



Journal Homepage: [-www.journalijar.com](http://www.journalijar.com)

## INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED RESEARCH (IJAR)

Article DOI: 10.21474/IJAR01/15150  
DOI URL: <http://dx.doi.org/10.21474/IJAR01/15150>



### RESEARCH ARTICLE

#### INFLUENCE DE LA TEMPERATURE ET DU CHAMP MAGNETIQUE SUR LA DECROISSANCE TRANSITOIRE DE LA DENSITE DES PORTEURS DE CHARGE DANS UNE PHOTOPILE AU SILICIUM A MULTI JONCTIONS VERTICALES CONNECTEES EN PARALLELE ET PLACEE ENCIRCUIT OUVERT

Pape Diop<sup>1</sup>, Sega Gueye<sup>1</sup>, Gora Diop<sup>1,4</sup>, Dibor Faye<sup>1</sup>, Ibrahima Diatta<sup>1</sup>, Oumou Khalsoum Dieng<sup>2</sup>, Ousmane Sow<sup>2</sup>, Moustapha Thiame<sup>3</sup>, Mamadou Wade<sup>4</sup> and Gregoire Sissoko<sup>1</sup>

1. Groupe International de Recherche en Energie Renouvelable(GIRER). BP. 15003, Dakar, Sénégal.
2. Institut Universitaire de Technologie-Université Iba Der THIAM de Thiès-Senegal.
3. Universié Assane SECK, Ziguinchor-Sénégal.
4. Ecole Polytechnique de Thiès-Sénégal.

#### Manuscript Info

##### Manuscript History

Received: 05 June 2022  
Final Accepted: 09 July 2022  
Published: August 2022

##### Key words:-

Photopile Au Silicium, Jonction Verticale Parallèle, Champ Magnétique, Température, Constante De Temps, Epaisseur De La Base

#### Abstract

Une étude de l'effet de la température et du champ magnétique sur une photopile au silicium à jonctions verticales connectées en parallèle, est présentée, en fonctionnement de régime transitoire de circuit ouvert. La densité transitoire de porteurs minoritaires en excès dans la base est une somme de termes infinis, dont le temps de décroissance des différentes harmoniques est étudié. L'épaisseur optimum de la base permet de déterminer la température optimum qui influe sur le temps de décroissance du régime transitoire.

Copy Right, IJAR, 2022,. All rights reserved.

#### Introduction:-

Les photopiles au silicium cristallin, par différentes technologies [1] se présentent sous différentes architectures, telles que les photopiles mono faciales [2, 3] (éclairage face avant ou arrière), bifaciales [4, 5] où l'éclairage peut être effectué simultanément des deux faces, et à jonctions verticales (connectées en série ou parallèle) où l'éclairage se fait parallèlement au plan de jonction [6, 7]. Ces dernières appelées Multi Jonctions verticales (MJV) [8, 9, 10] sont de deux types qui sont: les cellules (n/p) connectées en parallèles afin d'augmenter le courant électrique (MJVP) et les cellules (n/p/p+) connectées en série pour augmenter la tension électrique de sortie (MJVS). Ces structures sont élaborées à partir de matériaux pauvres en qualité électronique. La qualité électronique est évaluée à partir des paramètres phénoménologiques [11, 12, 13, 14] que sont, la durée de vie, le coefficient de diffusion, la longueur de diffusion et la mobilité des porteurs minoritaires de charge, dans les différentes régions de la photopile, plus particulièrement la base. Par les surfaces qui limitent les différentes zones, les vitesses de recombinaison surfaciques [15, 16, 17, 18, 19, 20] sont également des paramètres qui permettent d'évaluer la performance de la photopile, qui peut être étudiée selon les modèles à une dimension [7, 21] ou trois dimensions [22, 23] d'espace, dans les conditions de régimes de fonctionnement, qui sont :

- a) Le régime statique [24, 25]
- b) Le régime dynamique, transitoire [26, 27, 28, 29, 30] ou fréquentielle [31, 32, 33, 34].

Sous ces régimes de fonctionnement, la photopile peut être assujettie à des conditions extérieures, qui peuvent être:

- i) des variations du niveau d'éclairage [35]
- ii) de la qualité spectrale de la lumière incidente [36, 37] : mono ou polychromatique
- iii) des variations de température [38, 39]

Corresponding Author:- Grégoire SISSOKO, [gssissoko@yahoo.com](mailto:gssissoko@yahoo.com)

Address:- Groupe International de Recherche en Energie Renouvelable(GIRER). BP. 15003, Dakar, Sénégal.

- iv) des variations de champ électromagnétique [40, 41, 42, 43, 44]
- v) des variations de flux de particules chargées, servant à l'irradiation [45, 46]
- vi) variation de la fréquence de modulation de la lumière incidente [47,48]
- vii) la combinaison de différentes conditions externes [49, 50]

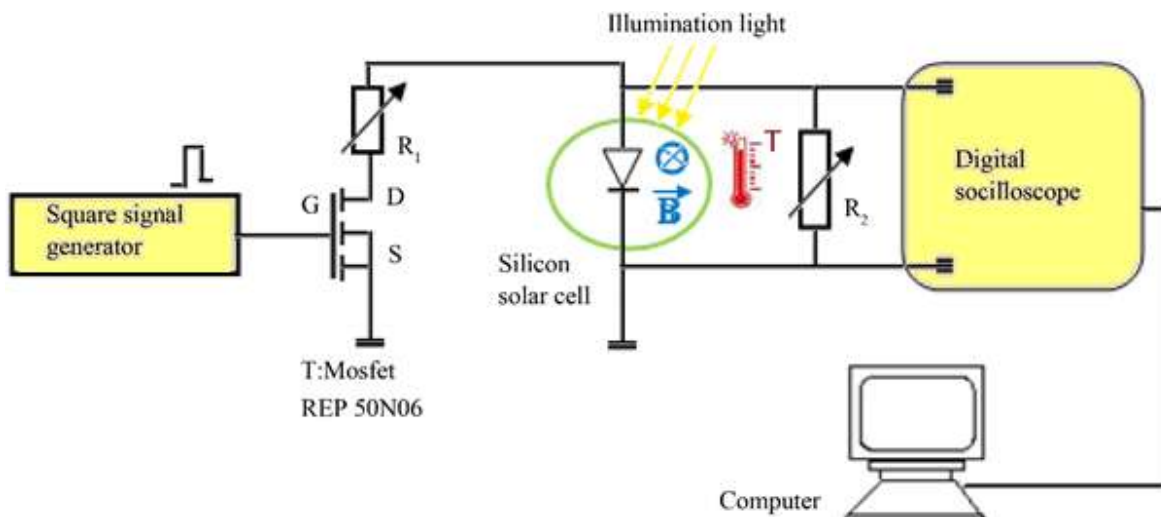
Les modèles d'études et les techniques utilisées, visent essentiellement à la détermination des paramètres phénoménologiques [51, 52, 53], qui influencent les paramètres électriques [54, 55, 56, 57], que sont les résistances série et shunt, ainsi que la capacité de la zone de charge d'espace.

Dans ce travail, nous étudions la photopile au silicium (n/p) à jonctions verticales connectées en parallèle, placée sous la double condition de température et de champ magnétique, et en régime transitoire. Ce régime s'obtient par variation du point de fonctionnement sur la caractéristique I-V statique entre deux points proches du circuit ouvert de la photopile sous éclairage [58, 59]. Nous examinons les effets de conditions extérieures par variation de la température [60, 61], du champ magnétique [62, 63] et de l'épaisseur optimale [64, 65] sur les porteurs minoritaires en excès et sur le temps ( $t_0$ ) initiant leur décroissance exponentielle, qui délimite les conditions de mesure expérimentale de la constante de temps.

## Materiaux Et Methodes:-

### Dispositif expérimental

La figure 2 présente le dispositif expérimental utilisé pour obtenir le régime transitoire par variation du point de fonctionnement de la photopile [28, 29, 30].



**Figure 1:-** Dispositif expérimental de caractérisation de la photopile.

Ce dispositif expérimental comprend un générateur de signaux carrés BRI8500 qui pilote un transistor MOSFET de type RFP50N06, deux résistances ajustables  $R_1$  et  $R_2$ . La photopile au silicium placée sous température et champ magnétique, est soumise à un éclairage multi spectral constant. Un oscilloscope numérique et un micro-ordinateur, sont utilisés pour l'acquisition et traitement du signal.

