

$$\delta_1(x) = A_1 \times \text{ch}\left(\frac{x}{L}\right) + B_1 \times \text{sh}\left(\frac{x}{L}\right) - \sum_{i=1}^4 K_i \times e^{-b_i \times x_i} \quad (4)$$

- Pour un éclairément face arrière

$$\delta_2(x) = A_2 \times \text{ch}\left(\frac{x}{L}\right) + B_2 \times \text{sh}\left(\frac{x}{L}\right) - \sum_{i=1}^4 K_i \times e^{-b_i \times (H - x_i)} \quad (5)$$

- Pour un éclairément simultané sur les deux faces

$$\delta_3(x) = A_3 \times \text{ch}\left(\frac{x}{L}\right) + B_3 \times \text{sh}\left(\frac{x}{L}\right) - \sum_{i=1}^4 K_i \times \left(e^{-b_i \times x_i} + e^{-b_i \times (H - x_i)} \right) \quad (6)$$

Etant donné que les porteurs minoritaires de charges en excès sont soumis à des phénomènes de recombinaison aux interfaces les coefficients A_α et B_α ($\alpha = 1, 2, 3$) peuvent être déterminés à partir des conditions aux limites à la jonction et à la face arrière [16]. Ainsi, les conditions aux limites sont définies comme suit :

A la jonction (pour $x = 0$)

$$\left. \frac{\partial \delta_\alpha(x)}{\partial x} \right|_{x=0} = \frac{S_{f\alpha}}{D} \times \delta_\alpha(0) \quad (7)$$

A la face arrière (pour $x = H$)

$$\left. \frac{\partial \delta_\alpha(x)}{\partial x} \right|_{x=H} = -\frac{S_{b\alpha}}{D} \times \delta_\alpha(H) \quad (8)$$

Pour les équations (7) et (8), $S_{f\alpha}$ et $S_{b\alpha}$ représentent respectivement les vitesses de recombinaison des porteurs minoritaires de charges à la jonction ($x = 0$) et à la face arrière ($x = H$) [17].

Et K_i est défini comme suit:

$$K_i = \frac{n \times L^2 \times \alpha_i}{D(b_i^2 \times L^2 - 1)} \quad (9)$$

$$\text{ou } D(b_i^2 \times L^2 - 1) \neq 0 \quad (10)$$

En introduisant les coefficients A_α et B_α respectivement dans les équations (4), (5) et (6), on obtient les différentes expressions de la densité des porteurs minoritaires en excès qui dépendent exclusivement de la profondeur x dans la base, des vitesses de recombinaison à la jonction S_{f1} et en face arrière S_{b1} , de la longueur de diffusion L et du coefficient de diffusion D .

Et en tenant compte du niveau d'éclairement, les profils de la densité des porteurs minoritaires en excès en fonction de la profondeur x dans la base et suivant les différents modes d'éclairement sont représentés aux figures 2, 3 et 4 suivantes.

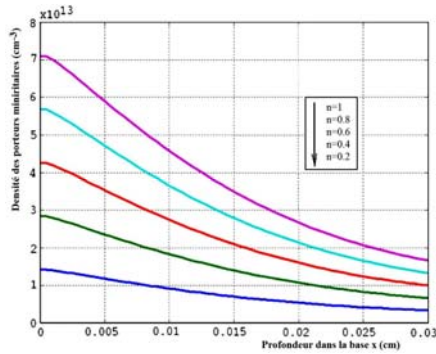


Fig. 2: Densité des porteurs en fonction de la profondeur x dans la base pour différentes valeurs de n , $S_{f1}=1000$ cm/s, $D=26$ cm²/s, $L=0.015$ cm, $S_{b1}=1000$ cm/s, $H=0.03$ cm
Eclairement face avant

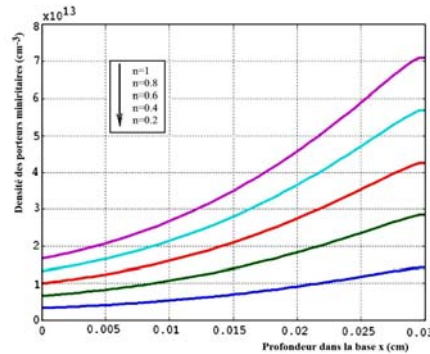


Fig. 3: Densité des porteurs en fonction de la profondeur x dans la base pour différentes valeurs de n , $S_f=1000$ cm/s, $D=26$ cm²/s, $L=0.015$ cm, $S_{b2}=1000$ cm/s, $H=0.03$ cm
Eclairement face arrière

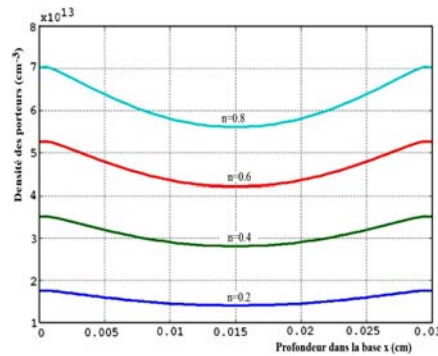


Fig. 4: Densité des porteurs en fonction de la profondeur dans la base pour différentes valeurs de n , $S_f=1000$ cm/s, $D=26$ cm²/s, $L=0.015$ cm, $S_{b3}=1000$ cm/s, $H=0.03$ cm
Eclairement simultané des deux faces

2.3 Etude de la densité du photo courant de la cellule pour différents modes d'éclairement

La densité du photo courant due à la diffusion des porteurs minoritaires de charges à travers la jonction est donnée par loi de Fick {équ. (11)} sous la forme suivante:

$$J_{ph\alpha} = q \times A_{\alpha} \times D \left. \frac{\partial \delta_a(x)}{\partial x} \right|_{x=0} \quad (11)$$

avec: q , Charge de l'électron et D , Coefficient de diffusion des porteurs.

D'après la relation (10), l'expression de la densité des photo courants devient une fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction. Ainsi, les densités des photo courants $J_{ph\alpha}$ peuvent être représentées en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction S_f suivant les différents modes d'éclairement (face avant, face arrière et simultanément sur les deux faces) de la photopile.

