



Journal Homepage: -www.journalijar.com

INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED RESEARCH (IJAR)

Article DOI: 10.21474/IJAR01/17980
DOI URL: <http://dx.doi.org/10.21474/IJAR01/17980>



RESEARCH ARTICLE

PHOTOPILE MONOFACIALE AU SILICIUM EN REGIME TRANSITOIRE : INFLUENCE DE L'IRRADIATION SUR LA DENSITE DE PHOTOCOURANT ET LA CAPACITE

Batoura Sagna¹, Mohamed Lemine Cheikh¹, Habiboula Lemrabott^{1,2}, Sega Gueye^{1,3}, Moustapha Thiame^{1,4} and Gregoire Sissoko¹

1. Groupe International de Recherche en Energie Renouvelable (GIRER). BP. 15003, Dakar, Sénégal.
2. Ecole Supérieure Mutinational de Télécommunication-Dakar, Sénégal.
3. Faculte des Sciences et Technologies de L'éducation et de la Formation-Departement de Physique et Chimie, Université Cheikh Anta DIOP, Dakar-Sénégal.
4. Université Assane SECK, Ziguinchor, Senegal.

Manuscript Info

Manuscript History

Received: 10 October 2023

Final Accepted: 14 November 2023

Published: December 2023

Key words:-

Photopile au Silicium, Irradiation, Régime Transitoire, Photocourant, Capacité

Abstract

Dans ce travail, nous étudions l'influence de l'irradiation (énergie d'irradiation et coefficient de dommage) sur le comportement d'une photopile solaire en régime transitoire, éclairée par sa face avant. L'étude porte principalement sur la densité de photocourant et sur la capacité de diffusion de la photopile. Après la résolution de l'équation de continuité des porteurs minoritaires de charge dans la base, nous obtenons une expression de la densité des porteurs minoritaires de charge, de la densité de photocourant, de la phototension et de la capacité de diffusion toutes dépendantes du temps. La densité des porteurs minoritaires de charge, la densité de photocourant, la phototension et la capacité de diffusion de la photopile sont étudiées pour différentes valeurs de l'énergie d'irradiation et du coefficient de dommage en fonction du temps.

Copy Right, IJAR, 2023,. All rights reserved.

Introduction:-

L'effet photovoltaïque est la transformation de la lumière en électricité dans le matériau sémiconducteur [1-4]. La structure utilisé pour la conversion de cette énergie lumineuse en électricité, est constituée de jonctions de matériaux semiconducteurs (de types n et p), et est appelé cellule solaire ou photopile [5-6]. Plusieurs auteurs ont effectué des travaux sur la caractérisation du matériau silicium, pour la détermination des paramètres phénoménologiques [7-19] et électriques [20-27] en vue d'améliorer le rendement [28-32] des photopies solaires. Certains de ces travaux ont porté sur une étude de la photopile dans le modèle à trois (03) dimensions [33, 34]; effet de la température [35, 36]; sous irradiation [37-49] et avec un éclairement en modulation de fréquence [50-54]; en régime statique [55, 56] afin de comprendre les mécanismes physiques qui gouvernent le comportement des porteurs minoritaires de charge avant ou après avoir traversé la zone de charge d'espace [57-61] et aussi, permettre la détermination des paramètres électriques afin d'améliorer le rendement des photopies.

Des études sur la capacité de la zone de charge d'espace en présence ou non de champ électromagnétique ont été réalisées à trois dimensions pour différents régimes de fonctionnement [62].

Corresponding Author:- Batoura Sagna

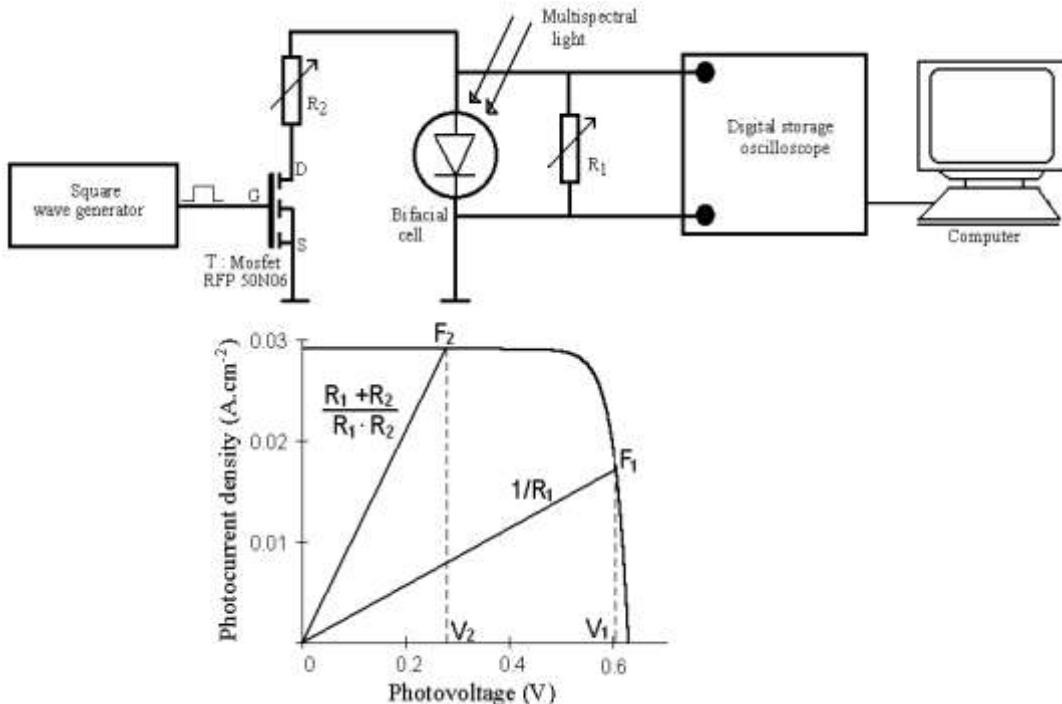
Address:- Groupe International de Recherche en Energie Renouvelable (GIRER).
BP. 15003, Dakar, Sénégal.

Dans ce travail, nous proposons d'étudier l'influence du flux d'irradiation et l'intensité du coefficient de dommage par des particules électriques chargées, sur la densité de photocourant et sur la capacité de diffusion de la photopile mono faciale en régime transitoire.

Régime transitoire par variation du point de fonctionnement de la photopile

Dispositif expérimental

La **figure. 1**, donne le schéma du dispositif expérimental conduisant au régime transitoire obtenu de la photopile sous éclairement constant par variation du point de fonctionnement (entre **F₁** et **F₂**), à l'aide des résistances de charge (R_1 et R_2) [16, 18].



Figures 1 et 2:- Dispositif expérimental et caractéristique I-V sous éclairement.

A l'instant $t < 0$ s, vu que la photopile est sous éclairement multi spectral constant, le transistor MOSFET T est ouvert et la résistance se trouve chargée par la résistance R_2 seule. C'est le point de fonctionnement F_1 en régime stationnaire. (Figure 1). A l'instant $t = 0$ s, commence la fermeture du MOSFET T et après un temps très court, à l'ordre de 800ns ; le MOSFET est totalement fermé et la résistance R_1 se trouve en parallèle avec R_2 . On se trouve au point de fonctionnement F_2 en régime stationnaire (figure 1). On appelle régime transitoire ; le régime établi entre deux points de fonctionnement F_1 et F_2 du régime statique. L'oscilloscope numérique nous permet d'enregistrer la tension transitoire aux bornes de la photopile. Cet oscilloscope assure la transmission à un micro-ordinateur qui à son tour assure le traitement et l'analyse de la tension. La variation des résistances R_1 et R_2 entraîne le déplacement des points de fonctionnement F_1 et F_2 sur la caractéristique courant-tension de la photopile, ce qui nous permet d'effectuer l'expérience en tout point de cette caractéristique depuis le circuit ouvert jusqu'au court-circuit pour enregistrer la réponse en tension ou en courant de la photopile sous éclairement multispectral constant.

La **figure 2** donne l'allure de la caractéristique courant-tension (I- V) de la photopile sous éclairement constant.

Etude théorique

La **figure. 3** présente la structure de la photopile au silicium [63-66] dans le modèle à une dimension et éclairée par la face avant. Le fonctionnement d'une photopile est directement lié aux phénomènes de génération-diffusion et recombinaison des porteurs minoritaires de charge photo générés dans la base.

