

1
2
3 **Study of the Influence of Optimal Base Thickness on the I–V Characteristics of a Bifacial Silicon Solar Cell**
4 **under Monochromatic Rear-Side Illumination in Steady-State Conditions for Short Wavelengths.**
5
6

7 **Abstract:**

8 In this work, we investigate the influence of the optimum base thickness on the current–voltage (I–V) characteristics
9 of a bifacial silicon solar cell subjected to monochromatic illumination at low wavelengths under steady-state
10 conditions. The study is based on the analysis of photovoltage and photocurrent density as functions of the junction
11 recombination velocity, the incident wavelength, and the corresponding optimum base thickness. The obtained
12 profiles show that the photovoltage remains maximum and constant at low recombination velocities, corresponding
13 to the open-circuit condition, and then decreases as the recombination velocity increases. The results also reveal that
14 the open-circuit voltage increases with wavelength while it decreases as the optimum thickness increases.
15 Furthermore, the short-circuit photocurrent density increases with wavelength and decreases with the optimum base
16 thickness. The obtained I–V characteristics highlight the significant influence of optical and geometrical parameters
17 on the electrical performance of the solar cell. This study therefore contributes to the optimization of bifacial silicon
18 photovoltaic cells intended for high-efficiency photovoltaic applications.

19 **Key words:-** bifacial solar cell; silicon; optimum thickness; I–V characteristic; photovoltage; photocurrent;
20 wavelength; recombination

21
22
23
24 **Introduction:-**

25 Les cellules photovoltaïques au silicium occupent aujourd’hui une place prépondérante dans la production mondiale
26 d’énergie solaire grâce à leur stabilité, leur abondance et leur rendement de conversion élevé [9, 54,55]. Parmi ces
27 dispositifs, les photopiles bifaciales au silicium suscitent un intérêt croissant en raison de leur capacité à capter le
28 rayonnement lumineux sur les deux faces, permettant ainsi une amélioration significative des performances
29 électriques et énergétiques [1, 2, 4,56].

30 Cette technologie constitue une voie prometteuse pour les systèmes photovoltaïques à haut rendement destinés aux
31 applications terrestres et spatiales [3,5].Les performances des photopiles bifaciales dépendent fortement des
32 paramètres physiques, géométriques et optiques intervenant dans les mécanismes de transport des porteurs
33 minoritaires [13,57]. Parmi ces paramètres, l’épaisseur de la base joue un rôle fondamental dans les phénomènes de
34 génération, diffusion et recombinaison des porteurs de charge photogénérés [6, 7,8]. Une base trop épaisse favorise
35 les recombinaisons volumiques avant la collecte des porteurs à la jonction, tandis qu’une base trop mince réduit
36 l’absorption du rayonnement incident. Il devient alors nécessaire de déterminer une épaisseur optimale permettant
37 d’établir un compromis entre absorption optique et limitation des pertes par recombinaison [45, 47, 52,53].Plusieurs
38 travaux ont été consacrés à l’optimisation de l’épaisseur de la base dans les cellules photovoltaïques au silicium. Les
39 paramètres structuraux sont importants dans l’amélioration du rendement des cellules photovoltaïques cristallines
40 [54-56].D’autres études théoriques et expérimentales ont porté sur les effets de la longueur d’onde, du champ
41 magnétique, de la température, de la fréquence et de l’irradiation sur les caractéristiques électriques des photopiles
42 bifaciales [19, 20, 27, 28, 47-50]. L’éclairement monochromatique l’influence de sur la détermination de l’épaisseur
43 optimale de la base d’une photopile bifaciale (n+/p/p+) au silicium [19,20]. Par ailleurs, les phénomènes de
44 recombinaison à la jonction et à la surface arrière constituent des paramètres essentiels dans l’étude des
45 caractéristiques courant–tension des cellules photovoltaïques [15, 26, 32, 37,41]. Les vitesses de recombinaison
46 traduisent les mécanismes d’échange des porteurs minoritaires au niveau des interfaces de la photopile et influencent
47 directement la phototension de circuit ouvert ainsi que le photocourant de court-circuit [30,31,43,46].Dans ce travail,
48 nous étudions l’influence de l’épaisseur optimale de la base sur les caractéristiques courant–tension (I–V) d’une
49 photopile bifaciale (n+/p/p+) au silicium soumise à un éclairement monochromatique de faibles longueurs d’onde
50 par la face arrière en régime statique. L’étude repose sur l’analyse de la phototension et de la densité de
51 photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction, de la longueur d’onde incidente et de