C'est la raison pour laquelle, pour différentes valeurs du niveau d'éclairement n , les profils des densités des photo courants sont données respectivement pour les éclairagements face avant, arrière et simultanément aux figures 5, 6 et 7.

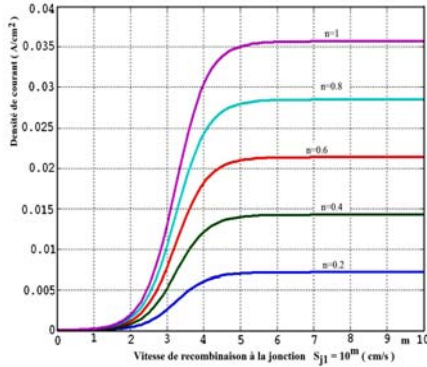


Fig. 5: Densité des porteurs en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction S_{f1} pour différentes valeurs de n , $D=26 \text{ cm}^2/\text{s}$, $L=0.015 \text{ cm}$, $S_{b1}=1000 \text{ cm/s}$, $H=0.03 \text{ cm}$
Eclairement face avant

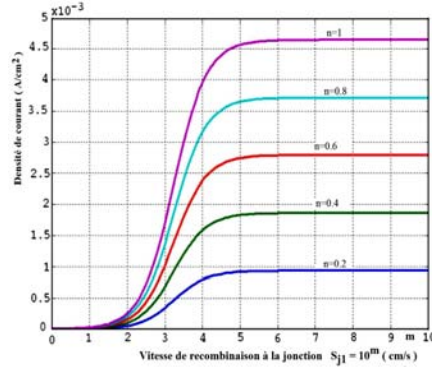


Fig. 6: Densité des porteurs en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction S_{f2} pour différentes valeurs de n , $D=26 \text{ cm}^2/\text{s}$, $L=0.015 \text{ cm}$, $S_{b2}=1000 \text{ cm/s}$, $H=0.03 \text{ cm}$
Eclairement face arrière

Pour des vitesses de recombinaison très élevées les densités de photo courant permettent d'obtenir les expressions des densités de courant de court-circuit.

2.4 Densité de photo courant de court-circuit en fonction de la longueur de diffusion des porteurs minoritaires

L'étude de la densité de courant J_{α} au paragraphe 2.3, en fonction de la vitesse de recombinaison $S_{f\alpha}$ à la jonction, a montré que cette dernière tend vers une valeur constante pour les grandes vitesses de recombinaison à la jonction $S_{f\alpha}$. Et cette valeur

de la densité du courant correspond au courant de court-circuit. Cela se traduit mathématiquement par l'équation suivante.

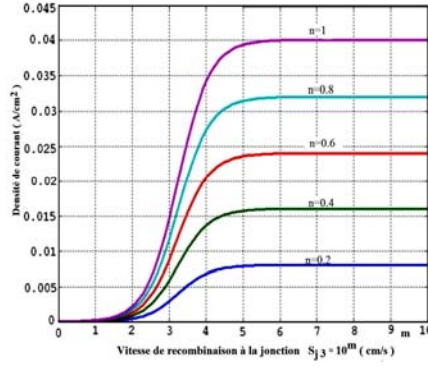


Fig. 7: Densité des porteurs en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction S_{f3} pour différentes valeurs de n , $D=26 \text{ cm}^2/\text{s}$, $L=0.015 \text{ cm}$, $S_{b3}=1000 \text{ cm/s}$, $H=0.03 \text{ cm}$, Eclairement simultané sur les deux faces

$$\frac{\partial J_{ph\alpha}}{\partial S_{j\alpha}} = 0 \quad (12)$$

On obtient ainsi, les différentes expressions du courant de court-circuit $J_{cc\alpha}$ en fonction uniquement de la longueur de diffusion L (les autres paramètres D , b_i et H étant constants), avec S_{b1} étant la vitesse de recombinaison en face arrière suivant le mode d'éclairement.

$$J_{cc1} = q \cdot D \cdot \sum_{i=1}^3 K_i \times \frac{L \cdot (b_i \cdot D - S_{b1}) \cdot \text{ch}\left(\frac{H}{L}\right) - (D - b_m \cdot L^2 \cdot S_{b1}) \cdot \text{sh}\left(\frac{H}{L}\right)}{D \cdot L \cdot \left(\frac{H}{L}\right) + S_{b1} \cdot L^2 \cdot \text{sh}\left(\frac{H}{L}\right)} + \frac{-L \cdot (b_i \cdot D - S_{b1}) \cdot e^{-b_i \cdot H}}{D \cdot L \cdot \left(\frac{H}{L}\right) + S_{b1} \cdot L^2 \cdot \text{sh}\left(\frac{H}{L}\right)} \quad (13)$$

$$S_{b1} = D \cdot \sum_{i=1}^3 \frac{b_i \left[\exp(-b_i \cdot H) - \text{ch}\left(\frac{H}{L}\right) \right] + \frac{1}{L} \cdot \text{sh}\left(\frac{H}{L}\right)}{L \cdot b_i \cdot \text{sh}\left(\frac{H}{L}\right) + \exp(-b_i \cdot H) - \text{ch}\left(\frac{H}{L}\right)} \quad (14)$$

$$J_{cc2} = q \cdot D \cdot \sum_{i=1}^3 K_i \times \frac{L \cdot (b_i \cdot D + S_{b2}) \left[L \cdot (S_{b2} + b_i \cdot D) \cdot \text{ch}\left(\frac{H}{L}\right) + (D + b_m \cdot L^2 \cdot S_{b2}) \cdot \text{sh}\left(\frac{H}{L}\right) \right] e^{-b_i \cdot H}}{D \cdot L \cdot \left(\frac{H}{L}\right) + S_{b2} \cdot L^2 \cdot \text{sh}\left(\frac{H}{L}\right)} \quad (15)$$

$$S_{b2} = \frac{D}{L} \cdot \sum_{i=1}^3 \frac{-L \cdot b_i + \left[\operatorname{sh}\left(\frac{H}{L}\right) + L \cdot b_i \cdot \operatorname{ch}\left(\frac{H}{L}\right) \right] \cdot e^{-b_i \cdot H}}{1 - \left[L \cdot b_i \cdot \operatorname{sh}\left(\frac{H}{L}\right) + \operatorname{ch}\left(\frac{H}{L}\right) \right] \cdot e^{-b_i \cdot H}} \quad (16)$$