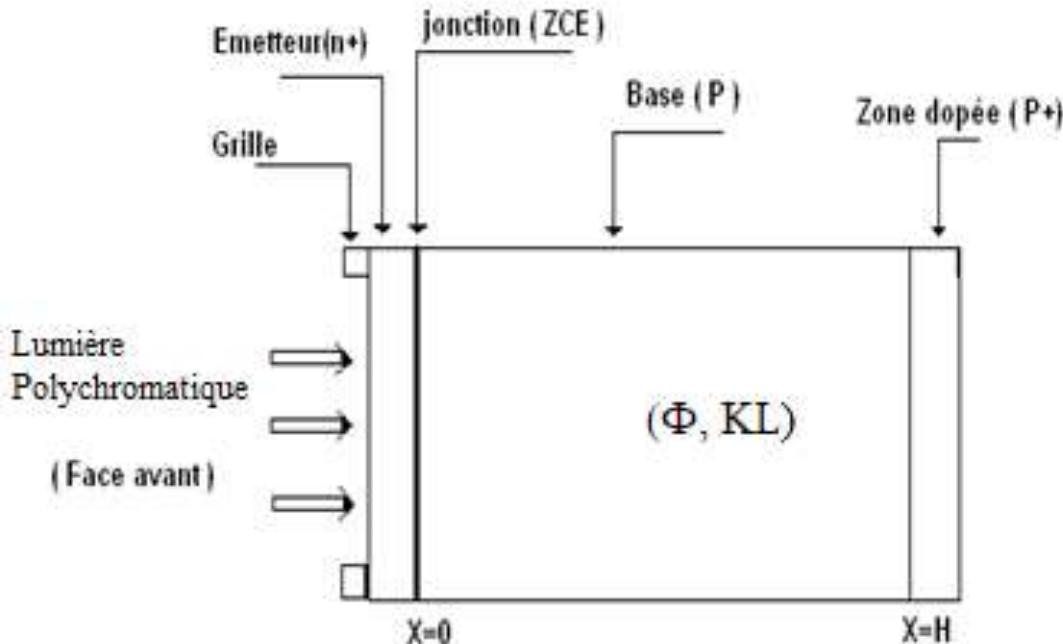


Figure.3:- Structure d'une photopile au silicium sous irradiation (\emptyset , KL) et éclairée par sa face avant.

L'éclairement polychromatique est uniforme sur la surface incidente. Le taux de génération des porteurs de charge photogénérés en profondeur dans la base de la photopile est exprimé par :

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

Les coefficients a_i et b_i sont déduits à partir à partir des valeurs tabulées modélisant tout le spectre de la radiation solaire [67] sur le taux de génération de porteurs minoritaires dans la photopile.

Les contributions de l'émetteur et de la zone de charge d'espace sont considérées comme négligeables. Alors les analyses se limiteront à la base de la photopile d'épaisseur $H = 0.02\text{cm}$. Ainsi la densité des porteurs minoritaires de charge en régime transitoire est obtenue en résolvant l'équation de continuité dans le modèle à une dimension (1D) [68-71] régie par :

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

$\delta(x, t)$: est la densité des porteurs minoritaires de charge en excès

$G(x)$: est le taux de génération des porteurs minoritaires de charge

$D(kl, \emptyset)$: est le coefficient de diffusion des porteurs minoritaires de charge dans la base sous irradiation [37-49]:

$$D(kl, \emptyset) = \frac{L_0^2}{(1 + L_0^2 * kl * \emptyset) * \tau} \quad (3)$$

τ : est la durée de vie des porteurs minoritaires de charge dans la base

L_0 : est la longueur de diffusion des porteurs de charge dans la photopile avant irradiation.

$$\text{Or } \tau \cdot D(kl, \emptyset) = L(kl, \emptyset)^2 \quad (4)$$

Dans la relation (3), $L(kl, \emptyset)$ est la longueur de diffusion des porteurs minoritaires dans la base, dépendant du flux de l'énergie d'irradiation et du coefficient de dommage, donnée par la relation suivante [43]:

$$L(kl, \emptyset) = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{L_0^2} + kl * \emptyset}} \quad (5)$$

$L(kl, \emptyset)$: est la longueur de diffusion des porteurs minoritaires de charges dans la base sous ir-

kl : est l'intensité du coefficient de dommages des particules chargées

\emptyset : est le flux d'énergie d'irradiation des particules chargées.

L'équation (2) est résolue en utilisant les conditions aux limites [10, 18, 19, 35, 43, 64, 65, 69-77] respectivement à la jonction et à la face arrière.

- A la jonction ($x = 0$)

$$D(kl, \emptyset) \frac{\partial \delta(x = 0, t)}{\partial x} = S_f \cdot \delta(x = 0, t) \quad (6)$$

- A la face arrière ($x = H$)

$$D(kl, \emptyset) \frac{\partial \delta(x = H, t)}{\partial x} = -S_b \cdot \delta(x = H, t) \quad (7)$$

S_f est définie comme la vitesse de recombinaison des porteurs de charge à la jonction. C'est la somme de deux termes qui traduisent les pertes au niveau de la jonction et les collectes des porteurs minoritaires [10, 18, 19,]. Quant à S_b , elle est la vitesse de recombinaison des porteurs à la surface arrière et traduit les pertes en surface arrière de la base, des porteurs minoritaires de charge [35, 43, 64, 64].

Les équations (5) et (6) forment un système de Sturm Louiville [68] dont les solutions sont obtenues en utilisant la méthode de séparation des variables d'espace et de temps. Ce qui nous permet d'écrire

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

Où :

$X(x)$ est la composante spatiale de la densité des porteurs minoritaires de charges.

$T(t)$ est la composante temporelle de la densité des porteurs minoritaires de charges.

$$X(x) = A \cos\left(\frac{x \cdot \omega}{\sqrt{D(kl, \emptyset)}}\right) + B \cdot \sin\left(\frac{x \cdot \omega}{\sqrt{D(kl, \emptyset)}}\right) \quad (9)$$

et

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

Avec la constante de temps de décroissance $\tau_c = \frac{1}{(\omega^2 + \frac{1}{\tau})}$.

En utilisant dans un premier temps la condition de limite à la jonction et en remplaçant $\delta(x, t)$ par sa forme générale $X(x) \cdot T(t)$, on obtient l'expression suivante :

$$\frac{\omega}{S_f} \cdot \sqrt{D(kl, \emptyset)} = \frac{A}{B} \quad (11)$$

En utilisant en suite la condition aux limites au niveau de la face arrière ; cela nous conduit à l'expression suivante:

$$\tan\left(\frac{\omega \cdot H}{\sqrt{D(kl, \emptyset)}}\right) = \frac{\omega \cdot \sqrt{D(kl, \emptyset)} \cdot (S_f + S_b)}{\omega^2 \cdot D(kl, \emptyset) - S_f \cdot S_b} \quad (12)$$

Avec

$$\frac{\omega \cdot H}{\sqrt{D(kl, \emptyset)}} \in \left[0; \frac{\pi}{2}\right] \cup \left[n - \frac{1}{2}; n + \frac{1}{2}\right] \cdot \pi \quad (13)$$

n est un entier naturel et

$$\omega^2 \cdot D(kl, \emptyset) \neq S_b \cdot S_f$$

Or

$$L(kl, \emptyset) = \sqrt{D(kl, \emptyset)} * \tau \quad (14)$$

En tenant compte de la relation (14) et en exprimant $D(kl, \emptyset)$ en fonction de $L(kl, \emptyset)$ et τ , l'expression de l'équation transcendante, utilisée pour la détermination des valeurs propres ω ($\text{rad}/\text{s}^{\frac{1}{2}}$), est donnée à la relation suivante :

$$\tan\left(\frac{\omega \cdot H \cdot \sqrt{\tau}}{L}\right) = \frac{\omega \cdot L \cdot \sqrt{\tau} \cdot (S_b + S_f)}{\omega^2 \cdot L^2 - \tau \cdot S_b \cdot S_f} \quad (15)$$

Ce type d'équation peut être résolue par la méthode numérique ou par la méthode graphique que nous utilisons ici, pour obtenir les solutions acceptables ω_n ; dans notre travail, les solutions de l'équation transcendante sont données par les points d'intersection des deux courbes $F(\omega) = \tan\left(\frac{\omega \cdot H \cdot \sqrt{\tau}}{L}\right)$ et $G(\omega) = \frac{\omega \cdot L \cdot \sqrt{\tau} \cdot (S_b + S_f)}{\omega^2 \cdot L^2 - \tau \cdot S_b \cdot S_f}$.

Ainsi sous forme de tableau les solutions de l'équation de l'équation transcendante donne la valeur propre (ω_n) et n désigne l'ordre des harmoniques. Si n = 0 correspond au mode fondamental.

