



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

INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED RESEARCH (IJAR)

Article DOI: 10.21474/IJAR01/18488
DOI URL: <http://dx.doi.org/10.21474/IJAR01/18488>



RESEARCH ARTICLE

MAGNETO RESISTANCE SERIE DANS LA PHOTOPILE (N+/P/P+) AU SILICIUM SOUS ECLAIREMENT POLYCHROMATIQUE PAR LA FACE (N+)

Cheikh Thiaw¹, Habiboula Lemrabott¹, Moustapha Thiame^{1,4}, Khady Loum^{1,2}, Sega Gueye^{1,3}, Issa Diagne¹
and Gregoire Sissoko¹

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. Faculte des Sciences et Technologies de l'Education 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: 28 January 2024

Final Accepted: 29 February 2024

Published: March 2024

Key words:-

Photopile au Silicium-Vitesse de
Recombinaison-Phototension-
Magnétorésistance Série-Epaisseur
Optimum

Abstract

Dans ce travail, la photopile (n+/p/p+) au silicium cristallin est sous éclairage polychromatique par la face (n+) et placée dans un champ magnétique (B) constant. L'étude de la caractéristique de la densité de courant en fonction de la tension, pour chaque valeur du coefficient de diffusion (D(B)) des porteurs minoritaires de charge dans la base (p), d'épaisseur optimum (Hopt(B)) requise, permet d'établir l'expression de la résistance série (Rs(Hopt(B))). De sa courbe de calibration en fonction de la vitesse de recombinaison (Sf) des porteurs minoritaires de charge à la jonction, la résistance série est extraite en fonction du champ magnétique appliqué et de l'épaisseur optimum de la base.

Copy Right, IJAR, 2024., All rights reserved.

Introduction:-

Les paramètres phénoménologiques [1-17] permettent d'établir les expressions des paramètres électriques [18-22] macroscopiques qui sont les quantités mesurables dans les modèles électriques [23-26] équivalents à la photopile [27-29] en différents modes de fonctionnement. Dans ce travail, la résistance série [30-45] de la photopile sous éclairage polychromatique [46] et placée sous champ magnétique [47-52] est produite à travers sa courbe de calibration en fonction de la vitesse de recombinaison (Sf) des porteurs minoritaires de charge à la jonction [8-14, 53-56] pour différentes valeurs de l'épaisseur optimum (Hopt) [57-63] de la base de la photopile. Par le concept de la vitesse de recombinaison (Sfco) à la jonction limitant la tension de circuit ouvert [53-56] sur la courbe Vph(Sf, (Hopt, B)), la résistance série est obtenue pour chaque champ magnétique, à partir de la courbe de calibration (Rs (Sf, Hopt, B)).

Etude de la phototension

L'expression de la tension qui existe aux bornes de la photopile lorsque celle-ci est soumise à un éclairage multi spectral constant est obtenue par la relation de Boltzmann donnée ci-après.

$$V_{ph}(Sf, B, Hopt) = V_T \times \ln \left(\frac{Nb}{n_i^2} \times \delta(0, Sf, B, Hopt) + 1 \right) \quad (1)$$

V_T est la tension thermique, cette tension est définie par :

Corresponding Author:- Gregoire Sissoko

Address:- Groupe International de Recherche en Energie Renouvelable. BP. 15003, Dakar, Senegal.

$$V_T = \frac{K_b}{q} \times T \quad (2)$$

n_i : la concentration intrinsèque

N_b : le taux de dopage en atomes accepteurs dans la base,

K_b : la constante de Boltzmann,

T : la température absolue,

q : charge élémentaire de l'électron.

La densité des porteurs de charge minoritaires à la jonction (n+/p, en $x=0$) est donnée par $\delta(0, B, Hopt)$ pour différentes valeurs de l'épaisseur optimum(Hopt(B)) [58] de la base de la photopile éclairée par une lumière polychromatique et placée sous champ magnétique.

Les **figures. 1 et 4** représentent les profils de la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires de charge dans la base d'épaisseur optimum (Hopt), obtenue pour différentes gammes de champ magnétique (B) appliqué.

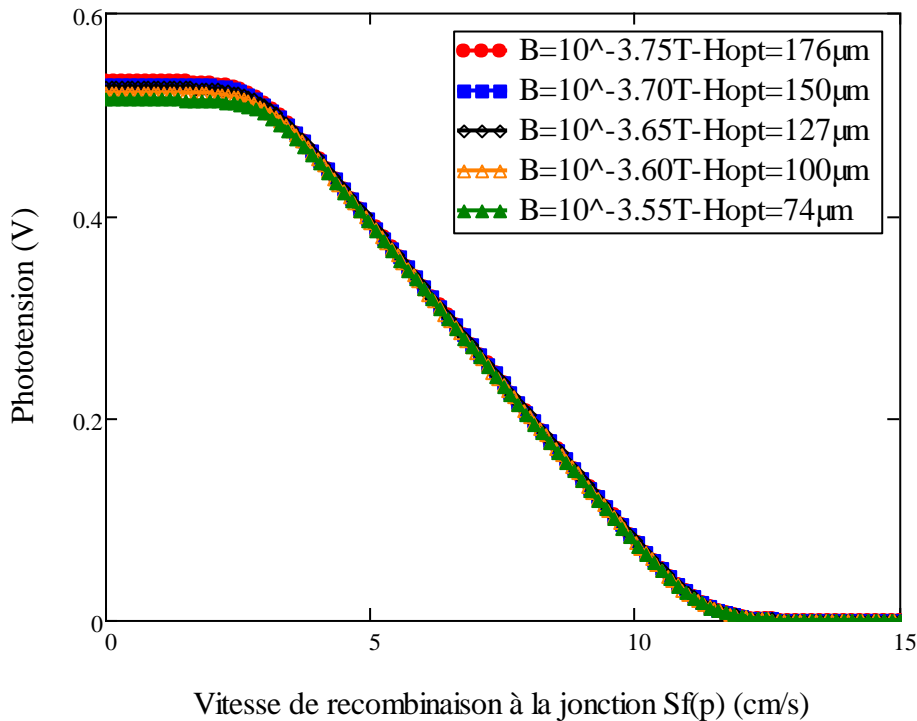


Figure 1:- Profil de la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes faibles valeurs du champ magnétique et de l'épaisseur optimum de la base (avec $Sf(p) = p \cdot 10^9$ cm/s).

Tableau 1:- Valeurs numériques de la phototension de circuit ouvert correspondantes à Hopt(B).

B(T)	$10^{-3.75}$	$10^{-3.70}$	$10^{-3.65}$	$10^{-3.60}$	$10^{-3.55}$
Hopt(cm)	0.0176	0.0150	0.0127	0.0100	0.0074
Vco(V)	0.53319	0.53023	0.52727	0.52164	0.51484

Le **tableau. 1** a permis de tracer les **figures. 2 et 3**, représentant la variation de la phototension de circuit ouvert en fonction du champ magnétique et de l'épaisseur optimum correspondante.

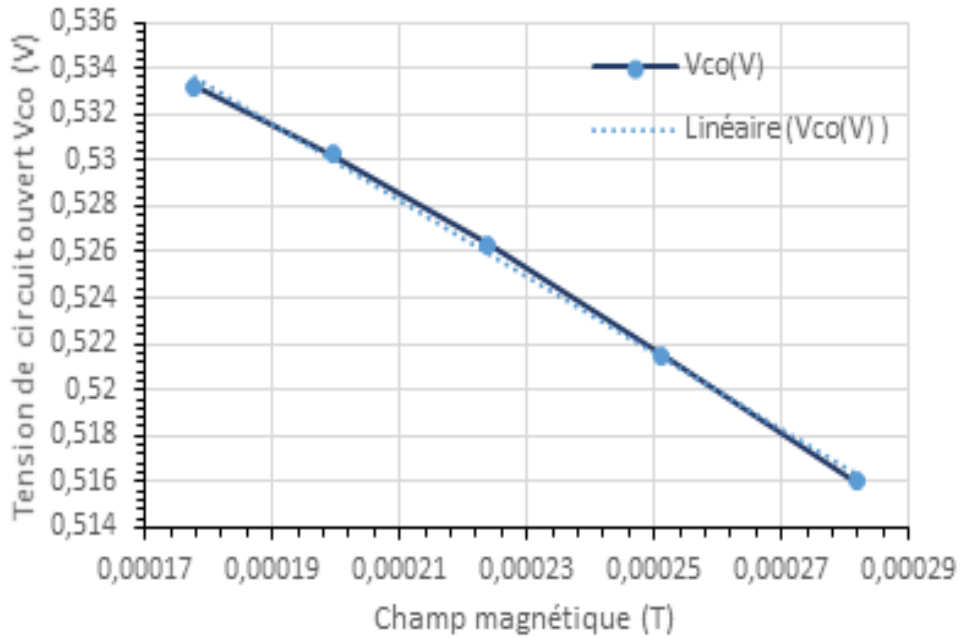


Figure 2:- Profil de la tension de circuit ouvert en fonction du champ magnétique.