$$J_{cc3} = q \cdot D \cdot \sum_{i=1}^3 K_i \times \frac{L \cdot (b_i \cdot D + S_{b3}) \left[L \cdot (S_{b3} + b_i \cdot D) \cdot \operatorname{ch}\left(\frac{H}{L}\right) + (D + b_i \cdot L^2 \cdot S_{b3}) \cdot \operatorname{sh}\left(\frac{H}{L}\right) \right] e^{-b_i \cdot H}}{D \cdot L \cdot \left(\frac{H}{L}\right) + S_{b3} \cdot L^2 \cdot \operatorname{sh}\left(\frac{H}{L}\right)} \quad (17)$$

$$+ q \cdot D \cdot K_i \times \frac{L \cdot (b_i \cdot D + S_{b3}) \cdot \operatorname{ch}\left(\frac{H}{L}\right) - (D - b_i \cdot L^2 \cdot S_{b3}) \cdot \operatorname{sh}\left(\frac{H}{L}\right) - L \cdot (b_i \cdot D + S_{b3}) \cdot e^{-b_i \cdot H}}{D \cdot L \cdot \left(\frac{H}{L}\right) + S_{b3} \cdot L^2 \cdot \operatorname{sh}\left(\frac{H}{L}\right)}$$

$$S_{b3} = \frac{D}{L} \cdot \sum_{i=1}^3 \frac{\left[L \cdot b_i \cdot \left(1 + \operatorname{ch}\left(\frac{H}{L}\right) \right) + \operatorname{sh}\left(\frac{H}{L}\right) \right] \cdot e^{-b_i \cdot H} - L \cdot b_i \cdot \left(1 + \operatorname{ch}\left(\frac{H}{L}\right) \right) + \operatorname{sh}\left(\frac{H}{L}\right)}{1 - \operatorname{ch}\left(\frac{H}{L}\right) + L^2 \cdot b_i \cdot \operatorname{sh}\left(\frac{H}{L}\right) + e^{-b_i \cdot H} \cdot \left[1 - \operatorname{ch}\left(\frac{H}{L}\right) - L \cdot b_i \cdot \operatorname{sh}\left(\frac{H}{L}\right) \right]} \quad (18)$$

Les courbes représentatives des différentes densités de courant de court-circuit en fonction de la longueur de diffusion L pour différents niveaux d'éclairement n sont représentées aux figures 8, 9 et 10 suivantes.

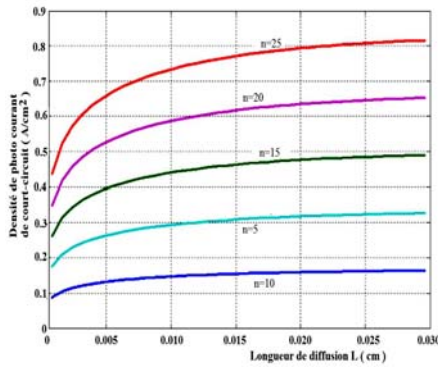


Fig. 8: Densité de photo courant de court-circuit en fonction de la longueur de diffusion L pour différentes valeurs de n ,
 $D=26 \text{ cm}^2/\text{s}$, $H=0.03 \text{ cm}$
 Eclairement face avant

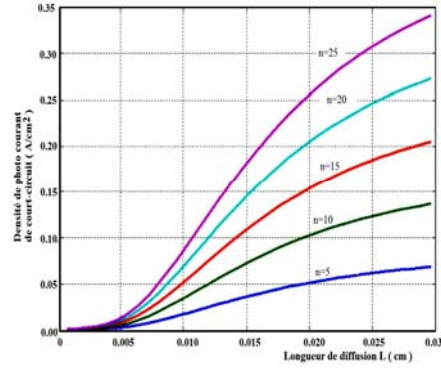


Fig. 9: Densité de photo courant de court-circuit en fonction de la longueur de diffusion L pour différentes valeurs de n ,
 $D=26 \text{ cm}^2/\text{s}$, $H=0.03 \text{ cm}$
 Eclairement face arrière

2.5 Rapport des densités de photo courant de court-circuit

Etant donné que les densités des courants de court-circuit pour un éclairement par la face avant et par la face arrière de la photopile sont fonction de la longueur de diffusion, alors leur rapport est également fonction de la longueur de diffusion L . Par conséquent,

ce rapport noté $\varepsilon(L)$ peut être représenté en fonction de la longueur de diffusion pour un niveau d'éclairement donné.

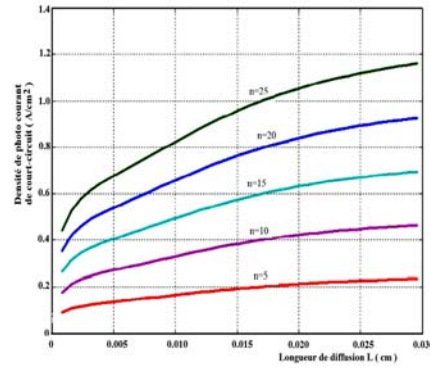


Fig. 10: Densité de photo courant de court-circuit en fonction de la longueur de diffusion L pour différentes valeurs de n , $D=26 \text{ cm}^2/\text{s}$, $H=0.03 \text{ cm}$
Eclairement simultané sur les deux faces

$$\varepsilon(L) = \frac{J_{cc1}(L)}{J_{cc2}(L)} \quad (19)$$

Ainsi, le profil du rapport de densité de photo courant de court-circuit $\varepsilon(L)$ en fonction de la longueur de diffusion L est représenté à la figure 11. Ce rapport permet d'obtenir la technique de détermination de la longueur de diffusion effective en fonction des photo courants de court-circuit.