A l'instant  $t < 0$  (figure1), la photopile étant sous éclairage multi spectral constant, le transistor MOSFET est ouvert et la photopile se trouve fermée en série avec la résistance  $R_2$  seule: cela correspond au point de fonctionnement  $F_2$  en régime permanent [58, 59]. A  $t = 0$  (figure1), commence la fermeture du MOSFET et après un temps très bref le MOSFET est totalement fermé, alors la résistance  $R_1$  se trouve en parallèle avec  $R_2$  cela correspond au point de fonctionnement  $F_1$ .

En faisant varier  $R_1$  et  $R_2$ , les points de fonctionnement en régime stationnaire  $F_1$  et  $F_2$  se déplacent sur la caractéristique I-V (figure2), pour produire un régime transitoire.

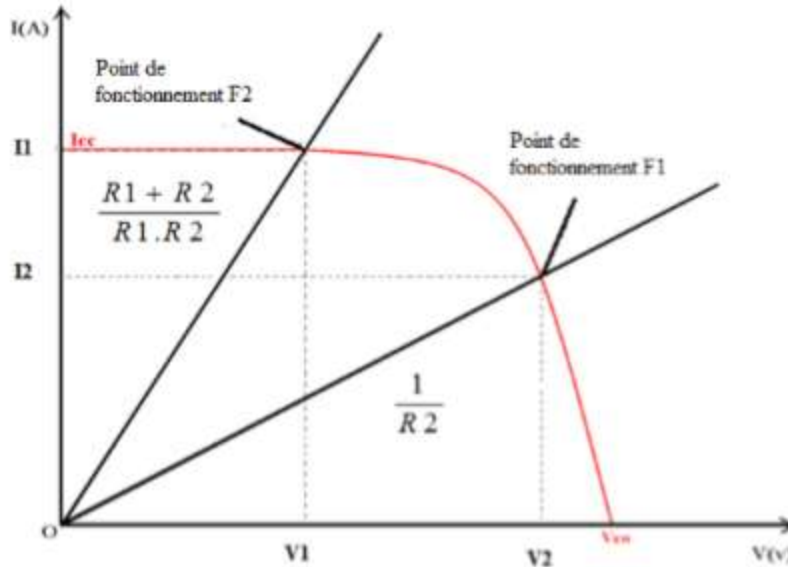


Figure 2:- Caractéristique I-V de la photopile sous éclaircissement.

**Théorie**

Sur la figure3, le schéma de la photopile (n/p) au silicium à jonctions verticales connectées en parallèles sous champ magnétique et température est présenté.

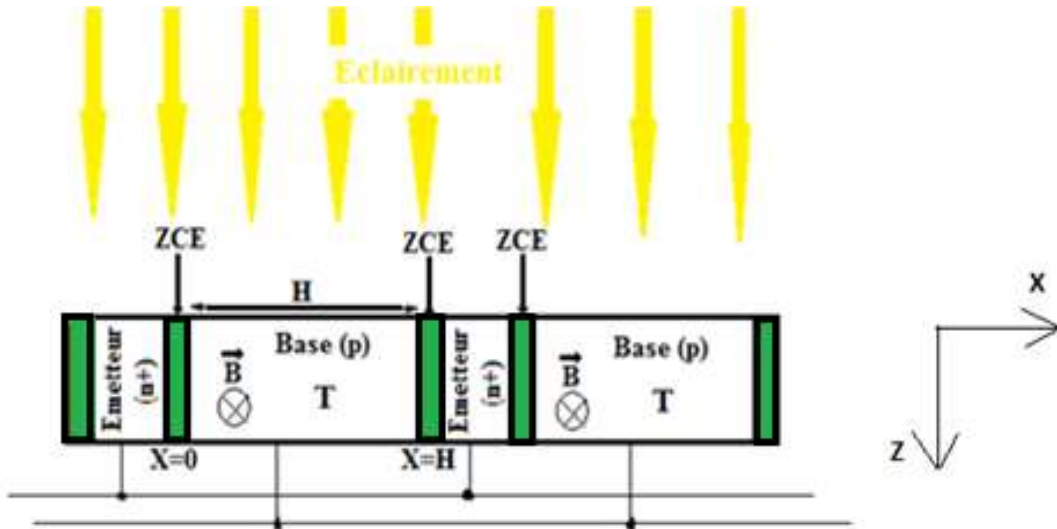


Figure 3:- Structure de la photopile (n/p) à jonctions verticales connectées en parallèle.

Le taux de génération  $G(z)$  des porteurs minoritaires en excès qui dépend de la profondeur d'absorption  $z$  de la lumière dans la base est donné par la relation suivante:

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

Les coefficients  $a_i$  et  $b_i$  sont obtenus à travers des valeurs tabulées du rayonnement[37].

Lors de l'expérience, le niveau d'éclairement demeure constant, cela implique que le niveau d'injection n'est pas modifié par rapport au temps. On obtient l'équation de magnéto-transport [16, 42] en régime dynamique, relative à l'excès de porteurs de charge  $\delta(x, t)$  [7], dans la base à la température (T) [38]:

$$D^* \cdot \frac{\partial^2 \delta(x, t)}{\partial x^2} - \frac{\delta(x, t)}{\tau} = \frac{\partial \delta(x, t)}{\partial t} \quad (2)$$

Le coefficient de diffusion  $D^*$  des porteurs minoritaires dans la base sous l'influence de la température T et du champ magnétique B appliqué, est donné par la relation [42, 67]:

$$D^* = D^*(B, T) = \frac{D(T)}{1 + [\mu(T) \times B]^2} \quad (3)$$

$\tau$  est la durée de vie moyenne des porteurs minoritaires dans la base.

$$\mu(T) = 1,43 \cdot 10^9 T^{2,42} \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ S}^{-1} \quad (4)$$

$\mu(T)$  est la mobilité des porteurs minoritaires de charge dans la base [66].

$\vec{B}$  est le champ magnétique dans la base, parallèle au plan de la jonction.

Le coefficient de diffusion des porteurs minoritaires de charge dans la base, tributaire de la température D(T) sans champ magnétique est donné par la relation d'Einstein-Smoluchowski:

$$D(T) = \mu(T) \cdot \frac{K_B \cdot T}{q} \quad (5)$$

Où  $K_B$  est la constante de Boltzmann  $K_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ m}^2 \text{ kg s}^{-2} \text{ K}^{-1}$  et  $q$  la charge élémentaire de l'électron.

L'équation est résolue en utilisant les conditions aux limites suivantes:

➤ à la jonction  $x=0$ :

$$D^* \cdot \frac{\partial \delta(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=0} = S_f \cdot \delta(0, t) \quad (6)$$

➤ Au milieu de la base [7], en  $X = \frac{H}{2}$ :

$$D^* \cdot \frac{\partial \delta(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=\frac{H}{2}} = 0 \quad (7)$$

$S_f$  est la vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires de charges à la jonction [17, 19, 30] et définit le point de fonctionnement de la photopile [9, 58, 59] sur sa caractéristique I-V.

Le système d'équations (2), (6) et (7) constitue un problème de Sturm Liouville [68] dont les solutions sont à variables séparables du type:

$$\delta(x, t) = X(x) \cdot T(t) \quad (8)$$

$X(x)$  représente la partie spatiale de la densité des porteurs minoritaires et  $T(t)$  la partie temporelle.

$X(x)$  et  $T(t)$  se mettent respectivement sous les formes suivantes:

$$X(x) = A_1 \cos\left(\frac{\omega \cdot x}{\sqrt{D^*}}\right) + A_2 \sin\left(\frac{\omega \cdot x}{\sqrt{D^*}}\right) \quad (9)$$

$$T(t) = T(0) \cdot \exp\left(-\left(\omega^2 + \frac{1}{\tau}\right)t\right) \quad (10)$$

$$\text{Avec } \frac{1}{\tau_c} = \frac{1}{\tau} + \omega^2 \quad (11)$$

L'application des conditions aux limites (6) et (7) donnent respectivement les relations (12) et (13):

$$\frac{\omega\sqrt{D^*}}{S_f} = \frac{A_1}{A_2} = \gamma \quad (12)$$

$$\tan\left(\frac{\omega H}{2\sqrt{D^*}}\right) = \frac{S_f}{\omega\sqrt{D^*}} \quad (13)$$

L'équation (13) est une équation transcendante dont les solutions sont déterminées graphiquement.

$$\text{Avec : } \frac{\omega H}{2\sqrt{D^*}} \in \left[0, \frac{\pi}{2}\left[\cup\right]\left(n - \frac{1}{2}\right)\pi; \left(n + \frac{1}{2}\right)\pi\right] \quad (14)$$

Le premier intervalle  $\left[0, \frac{\pi}{2}\left[\right]$  convient pour  $n=0$  et le second pour  $n > 0$ .