L'équation de corrélation est obtenue sous la forme suivante:

$$V_{co}(V) = -166,54 \times B(T) + 0,5632 \quad (3)$$

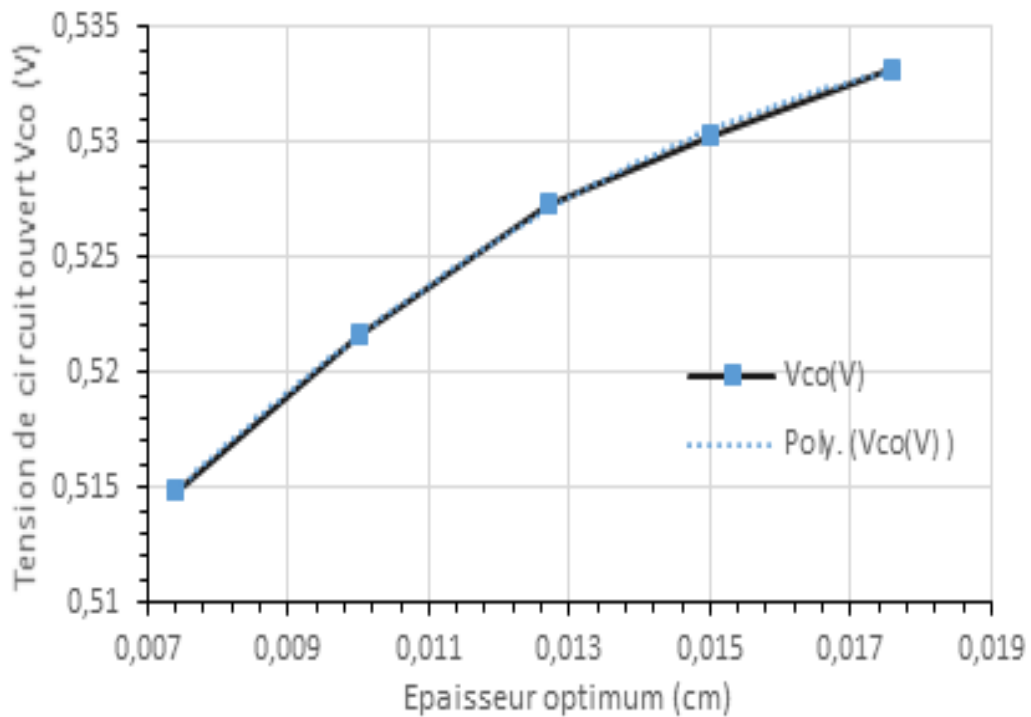


Figure 3:- Profil de la tension de circuit ouvert en fonction de l'épaisseur optimum.

L'équation de corrélation obtenue est donnée par:

$$V_{co}(V) = -105,24 \times H_{opt}(cm)^2 + 4,4149 \times H_{opt}(cm) + 0,488 \quad (4)$$

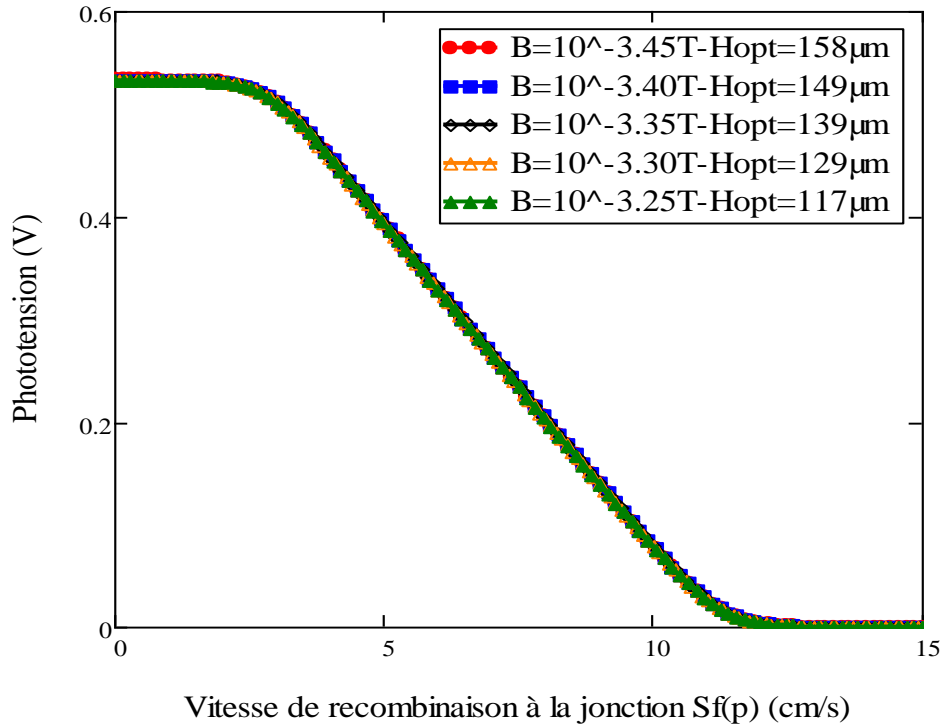


Figure 3:- Profil de la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes grandes valeurs du champ magnétique et de l'épaisseur optimum de la base(avec $Sf(p) = p \cdot 10^p$ cm/s).
 La **figure. 4**, permet d'établir le **tableau. 2** de la phototension de circuit ouvert correspondantes à l'épaisseur optimum $H_{opt}(B)$.

Tableau 2:- Valeurs numériques de la phototension de circuit ouvert correspondantes à B et H_{opt} .

B(T)	$10^{-3.45}$	$10^{-3.40}$	$10^{-3.35}$	$10^{-3.30}$	$10^{-3.25}$
$H_{opt}(cm)$	0.0158	0.0149	0.0139	0.0129	0.0117
$V_{co}(V)$	0.53355	0.53344	0.53326	0.53319	0.53285

Le **tableau.2** permet de tracer les **figures. 5 et 6** qui représentent la variation de la phototension de circuit ouvert en fonction du champ magnétique et de l'épaisseur optimum.

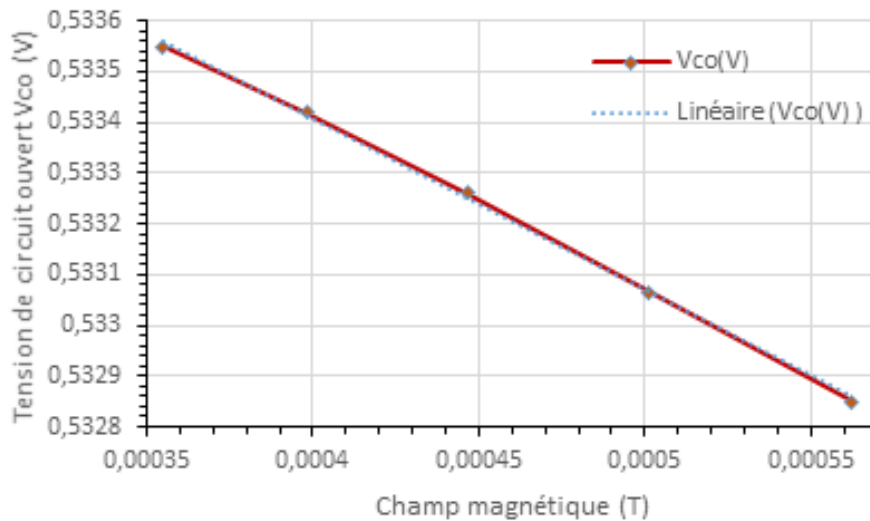


Figure 3-4:- Profil de la tension de circuit ouvert en fonction du champ magnétique.