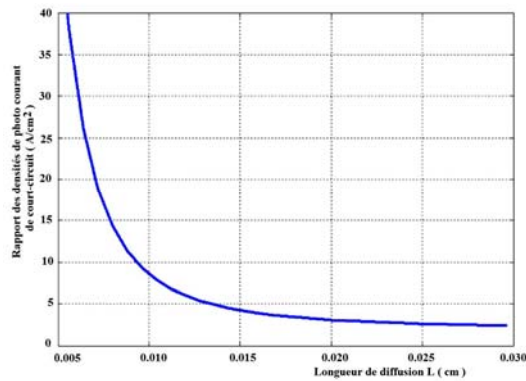


Fig. 11: Rapport des densités de courant de court-circuit en fonction de la longueur de diffusion L , $D=26 \text{ cm}^2/\text{s}$, $H=0.03 \text{ cm}$, $n=25$

2.6 Etude de la photo tension

2.6.1 Généralités

Lorsque la photopile est éclairée, il apparaît aux bornes de celle-ci une photo tension V_{α} dont l'expression est donnée par la relation de Boltzmann:

$$V_{\alpha} = V_T \times \ln \left(\frac{N_b}{n_i^2} \times \delta_{\alpha}(0) + 1 \right) \quad (20)$$

Avec: N_b , Taux de dopage de la base en atomes accepteurs base ($N_b = 10^{16} \text{cm}^{-3}$);
 n_i , Densité intrinsèque des porteurs minoritaires ($n_i = 10^{10} \text{cm}^{-3}$);
 V_T , Tension thermique ($V_T = 26 \text{ mV}$).

La tension thermique est définie par la relation suivante:

$$V_T = \frac{K \times T}{q} \quad (21)$$

où K est la constante de Boltzmann, q la charge de l'électron et T la température absolue à l'équilibre thermique ($T = 300^\circ\text{K}$).

À la jonction $\delta_{\alpha}(0)$, la photo tension ne sera plus qu'une fonction de la vitesse de recombinaison $S_{f_{\alpha}}$. Par conséquent, on peut représenter le profil de la photo tension V_{α} en fonction de la vitesse de recombinaison $S_{f_{\alpha}}$ à la jonction.

Pour les différents modes d'éclairage, les expressions qui suivent donnent les photo tensions en fonction de la vitesse de recombinaison $S_{f_{\alpha}}$ à la jonction. Les profils sont représentés avec les figures (12, 13 et 14).

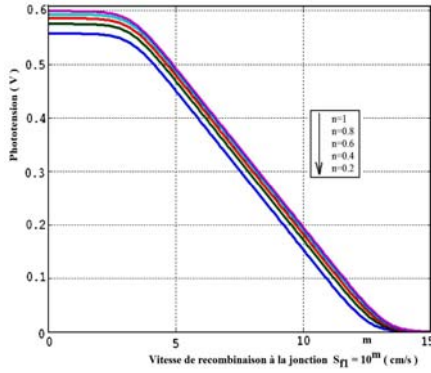


Fig. 12: Photo tension en fonction de la vitesse de recombinaison S_{f1} pour différentes valeurs de n , $D=26 \text{ cm}^2/\text{s}$, $S_{b1}=1000 \text{ cm/s}$, $H=0.03 \text{ cm}$
Eclairage par la face avant

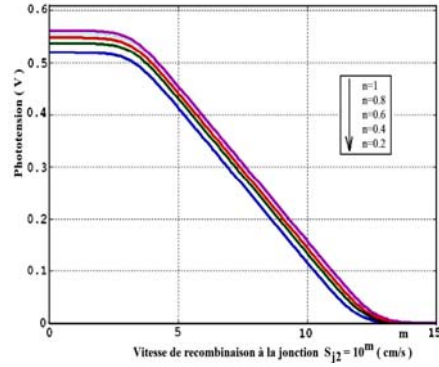


Fig. 13: Photo tension en fonction de la vitesse de recombinaison S_{f2} pour différentes valeurs de n , $D=26 \text{ cm}^2/\text{s}$, $S_{b1}=1000 \text{ cm/s}$, $H=0.03 \text{ cm}$
Eclairage par la face avant

$$V_1 = \frac{K \times T}{q} \times \ln \left(\frac{N_b}{n_i^2} \times \delta_1(0) + 1 \right) \quad (22)$$

$$V_2 = \frac{K \times T}{q} \times \ln \left(\frac{N_b}{n_i^2} \times \delta_2(0) + 1 \right) \quad (23)$$

$$V_3 = \frac{K \times T}{q} \times \ln \left(\frac{N_b}{n_i^2} \times \delta_3(0) + 1 \right) \quad (24)$$

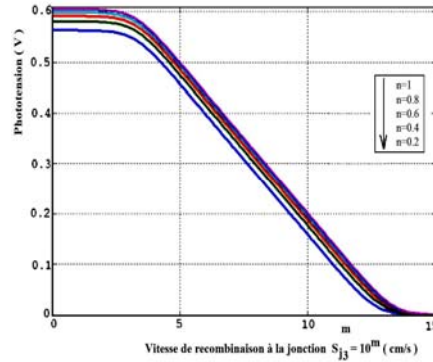


Fig. 14: Photo tension en fonction de la vitesse de recombinaison S_{f1} pour différentes valeurs de n , $D=26 \text{ cm}^2/\text{s}$, $L=0.015 \text{ cm}$, $S_{b3}=1000 \text{ cm/s}$, $H=0.03 \text{ cm}$ Eclairage simultané par les deux faces

3. TECHNIQUES DE DETERMINATION EXPERIMENTALE DES PARAMETRES DE RECOMBINAISON DES PORTEURS MINORITAIRES DE CHARGE ET DOMAINE DE LEUR VALIDITE

3.1 Généralités

Dans cette partie de l'article, l'accent est mis sur les techniques de détermination des paramètres de recombinaison suivant les différents modes d'éclairage de la photopile. Il s'agit de déterminer la longueur de diffusion effective L_{eff} , les vitesses de recombinaison intrinsèques $S_{f\alpha}$ et $S_{b\alpha}$ à la jonction et à la face arrière des porteurs minoritaires de charge pour différents modes d'éclairage de la photopile [7-19].

Le dispositif expérimental permettant d'obtenir les relevés point par point de la tension de circuit ouvert et du courant de court-circuit fournis par la photopile suivant ses différents modes d'éclairage est représenté à la figure 15.