Pour un flux d'énergie d'irradiation $\emptyset = 0 \text{ MeV}$ on a :

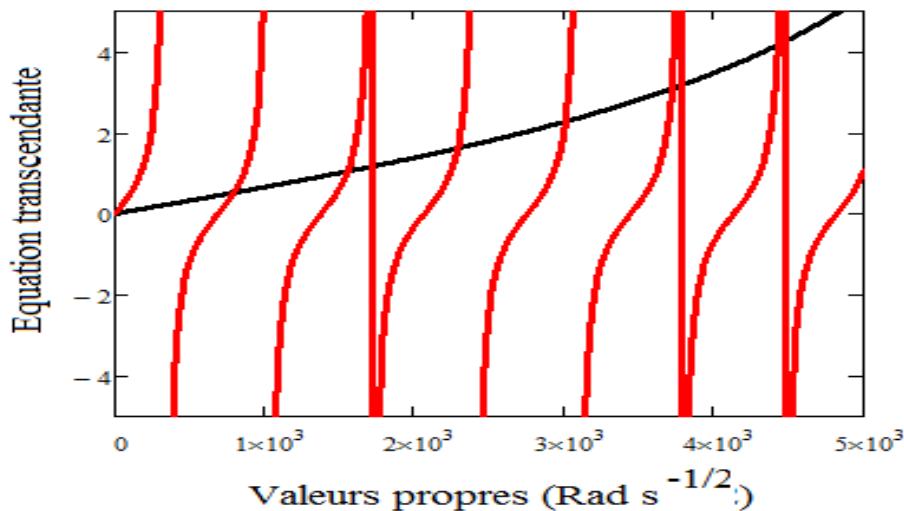


Fig.4:- Détermination graphique de valeurs propres pour un flux d'énergie d'irradiation $\phi=0\text{MeV}$; $kl = 10\text{cm}^2/\text{s}$; $H = 0.02\text{cm}$; $\tau = 5.10^{-6}\text{s}$; $L_0 = 0.01\text{cm}$; $D = 26\text{cm}^2/\text{s}$; $Sf_j = 6.10^6\text{cm}/\text{s}$.

Tableau 1:- Valeurs propres pour $\phi=0\text{MeV}$.

n	1	2	3	4
$\omega_n(\text{rad/s}^{-1/2})$	925	1800	2635	3460

➤ Pour une énergie d'irradiation $\phi = 100\text{MeV}$

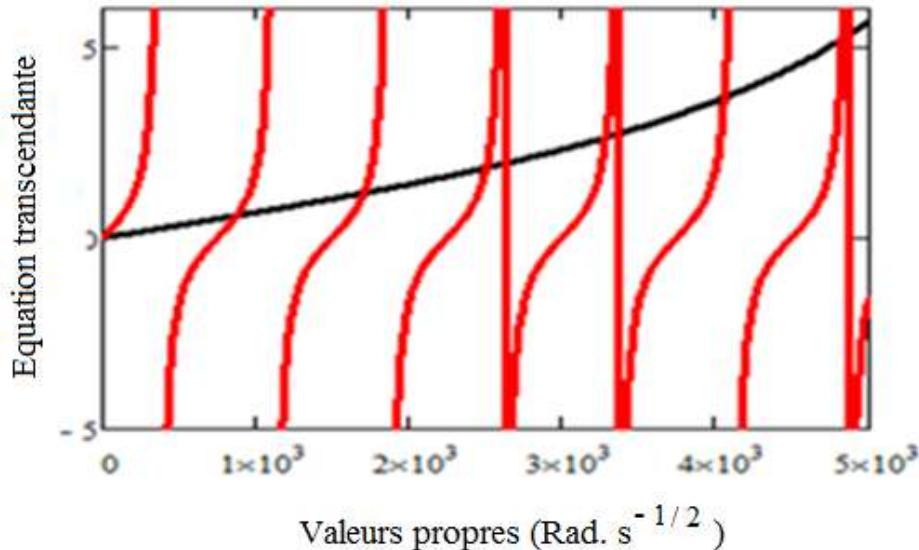


Fig.5 : Détermination graphique de valeurs propres pour un flux d'énergie d'irradiation $\phi=100\text{MeV}$; $kl = 10\text{cm}^2/\text{s}$; $H = 0.02\text{cm}$; $\tau = 5.10^{-6}\text{s}$; $L_0 = 0.01\text{cm}$; $D = 26\text{cm}^2/\text{s}$; $Sf_j = 6.10^6\text{cm}/\text{s}$.

Tableau 2:- Valeurs propres pour $\phi=100\text{MeV}$.

n	1	2	3	4
$\omega_n(\text{rad/s}^{-1/2})$	895	1710	2490	3270

➤ Pour un flux d'énergie d'irradiation $\phi = 200\text{MeV}$

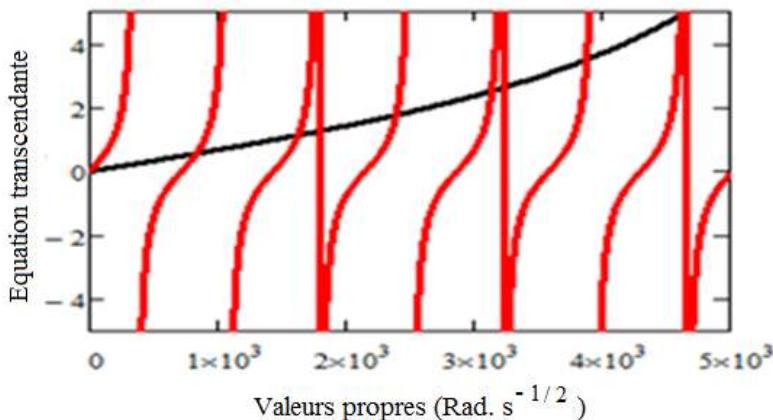


Fig.6:- Détermination graphique de valeurs propres $\phi=200\text{MeV}$; $kl = 10\text{cm}^2/\text{s}$; $H = 0.02\text{cm}$; $L_0 = 0.01\text{cm}$; $\tau = 5 \cdot 10^{-6}\text{s}$; $D = 26\text{cm}^2/\text{s}$; $Sf_j = 6 \cdot 10^6\text{cm/s}$

Tableau2:- Valeurs propres pour $\phi=200\text{MeV}$.

n	1	2	3	4
$\omega_n(\text{rad/s}^{-1/2})$	840	1635	2395	3155

➤ Pour un flux d'énergie d'irradiation $\phi = 250\text{MeV}$

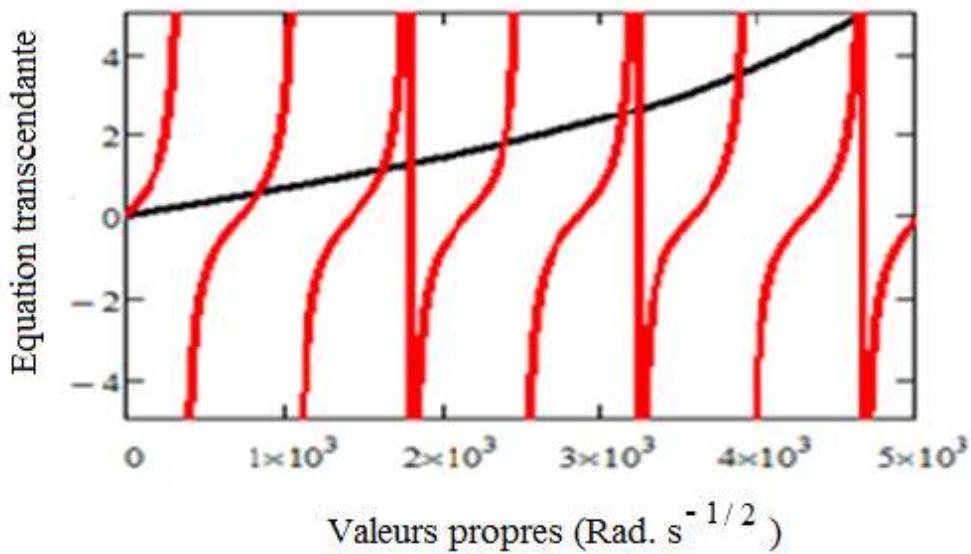


Figure7:- Détermination graphique de valeurs propres $\phi=250\text{MeV}$; $kl = 10\text{cm}^2/\text{s}$; $H = 0.02\text{cm}$; $L_0 = 0.01\text{cm}$; $\tau = 5 \cdot 10^{-6}\text{s}$; $D = 26\text{cm}^2/\text{s}$; $Sf_j = 6 \cdot 10^6\text{cm/s}$

Tableau 3:- Valeurs propres pour $\phi=250\text{MeV}$.

n	0	1	2	3	4
$\omega_n(\text{rad/s}^{-1/2})$	597	835	1595	2345	3095

ω_0 correspond à la valeur propre du mode fondamentale et les valeurs propres ω_n correspondent aux autres modes ; les harmoniques d'ordre n lorsque ($n > 0$). Ainsi, les coefficients (A ; B) sont obtenus à l'aide de la normalisation et des transformations de Fourier. Alors la densité des porteurs minoritaires de charge apparaît comme une somme infinie de termes $\delta_n(x; t)$. Chaque terme $\delta_n(x; t)$ est la contribution de l'harmonique d'ordre n sur la densité des porteurs minoritaires

Résultats et Discussions:-

La densité des porteurs minoritaires de charge

Pour la simulation, nous prenons en compte, la profondeur, la longueur de diffusion, le coefficient de diffusion de la photopile, ainsi que les valeurs propres ω_n qui sont déterminées par la méthode graphique. Les valeurs propres (point d'intersection des deux courbes) caractérisent les points de fonctionnement. La densité des porteurs minoritaires de charge est alors exprimée en fonction du flux d'énergie d'irradiation, du coefficient de dommage, de l'ordre n des harmoniques et du temps t.