L'équation de corrélation est donnée par la relation suivante:

$$V_{co}(V) = -3,3926 \times B(T) + 0,5348 \quad (5)$$

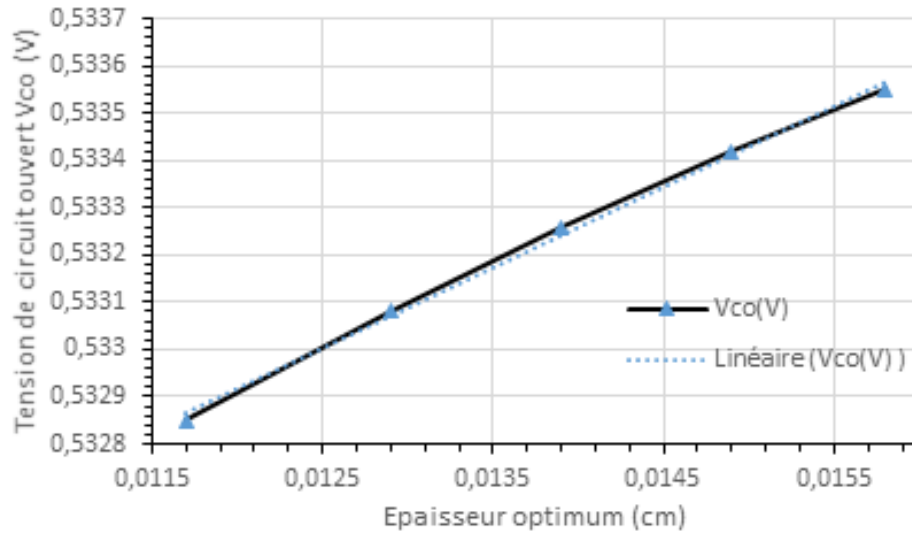


Figure 5:- Profil de la tension de circuit ouvert en fonction de l'épaisseur optimum.

L'équation de corrélation est déduite par la relation suivante:

$$V_{co}(V) = 0,1711 \times H_{opt}(cm) + 0,5309 \quad (6)$$

2. Profil de la caractéristique Jph(Sf,Hopt(B))-V(Sf,Hopt(B))

Les figures 7 et 9, représentent les profils de la caractéristique de la densité du photocourant (Jph(Sf,Hopt(B))) en fonction de la phototension (Vph(Sf,Hopt(B))) de la photopile pour différentes valeurs de l'épaisseur optimum (Hopt(B)) [58] de la base de la photopile champ magnétique.

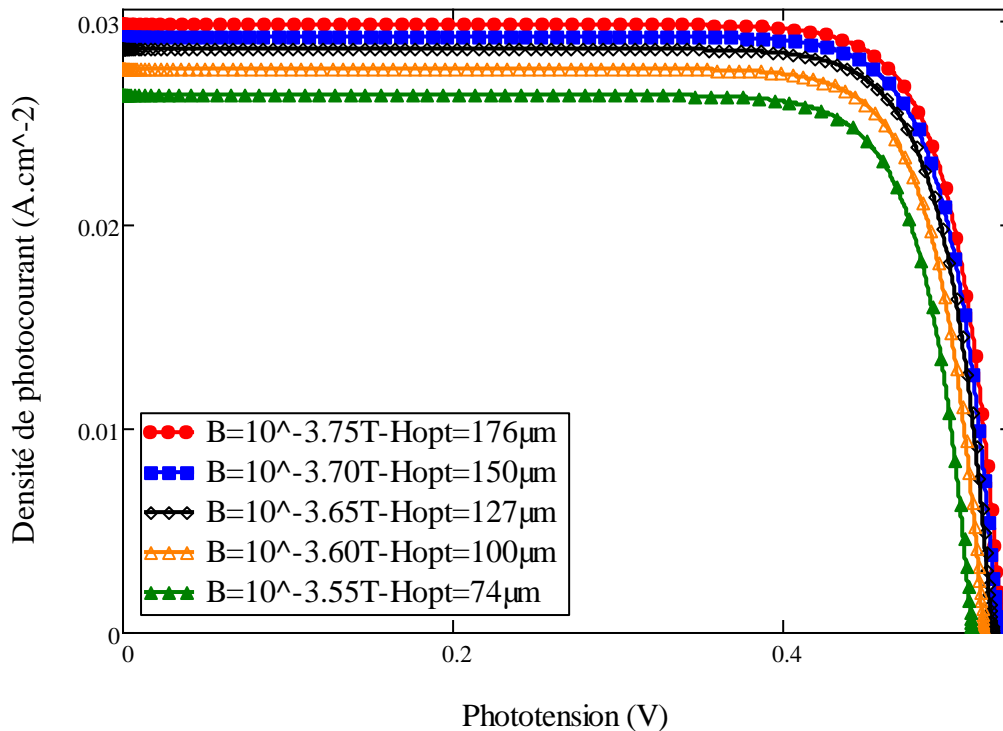


Figure 6:- Profil de la caractéristique Jph-Vph pour différentes valeurs faibles du champ magnétique et de l'épaisseur optimum de la base.

Le **tableau. 3** résume les variations de la densité du photocourant de court-circuit et de la phototension de circuit ouvert avec l'épaisseur optimum de la base de la photopile et du champ magnétique correspondant.

Tableau 3:- Valeurs numériques de J_{phcc} , de V_{co} en fonction du champ magnétique et de l'épaisseur optimum.

B(T)	$10^{-3.75}$	$10^{-3.70}$	$10^{-3.65}$	$10^{-3.60}$	$10^{-3.55}$
Hopt(cm)	0.0176	0.0150	0.0127	0.0100	0.0074
$J_{phcc}(A.cm^{-2})$	0.029816	0.029229	0.028643	0.027665	0.026296
$V_{co}(V)$	0.53319	0.53023	0.52727	0.52164	0.51484

Le **tableau. 3** a permis de tracer les profils de la densité de photocourant de court-circuit en fonction de l'épaisseur optimum **figures. 8** sous l'influence du champ magnétique.

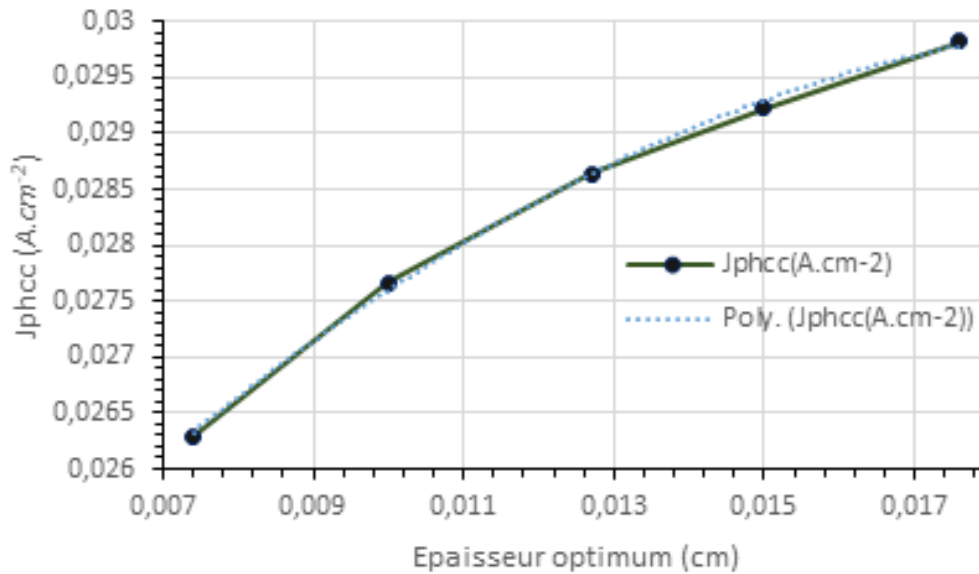


Figure 7:- Profil de la densité de photocourant de court-circuit en fonction de l'épaisseur optimum.