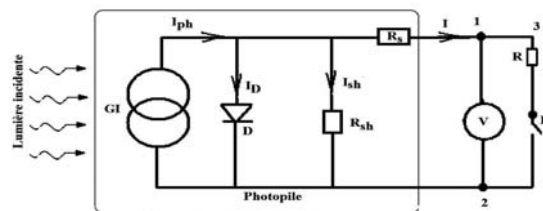


Fig. 15: Dispositif expérimental

Ce dispositif est composé:

- d'une photopile bifaciale au silicium de 27 cm^2 ;
- d'un voltmètre numérique de type métrix;
- d'une résistance R très faible de 1Ω ;
- d'un interrupteur K ;
- de deux sources lumineuses multi spectrales (deux lampes de 100 W).

Le voltmètre V permet de mesurer le courant de court-circuit et la tension de circuit ouvert suivant la position de l'interrupteur K .

Lorsque l'interrupteur K est ouvert, la photopile est en parallèle avec le voltmètre V qui mesure la tension du circuit ouvert V_{CO} .

Quand l'interrupteur K est fermé, la photopile et le voltmètre sont shuntés par la résistance R . Dans ce cas, le voltmètre mesure la tension de court-circuit V_{CC} , qui donne directement la valeur du courant de court-circuit suivant la loi d'Ohm ($I_{CC} = V_{CC} / R$ avec $R = 1 \Omega$).

3.2 Techniques de détermination des paramètres de recombinaison et résultats expérimentaux

3.2.1 Techniques de détermination de la longueur de diffusion effective

Ce paragraphe est consacré aux deux techniques de détermination de la longueur de diffusion effective, à savoir: la technique de l'intersection des courbes théorique et expérimentale des courants de court-circuit 'T.I.C.C.C' et la technique du rapport des courants de court-circuit 'T.R.C.C.C'.

Aux paragraphes 2.4 et 2.5, nous avons obtenu les expressions théoriques des densités de courant de court-circuit en faisant tendre vers l'infini la vitesse de recombinaison $S_{f\alpha}$ à la jonction dans les expressions des densités de courant $J_{ph\alpha}$. Ainsi, pour chaque mode d'éclairement, la densité de courant de court-circuit devient une fonction de la longueur de diffusion L .

Nous traçons sur un même repère, les courbes expérimentale et théorique des densités de courant de court-circuit. Les profils des densités de courant $J_{CC\alpha}$ de court-circuit expérimentaux ou de leur rapport $\varepsilon(L)$, en fonction de la longueur de diffusion sont des droites parallèles à l'axe des abscisses pour différents niveaux d'éclairement n (Fig. 16, 17 et 18).

Avec la 'T.I.C.C.C', la longueur de diffusion effective L_{eff} est obtenue en projetant le point d'intersection des courbes théoriques et expérimentales de la densité des courants de court-circuit sur l'axe des abscisses.

L'autre technique étudiée dans ce travail, est la technique de l'intersection des courbes théorique et expérimentale du rapport des courants de court-circuit 'T.I.R.C.C.C'.

Elle consiste à éclairer les faces avant et arrière de la photopile bifaciale l'une après l'autre. On mesure pour un éclairement donné, la valeur expérimentale de la densité de courant de court-circuit pour chaque mode d'éclairement.

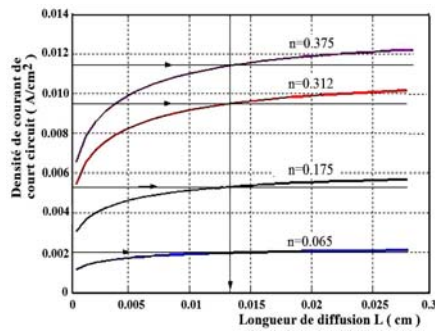


Fig. 16: Densité de photo courant de court-circuit en fonction de la longueur de diffusion L pour différentes valeurs de n , $D=26 \text{ cm}^2/\text{s}$, $H=0.03 \text{ cm}$
Eclairement face avant

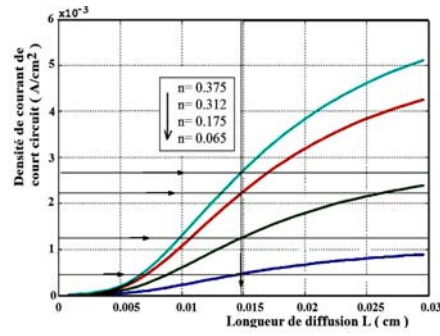


Fig. 17: Densité de photo courant de court-circuit en fonction de la longueur de diffusion L pour différentes valeurs de n , $D=26 \text{ cm}^2/\text{s}$, $H=0.03 \text{ cm}$
Eclairement face arrière

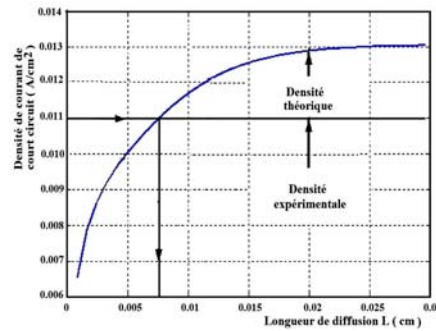


Fig. 18: Détermination de la longueur de diffusion effective L_{eff} pour $n=0.312$, $D=26 \text{ cm}^2/\text{s}$, $H=0.03 \text{ cm}$, en fonction de la densité de courant de court-circuit
Eclairement simultané sur les deux faces

Ainsi, on obtient le rapport expérimental des deux densités de courant de court-circuit:

$$\varepsilon_{\text{exp}}(L) = \frac{J_{\text{cc1.exp}}}{J_{\text{cc2.exp}}} \quad (25)$$

On représente sur le même graphique, les courbes expérimentale et théorique du rapport des densités de courant de court-circuit. Ainsi, la figure 19 représente le profil du rapport $\varepsilon_{\text{exp}}(L)$ des courants de court-circuit en fonction de la longueur L de diffusion.

La longueur de diffusion effective est obtenue par projection sur l'axe des abscisses, le point d'intersection des courbes théorique et expérimentale du rapport des densités de courants de court-circuit.