La **figure 8** donne le profil de la densité des porteurs minoritaires en fonction du temps pour différents états harmoniques pour un flux d'énergie d'irradiation $\phi = 100\text{MeV}$ et $k=10\text{cm}^2/\text{s}$

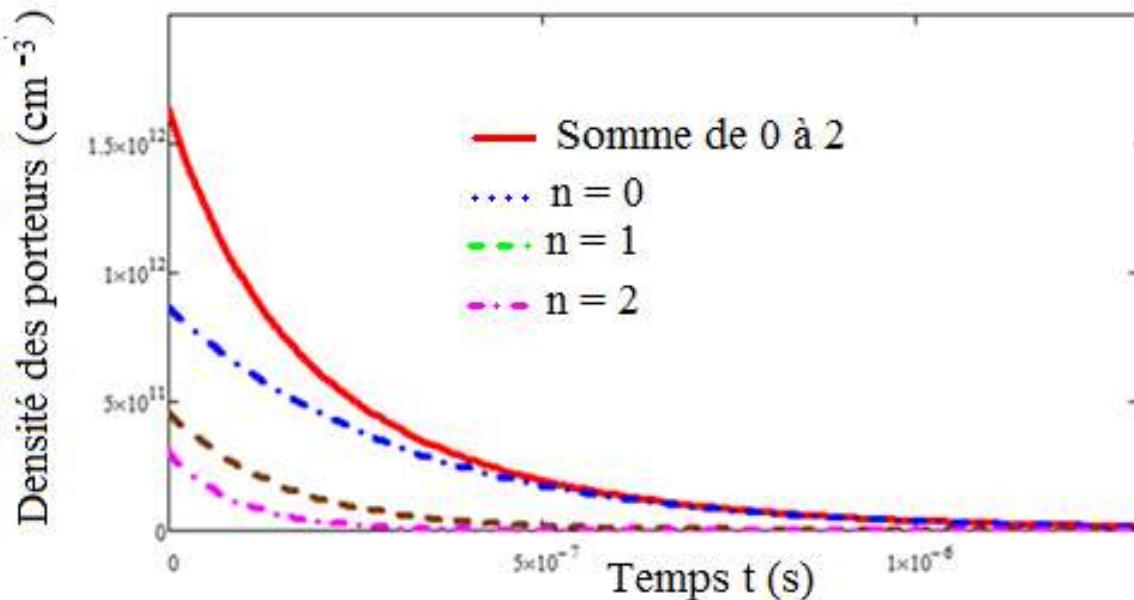


Figure 8:-Profil de la densité des porteurs minoritaires en fonction du temps pour le mode fondamental et les deux premières harmoniques ; $\phi=100\text{MeV}$; $k=10\text{cm}^2/\text{s}$; $D=26\text{cm}^2/\text{s}$; $S_f=6.10^6\text{cm}/\text{s}$; $x=0.02\text{cm}$; $L_0=0.01\text{cm}$.

Sur cette **figure 8**, la densité des porteurs minoritaires diminue en fonction du temps pour atteindre le régime stationnaire final. Il en est de même pour les deux harmoniques de rang n, ainsi que leur somme (somme de n=0 à n=2). Par contre on observe qu'au bout d'un temps t_0 les deux autres modes ou harmoniques ($n \neq 0$) tendent très rapidement vers zéro (0), alors que pour le mode fondamental, sa densité se confond à la somme c'est à dire à la densité totale $\delta(x, t)$. Donc, nous pouvons écrire que pour $t \geq t_0$ on a : $\delta(x, t) = \delta_0(x, t)$, la somme converge alors vers le mode fondamental. Par conséquent, après un temps assez court c'est-à-dire une durée assez faible, étudier la densité $\delta(x, t)$ revient à étudier la densité $\delta_0(x, t)$ qui représente la densité des porteurs minoritaires pour le mode fondamental.

Les **figures. 9 et 10**, présentent l'influence respective du flux d'énergie d'irradiation et de l'intensité du coefficient de dommage sur ladensité des porteurs de charge au cours du temps.

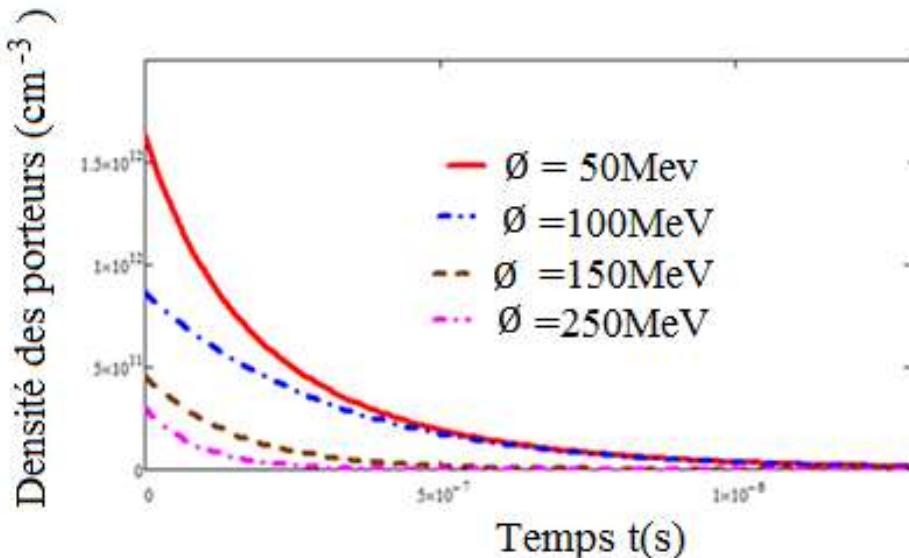


Figure 9:- Profil de la densité des porteurs de charge en fonction du temps pour différentes valeurs du flux d'énergie d'irradiation; $k_1=10\text{cm}^2/\text{s}Sf_j=6.10^6\text{cm/s}$; $H=0.02\text{cm}$; $L_0=0.01\text{cm}$; $D=26\text{cm}^2/\text{s}$; $\tau=5.10^{-5}\text{s}$.

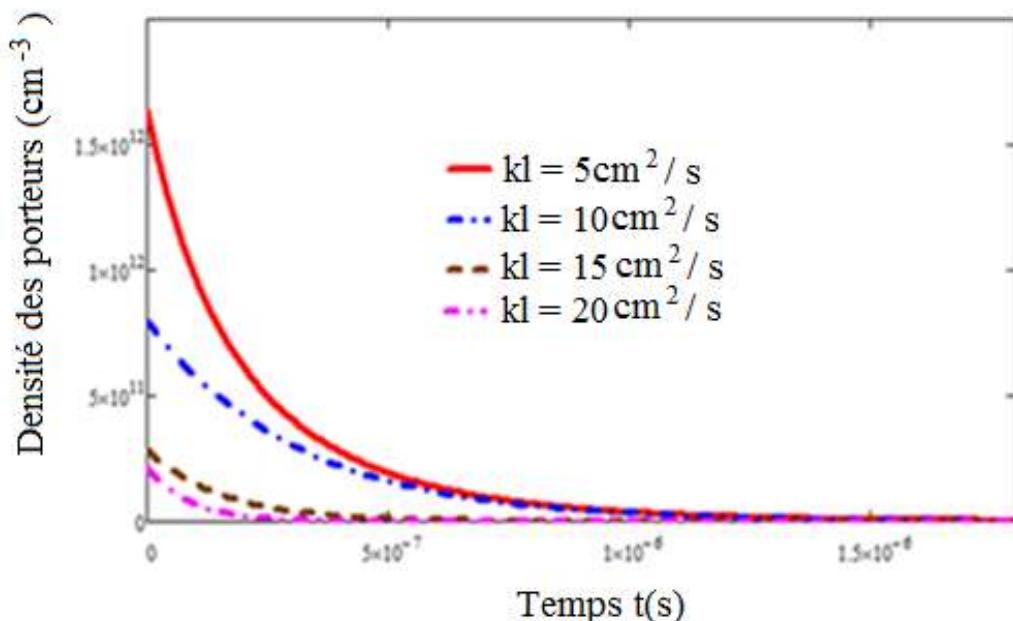


Figure 10:- Profil de la densité des porteurs en fonction du temps pour différentes valeurs de l'intensité du coefficient de dommage; $\emptyset=100\text{MeV}$; $Sf_j=6.10^6\text{cm/s}$; $H=0.02\text{cm}$; $L_0=0.01\text{cm}$; $D=26\text{cm}^2/\text{s}$; $\tau=5.10^{-5}\text{s}$.

Sur les **figures 9 et 10** nous remarquons que le flux d'énergie d'irradiation des particules affecte la densité des porteurs minoritaires de charge. L'augmentation du flux d'énergie d'irradiation est accompagnée d'une diminution de la densité des porteurs minoritaires de charge et sa variation dans le temps de cette dernière devient plus remarquable. Les effets de la variation de l'intensité du coefficient de dommage sont similaires.