Lorsque  $n=0$ , nous avons le premier terme  $\delta_0(x, t)$  qui correspond à l'état fondamental avec la valeur propre  $\omega_0$ . Et pour  $n > 0$ , nous avons les différentes  $\delta_n(x, t)$  correspondantes aux harmoniques d'ordre de valeurs propres  $\omega_n$ .

$A_1$  et  $A_2$  sont calculés en utilisant les conditions de normalisation et la transformation de Fourier.

L'expression de  $T_n(0)$  est calculée en utilisant la densité de porteurs minoritaires en régime statique.

L'expression de  $\delta(x, t)$  s'écrit donc :

$$\delta(x, z, t, T, B) = \sum \delta_n(x, z, t, T, B) = \sum X_n(x) \cdot T_n(z, T, B, 0) \cdot \exp\left(-\frac{1}{\tau_{c,n}} t\right) \quad (15)$$

La densité des porteurs minoritaires de charge en excès dans la base est donnée par la relation (16).

$$\delta(x, t) = \sum_n \delta_n(x, t) \quad (16)$$

$\tau_{c,n}$  étant appelée constante de temps de décroissance, son inverse peut s'écrire :

$$\frac{1}{\tau_{c,n}} = \frac{1}{\tau_0} + \omega_n^2 \quad (17)$$

## Resultats Et Discussion:-

### Densité des porteurs minoritaires en excès

Les solutions de l'équation transcendante nous ont permis de tracer les profils de densité de porteurs minoritaires  $\delta(x, t)$  dans la base en utilisant les résultats de l'épaisseur optimale de la base (Hopt) [62, 63] pour différents champs magnétiques (B) et valeurs de la température optimale, frontière entre les phénomènes normales et le processus Umklapp [67].

Les figures suivantes représentent l'évolution de la densité des porteurs minoritaires  $\delta(x, t)$  en excès en fonction de (Hopt), du champ magnétique (B) et de (Topt).

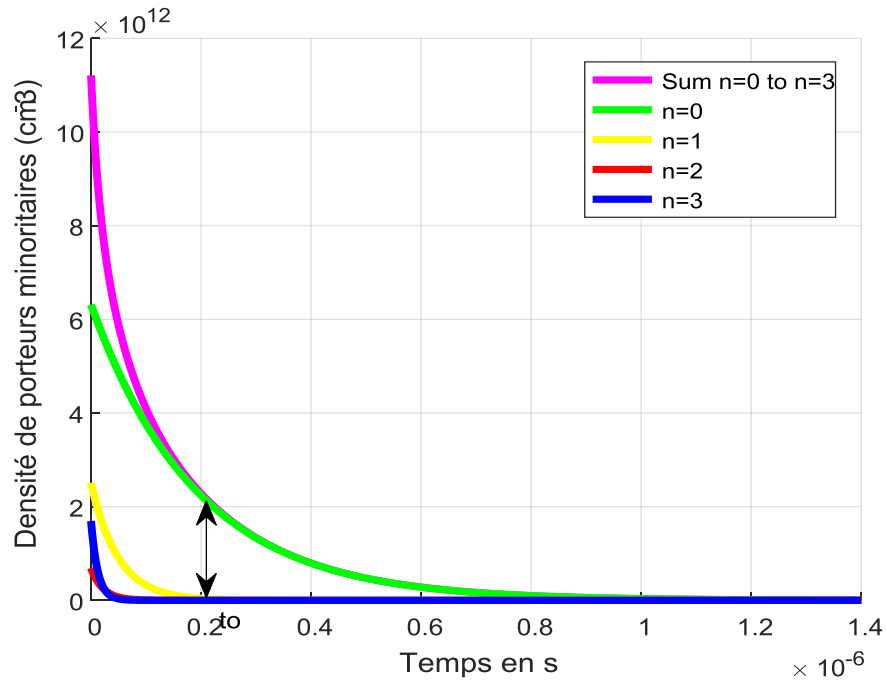


Figure 4:- Profil de la densité de porteurs minoritaires de charge en excès en fonction du temps ( $S_f=10\text{cm/s}$  ;  $T_{op}=254.7\text{K}$  ;  $B=0.0003\text{T}$  ;  $H_{opt}=0.0161\text{cm}$  ;  $z=0.017\text{cm}$  ;  $\tau=10^5\text{s}$  ;  $n=0$  ;  $n=1$  ;  $n=2$  ;  $n=3$  et  $n=4$ ).

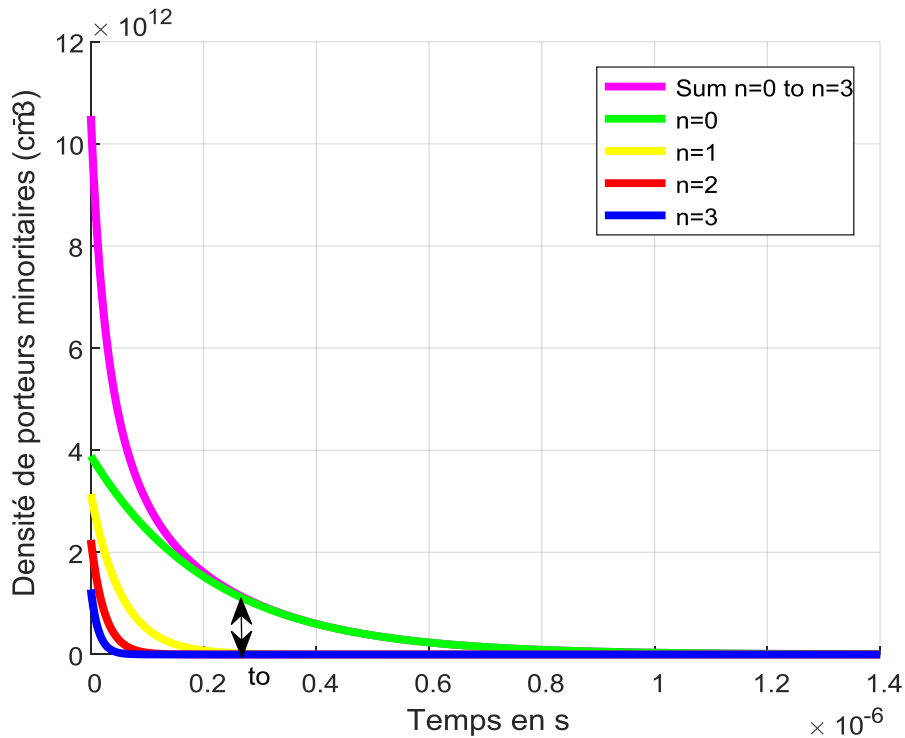


Figure 5:- Profil de la densité de porteurs minoritaires de charge en excès en fonction du temps ( $S_f=10\text{cm/s}$  ;  $T_{op}=286.6\text{K}$  ;  $B=0.0004\text{T}$  ;  $H_{opt}=0.0156\text{cm}$  ;  $z=0.017\text{cm}$  ;  $\tau=10^5\text{s}$  ;  $n=0$  ;  $n=1$  ;  $n=2$  ;  $n=3$  et  $n=4$ ).