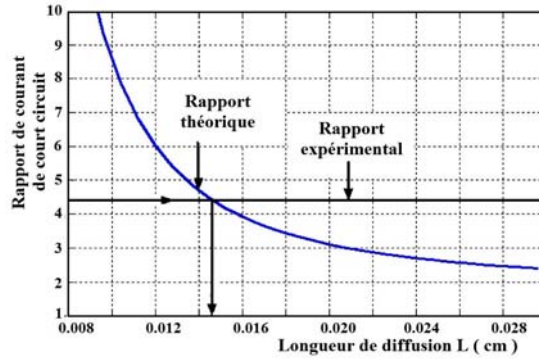


Fig. 19: Technique de détermination de la longueur de diffusion effective en fonction du rapport des courants de court-circuit avec $D = 26 \text{ cm}^2/\text{s}$, $H = 0.03 \text{ cm}$, $n = 0.375$

3.2.2 Détermination de la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction: Technique de l'intersection des courbes de tension de circuit ouvert 'T.I.C.T.C.O'

Suivant le mode d'éclairage de la photopile, nous avons fait une collecte de mesures de photo tensions expérimentales. Sur un même repère, les profils (Fig. 20) des courbes théorique et expérimentale de la photo tension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction sont représentés pour un mode d'éclairage donné.

Et la variation de la phototension expérimentale en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction est une droite parallèle à l'axe des abscisses.

Avec cette technique, la vitesse de recombinaison intrinsèque S_{f0} à la jonction est obtenue en projetant le point d'intersection des courbes théoriques et expérimentales des photo tensions des figures 20, 21 et 22 sur l'axe des abscisses.

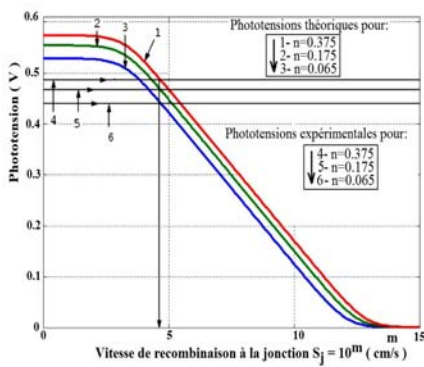


Fig. 20: Technique de détermination de la vitesse de recombinaison intrinsèque S_{f01} à la jonction pour différentes valeurs de n , $D=26 \text{ cm}^2/\text{s}$, $H=0.03 \text{ cm}$
Eclairage par la face avant

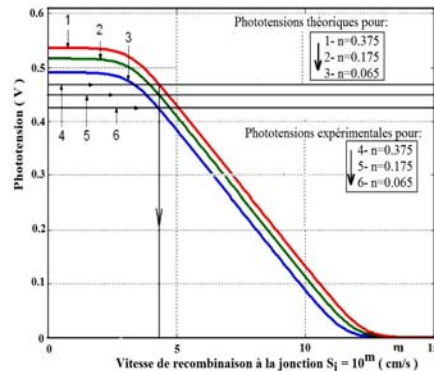


Fig. 21: Technique de détermination de la vitesse de recombinaison intrinsèque S_{f02} à la jonction pour différentes valeurs de n , $D=26 \text{ cm}^2/\text{s}$, $H=0.03 \text{ cm}$
Eclairage par la face arrière

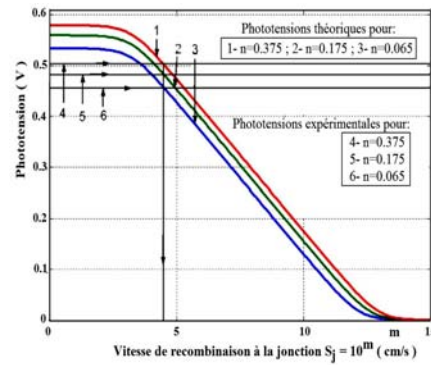


Fig. 22: Technique de détermination de la vitesse de recombinaison intrinsèque S_{f03} à la jonction pour différentes valeurs de n , $D = 26 \text{ cm}^2/\text{s}$, $H = 0.03 \text{ cm}$
Eclairage sur les deux faces

3.3 Détermination de la vitesse de recombinaison à la face arrière de la photopile

Quant à la vitesse de recombinaison effective des porteurs minoritaires à la face arrière de la base, elle est obtenue en remplaçant la longueur de diffusion effective L_{eff} obtenue expérimentalement au 2.4 dans les équations 14, 16 et 18.

3.4 Résultats expérimentaux

Les tableaux qui suivent, donnent les paramètres de recombinaison (longueur de diffusion effective, vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction et vitesse de recombinaison effective à la face arrière) suivant les différents modes d'éclairage de la photopile et pour un nombre de soleil donné.

Tableau 1: Longueur de diffusion et vitesse de recombinaison en face arrière en fonction des courants de court-circuit

$n_1 = n_2$	J_{cc1} (mA)	L_{ef1} (μm)	S_{b1} (cm/s)	J_{cc2} (mA)	L_{ef2} (μm)	S_{b2} (cm/s)
0.375	11.4	137	1.8×10^4	2.6	144	2.0×10^5
0.312	9.5	133	2.0×10^4	2.2	144	2.0×10^5
0.175	5.3	130	2.2×10^4	1.2	146	2.0×10^5
0.065	2	130	2.2×10^4	0.5	145	2.0×10^5

Tableau 2: Longueur de diffusion et vitesse de recombinaison en face arrière en fonction du rapport des courants de court-circuit

$n_1 = n_2$	J_{cc1} (mA)	J_{cc2} (mA)	ϵ	L_{ef1} (μm)	S_{b1} (cm/s)	S_{b2} (cm/s)
0.375	11.45	2.6	4.4	153	1.2465×10^4	2.022×10^5
0.312	9.52	2.22	4.3	152	1.2711×10^4	2.022×10^5
0.175	5.3	1.25	4.24	152	1.2711×10^4	2.0221×10^5
0.065	2	0.5	4	151	1.2966×10^4	2.0221×10^5