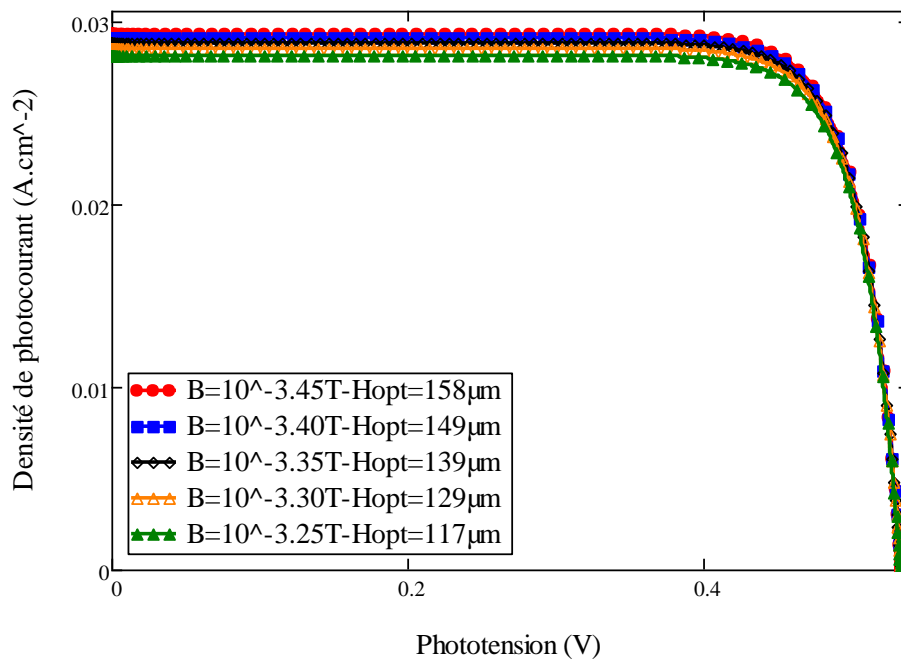


Figure 8:- Profil de la caractéristique I-V pour différentes grandes valeurs du champ magnétique et de l'épaisseur optimum de la base.

Equation de corrélation obtenue est donnée par la relation suivante:

$$J_{phcc}(A.cm^{-2}) = -19,903 \times Hot(cm)^2 + 0,8364 \times Hopt(cm) + 0,0212 \quad (7)$$

Le **tableau. 4** résume les variations de la densité du photocourant de court-circuit et de la phototension de circuit ouvert avec l'épaisseur optimum de la base de la photopile et du champ magnétique correspondant.

Tableau 3:- Valeurs numériques de J_{phcc} , de V_{co} en fonction de l'épaisseur optimum et du champ magnétique correspondant.

B(T)	$10^{-3.45}$	$10^{-3.40}$	$10^{-3.35}$	$10^{-3.30}$	$10^{-3.25}$
Hopt(cm)	0.0158	0.0149	0.0139	0.0129	0.0117
$J_{phcc}(A.cm^{-2})$	0.029522	0.029229	0.028936	0.028447	0.027958
Vco(V)	0.53355	0.53344	0.53326	0.53319	0.53285

Le **tableau. 4** a permis de tracer les profils de la densité de photocourant de court-circuit en fonction de l'épaisseur optimum (**figure. 10**) sous l'influence du champ magnétique.

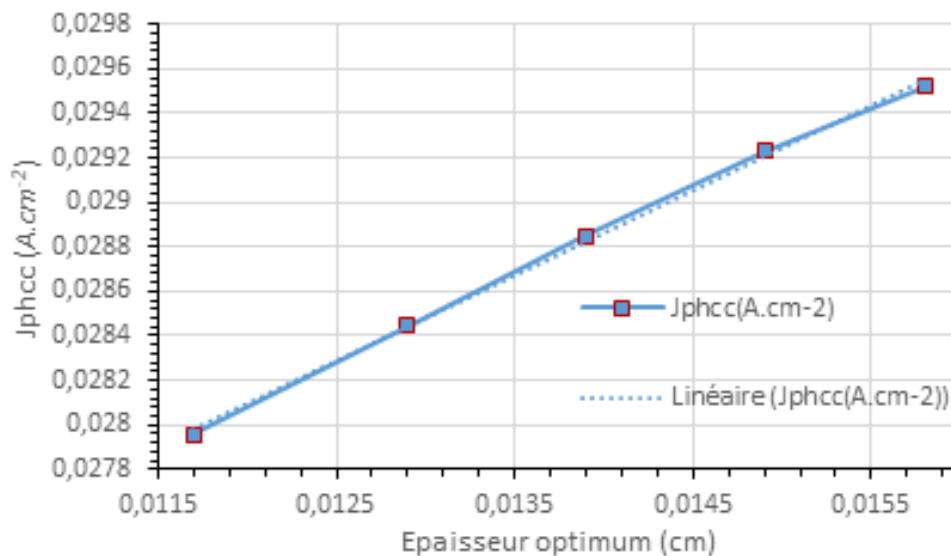


Figure 9:- Profil de la densité de photocourant de court-circuit en fonction de l'épaisseur optimum.

L'équation de corrélation s'écrit par:

$$J_{phcc}(A.cm^{-2}) = 0,3841 \times Hot(cm) + 0,0235 \quad (8)$$

Etude de la résistance série

La résistance série R_s est un paramètre fondamental qui dépend de la nature du substrat, de la température et de la technologie utilisée et joue un rôle déterminant sur la qualité d'une photopile. Elle caractérise les effets résistifs du matériau et du dispositif de contact utilisé. Pour des photopiles de bonne qualité, elle est souvent très faible [30-41].

Modèle électrique de la photopile en circuit ouvert

Sur la caractéristique densité de photocourant en fonction de la phototension de la photopile, considérons la situation de circuit-ouvert [64-66] où la phototension est maximale et la densité de photocourant nulle, dans cette zone la caractéristique, la photopile est modélisée comme une source idéale de tension, en série avec une résistance série R_s . Les **figures. 11 et 12** ci-dessous matérialisent, le modèle au voisinage du circuit ouvert et le circuit électrique équivalent.

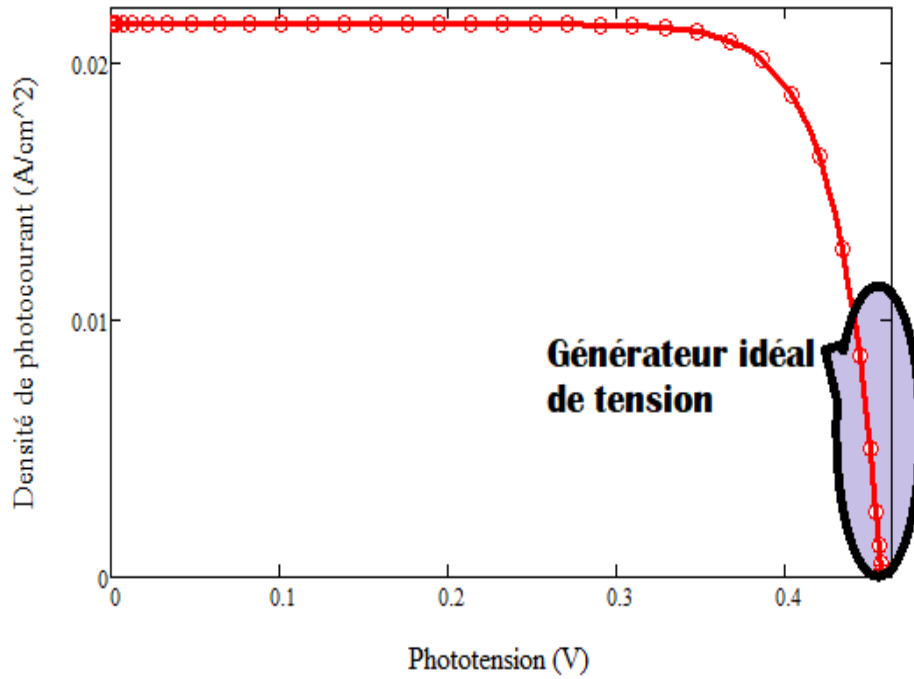


Figure 11:- Caractéristique densité de photocourant-phototension d'un générateur de tension.