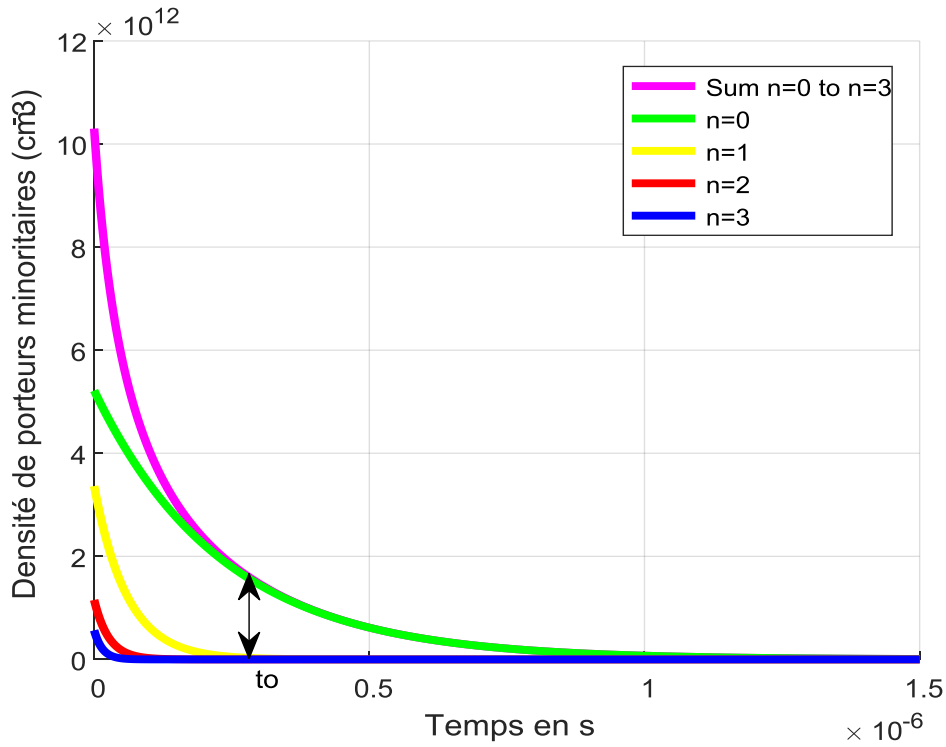


Figure 6:- Profil de la densité de porteurs minoritaires de charge en excès en fonction du ( $S_f=10\text{cm/s}$ ;  $T_{op}=336.5\text{K}$ ;  $B=0.0005\text{T}$ ;  $H_{opt}=0.0153\text{cm}$ ;  $z=0.017\text{cm}$ ;  $\tau=10^{-5}\text{s}$ ;  $n=0$ ;  $n=1$ ;  $n=2$ ;  $n=3$  et  $n=4$ ).

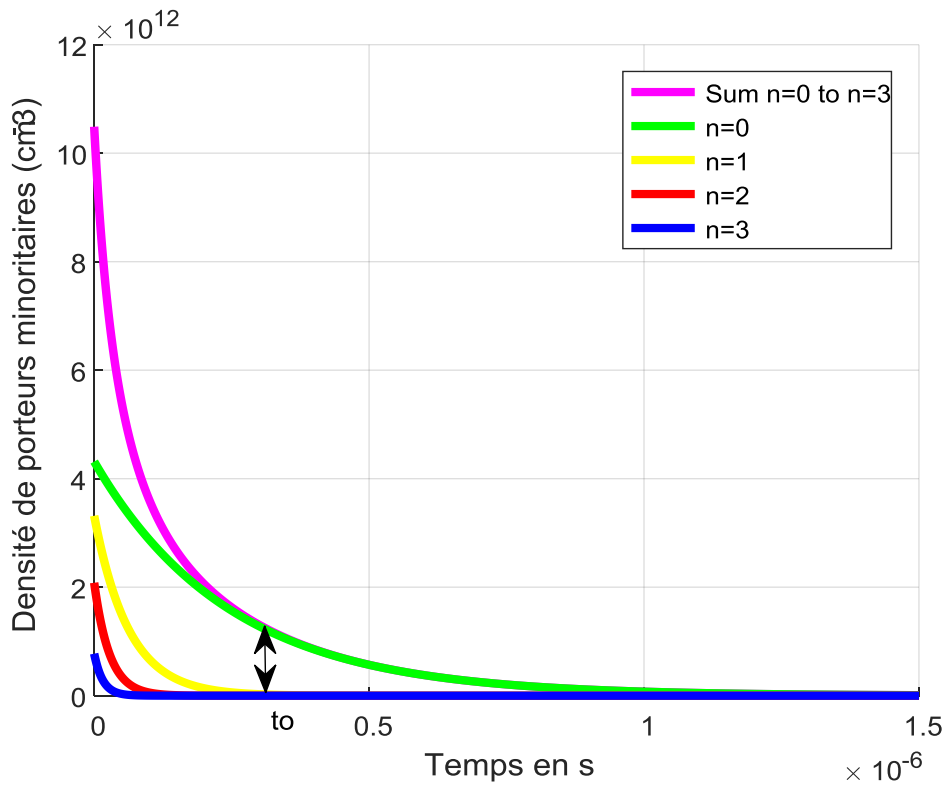
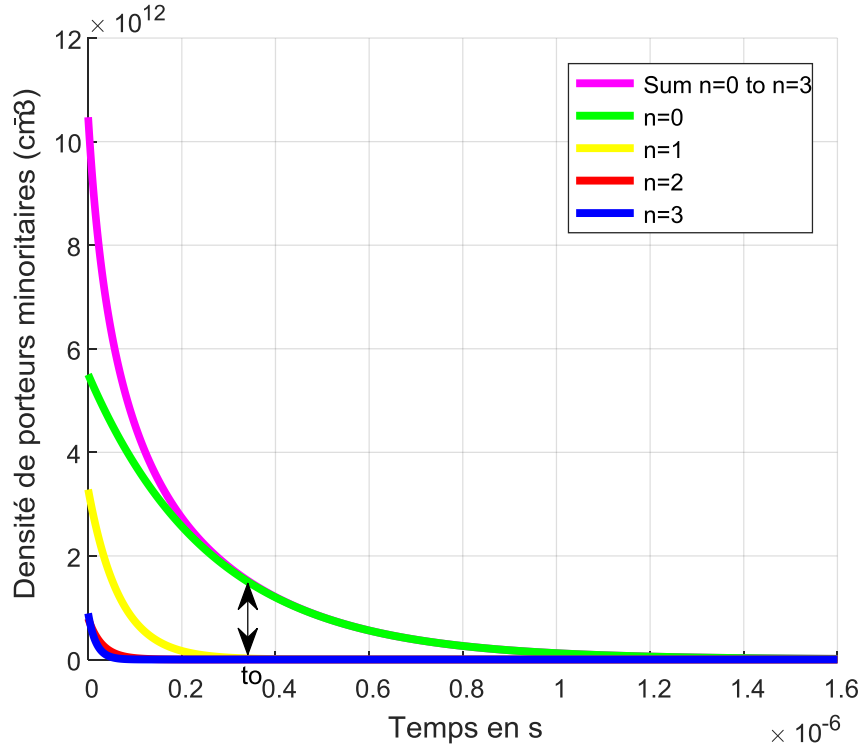
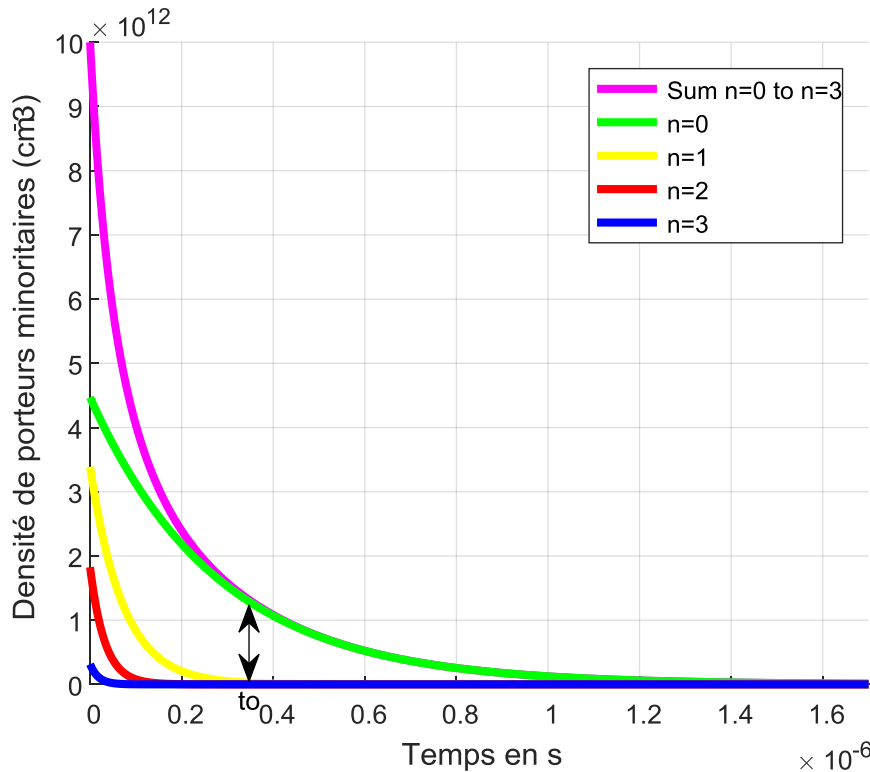


Figure 7:- Profil de la densité de porteurs minoritaires de charge en excès en fonction du temps ( $S_f=10\text{cm/s}$ ;  $T_{op}=336.5\text{K}$ ;  $B=0.0006\text{T}$ ;  $H_{opt}=0.0149\text{cm}$ ;  $z=0.017\text{cm}$ ;  $\tau=10^{-5}\text{s}$ ;  $n=0$ ;  $n=1$ ;  $n=2$ ;  $n=3$  et  $n=4$ ).