Tableau 3: Longueur de diffusion et vitesse de recombinaison en face arrière

n	J_{ccs} (mA)	L_{eff} (μm)	S_{bs} (cm/s)
0.375	11	76	3.5×10^3

Tableau 4: Vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction en fonction des photo tensions

$n_1 = n_2$	V_{co1} (mV)	S_{f1} (cm/s)	V_{co2} (mV)	S_{f2} (cm/s)	V_{co3} (mV)	S_{f3} (cm/s)
0.375	487	5.2×10^4	469	1.7×10^4	503	2.8×10^4
0.175	467	5.2×10^4	450	1.7×10^4	479	2.8×10^4
0.065	438	5.2×10^4	426	1.7×10^4	455	2.8×10^4

3.5 Etude des incertitudes sur la détermination de la longueur de diffusion

Pour la 'T.C.C', la figure 23 ci-dessous représente le profil de courant de court-circuit en fonction de la longueur de diffusion, pour un nombre de soleil $n=0.312$ et pour un éclairage simultané sur les deux faces de la photopile. Elle permet de déterminer l'incertitude sur la mesure de la longueur de diffusion L_{eff} en fonction de l'erreur sur la densité expérimentale du courant de court-circuit pour un éclairage simultané des deux faces de la photopile.

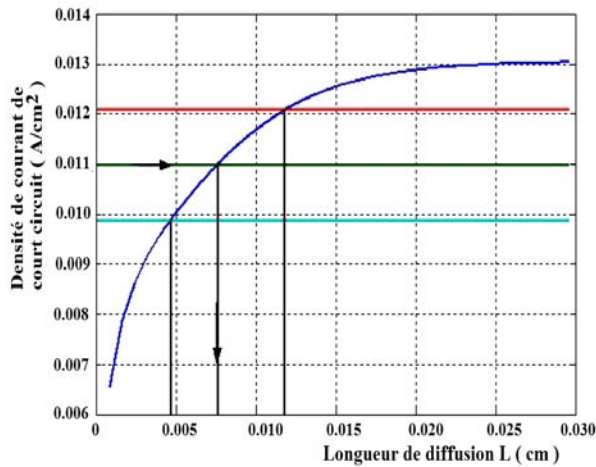


Fig. 23: Détermination de l'incertitude sur la longueur de diffusion effective L_{eff} en fonction de la densité de courant de court-circuit pour $n=0.312$, $D=26 \text{ cm}^2/\text{s}$, $H=0.03 \text{ cm}$, pour éclairage simultané.

De cette figure, il en résulte que pour des photopiles dont la longueur de diffusion est supérieure ou égale à $75 \mu\text{m}$, une erreur relative sur la densité de courant de court-

circuit expérimental ($\Delta J_{cc\text{exp}}/J_{cc\text{exp}}=10\%$) entraîne une incertitude de plus de 45 % sur la détermination de la longueur de diffusion effective L_{eff} .

L'incertitude sur L_{eff} augmente avec la longueur de diffusion.

Quant à la figure 24, elle permet de déterminer l'incertitude sur la L_{eff} pour la méthode 'T.R.C.C.C'.

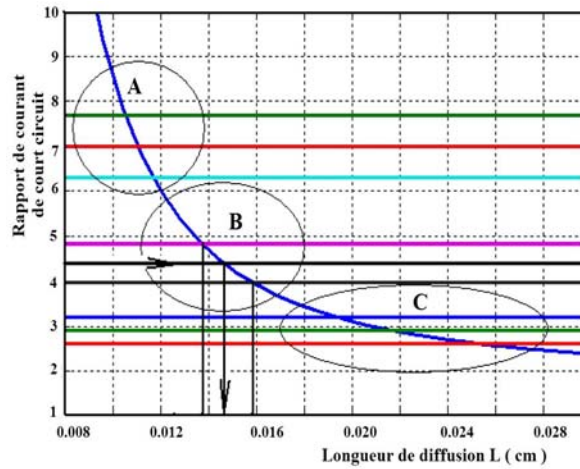


Fig. 24: Incertitude sur la longueur de diffusion L_{eff} pour $D=26\text{ cm}^2/\text{s}$ en fonction du rapport des densités de courant de court-circuit

Cette figure montre que la précision de la mesure est liée à la zone de mesure. Et la technique 'T.R.C.C.C.' permet de classer également les photopiles en fonction de leur qualité. Nous avons trois zones distinctes (A, B et C) :

- La zone A où la longueur de diffusion est inférieure à $120\text{ }\mu\text{m}$ est le domaine des mauvaises photopiles (ohmiques) avec une courte longueur de diffusion. Dans cette zone, une incertitude de 10 % dans la mesure du rapport expérimental des courants de court-circuit induit une incertitude de l'ordre de 6 % sur la longueur de diffusion effective.

- La zone B où la longueur de diffusion est comprise entre $120\text{ }\mu\text{m}$ et $170\text{ }\mu\text{m}$. Dans cette zone, une erreur de mesure de 10 % sur le rapport expérimental conduit à une incertitude d'environ de 12 % sur la mesure de L_{eff} . Cette zone est celle des cellules solaires intermédiaires entre photopiles ohmiques et à champ arrière.

- La zone C où la longueur de diffusion est supérieure à $170\text{ }\mu\text{m}$. Cette zone est le domaine de bonnes qualités de photopiles (BSF). Dans ce cas, une incertitude de 10 % sur la mesure du rapport expérimental donne une erreur allant jusqu'à 60 % sur la longueur de diffusion L_{eff} .

Dans tous les cas, l'incertitude sur L_{eff} est intimement liée à la mesure de la densité expérimentale des courants de court-circuit et éventuellement de leur rapport.

C'est pourquoi, l'utilisation de ces techniques de détermination de l'incertitude sur la longueur de diffusion effective L_{eff} requiert une attention particulière sur la mesure des densités de courant de court-circuit.

5. CONCLUSION

Dans cet article, nous avons fait l'étude expérimentale d'une photopile bifaciale au silicium poly cristallin sous éclairage multi spectral constant en régime statique en vue de déterminer certains de ses paramètres et en particulier sa longueur de diffusion effective, ses vitesses de recombinaison intrinsèque à la jonction et à la face arrière.