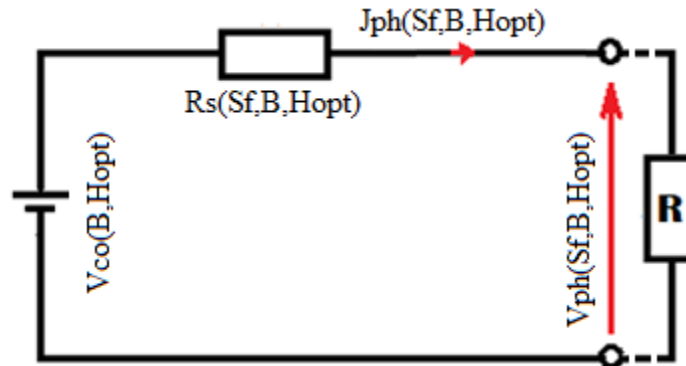


Figure 12:- Circuit électrique équivalent de la photopile en circuit ouvert.

L'expression de la résistance série s'obtient en appliquant les lois des nœuds et des mailles sur le circuit électrique de la figure 12. Elle est définie par l'équation (9).

$$Rs(Sf, B, Hopt) = \frac{Vco(B, Hopt) - Vph(Sf, B, Hopt)}{Jph(Sf, B, Hopt)} \tag{9}$$

La figure 13 représente les profils de la résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison pour différentes valeurs faibles du champ magnétique et de l'épaisseur optimum.

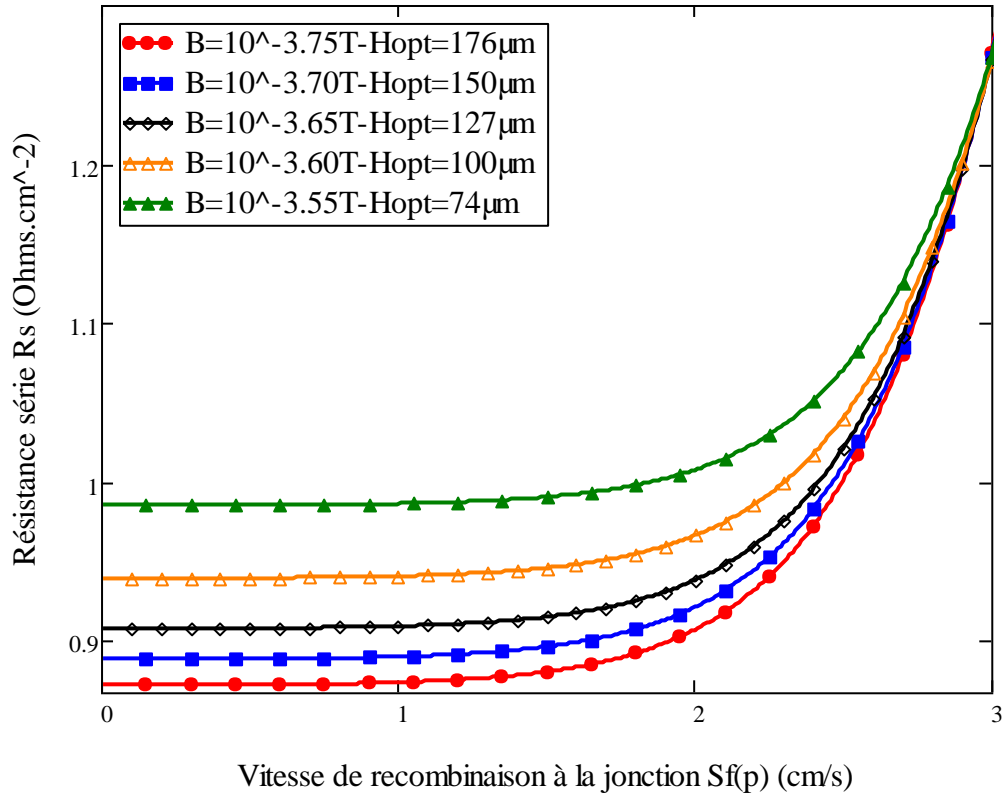


Figure 13:- Profil de la résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction ($Sf=p \cdot 10^p$) pour différentes faibles valeurs du champ magnétique et de l'épaisseur optimum.

Tableau 5:- Valeurs numériques de la résistance série (R_s) pour différentes valeurs faibles du champ magnétique et de l'épaisseur optimum.

B(T)	$10^{-3.75}$	$10^{-3.70}$	$10^{-3.65}$	$10^{-3.60}$	$10^{-3.55}$
Hopt(cm)	0.0176	0.0150	0.0127	0.0100	0.0074
$R_s(\Omega.cm^{-2})$	0.87212	0.88974	0.90736	0.93882	0.98539

Le **tableau. 5**, a permis de tracer les profils de la résistance série (**figure. 14**) et de l'épaisseur optimum (**figure. 15**) en fonction du champ magnétique

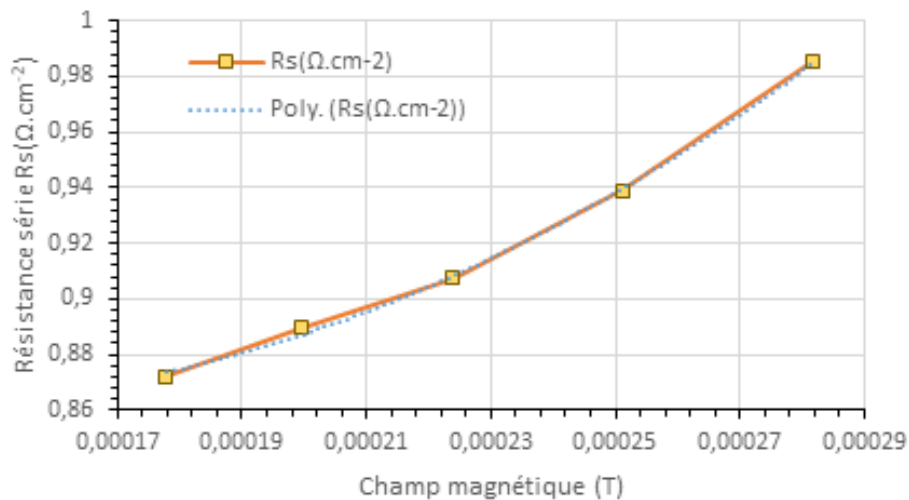


Figure 14:- Profil de la résistance série en fonction du champ magnétique.

L'équation de corrélation s'obtient par:

$$R_s(\Omega.cm^{-2}) = 5 * 10^6 \times B(T)^2 + 1433,1 \times B(T) + 0,9549 \quad (10)$$

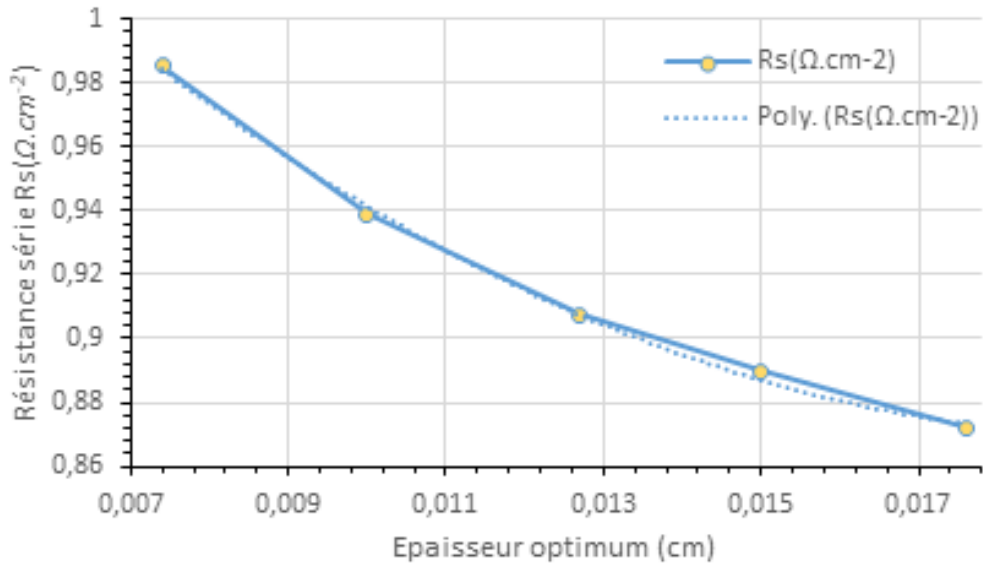


Figure 15:- Profil de la résistance série en fonction de l'épaisseur optimum.