**Figure 8:-** Profil de la densité de porteurs minoritaires de charge en excès en fonction du temps ( $S_f=10\text{cm/s}$ ;  $T_{op}=361.4\text{K}$ ;  $B=0.0007\text{T}$ ;  $H_{opt}=0.0147\text{cm}$ ;  $z=0.017\text{cm}$ ;  $\tau=10^5\text{s}$ ;  $n=0$ ;  $n=1$ ;  $n=2$ ;  $n=3$  et  $n=4$ ).



**Figure 9:-** Profil de la densité de porteurs minoritaires de charge en excès en fonction du temps ( $S_f=10\text{cm/s}$ ;  $T_{op}=381.9\text{K}$ ;  $B=0.0008\text{T}$ ;  $H_{opt}=0.0146\text{cm}$ ;  $z=0.017\text{cm}$ ;  $\tau=10^5\text{s}$ ;  $n=0$ ;  $n=1$ ;  $n=2$ ;  $n=3$  et  $n=4$ ).



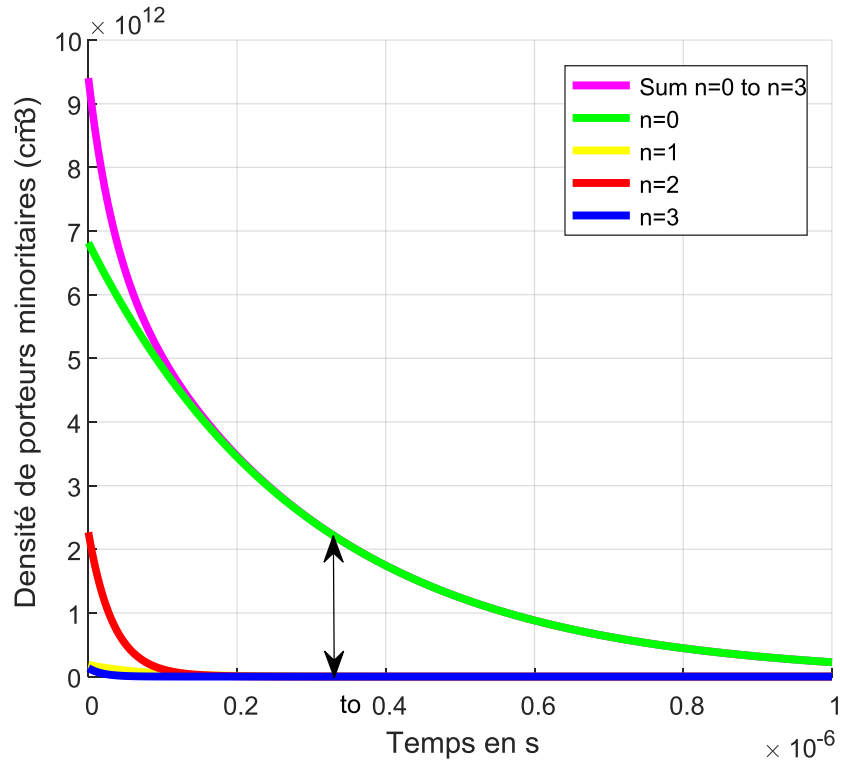


Figure 10:- Profil de la densité de porteurs minoritaires en excès en fonction du temps ( $S_f=10\text{cm/s}$  ;  $T_{op}=410\text{K}$  ;  $B=0.0009T$  ;  $H_{opt}=0.01445\text{cm}$  ;  $z=0.017\text{cm}$  ;  $\tau=10^5\text{s}$  ;  $n=0$  ;  $n=1$  ;  $n=2$  ;  $n=3$  et  $n=4$ ).

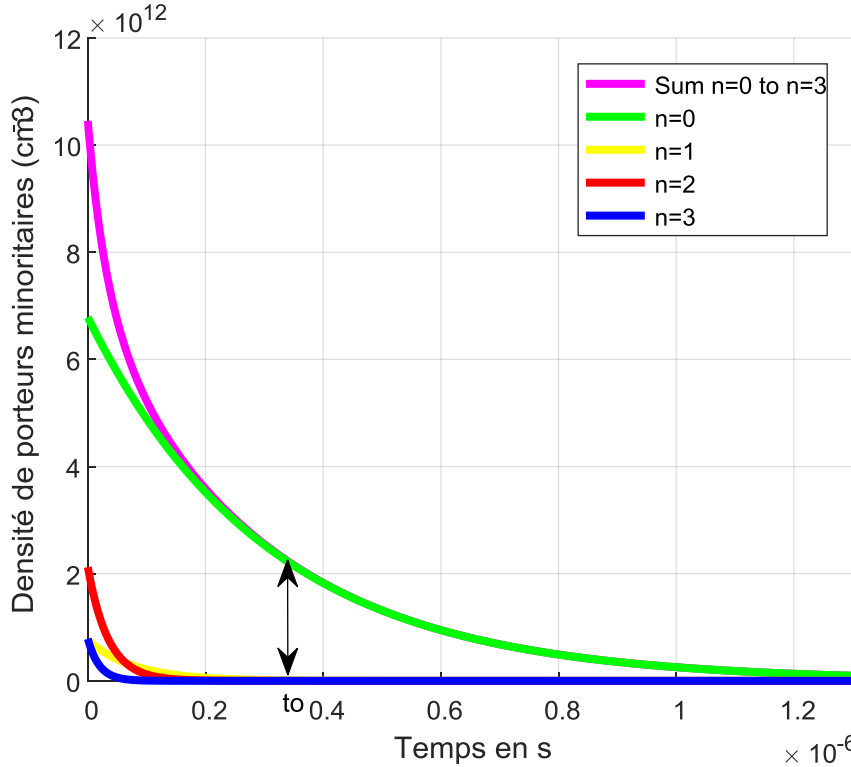


Figure 11:- Profil de la densité de porteurs minoritaires en excès en fonction du temps ( $S_f=10\text{cm/s}$  ;  $T_{op}=418.8\text{K}$  ;  $B=0.001T$  ;  $H_{opt}=0.0143\text{cm}$  ;  $z=0.017\text{cm}$  ;  $\tau=10^5\text{s}$  ;  $n=0$  ;  $n=1$  ;  $n=2$  ;  $n=3$  et  $n=4$ ).

Nous constatons sur les figures ci-dessus que la densité  $\delta(x, t)$  des porteurs de charge décroît pour atteindre le régime stationnaire final. Il en est de même pour les harmoniques de rang  $n$ . Cependant, il est observé au bout d'un temps  $t_0$ , que les densités des autres modes ou harmoniques  $n \neq 0$  tendent rapidement vers 0 tandis que celle du mode fondamental se confond à la densité  $\delta(x, t)$  des porteurs minoritaires de charge en excès.  $t_0$  est le temps au bout duquel la densité des porteurs minoritaires de charge correspondant à l'état fondamental se confond à la densité de porteurs minoritaires de charge en excès. Quelques valeurs de  $t_0$  sont données sur le tableau 4 suivant.