Etude de la phototension

L'expression de la phototension est donnée par la relation de Boltzmann:

$$V_{ph}(x, t) = V_T * \ln \left(1 + N_b \frac{\delta(0, t)}{n(T)^2} \right) \quad (15)$$

Où :

N_b correspond au niveau ou taux de dopage de la base de la photopile

V_T : est la tension thermique avec :

$$V_T = \frac{K_b \cdot T}{q} \quad (16)$$

$n(T)$ est la température intrinsèque de la densité intrinsèque des porteurs exprimé comme suit :

$$n(T) = A \cdot T^{\frac{3}{2}} \cdot \exp\left[\frac{-Eg}{2 \cdot K_b \cdot T}\right] \quad (17)$$

A est constant et vaut : $A = 3.87 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3} \text{ K}^{-\frac{3}{2}}$

Sur les **figures 11 et 12** nous avons représenté respectivement le profil de la phototension en fonction du temps pour différentes valeurs du flux d'énergie d'irradiation et de l'intensité du coefficient de dommage.

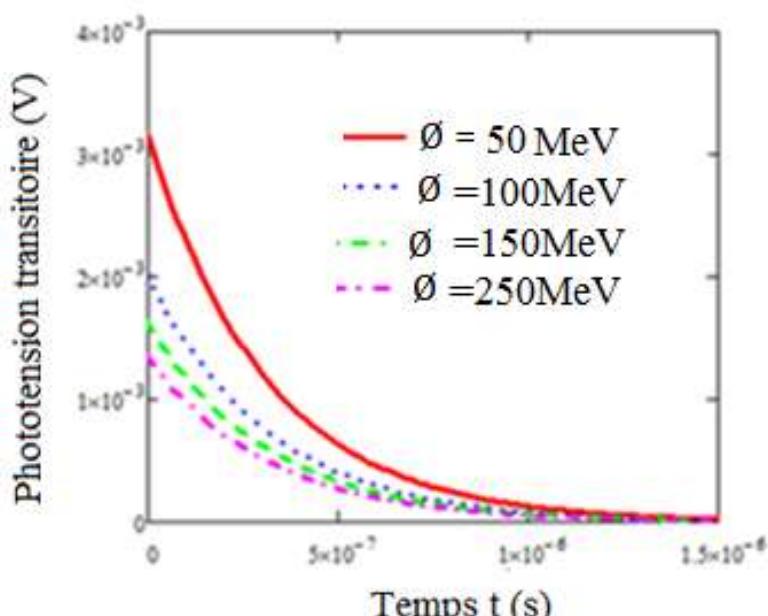


Figure. 11:- Profil de la phototension transitoire pour différentes valeurs du flux d'énergie d'irradiation; $kI=10 \text{ cm}^2/\text{s}$; $sSf_j = 6.10^6 \text{ cm/s}$; $H = 0.02 \text{ cm}$; $L_0 = 0.01 \text{ cm}$; $D = 26 \text{ cm}^2/\text{s}$; $\tau = 5.10^{-5} \text{ s}$.

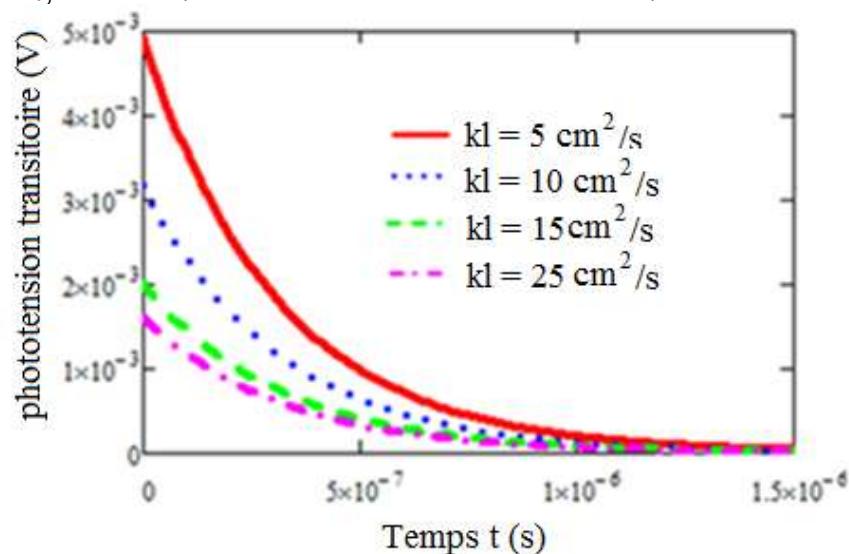


Fig.12:- Profil de la phototension transitoire pour différentes valeurs de l'intensité du coefficient de dommage; $\emptyset = 100 \text{ MeV}$; $Sf_j = 6.10^6 \text{ cm/s}$; $H = 0.02 \text{ cm}$; $L_0 = 0.01 \text{ cm}$; $D = 26 \text{ cm}^2/\text{s}$; $\tau = 5.10^{-5} \text{ s}$.

Les **figures 11 et 12** montrent que la phototension transitoire diminue lorsque le flux d'énergie d'irradiation et le coefficient de dommage augmentent, et elle finit par s'annuler au cours du temps.

Densité de photocourant

Le photocourant transitoire est donné par la relation suivante :

$$J_{ph}(t) = q * D(kl, \emptyset) \frac{\partial \delta(x, t)}{\partial x} /_{x=0} \quad (18)$$

Avec q : la charge de l'électron

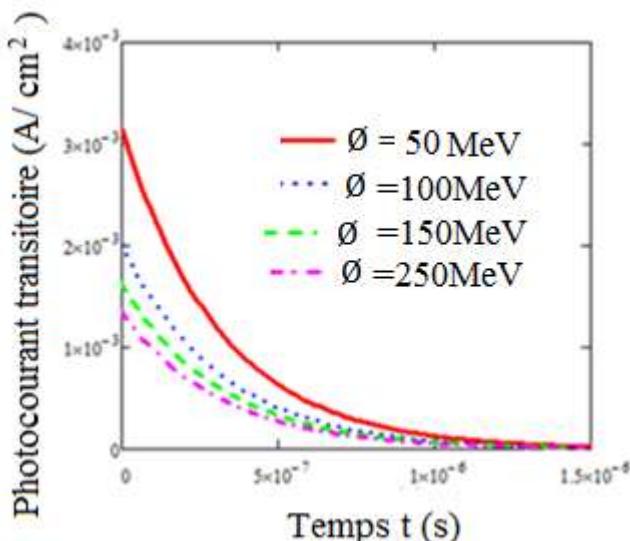


Figure 13:- Profil du photocourant transitoire pour différentes valeurs du flux d'énergie d'irradiation ; $kl=10\text{cm}^2/\text{s}$; $Sf_j = 6.10^6\text{cm/s}$; $H = 0.02\text{cm}$; $L_0 = 0.01\text{cm}$; $D = 26\text{cm}^2/\text{s}$; $\tau = 5.10^{-5}\text{s}$.

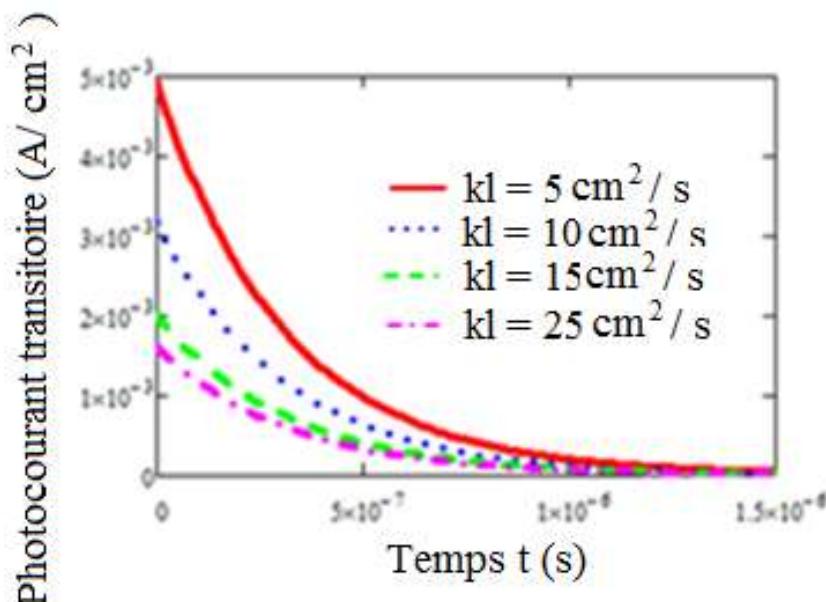


Figure14:-Profil du photocourant transitoire pour différentes valeurs de l'intensité du coefficient de dommage; $\emptyset = 100\text{MeV}$; $Sf_j = 6.10^6\text{cm/s}$; $H = 0.02\text{cm}$; $L_0 = 0.01\text{cm}$; $D = 26\text{cm}^2/\text{s}$; $\tau = 5.10^{-5}\text{s}$.

Nous observons sur les **figures 13 et 14** que la densité de photocourant diminue lorsque le flux d'énergie d'irradiation et l'intensité du coefficient de dommage augmentent. Cela est dû au fait que la densité des porteurs

minoritaires de charge est affectée par l'irradiation ; le nombre de porteurs traversant la zone de charge d'espace va diminuer par conséquent, la décroissance de la densité de photocourant.