L'équation de corrélation donnée par:

$$R_s(\Omega.cm^{-2}) = 736,84 \times Hopt(cm)^2 - 29,277 \times Hopt(cm) + 1,1604 \quad (11)$$

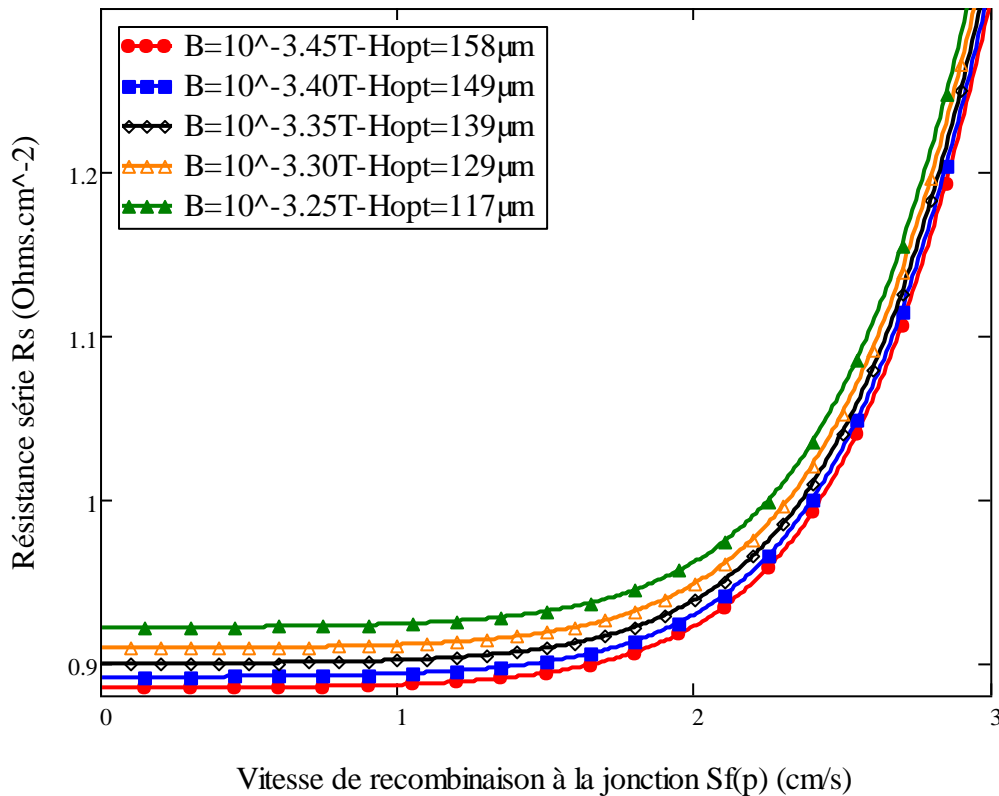


Figure 16:- Profil de la résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes grandes valeurs du champ magnétique et de l'épaisseur optimum ($Sf(p) = p \cdot 10^9$ cm/s).

Tableau. 6:- Valeurs numérique de la résistance série (Rs) pour différentes grandes valeurs du champ magnétique et de l'épaisseur optimum.

B(T)	10 ^{-3.45}	10 ^{-3.40}	10 ^{-3.35}	10 ^{-3.30}	10 ^{-3.25}
Hopt(cm)	0.0158	0.0149	0.0139	0.0129	0.0117
Rs(Ω.cm ⁻²)	0.88578	0.89150	0.90044	0.91022	0.92121

Le **tableau. 6,**a permis de tracer les profils de la résistance série (**figure. 17**) et de l'épaisseur optimum (**figure. 18**) en fonction du champ magnétique.

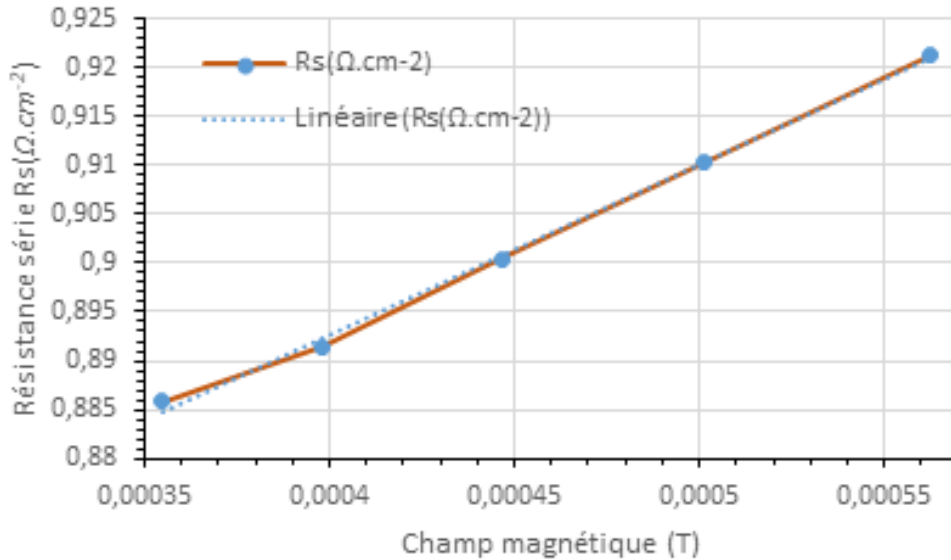


Figure 17:- Profil de la résistance série en fonction du champ magnétique.

L'équation de corrélation est la suivante:

$$Rs(\Omega.cm^{-2}) = 173,35 \times B(T) + 0,8234 \quad (12)$$

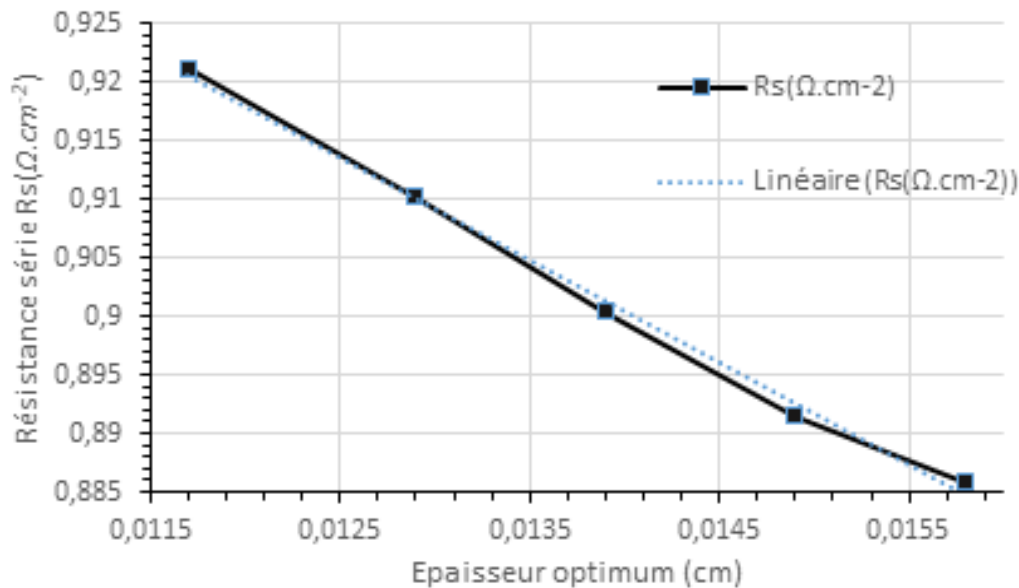


Figure 18:- Profil de la résistance série en fonction de l'épaisseur optimum.

L'équation de corrélation conduit à:

$$Rs(\Omega.cm^{-2}) = -8,8047 \times Hopt(cm) + 1,0237 \quad (13)$$

Conclusion:-

A partir des expressions de la densité du photocourant et de la phototension, la caractéristique courant-tension (I-V) de la photopile sous champ magnétique et sous éclairage multispectral est obtenue. De la situation de circuit ouvert de la photopile, la résistance série dans le modèle électrique équivalent est obtenue, par sa courbe de calibration en fonction de la vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires de charge à la jonction. L'ordonnée de l'abscisse correspondant à la vitesse de recombinaison à la jonction limitant le circuit ouvert, pour chaque valeur du champ magnétique, conduit à la valeur de la résistance série. L'expression de la modélisation de la résistance série est alors établie comme fonction croissante du champ magnétique et décroissante de l'épaisseur optimum de la base de la photopile.