**Tableau 4:-** Quelques valeurs  $t_0$ .

T(K)	254.7	286.6	313	336.5	361.4	381.9	410	418.8
B(T)	0.0003	0.0004	0.0005	0.0006	0.0007	0.0008	0.0009	0.001
Hopt (cm)	0.0161	0.0156	0.0153	0.0149	0.0147	0.0146	0.01445	0.0143
$t_0(10^{-7}$ s)	2.17	2.75	2.82	2.91	3.35	3.51	3.52	3.58

Cependant, une augmentation de la température entraîne une accumulation de porteurs au niveau de la jonction. Elle va aussi entraîner une agitation thermique d'où une réduction de la mobilité des porteurs. Cette agitation thermique entraîne une lente décroissance, car les porteurs minoritaires de charge dans la base vont prendre plus de temps pour arriver à l'état stationnaire d'où  $t_0$  augmente avec l'augmentation de la température.

Il en est de même, lorsque le champ magnétique augmente, la mobilité et la diffusion de porteurs minorités diminuent avec l'augmentation de l'intensité du champ magnétique (loi de Lorentz) et ceci va ralentir le mouvement des porteurs de charges d'où  $t_0$  augmente avec la température.

### Conclusions:-

Ce travail nous a permis de voir l'effet de la température et du champ magnétique sur la densité de porteurs minoritaires de charge en excès dans la base d'une photopile au silicium à jonction verticale parallèle. La résolution graphique de l'équation transcendante a été effectuée. Il nous a permis aussi de voir que les valeurs propres et les constantes de temps de décroissance obtenues sont dépendantes de la température optimale. La diminution de l'épaisseur de la base entraîne un ralentissement du temps de décroissance.

Une augmentation du champ magnétique entraîne une augmentation de la température (Umklapp), par conséquent on obtient le même effet d'augmentation du temps de décroissance correspondant à une réduction de l'épaisseur optimum de la base.

### References:-

- [1]. M. A. Green, (March 1995). Silicon Solar cells advanced principles & practice Printed by Bridge printer Pty. Ltd. 29-35 Dunning Avenue, Roseberry, Center for photovoltaic Devices and systems; pp.29-35
- [3] Fossum, J.G. and Burgess, E.L. (1978) High Efficiency p+-n-n+ Back-Surface-Field Solar Cells. Applied Physics Letters, 33, 238-240. <https://doi.org/10.1063/1.90311>
- [4] Meier, D.L., Hwang, J.-M. and Campbell, R.B. (1988) The Effect of Doping Density and Injection Level on Minority Carrier Lifetime as Applied to Bifacial Dendritic Web Silicon Solar Cells. IEEE Transactions on Electron Devices, 35, 70-79. <https://doi.org/10.1109/16.2417>
- [5] Luque, A., Ruiz, J.M., Cuevas, A., Eguren, J. and Agost, M.G. (1997). Double Side Solar Cells to Improve Static Concentrator. Photovoltaic Solar Energy Conference, Luxembourg, 269-277. [https://doi.org/10.1007/978-94-009-9840-7\\_25](https://doi.org/10.1007/978-94-009-9840-7_25)
- [6]. Wise, J.F. (1970). Vertical Junction Hardened Solar Cell. US Patent 3, 690-953.
- [7] Gover, A. and Stella, P. (1974). Vertical Multijunction Solar-Cell One-Dimensional Analysis. IEEE Transactions on Electron Devices, ED-21, 351-356. <https://doi.org/10.1109/T-ED.1974.17927>
- [8]. M. Meusel, W. Benssch, T. Berdunde, R. Kern, V. Khorenko, W. Kostler, G. Laroche, T. Torunski, W. Zimmermann, G. Strobl, W. Guter, M. Hermle, R. Hoheisel, G. Siefert, E. Welsler, F. Dimroth, A. W. Bett, W. Geens, C. Baur, S. Taylor, G. Hey. (2007). Development and production of European III-V multijunction Solar cells. Proceeding of the 22nd European photovoltaic Solar Energy Conference. Pp. 16 – 51.
- [9] Diallo, H.L., Dieng, B., Ly, I., Dione, M.M., Ndiaye, M., Lemrabott, O.H., Bako, Z.N., Wereme, A. and Sissoko, G. (2012). Determination of the Recombination and Electrical Parameters of a Vertical Multijunction Silicon Solar Cell. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 4, 2626-2631.

- [10] Ayvazian, G.E., Kirakosyan, G.H. and Minasyan, G.A. (2004). Characteristics of Solar Cells with Vertical p-n Junction. Proceedings of 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Paris, 7-11 June 2004, 117-119.
- [11] K. Taretto, U. Rau, Thomas A. Wagner, Jens Werner (2003). A Simple Method to Extract the Diffusion Length from the Output Parameters of Solar Cells - Application to Polycrystalline Silicon. *Solid State Phenomena Vol. 93*, Pp 399-404 <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.93.399>
- [12] R. R. Vardanyan, U. Kerst, P. Wawer, H. Wagemann, (1998). Method for measurement of all recombination parameters in the base region of solar cells. 2nd World conference and exhibition on photovoltaic solar energy conversion 6-10 July, Vol I; pp, 191-193
- [13] K. Misiakos, C. H. Wang, A. Neugroschel and F. A. Lindholm (1990). Simultaneous extraction of minority carrier parameters in crystalline semiconductors by lateral photocurrent. *J. Appl. Phys.* 67(1): 321-333.
- [14] Jurg Waldmeyer (1988). A contactless method for determination of carrier lifetime, surface recombination velocity, and diffusion constant in semiconductors; *J. Appl. Phys.* 63(6), 15, pp. 1977-1983.
- [15] Wang, C.H. and Neugroschel, A. (1987). Minority-Carrier Lifetime and Surface Recombination Velocity Measurement by Frequency-Domain Photoluminescence. *IEEE Transaction on Electron Devices*, 38, 2169-2180. <https://doi.org/10.1109/16.83745>
- [16] Th. Flohr and R. Helbig (1989). Determination of minority-carrier lifetime and Surface recombination velocity by optical beam induced current measurements at different light wavelengths. *J. Appl. Phys.*, 66(7), 3060-3065.
- [17] Bocande, Y.L., Correa, A., Gaye, I., Sow, M.L. and Sissoko, G. (1994) Bulk and Surfaces Parameters Determination in High Efficiency Si Solar Cells. Proceedings of the World Renewable Energy Congress, Pergamon, Part III, Vol. 3, 1698-1700
- [18] Jung, T.-W., Lindholm, F.A. and Neugroschel, A (1984). Unifying View of Transient Responses for Determining Lifetime and Surface Recombination Velocity in Silicon Diodes and Back-Surface-Field Solar Cells, with Application to Experimental Short-Circuit-Current Decay. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 31, 588-595. <https://doi.org/10.1109/T-ED.1984.21573>
- [19] G. Sissoko, C. Museruka, A. Corréa, I. Gaye and A. L. Ndiaye (1996). Light spectral effect on recombination parameters of silicon solar cell. *Renewable Energy*, Vol 3, pp.1487-1490. Pergamon, 0960-1481
- [20] O. Diasse, A. Diao, M. Wade, M. S. Diouf, I. Diatta, R. Mane, Y. Traore And G. Sissoko (2018). Back surface recombination velocity modeling in white bias silicon solar cell under steady state. *World Journal of Condensed Matter Physics*, 9, (1), pp. 189-201.
- [21] Wafaa Abd El-Basit, Ashraf Mosleh Abd El-Maksood and Fouad Abd El-Moniem Saad Soliman (2013). Mathematical Model for Photovoltaic Cells. *Leonardo Journal of Sciences*, Issue 23, pp.13-28. (<http://ljs.academicdirect.org/>)
- [22] Diallo, H.L., Maiga, A.S., Wereme, A. and Sissoko, G. (2008) New Approach of both Junction and Back Surface Recombination Velocities in a 3D Modelling Study of a Polycrystalline Silicon Solar Cell. *The European Physical Journal Applied Physics*, 42, 193-211. <http://dx.doi.org/10.1051/epjap:2008085>
- [23] Attoumane Mamadou Moustapha Kosso, Moustapha Thiame, Youssou Traore, Ibrahima Diatta, Mor Ndiaye, Lemrabbott Habiboullah, Ibrahima Ly, Grégoire Sissoko, (2018). 3D Study of a Silicon Solar Cell under Constant Monochromatic Illumination : Influence of Both, Temperature and Magnetic Field. *Journal of Scientific and Engineering Research*, 5(7):259-269. [24] Sissoko, G., Nanema, E., Correa, A., Biteye, P.M., Adj, M. and Ndiaye, A. L (1998). Silicon Solar cell recombination parameters determination using the illuminated I-V characteristic. *Renewable Energy*, Elsevier Science Ltd, 0960-1481/#. Vol-3, pp.1848-1851.
- [24] I. Ly, O.H. Lemrabbott, B. Dieng, I. Gaye, S. Gueye, M.S. Diouf and G. Sissoko, (2012). 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 *Revue des Energies Renouvelables Vol. 15 N°2* pp 187 – 206
- [25] Dieye, M, Mbodji, S, Zoungrana, M, Zerbo, I, Dieng, B and Sissoko, G. (2015) A 3D Modelling of Solar Cell's Electric Power under Real Operating Point. *World Journal of Condensed Matter Physics*, 5, 275-283. doi: 10.4236/wjcmp.2015.54028
- [26] B. Ba, M. Kane, A. Fickou, G. Sissoko (1993). Excess minority carrier densities and transient short circuit currents in polycrystalline silicon solar cells. *Solar Energy Materials and Solar cells* 31 pp. 33-49  
0927-0248 /93/\$ 06.00 © 1993 Elsevier Science Publishers B. V.
- [27] Joardar, K., Dondero, R.C. and Schroda, D.K (1989). Critical Analysis of the Small-Signal Voltage-Decay Technique for Minority-Carrier Lifetime Measurement in Solar Cells. *Solid State Electronics*, 32, pp.479-483. [https://doi.org/10.1016/0038-1101\(89\)90030-0](https://doi.org/10.1016/0038-1101(89)90030-0)