Capacité transitoire

La capacité de diffusion [57-61] d'une photopile provient de la diffusion de la densité des porteurs minoritaires de charge dans la base. Ainsi l'expression de la capacité $C(t)$ de la photopile en régime transitoire est donnée par l'expression suivante :

$$C(t) = q * \frac{d\delta(x = 0, t)}{dV_{ph}(x = 0, t)} \quad (19)$$

A partir de l'expression de la phototension, nous obtenons la relation suivante :

$$C(t) = q * \frac{n(T)^2}{N_b \cdot V_T} + \frac{q \cdot \delta(x = 0; t)}{V_T} \quad (20)$$

En posant la capacité de transition :

$$C_0(T) = q * \frac{n(T)^2}{N_b \cdot V_T} \quad (21)$$

Et

$$C_1(x = 0; t) = \frac{q \cdot \delta(x = 0; t)}{V_T} \quad (22)$$

Alors

$$C(t) = C_0(T) + C_1(x = 0; t) \quad (23)$$

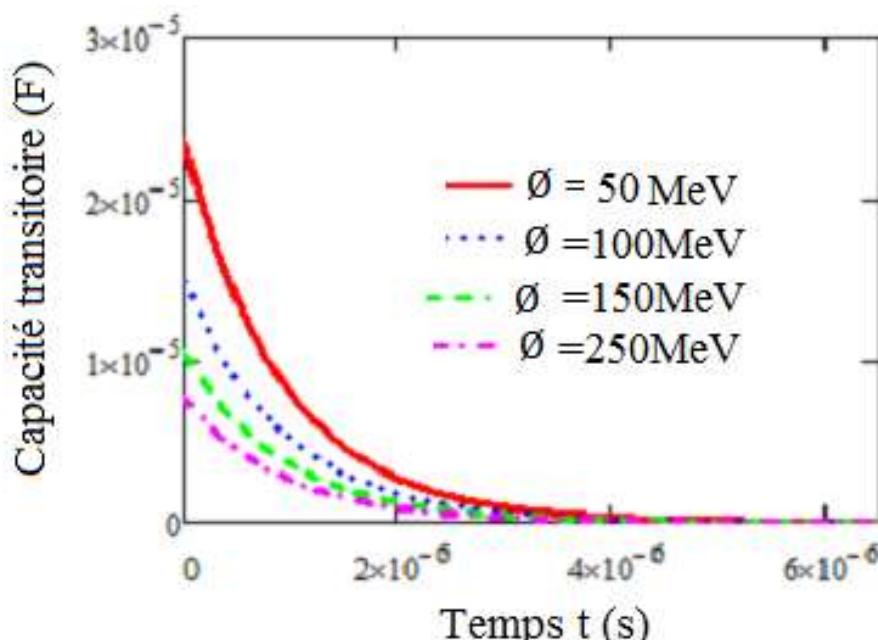


Figure 15:- Profil de la capacité transitoire pour différentes valeurs du flux d'énergie d'irradiation ; $kl=10\text{cm}^2/\text{sSf}_j = 6.10^6\text{cm/s}$; $H = 0.02\text{cm}$; $L_0 = 0.01\text{cm}$; $D = 26\text{cm}^2/\text{s}$; $\tau = 5.10^{-5}\text{s}$

La **figure 15** montre la décroissance de la capacité en fonction du temps, lorsque le flux d'énergie d'irradiation augmente, pour des faibles valeurs du temps.

b) Influence de l'intensité du coefficient de dommage.

Sur la **figure 16**, est représenté le profil de la capacité en fonction du temps pour différentes valeurs de l'intensité du coefficient de dommage.

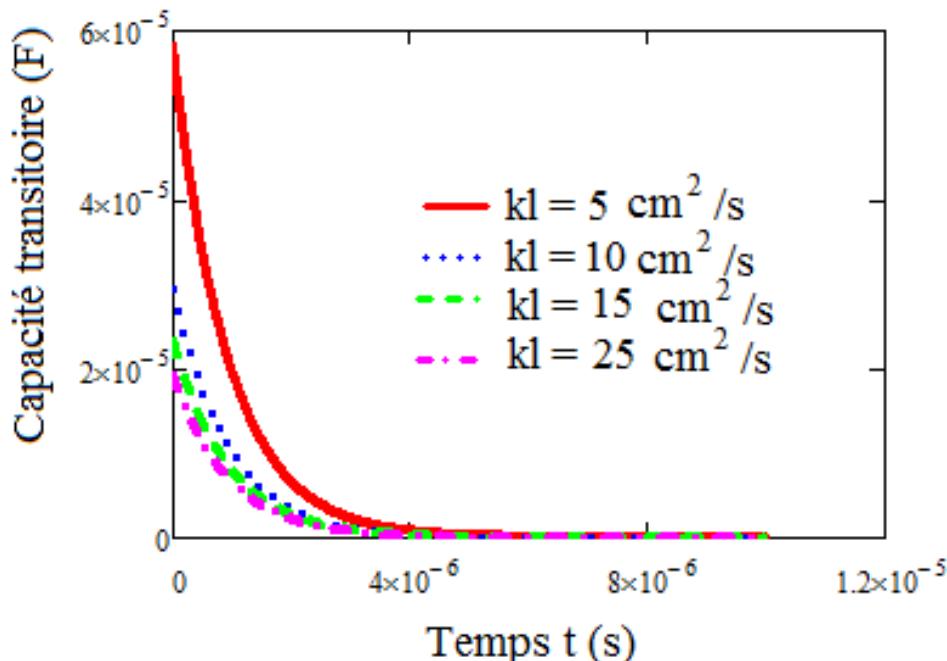


Figure16:- Profil de la capacité transitoire pour différentes valeurs de l'intensité du coefficient de dommage; $\phi = 100\text{MeV}$; $Sf_j = 6.10^6\text{cm/s}$; $H = 0.02\text{cm}$; $L_0 = 0.01\text{cm}$; $D = 26\text{cm}^2/\text{s}$; $\tau = 5.10^{-5}\text{s}$.

Lorsque l'intensité du coefficient de dommage augmente, la capacité de diffusion des porteurs diminue.

Conclusion:-

Dans ce travail, après résolution de l'équation de continuité des porteurs dans la base de la photopile au silicium, en régime transitoire,nous avons effectué une étude en modlisation de l'influence du flux d'énergie d'irradiation et de l'intensité du coefficient de dommage,sur la densité de photocourant et sur la capacité de diffusion. Il est ressorti de cette étude que la variation du flux de l'énergie d'irradiation et de l'intensité du coefficient de dommage entraîne une dégradationdu matériau provoquant ainsi la diminution de la capacité et de la densité de photocourant.

References:-

- [1] Orton, J. (2004). The Story of Semiconductors. Oxford University Press, Oxford.
- [2] Joshi, N.V. (1990). Photoconductivity: Art, Science and Technology. Marcel Dekker, New York
- [3] Bube, R.H. (1960) Photoconductivity of Solids. Wiley, New York.
- [4] H. J. Möller, A. house, "Semiconductors for solar cells", Spectroscopy, Solar Cells, Boston 1993, ISBN 0-89006-574-8, pp. 343 ;
- [5] 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.
- [6] Alain Ricaud, Photopiles Solaires, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, (1997).
- [7] E.Gaubas and J. Vanhellemont (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/10.1063/1.363705M>
- [8] 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>
- [9] Jain, G.C., Singh, S.N. and Kotnala, R.K. (1983) Diffusion Length Determination in n+-p-p+ Structure Based Silicon Solar Cells from the Intensity Dependence of the Short-Circuit Current for Illumination from the p+ Side. Solar Cells, 8, 239-248. [https://doi.org/10.1016/0379-6787\(83\)90063-7](https://doi.org/10.1016/0379-6787(83)90063-7)
- [10] G. Sissoko, E. Nanema, A. Correa, M. Adj, A.L. Ndiaye, M.N. Diarra (1998). Recombination parameters measurement in double sided surface field solar cell. Proceedings of World Renewable Energy Conference, Florence-Italy, pp. 1856–1859.