Références Bibliographiques:-

- [1] 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>
- [2] Y.Bester, D. Ritter, G. Bahia, S. Cohen and J. Sparkling, Method Measurement of the Minority Carrier Mobility in the Base of Heterojunction Bipolar Transistor Using a Magneto transport Method. *Applied Physics Letters*, 1995, 67, 1883- 1884. <https://doi.org/10.1063/1.114364>
- [3] Vardayan, R.R., Kerst, U., Wawer, P., Nell, M.N. and Wagemann, H.G (1998). Method of Measurement of All Recombination Parameters in the Base Region of Solar Cells. *Proceedings of 2nd Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Vienna, 6-10 July 1998*, 191-193.
- [4] Rosling, M., Bleichner, H., Mundqvist, M. and Nordlander, E. (1992). A Novel Technique for the Simultaneous Measurement of Ambipolar Carrier Lifetime and Diffusion Coefficient in Silicon. *Solid State Electronics*, 35, 1223-1227. [https://doi.org/10.1016/0038-1101\(92\)90153-4](https://doi.org/10.1016/0038-1101(92)90153-4)
- [5] Konstantinos Misiakos and Dimitris Tsamakis, Electron and Hole Mobilities in Lightly Doped Silicon. *Appl. Phys. Lett.* 1994, 64(15), 2007-2009. <https://doi.org/10.1063/1.111721>
- [6] 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>
- [7] 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)
- [8] 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.
- [9] 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>
- [10] Diallo, H.L., Seidou, A., Maiga, 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, 203-211. <https://doi.org/10.1051/epjap:2008085>
- [11] N, 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>
- [12] O. Diasse, A. Diao, I. Ly, M. S. Diouf, I. Diatta, R. Mane, Y. Traore and G. Sissoko, (2018),. Back Surface Recombination Velocity Modeling in White Biased Silicon Solar Cell under Steady State. *Journal of Modern Physics*, 9, 189-201. <https://doi.org/10.4236/jmp.2018.92012>
- [13] Y. L. B. Bocande, A. Correa, I. Gaye, M. L. Sow and G. Sissoko (1994). Bulk and surfaces parameters determination in high efficiency Si solar cells. *Renewable Energy*, vol 5, part III, pp. 1698-1700, Pergamon, 0960-1481 / 94\$ 700 +0.00.
- [14] Sissoko, G., Museruka, C., Corréa, A., Gaye, I. and Ndiaye, A.L. (1996). Light Spectral Effect on Recombination Parameters of Silicon Solar Cell. *World Renewable Energy Congress, Pergamon, Part III*, pp.1487-1490.

- [15] Joardar, K., Dondero, R.C. and Schroda, 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, pp.479-483. [https://doi.org/10.1016/0038-1101\(89\)90030-0](https://doi.org/10.1016/0038-1101(89)90030-0)
- [16] Rose, B.H. and Weaver, H.T. (1983) Determination of Effective Surface Recombination Velocity and MinorityCarrier Lifetime in High-Efficiency Si Solar Cells. *Journal of Applied Physics*, 54, pp.238-247. <https://doi.org/10.1063/1.331693>.
- [17] 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, 6293-6974. <https://doi.org/10.1063/1.363705>
- [18] S. Mbodji, H. Ly.Diallo, I.Ly, A.Dioum, I.F.BarroAnd 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 (2006)*, pp. 447 – 450
- [19] 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
- [20] Cao, Y., Yang, D., Si, M., Shi, H., &Xue, D. (2018). Model for large magnetoresistanceeffect in p–n junctions. *Applied Physics Express*, 11(6), 061304. doi :10.7567/apex.11.061304
- [21] Yang, D., Wang, F., Ren, Y., Zuo, Y., Peng, Y., Zhou, S., &Xue, D. (2013). A Large Magnetoresistance Effect in p-n Junction Devices by the Space-Charge Effect. *Advanced Functional Materials*, 23(23), 2918–2923. doi:10.1002/adfm.201202695
- [22] Sow, O., Zerbo, I., Mbodji, S., Ngom, M. I., Diouf, M. S., &Sissoko, G. (2012). Silicon solar cell under electromagnetic waves in steady state: Electrical parameters determination using the I-V and P-V characteristics. *International Journal of Science, Environment and Technology*, Vol. 1, N°4, 230-246
- [23] WafaaAbd El-Basit, Ashraf MoslehAbd El-Maksood and FouadAbd El-MoniemSaadSoliman (2013). Mathematical Model for Photovoltaic Cells. *Leonardo Journal of Sciences*, Issue 23, pp.13-28. (<http://ljs.academicdirect.org/>)
- [24] Benmoussa, W. C., Amara, S., &Zerga, A. (2007). Etude comparative des modèles de la caractéristique courant-tension d’une cellule solaire au silicium monocristallin. *Revue desEnergies Renouvelables ICRESD-07 Tlemcen*, 301 – 306.
- [25] Sissoko, G., Nanéma, E., Corréa, A., Biteye, P.M., Adj, M. and N’Diaye, A.L. (1998). Silicon Solar Cell Recombination Parameters Determination Using the Illuminated I-V Characteristic. *World Renewable Energy Congress, Florence, 20-25 September 1998*, 1847-1851.
- [26] 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>
- [27] 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.
- [28] Green, M. A., Jianhua Zhao, Wang, A., & Wenham, S. R. (1999). Very high efficiencysilicon solar cells-science and technology. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 46(10),1940–1947. doi:10.1109/16.791982
- [29] 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>
- [30] M I. Ngom, Mohamed LemineCheikh, M. Yacine Ba, MalickNdiaye , A. Mamour Ba, SegaGueye, MoustaphaThiame, Ousmane Sow, MamadouWadeAndGregoireSissoko(2023). Magnétorésistance dans une photopile au silicium a jonctions verticales parallèles en régime statique sous éclairnement polychromatique. *International Journal of Advanced Research*,11(06), 752-763
- [31] M. Bashahu and Habyarimna, (1995). Review and test of mthods for determinationofthesolarcellseries resistance. *Renewable Energy*, 6, 2, pp. 127-138.
- [32] 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).
- [33] 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>
- [34] M.M. Dione, H. Ly Diallo, M. Wade, I. Ly, M. Thiame, F. Toure, A. GueyeCamara, N. Dieme, Z. NhouhouBako, 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.
- [35] 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
- [36] Barro, F.I., Gaye, S., Deme, M., Diallo, H.L., Samb, M.L., Samoura, A.M., Mbodji, S. and Sissoko, G. (2008) Influence of Grain Size and Grain Boundary Recombination Velocity on the Series and Shunt Resistances of a Polycrystalline Silicon Solar Cell. *Proceedings of the 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference, Valencia, 1-5 September 2008*, 612-615.11
- [37] K. Bouzidi, M. Chegaar, A. Bouhemadou Solar cells parameters evaluation considering the series and shunt resistance. *Solar Energy Materials & Solar Cells*. Volume 91, Issue 18, 6 November 2007, Pages 1647-165. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2007.05.019>.
- [38] S.Mbodji, I.Ly, H.L. Diallo, M.M. Dione, O.Diasse and G. Sissoko (2012). Modeling Study of N⁺/P Solar Cell Resistances from Single I-V Characteristic Curve Considering the Junction Recombination Velocity (Sf) *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology* 4(1):1-7.
- [39] R. Anil Kumar, M. S. Suresh et J. Nagaraju.(2001). Measurement of AC parameters of gallium arsenide (GaAs/Ge) solar cell by impedance spectroscopy. *IEEE Transactions on electron devices*, Volume 48, Issue 9, Sept., Pp.2177 – 2179. DOI: 10.1109/16.944213.
- [40] J. Thongpron, K. Kirtikara, C. Jivacate (2006). A method for the determination of dynamic resistance of photovoltaic modules under illumination. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 91, Pp. 3078-3084.
- [41] Oumar DIA, Mamadou Lamine BA, Gora DIOP, Ibrahima DIATTA, Mor SARR, Mamadou WADE and Gregoire SISSOKO (2021). Effet De L'énergie D'irradiation Sur La Resistance Serie Dans Une Photopile (N+/P/P+) Au Silicium A Jonctions Verticales Series. *International Journal of Advanced Research*, 9(11), 985-997. <https://doi.org/10.21474/IJAR01/13832>
- [42] Van Dyk, E. E., & Meyer, E. L. (2004). Analysis of the effect of parasitic resistances on the performance of photovoltaic modules. *Renewable Energy*, 29(3), 333–344. doi :10.1016/s09601481(03)00250-7
- [43] Meyer, E. L., & Ernest van Dyk, E. (n.d.). The effect of reduced shunt resistance and shading on photovoltaic module performance. *Conference Record of the Thirty-First IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 2005. doi :10.1109/pvsc.2005.1488387
- [44] Dione, M. M., Diallo, H. L., Wade, M., Ly, I., Thiame, M., Toure, F., Camara, A. G., Dieme, N., Bako, Z. N., Mbodji, S., Barro, F. I., & Sissoko, G. (2011). 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, 250-254
- [45] Abdoulaye Diop, Richard Mane, Gora Diop, Ibrahima Diatta, Khady Loum, Sega Gueye, Moustapha Thiame, Ousmane Sow, Mamadou, Wade, Gregoire Sissoko. Bifacial Silicon (N+/P/P+) Silicon Solar Cell Base Thickness Optimization under Back Illumination of Long Wavelength: Effect of Diffusion Coefficient Resonance in Temperature under Applied Magnetic Field. *Journal of Scientific and Engineering Research*, 2022, 9(11):152-165
- [46] 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).
- [47] F. Toure, M. Zougrana, 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, p51-59.
- [48] 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>.
- [49] Diao, A., Thiame, N., Zougrana, M., Sahin, G., Ndiaye, M. and Sissoko, G. (2014) Diffusion Coefficient in Silicon Solar Cell with Applied Magnetic Field and under Frequency: Electric Equivalent Circuits. *World Journal of Condensed Matter Physics*, 4, 84-92. doi: 10.4236/wjcmp.2014.42013.
- [50] R. Mane, Ibrahima Ly, Mamadou Wade, Ibrahima Datta, Marcel S. Douf, Youssou Traore, 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>
- [51] Diao, A., Wade, M., Thiame, M. and Sissoko, G. (2017) Bifacial Silicon Solar Cell Steady Photoconductivity under Constant Magnetic Field and Junction Recombination Velocity Effects. *Journal of Modern Physics*, 8, 2200-2208. doi: 10.4236/jmp.2017.814135.