- [28] P. Mialhe, G. Sissoko, F. Pelanchon, and J. M. Salagnon (1992). Régimes transitoires des photopiles : durée de vie des porteurs et vitesse de recombinaison. *J. Phys. III, France* 2 pp. 2317-2331.
- [29] Kalidou Mamadou Sy, Alassane Diene, Séni Tamba, Marcel Sitor Diouf, Ibrahima Diatta, Mayoro Dieye, Youssou Traore, Grégoire Sissoko (2016). Effect of temperature on transient decay induced by charge removal of a silicon solar cell under constant illumination. *Journal of Scientific and Engineering Research*, 3(6): 433-445. [30]. G.Sissoko, S. Sivonthanam, M. Rodot, P. Mialhe, (1992). Constant illumination-induced open circuit voltage decay (CIOCV) method, as applied to high efficiency Si Solar cells for bulk and back surface characterization. 11th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (Montreux, Switzerland). Pp. 352-54.
- [31] Mandelis, A. (1989) Coupled Ac Photocurrent and Photothermal Reflectance Response Theory of Semiconducting p-n Junctions. I. *Journal of Applied Physics*, 66, 5572-5583. <https://doi.org/10.1063/1.343662>
- [31] Chih Hsin Wang and Arnost Neugroschel (1991). Minority-carrier lifetime and surface recombination velocity measurement by frequency-domain photoluminescence; *IEEE transactions on electron devices*, vol.38, no. 9. September, Pp. 2169-2180.
- [32] Ly, I., Zerbo, I., Wade, M., Ndiaye, M., Dieng, A., Diao, A., Thiam, N., Thiam, A., Dione, M.M., Barro, F.I., Maiga, A.S. and Sissoko, G. (2011). Bifacial Silicon Solar Cell under Frequency Modulation and Monochromatic Illumination: Recombination Velocities and Associated Equivalent Electrical Circuits. *Proceedings of 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg*, 5-9 September 2011, 298-301.
- [33] Luc, B., Shahriar, M., Dean, H., Marco, S., Manuela, A. and Claudio, N. (1994). Investigation of Carrier Transport through Silicon Wafers by Photocurrent Measurement. *Journal of Applied Physics*, 75, 4000-4008. <https://doi.org/10.1063/1.356022>
- [34] Honma, N., Munakata, C. and Shimizu, H. (1988). Calibration of Minority Carrier Lifetimes Measured with an Ac Photovoltaic Method. *Japanese Journal of Applied Physics*, 27, 1322-1326. <https://doi.org/10.1143/JJAP.27.1322>
- [35] F. Toure, M. Zoungrana, B. Zouma, S. Mbodji, S. Gueye, A. Diao & G. Sissoko (2012). Influence of Magnetic Field on Electrical Model and Electrical Parameters of a Solar Cell Under Intense Multispectral Illumination. *Global Journal of Science Frontier Research (A) Vol. XII, issue VI, Version I*, pp 51-59.
- [36] Antilla, O.J. and Hahn, S.K. (1993). Study on Surface Photovoltage Measurement of Long Diffusion Length Silicon: Simulation Results. *Journal of Applied Physics*, 74, 558-569. <https://doi.org/10.1063/1.355343>
- [37] Furlan, J. and Amon, S. (1985) Approximation of the Carrier Generation Rate in Illuminated Silicon. *Solid-State Electronics*, 28, 1241-1243. [https://doi.org/10.1016/0038-1101\(85\)90048-6](https://doi.org/10.1016/0038-1101(85)90048-6)
- [38] Fall, M., Gaye, I., Diarisso, D., Diop, G., Loum, K., Diop, N., Sy, K., Ndiaye, M. and Sissoko, G. (2021). AC Back Surface Recombination Velocity in  $n^+p$ - $p^+$  Silicon Solar Cell under Monochromatic Light and Temperature. *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, 13, 67-81. doi: 10.4236/jemaa.2021.135005.
- [39] Bakary Dit Dembo Sylla, Ibrahima Ly, Ousmane Sow, Babou Dione, Youssou Traore, Grégoire Sissoko, (2018). Junction Surface Recombination Concept as Applied to Silicon Solar Cell Maximum Power Point Determination Using Matlab/Simulink: Effect of Temperature. *Journal of Modern Physics*, 9, 172-188. <http://www.scirp.org/journal/jmp>
- [40] Mbodji, S., Zoungrana, M., Zerbo, I., Dieng, B. and Sissoko, G. (2015) Modelling Study of Magnetic Field's Effects on Solar Cell's Transient Decay. *World Journal of Condensed Matter Physics*, 5, 284-293. doi: 10.4236/wjcmp.2015.54029.
- [41] S. Mbodji, I. Ly, A. Dioum, H. Ly Diallo, I.F. Barro, G. Sissoko (2006). Equivalent electric circuit of a bifacial solar cell in transient state under magnetic field. *Proceedings of the 21<sup>st</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition -Dresden, Germany*, pp.447-450.
- [42] Y. Betser, D. Ritter, G. Bahir, S. Cohen, and J. Sperling, "Measurement of the minority carrier mobility in the base of heterojunction bipolar transistors using a magnetotransport method", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 67, No. 13, (1995) p 1883-1884.
- [43] S. Mbodji, A. S. Maiga, M. Dieng, A. Wereme, G. Sissoko (2009). Removal charge technique applied to a bifacial solar cell under a constant magnetic field *Global Journal of Pure and Applied Sciences*, Vol.15, N°1, pp.125-132.
- [44] Madougou, S., Made, F., Boukary, M.S. and Sissoko, G. (2007) I-V Characteristics for Bifacial Silicon Solar Cell Studied under a Magnetic Field. *Advanced Materials Research*, 18-19, 303-312. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.18-19.303>