- [11] E. D. Stokes and T. L. Chu (1977). Diffusion Lengths in Solar Cells From Short-Circuit Current Measurements. *Applied Physics Letters*, Vol. 30, No8; pp 425-426
- [12] S. Gupta, P. Ahmed and S. Garg, (1988). A Method for the Determination of the Material parameters D, L, S and α from Measured Short-Circuit Photocurrent. *Solar Cells*, 25, 61-72. [https://doi.org/10.1016/0379-6787\(88\)90058-0P](https://doi.org/10.1016/0379-6787(88)90058-0P).
- [13] Flohr, Th. and Helbig, R. (1989). Determination of Minority-Carrier Lifetime and Surface Recombination Velocity by Optical-Beam-Induced-Current Measurements at Different Light Wavelengths. *Journal of Applied Physics*, 66, 3060-3065. <https://doi.org/10.1063/1.344161>
- [14] R. R. Vardanyan, U. Kerst, B. Tierock, H. G. Wagemann (1997). Measurement of recombination parameters of solar cell in a magnetic field. Proceeding of the 14th European Photovoltaic Solar Energy Conference (Barcelona, Spain). Pp 2367-2369.
- [15] Muzeyyen Saritas and Harry D. Mckell (1988). Comparison of minority carrier diffusion length measurements in silicon by the photoconductive decay and surface photovoltage methods. *J. Appl. Phys* 63 (9) pp. 4561-67.
- [16] 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.
- [17] Dhariwal, S.R. and Vasu, N.K. (1981). A Generalized Approach to Lifetime Measurement in pn Junction Solar Cells. *Solid-State Electronics*, 24, 915-927. [https://doi.org/10.1016/0038-1101\(81\)90112-X](https://doi.org/10.1016/0038-1101(81)90112-X)
- [18] G.Sissoko, S. Sivoththanam. M.Rodot and P. Mialhe, Constant Illumination-Induced Open Circuit Voltage Decay (CIOCVD) Method, as Applied to High Efficiency Si Solar Cells for Bulk and Back Surface Characterization. 11th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (Montreux), 1992, Pp. 352-354.
- [19] G.Sissoko, C. Museruka, A. Corréa, I. Gaye and A.L.Ndiaye, Light Spectral Effect on Recombination Parameters of Silicon Solar Cell. World Renewable Energy Congress, Pergamon, Part III, pp.1487-1490.
- [20] 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://ljsacademicdirect.org/>)
- [21] Ly Diallo, H., Wade, M., Ly, I., NDiaye, M., Dieng, B., Lemrabott, O.H., Maïga, A.S. and Sissoko. G. (2012). 1D Modeling of a Bifacial Silicon Solar Cell under Frequency Modulation, Monochromatic Illumination: Determination of the Equivalent Electrical Circuit Related to the Surface Recombination Velocity. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 4, 1672-1676. <http://www.maxwell.org>.
- [22] Sahin, G., Dieng, M., Moujtaba, M., Ngom, M., Thiam, A. and Sissoko, G. (2015) Capacitance of Vertical Parallel Junction Silicon Solar Cell under Monochromatic Modulated Illumination. *Journal of Applied Mathematics and Physics*, 3, 1536-1543. <https://doi.org/10.4236/jamp.2015.311178>
- [23] Massamba Dieng, Boureima Seibou, Ibrahima Ly, Marcel Sitor Diouf, Mamadou Wade, Grégoire Sissoko (2017). Silicon Solar Cell Emitter Extended Space Charge Region Determinationunder Modulated Monochromatic Illumination by using Gauss's Law. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering* Vol. 6, issue 2, pp: 17-20.
- [24] K. Bouzidi, M. Chegaar, A. Bouhemadou (2007). Solar cells parameters evaluation considering the series and shunt resistance. *Solar Energy Materials &Solar Cells*. Volume 91, Issue 18, 6, Pp. 1647-165. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2007.05.019>.
- [25] 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).
- [26] El-Adawi, M.K. and Al-Nuaim, I.A. (2002). A Method to Determine the Solar Cell Series Resistances from a Single I-V Characteristic Curve Considering Its Shunt Resistance—New Approach. *Vaccum*, 64, 33-36. [http://dx.doi.org/10.1016/S0042-207X\(01\)00370-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0042-207X(01)00370-0)
- [27] D. Chenvidhya, K. Kirtikara, C. Jivacate (2003). A new characterization method for solar cell dynamic impedance. *Solar Energy Materials &Solar Cells*, Volume 80, Issue 4, Déc. 2003, Pp. 459-464. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2003.06.011>
- [28] M. A. Green, K. Emery, D. L. King, Y. Hishikawa, and W. Warta, (2006). ‘Solar Cell Efficiency Tables (version 28)’, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 14; pp. 455–461.
- [29] T. Baghdali, A. Zerga et B. Benyoucef, (1999)Optimisation du Rendement de Conversion Photovoltaïque des Cellules Solaires à base de GaAs et de Si, *Rev. Energ. Ren. : Valorisation*, pp. 27-31
- [30] X. Sun, M. R. Khan, C. Deline and M. A. Alam (2018). Optimization and performance of bifacial solar modules: A global perspective. *Appl. Energy*, vol. 212, pp. 1601-1610, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.12.041>.

- [31] Chung F; Chung-Feng Jeffery Kuo, Hung-Min Tu, Shin-Wei Liang, Wei-Lun Tsai (2010). Optimization of microcrystalline silicon thin film solar cell isolation processing parameters using ultraviolet laser. Optics & Laser Technology, Vol. 42 issue 6, Pp. 945-955. <http://dx.doi.org/10.1016/j.optlastec.2010.01.013>
- [32] yadav, P., Pandey, K., Tripathi, B., Kumar, C.M., Srivastava, S.K., Singh, P.K. and Kumar, M. (2015) An Effective Way to Analyze the Performance Limiting Parameters of a Poly-Crystalline Silicon Solar Cell Fabricated in the Production Line. Solar Energy, 122, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.08.005>
- [33] Heinbockel, J.H. and Walker, G.H. (1988) Three-Dimensional Models of Conventional and Vertical Junction Laser-Photovoltaic Energy Converters. NASA-TM-403919880014727V.
- [34] Dieng, A., Zerbo, I., Wade, M., Maiga, A.S. and Sissoko, G. (2011) Three-Dimensional Study of a Polycrystalline Silicon Solar Cell: The Influence of the Applied Magnetic Field on the Electrical Parameters. Semiconductor Science and Technology, 26, Article ID: 095023.<https://doi.org/10.1088/0268-1242/26/9/095023>.
- [35] Denise, K., Mamadou, L.B., Mamour, A.B., Gora, D., El Hadj, S., Oulimata, M. and Gregoire, S. (2020) AC Back Surface Recombination in n⁺-p-p⁺ Silicon Solar Cell: Effect of Temperature. International Journal of advanced Research (IJAR), 8, 140-151. <https://doi.org/10.21474/IJAR01/11273>
- [36] Richard Mane, Ibrahima Ly, Mamadou Wade, IbrahimaDatta, Marcel S. Douf, YoussouTraore, Mor Ndiaye, Seni Tamba, Grégoire Sissoko (2017). Minority Carrier Diffusion Coefficient D*(B, T): Study in Temperature on a Silicon Solar Cell under Magnetic Field. Energy and Power Engineering, 9, pp.1-10 <http://www.scirp.org/journal/epe>
- [37] Rosenzweig, W. (1962) Diffusion Length Measurement by Mean of Ionization Radiation. The Bell System Technical Journal, 41, 1573-1588. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1962.tb03995.x>
- [38] Ohshima, T., T. Sumita, M. Imaizumi, S. Kawakita, K. Shimazaki, S. Kuwajima, A. Ohi, And H. Itoh (2005). Evaluation of the Electrical Characteristics of III-V Compounds Solar Cells Irradiated with Protons at Low Temperatures. Proceedings of the 31st IEEE Photovoltaic Specialists Conference. Lake Buena Vista, FL, 3-7 January 2005: 806
- [39] Cristina Constanta Stanescu (2002). SiO₂ sur silicium : comportement sous irradiation avec des ions lourds. Thèse de Doctorat de l'Université de Caen/Basse Normandie/ France.
- [40] Kraner, H. W., Radiation damage in silicon detectors, 2nd Pisa Meeting on Advanced Detectors, Grosetto, Italy, June 3-7 1983.
- [41] Fatemi, N.S., Sharps, P.R., Stan, M.A., Aiken, D.J., Clevenger, B. and Hou, H.Q. (2001) Radiation-Hard High-Efficiency Multi-Junction Solar Cells for Commercial Space Applications. Proceedings of the 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 2155-2158.
- [42] Goo-Hwan Shin and Kwangsung Ryu and Hyung-Myung Kim and Kyung-wook Min (2008). Radiation effect test for single-crystalline and polycrystalline silicon solar cells. Journal of the Korean Physical Society. Vol. 52, Pp. 843-847. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:120466620>
- [43] Rose, B.H. and Weaver, H.T. (1983) Determination of Effective Surface Recombination Velocity and Minority-Carrier Lifetime in High-Efficiency Si Solar Cells. Journal of Applied Physics, 54, 238-247. <https://doi.org/10.1063/1.331693>
- [44] M. A. Ould El Moujtaba, M. Ndiaye, A. Diao, M. Thiam, I. F. Barro and G. Sissoko (2012). Theoretical Study of Influence of Irradiation on a Silicon Solar Cell Under Multispectral Illumination. Research Journal of Applied Sciences Engineering and Technlogy, Vol. 23, Issue 4, pp. 5068-5073, 2012.
- [45] I. Gaye, R. Sam, A. D. Seré, I. F. Barro, M. A. Ould El Moujtaba, R. Mané, G. Sissoko (2012). Effect of irradiation on the transient response of a silicon solar cell; International journal of emerging trends and technologies in computer science (IJETTCS) Volume 1, Issue 3, September-October 2012, ISSN 2278-6856.
- [46] I. Ly, M. Wade, H. Ly Diallo, M. A. O. El Moujtaba, O. H. Lemrabott, S. Mbodji, O. Dianne, A. Ndiaye, I. Gaye, F. I. Barro, A. Wereme, G. Sissoko (2011). Irradiation effect on the electrical parameters of a bifacial silicon solar cell under multispectral illumination», Proceedings of 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 1DV.4.52 (2011), pp 785-788; <http://www.eupvsec-proceedings.com>
- [47] Ndeye Madeleine Diop, Boureima Seibou, Mamadou Wade, Marcel S. Diouf, Ibrahima Ly, Hawa Ly Diallo, G. Sissoko (2016). Theoretical Study of Vertical Parallel Junction Silicon Solar Cell Capacitance under Modulated Polychromatic Illumination: Influence of Irradiation. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE) ISSN: 2278-3075, Volume-6 Issue-3, August 2016).