- [52] 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>.
- [53] Marcel SitorDiouf, GohanSahin, AmaryThiam, MoussaIbraNgom, Khady Faye, Doudou Gaye, GrégoireSissoko (September 2015). Determination of the junction surface recombination velocity limiting the open circuit (sfoc) for a bifacial silicon solar cell under external electric field. *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, Vol. 2 Issue 9, p 931-938, <http://www.ijiset.com>
- [54] I. Ly, Lemrabortt, O.H., Dieng, B., Gaye, I., Gueye, S., Diouf, M.S. and Sissoko, G. (2012) Technics of Recombination Parameters Determination and the Validity Domain of a Polycrystalline Bifacial Silicon Solar Cell under Constant Multispectral Illumination in Static Mode. www.cder.dz/spip.php?article535
- [55] Fatimata Ba, boureimaSeibou, mamadou Wade, marcel SitorDiouf, brahima Ly and grégoireSissoko (2016).Equivalent Electric Model of the Junction Recombination Velocity limiting the Open Circuit of a Vertical Parallel Junction Solar Cell under Frequency Modulation. *IPASJ International Journal of Electronics & Communication (IJEC)*, Volume 4, Issue 7, pp.1-11.
- [56] I.Ly, M. Ndiaye, M. Wade, N. Thiam, S. Gueye and G. Sissoko, Concept of Recombination Velocity Sfoc 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>
- [57] E. Demesmaeker, J. Symons, J. Nijs, R. Mertens (1991).The Influence Of Surface Recombination On The Limiting Efficiency And Optimum Thickness Of Silicon Solar Cells.10th European Photovoltaic Solar Energy Conference Lisbon, Portugal-Pp.66-67.
- [58] Thiaw, C. , Ba, M. , Amadou Ba, M. , Diop, G. , Diatta, I. , Ndiaye, M. and Sissoko, G. (2020) $n^+ - p - p^+$ Silicon Solar Cell Base Optimum Thickness Determination under Magnetic Field. *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, **12**, 103-113. doi: 10.4236/jemaa.2020.127009.
- [59] Teya, M. , Sow, O. , Loum, K. , Diatta, I. , Diop, G. , Traore, Y. , Wade, M. and Sissoko, G. (2023) Determination of the Base Optimum Thickness of Back Illuminated ($n^+ / p / p^+$) Bifacial Silicon Solar Cell, by Help of Diffusion Coefficient at Resonance Frequency. *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, **15**, 13-24. doi: 10.4236/jemaa.2023.152002.
- [60] Sega Diagne, Ousmane Sow, Gora Diop, Richard Mane, IbrahimaDiatta, DjibyNdiongue, YoussouTraore, LemraborttHabiboullah, Mamadou Wade, GregoireSissoko. Optimization of silicon solar cell base thickness, while illuminated by a long wavelength monochromatic light: influence of both lorentz law and umklapp process. *International Journal of Advanced Research*, www.journalijar.com, Volume 10, Issue 8, pp: 133 – 143, 2022.
- [61] Gora Diop, Richard Mane, IbrahimaDiatta, KhadyLoum, Sega Gueye, MoustaphaThiame, Ousmane Sow, Mamadou Wade, GregoireSissoko. Optimization of the base thickness of an ($n^+ / p / p^+$) bifacial silicon solar cell illuminated from the back side, using short-wavelength light: Resonance Effect on the diffusion coefficient in temperature under applied magnetic field. *Journal of chemical, biological and physical sciences*, www.jcbcs.org, Volume 13, Issue 1, pp: 038 – 052, 2022.
- [62] Faye, D. , Gueye, S. , Ndiaye, M. , Ba, M. , Diatta, I. , Traore, Y. , Diop, M. , Diop, G. , Diao, A. and Sissoko, G. (2020) Lamella Silicon Solar Cell under Both Temperature and Magnetic Field: Width Optimum Determination. *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, **12**, 43-55. doi: 10.4236/jemaa.2020.124005
- [63] Sega Diagne, Gora Diop, Richard Mane, MalickNdiaye, IbrahimaDiatta, Gilbert N Dione, Ousmane Sow, MoustaphaThiame, Mamadou Wade, GregoireSissoko. Monochromatic light of short wavelength as applied to determine ($n^+ / p / p^+$) silicon solar cell base thickness under the influence of both magnetic field and Temperature. *International Journal of Engineering Research Updates*, <https://orionjournals.com/ijeru>, Volume 3, Issue 2, pp : 013-025, 2022.
- [64] AmadouMamour Ba, Gora Diop, IbrahimaDiatta, Richard Mane, MoussaIbraNgom, MamadouYacine Ba, KhadyLoum, YoussouTraore, MoustaphaThiame, Sega Gueye, Ousmane Sow, Mamadou Wade, GregoireSissoko. Determination of the junction intrinsic recombination velocity of minority carriers in the base of parallel vertical multi junctions' silicon solar cell using the open-circuit voltage calibration curve technique. *Journal of chemical, biological and physical sciences*, www.jcbcs.org, Volume 13, Issue 2, pp: 129 – 138, 2023.
- [65] Diouf, M.S., et al. (2016) Study of the Series Resistance of a Solar Cell Silicon under Magnetic Field from of Junction Surface Recombination Velocity of Minority Charge Carriers at the Junction Limiting the Open Circuit (Sfoc). *Journal of Scientific and Engineering Research*, **3**, 289-297. <http://www.jsaer.com>
- [66] Diouf, M.S., Gaye, I., Thiam, A., Fall, M.F.M., Ly, I. and Sissoko, G. (2014) Junction Recombination Velocity Induced Open Circuit Voltage for a Silicon Solar Cell under External Electric Field. *Current Trends in Technology & Sciences*, **3**, 372-375. <http://www.ctts.in/>