Trois techniques ont été élaborées pour les déterminer.

Pour mettre en exergue la fiabilité de ces techniques, une étude des incertitudes dans la détermination de la longueur de diffusion effective a été élaborée.

Cette étude a révélé que l'erreur sur la longueur de diffusion effective est intimement liée à la qualité de mesure des courants de court-circuit.

Il a été également montré que ces techniques ont des limites d'applicabilité pour les grandes longueurs de diffusion des photopiles.

REFERENCES

- [1] I. Ly, I. Zerbo, M. Wade, M. Ndiaye, A. Dieng, A. Diao, N. Thiam, A. Thiam, M.M. Dione, F.I. Barro, A.S. Maiga and G. Sissoko, '*Bifacial Silicon Solar Cell under Frequency Modulation and Monochromatic Illumination: Recombination Velocities and Associated Equivalent Electrical Circuits*', Proceedings of the 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 1CV.3.28, Hamburg, Germany, pp. 298 – 301, 2011.
- [2] I. Ly, M. Wade, H. Ly Diallo, M.A. El Moujtaba, O.H. Lemrabott, S. Mbodji, O. Diasse, A. Ndiaye, I. Gaye, F.I. Barro, A. Wereme and G. Sissoko, '*Irradiation Effect on the Electrical Parameters of a Bifacial Silicon Solar Cell under Multispectral Illumination*', Proceeding of the 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 1DV.4.52I, Hamburg, Germany, pp. 785 – 788, 2011.
- [3] M.M. Dione, H. Ly Diallo, M. Wade, I. Ly, M. Thiame, F. Toure, A. Gueye Camara, N. Dieme, Z. Nouhou Bako, S. Mbodji, F.I. Barro and G. Sissoko, '*Determination of the Shunt and Series Resistances of a Vertical Multijunction Solar Cell under Constant Multispectral Light*', Proceedings of the 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg, Germany, pp. 250 – 254, 2011.
- [4] S. Ndoeye, M. Ndiaye, A. Diao, M.M. Dione, D. Diarisso, A.O.N. Bama, I. Ly, G. Sow, A.S. Maiga, A. Foulani, F.I. Barro and G. Sissoko, '*Modelling and Simuling the Powering System of a Base Transmitter Station with a Standalone Photovoltaic Generator*', Proceedings of the 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition / 5th World Conference on Photovoltaic Energy, Valencia, Spain, pp. 5208 – 5211, 2010.

- [5] M. Ndiaye, A. Diao, M. Thiame, M.M. Dione, H. Ly Diallo, M.L. Samb, I. Ly, C. Gassama, S. Mbodji, F.I. Barro and G. Sissoko, '3D Approach for a Modelling Study of the Diffusion Capacitance's Efficiency of the Solar Cell', Proceedings of the 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition / 5th World Conference on Photovoltaic Energy, Valencia, Spain, pp. 484 – 487, 2010.
- [6] S. Mbodji, H. Ly, A. Dioum, H. Ly Diallo, I.F. Barro and G. Sissoko, 'Equivalent Electric Circuit of a Bifacial Solar Cell in Transient State Under Constant Magnetic Field', Proceedings of the 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Dresden, Germany, pp. 447 – 450, 2006.
- [7] A.W. Blakers, J. Zhao, A. Wang, A.M. Milne, X. Dai and M.A. Green, '23% Efficient Silicon Solar Cell', Proceedings of the 9th European Communities Photovoltaic Solar Energy Conference, Freiburg, Germany, September, pp. 328 – 329, 1989.
- [8] D.M. Huljić, E. Hirth, R. Ludemann and G. Willeke, 'Large Area Crystalline Silicon Solar Cells with Pad Printed Front Side Metallization', Proceedings of the 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Munich, Germany, pp. 1582 – 1585, 2002.
- [9] A.L. Endrös, R. Einzinger and G. Martinelli, 'Tri-silicon: a Novel Substrate for Thin Wafer Solar Cells', Proceedings of the 14th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Barcelona, Spain, pp. 112-114, 1997.
- [10] A. Ricaud, 'Photopiles Solaires: De la physique de la Conversion Photovoltaïque aux Filières, Matériaux et Procédés', Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 332 pages, 1997.
- [11] Collectif et B. Eguer, 'Energie Solaire Photovoltaïque: Physique et Technologie de la Conversion Photovoltaïque', Ellipses, Unesco, Volume 1, 238 pages, 1993.
- [12] H. Mathieu, 'Physique des Semi-conducteurs et des Composants Electroniques', Masson, Paris, 601 pages, 1987.
- [13] G. Sissoko, 'Caractérisation par Phénomènes Transitoires de Photopiles au Silicium Polycristallin', Thèse de Doctorat d'Etat, UCAD, Dakar, Sénégal, Janvier 1993
- [14] S. Bowden and A. Rohatgi, 'Rapid and Accurate Determination of Series Resistance and Fill Factor Losses in Industrial Silicon Solar Cell's', Proceedings of the 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Munich, Germany, pp. 22 – 26, 2001.
- [15] H.J. Möller, 'Semiconductors for Solar Cells', Artech House Publishers, Optoelectronics Library, 343 pages, 1993
- [16] G. Sissoko, C. Museruka, A. Correa, I. Gaye and A.L. Ndiaye, 'Light Spectral Effect on Recombination Parameters of Silicon Solar Cell', Proceedings of the World Renewable Energy Congress, Denver, USA, Part III, 15 - 21 June, pp. 1487 - 1490, 1996.
- [17] G. Sissoko, C. Museruka, A. Correa, I. Gaye and A.L. Ndiaye, Proceedings of the World Renewable Energy Congress, Denver, USA, Part II, 15 - 21 June, pp. 1668 - 1670, 1996.

- [18] S.N. Mohammad, '*An Alternative Method for the Performance Analysis of Silicon Solar Cells*', Journal Applied Physics, Vol. 61, N°2, pp. 767 – 772, 1987.
- [19] S. Madougou, M. Kaka and G. Sissoko, '*Silicon Solar Cells: Recombination and Electrical Parameters*', University Abdou Moumouni, Niamey, Niger. Solar Energy, 01 February 2010.