- [48] Mouhamadou Mousliou Diallo, Seni Tamba, Boureima Seibou, Mohamed Lemine Ould Cheikh, Ibrahima Diatta, El Hadji Ndiaye, Youssou Traore, Cheikh Tidiane Sarr, Gregoire Sissoko (2017). Impact of irradiation on the surface recombination velocity of a back side monochromatic illuminated bifacial silicon solar cell under frequency modulation, Journal of Scientific and Engineering Research, 2017, 4(1): 29-40
- [49] Ba, M.L., Diallo, H.L., Ba, H.Y., Traore, Y., Diatta, I., Diouf, M.S., Wade, M. and Sissoko, G. (2018). Irradiation Energy Effect on a Silicon Solar Cell: Maximum Power Point Determination. Journal of Modern Physics, 9, 2141-2155. <https://doi.org/10.4236/jmp.2018.912135>
- [50] N. Honma and C. Munakata (1987). Sample Thickness Dependence of Minority Carrier Lifetimes Measured Using an ac Photovoltaic Method. Japanese Journal of Applied Physics, 26, 2033-2036. <https://doi.org/10.1143/JJAP.26.2033>
- [51] 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.
- [52] Zerbo, I. Barro. F.I. Mbow. B. Diao. A, Madougou. S, Zougmore. F and Sissoko G. (2004). Theoretical Study of Bifacial Silicon Solar Cell under Frequency Modulate white Light: Determination of Recombination Parameters. Proceedings of the 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Paris, 7-11 June 2004, 258-261.
- [53] Thiam. N, Diao. A, Ndiaye. M, Dieng. A, Thiam.A, Sarr. M, Maiga. A.S and Sissoko G. (2012). Electric Equivalent Models of Intrinsic Recombination Velocities of a Bifacial Silicon Solar Cell under Frequency Modulation and Magnetic Field Effect. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 4, 4646-4655.
- [54] 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, pp2169-2180.
- [55] Grégoire Sissoko and Senghane Mbodji (2015).A method to determine the solar cell resistances from single I-V characteristic curve considering the junction recombination velocity (sf). Int. J. Pure Appl. Sci. Technol., 6(2) (2011), pp.103-114-ISSN 2229 – 6107, www.ijopaasat.in
- [56] 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.
- [57] G. Sissoko, B. Dieng, A. Corréa, M.Adj, D. Azilinon (1998). Silicon Solar cell space charge region width determination by a study in modelling. Renewable Energy, vol-3, pp.1852-55-Elsevier Science Ltd, 0960-1481/98/#
- [58] Fatoumata Balde, Hawa Ly Diallo, Hamet Yoro Ba, Youssou Traore, Ibrahima Diatta, Marcel Sitor Diouf, Mamadou Wade, Gregoire Sissoko, (2018). External electric field as applied to determine silicon solar cell space charge width region. Journal of Scientific and Engineering Research, 5(10):252-259 <https://jsaer.com/archive/volume-5-issue-10-2018/>
- [59] Moussa Ibra Ngom, Amary Thiam, Gokhan Sahin, Mohamed Abderrahim Ould El Moujtaba , Khady Faye, Marcel Sitor Diouf, Grégoire Sissoko. Influence of magnetic field on the capacitance of a vertical junction parallel solar cell in static regime, under multispectral illumination. Int. J. Pure Appl. Sci. Technol., 31(2) (2015), pp. 65-75, www.ijopaasat.in
- [60] Ibrahima Diatta, Ibrahima Ly, Mamadou Wade, Marcel Sitor Diouf, Senghane Mbodji, Grégoire Sissoko (2016).Temperature Effect on Capacitance of a Silicon Solar Cell under Constant White Biased Light. World Journal of Condensed Matter Physics, 2016, 6, 261-268 www.scirp.org/journal/wjcmp
- [61] S. Mbodji, B.Mbow , F.I.Barro , G Sissoko . A 3D model for thickness and diffusion capacitance of emitter-base junction determination in a bifacial polycrystalline solar cell under real operating condition; Turskish of physics; vol 35 ; 2011 ; pp 281- 291.
- [62] K. M. Sy, A.Dieng, S. Tamba, M. S. Diouf, I. Diatta, M. Dieye, Y. Traoré, G. Sissoko. Effect of temperature on transient decay induced by charge removal of a silicon solar cell under constant illumination. Journal of Scientific and Engineering Research. Vol 3 n°. 6; 2016, pp 2394- 2630.
- [63] Martin A. Green (2013). High-Efficiency Silicon Solar Cell Concepts. Chapter published 2013 in Solar Cells, Pp. 87-113 <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-386964-7.00005-6>
- [64] Le Quang Nam M. Rodot, Solar cells with 15.6% efficiency on multicrystalline silicon, using impurity gettering back surface field and emitter passivation. Int. J. Solar Energy,1992, 11, 273-279.
- [65] 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>

- [66] P. K. Basu and S. N. Singh (1994). On The Determination of Minority Carrier Diffusion Length in the Base Region of n+-p-p+ Silicon Solar Cells Using Photoresponse Methods. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 33, 317-329. [https://doi.org/10.1016/0927-0248\(94\)90234-8P](https://doi.org/10.1016/0927-0248(94)90234-8P).
- [67] J Furlan and S. Amon. Approximation of the carrier generation rate in illuminated silicon ; solide state electronics ; vol 28 , no28 ; 1985 ; pp 1241-1243.
- [68] H. Reinhard. Equations aux dérivées partielles. Dunod Université, Paris, 1987.
- [69] F.I Barro, A. S. Maiga, A. Wereme, and G. Sissoko; Determination of recombinaison parameters in the base of silicon solar cell under constant multispectral light; Physical and Chemical news; vol 56 ; 2010; pp 76-84
- [70] Joardar, K., Dondero, R.C. and Schroder, D.K. (1989). A Critical Analysis of the Small-Signal Voltage-Decay Technique for Minority-Carrier Lifetime Measurement in Solar Cells. *Solid-State Electronics*, 32, 479-483. . [https://doi.org/10.1016/0038-1101\(89\)90030-0](https://doi.org/10.1016/0038-1101(89)90030-0)
- [71] Zondervan, A., Verhoef, L.A. and Lindholm, F.A. (1988). Measurement Circuits for Silicon-Diode and Solar Cells Lifetime and Surface Recombination Velocity by Electrical Short-Circuit Current Delay. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 35, 85-88. <https://doi.org/10.1109/16.2419>
- [72] O. Dianne. A. Diao, I. Ly, M.S. Diouf. I. Diatta. R.Mane. Y. Traore and G.Sissoko, Back Surface Recombination Velocity Modeling in White Biased Silicon Solar Cell under Steady State. *Journal of Modern Physics*, 2018, 9, 189-201.
- [73] H.L.Diallo, A. Seïdou. Maiga, A.Wereme and G.Sissoko, 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*,2008, 42, 203-211. <http://dx.doi.org/10.1051/epjap:2008085>
- [74] I. Ly, M. Ndiaye, M. Wade, N. Thiam, S. Gueye and G. Sissoko, Concept of Recombination Velocity S_{FCC} at the Junction of a Bifacial Silicon Solar Cell, in Steady State, Initiating the Short-Circuit Condition. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*,2013, 5, 203-208. <https://doi.org/10.19026/rjaset.5.5105>
- [75] Y. Traore, N. Thiam, M. Thiame, M. L. Ba, M. S. Diouf et G. Sissoko, AC Recombination Velocity in the Back Surface of a Lamella Silicon Solar Cell under Temperature. *Journal of Modern Physics*,2019,10, 1235-1246. <https://doi.org/10.4236/jmp.2019.1010082>
- [76] M. Gueye, H. L. Diallo, A. Kosso, M. Moustapha, Y. Traore, I. Diatta et G. Sissoko, Ac Recombination Velocity in a Lamella Silicon Solar Cell. *World Journal of Condensed Matter Physics*, 2018,8, 185-196.
- Ndiaye, E.H., Sahin, G, Dieng, M., Thiam, A, Diallo, H.L., Ndiaye, M. and Sissoko, G. (2015) Study of the Intrinsic Recombination Velocity at the Junction of Silicon Solar under Frequency Modulation and Irradiation. *Journal of Applied Mathematics and Physics*, 3, 1522-1535. <https://doi.org/10.4236/jamp.2015.311177>.