- [45] Omar Dia, Mohamed Abderrahim Ould El Moujtaba, Sega Gueye, Mamadou Lamine Ba, Ibrahima Diatta, Gora Diop, Marcel Sitor Diouf and Gregoire Sissoko (2020). Optimum thickness determination technique as applied to a series vertical junction silicon solar cell under polychromatic illumination: effect of irradiation. *Int. J. Adv. Res.* 8(05). pp. 616-626. Article DOI:10.21474/IJAR01/10967 DOI URL: <http://dx.doi.org/10.21474/IJAR01/10967>
- [46] Ba. M.L, Thiam. N, Thiame. M, Traore. Y, Diop. M.S, Ba. M, Sarr. C.T, Wade. M and Sissoko. G. (2019). Base Thickness Optimization of a ( $n^+p-p^+$ ) Silicon Solar Cell in Static Mode under Irradiation of Charged Particles. *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, 11, pp.173-185. <https://doi.org/10.4236/jemaa.2019.1110012>
- [47] Sall. M, Diarisso .D , Faty Mbaye Fall. M, Diop. G, Ndiaye. M, Loum/ K and Sissoko, G. (2021). Back Illuminated N/P/P<sup>+</sup> Bifacial Silicon Solar Cell under Modulated Short-Wavelength: Determination of Base Optimum Thickness. *Energy and Power Engineering*, 13, 207-220. doi: 10.4236/epe.2021.135014.
- [48] Seydina, D., Mor, N., Ndeye, T., Youssou, T., Mamadou, L.B., Ibrahima, D., Marcel, S.D., Oulimata, M., Amary, T. and Grégoire, S. (2019). Influence of Temperature and Frequency on Minority Carrier Diffusion Coefficient in a Silicon Solar Cell Under Magnetic Field. *Energy and Power Engineering*, 11, 355-361. <https://doi.org/10.4236/epe.2019.1110023>
- [49] Ndiaye, A. , Gueye, S. , Mbaye Fall, M. , Diop, G. , Ba, A. , Ba, M. , Diatta, I. , Habiboullah, L. and Sissoko, G. (2020). Diffusion Coefficient at Resonance Frequency as Applied to n+/p/p+ Silicon Solar Cell Optimum Base Thickness Determination. *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, 12, 145-158. doi: 10.4236/jemaa.2020.1210012.
- [50] D. Faye, S. Gueye, M. Ndiaye, M. Ba, I. Diatta, Y. Traore, M. Diop, G. Diop, A. Diao, G. Sissoko Lamella Silicon Solar Cell under Both Temperature and Magnetic Field: Width Optimum Determination *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, 2020, 12, 43-55 <https://www.scirp.org/journal/jemaa>
- [51] Gaubas, E. and Vanhellemont, J. (1996). A Simple Technique for the Separation of Bulk and Surface Recombination Parameters in Silicon. *Journal of Applied Physics*, 80, 6293-6297. <https://doi.org/10.1063/1.363705>
- [52] Gupta, S., Ahmed, P. and Garg, S. (1988). A Method for the Determination of the Material parameters  $\eta$ ,  $D$ ,  $L$ ,  $S$  and  $\tau$  from Measured Short-Circuit Photocurrent. *Solar Cells*, 25, 61-72. [https://doi.org/10.1016/0379-6787\(88\)90058-0](https://doi.org/10.1016/0379-6787(88)90058-0)
- [53] J.H. Scofiels (1995). Effects of series resistance and inductance on solar cell admittance measurements. *Solar energy materials and solar cells*, 37(2), 217-233
- [54] M Chegaar, Z Ouennoughi, A Hoffmann (2001). A new method for evaluating illuminated solar cell parameters. *Solid-State Electronics* Vol. 45, issue 2, Pp. 293-296. [http://dx.doi.org/10.1016/s0038-1101\(00\)00277-x](http://dx.doi.org/10.1016/s0038-1101(00)00277-x)
- [55] Nobuyuki Andoh, Kenichi Hayashi, Takatoshi Shirasawa, Toshiyuki Sameshima, Koichi Kamisako (2001). Effect of film thickness on electrical property of microcrystalline silicon *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 66 issue 1-4 Pp. 437-441 [http://dx.doi.org/10.1016/s0927-0248\(00\)00205-1](http://dx.doi.org/10.1016/s0927-0248(00)00205-1)
- [56] M. Bashahu and A. Habyarimana (1995). Review and test of methods for determination of the solar cell series resistance. *Renewable Energy*, 6, 2, pp. 127-138, [https://doi.org/10.1016/0960-1481\(94\)E0021-V](https://doi.org/10.1016/0960-1481(94)E0021-V)
- [57] 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, G. Sissoko . Determination of the shunt and series resistances of a vertical multijunction solar cell under constant multispectral light. 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (2010), pp. 250-254.
- [57] Gokhan Sahin, Moustapha Dieng, Mohamed Abderrahim Ould El Moujtaba, Moussa libra Ngom, Amary Thiam, Grégoire Sissoko. (2015). Capacitance of Vertical Parallel Junction Silicon Solar Cell Under Monochromatic Modulated Illumination. *Journal of Applied Mathematics and Physics*, 3, 1536-1543.
- [58] Babou Dione, Ousmane Sow, Mamadou Wade, L. Y. Ibrahima, Senghane Mbodji, Gregoire Sissoko (2016). Experimental Processus for Acquisition Automatic Features of I-V Properties and Temperature of the Solar Panel by Changing the Operating Point. *Circuits and Systems*, 7, 3984-4000 <http://www.scirp.org/journal/cs> ISSN Online: 2153-1293 ISSN Print: 2153-1285.
- [59] Grégoire Sissoko and Senghane Mbodji (2011). A Method to Determine the Solar Cell Resistances from Single I-V Characteristic Curve Considering the Junction Recombination Velocity ( $S_f$ ). *Int. J. Pure Appl. Sci. Technol.*, 6(2), pp.103-114. ISSN 2229 – 6107 Available online at [www.ijopaasat.in](http://www.ijopaasat.in)
- [60] Ndiaye, F.M., Ba, M.L., Ba, M.A., Diop, G., Diatta, I., Sow, E.H., Mballo, O. and Sissoko, G. (2020) Lamella Silicon Optimum Width Determination under Temperature. *International Journal of Advanced Research*, 8, 1409-1419. <https://doi.org/10.21474/IJAR01/11228>

- [61] Mohamed. N, Sow. O, Gueye. S, Traore. Y, Diatta. I, Thiam. A, Ba. M, Mane. R, Ly. I and Sissoko. G. (2019). Influence of Both Magnetic Field and Temperature on Silicon Solar Cell Base Optimum Thickness Determination. *Journal of Modern Physics*, **10**, 1596-1605. doi: 10.4236/jmp.2019.1013105.
- [62] Cheikh Thiaw, Mamadou Lamine Ba, Mamour Amadou Ba, Gora Diop, Ibrahima Diatta, Mor Ndiaye, Gregoire Sissoko (2020). n+-p-p+ Silicon Solar Cell Base Optimum Thickness Determination under Magnetic Field. *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, **12**, pp. 103-113, ISSN Online: 1942-0749 ISSN Print: 1942-0730: <https://www.scirp.org/journal/paperabs.aspx?paperid=101717>
- [63] Diop, G., Ba, H.Y., Thiam, N., Traore, Y., Dione, B., Ba, M.A., Diop, P., Diop, M.S., Mballo, O. and Sissoko, G (2019). Base Thickness Optimization of a Vertical Series Junction Silicon Solar Cell under Magnetic Field by the Concept of Back Surface Recombination Velocity of Minority Carrier. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, **14**, 4078-4085.
- [64] Sidi Dede, M. , Lamine Ba, M. , Amadou Ba, M. , Ndiaye, M. , Gueye, S. , Sow, E. , Diatta, I. , Diop, M. , Wade, M. and Sissoko, G. (2020). Back Surface Recombination Velocity Dependent of Absorption Coefficient as Applied to Determine Base Optimum Thickness of an n+/p/p+ Silicon Solar Cell. *Energy and Power Engineering*, **12**, 445-458. doi: 10.4236/epe.2020.127027.
- [65] Masse Samba Diop, Hamet Yoro Ba, Ndeye Thiam, Ibrahima Diatta, Youssou Traore, Mamadou Lamine Ba, El Hadji Sow, Oulymata Mballo, Grégoire Sissoko (2019). Surface Recombination Concept as Applied to Determinate Silicon Solar Cell Base Optimum Thickness with Doping Level Effect. *World Journal of Condensed Matter Physics*, **9**, 102-111. <https://doi.org/10.4236/wjcmp.2019.94008>
- [66] Kunst, M., Muller, G., Schmidt, R. and Wetzal, H. (1988). Surface and Volume Decay Processes in Semiconductors Studied by Contactless Transient Photoconductivity Measurements. *Applied Physics*, **46**, 77-85. <https://doi.org/10.1007/BF00615912>
- [67] Richard, M., Ibrahima, L., Mamadou, W., Ibrahima, D., Marcel, S.D., Youssou, T., Mor, N., Seni, T. and Grégoire, S. (2017). Minority Carrier Diffusion Coefficient  $D^*(B, T)$ : Study in Temperature on a Silicon Solar Cell under Magnetic Field. *Energy and Power Engineering*, **9**, 1-10. <http://www.scirp.org/journal/epe>. <https://doi.org/10.4236/epe.2017.91001>
- [68] H.Reinhard(1987). *Equation aux dérivées partielles*. Dunod Université, Paris.