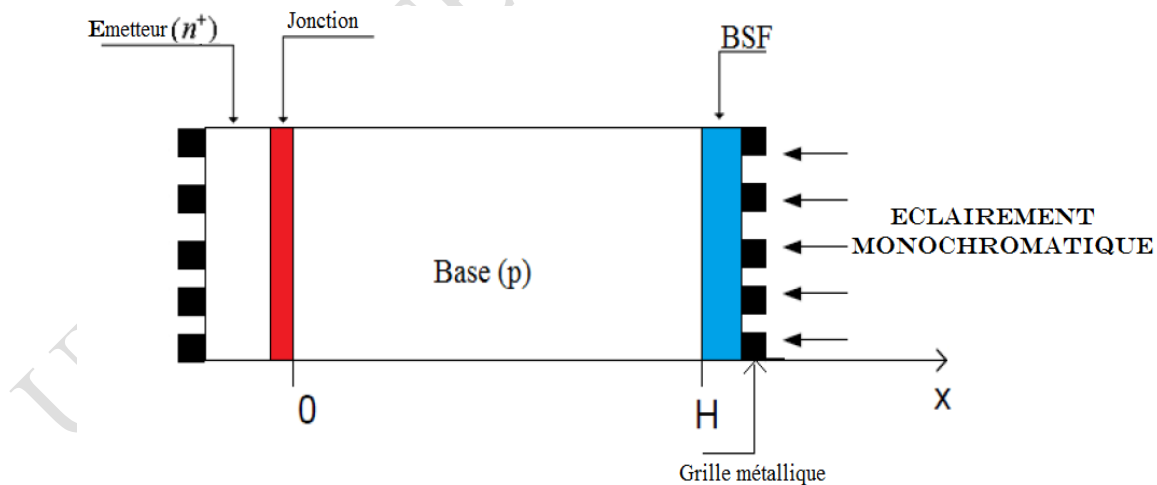
52 l'épaisseur optimale correspondante de la base. L'objectif principal est de mettre en évidence l'effet combiné des
53 paramètres optiques et géométriques sur les performances électriques de la photopile afin de contribuer à
54 l'optimisation des cellules photovoltaïques bifaciales au silicium [12, 19, 20, 45, 49,52].

55 Théorie

56 a)Présentation de la photopile

57 Dans ce travail, on considère une photopile bifaciale ($n^+/p/p^+$) au silicium étudiée dans le cadre d'un modèle
58 unidimensionnel [12, 20,45], soumise à un éclairage monochromatique de faibles longueurs d'onde par la face
59 arrière en régime statique [19,20]. L'étude porte sur l'influence de l'épaisseur optimale de la base sur les
60 caractéristiques électriques de la photopile, notamment la phototension et la densité de photocourant, à travers les
61 phénomènes de génération, diffusion et recombinaison des porteurs minoritaires dans la base [13,18,21,57].La
62 structure de la photopile au silicium considérée est représentée sur la figure (1). Elle est composée principalement de
63 l'émetteur ou face avant de type n^+ (comportant des grilles métalliques, fortement dopé en atomes donneurs de
64 phosphore et de faible épaisseur), suivi de la zone de charge d'espace située entre l'émetteur et la base où règne un
65 champ électrique intense permettant la séparation des paires électron-trou photogénérées. La base, de type p , est
66 faiblement dopée en atomes accepteurs trivalents et possède une épaisseur beaucoup plus importante que celle de
67 l'émetteur. Enfin, la région arrière fortement dopée p^+ constitue le Back Surface Field (BSF) [10, 14, 38, 41,42].
68 Cette région crée un champ électrique arrière permettant de renvoyer vers la jonction émetteur-base les porteurs
69 minoritaires générés près de la face arrière, réduisant ainsi les pertes par recombinaison et améliorant la collecte des
70 charges photogénérées [11,14,38,41,42].Les paramètres optiques liés à l'absorption du rayonnement lumineux
71 jouent un rôle essentiel dans la génération des porteurs minoritaires au sein de la base [22-24]. Sous éclairage
72 monochromatique par la face arrière, la répartition spatiale des porteurs photogénérés dépend fortement de la
73 longueur d'onde incidente ainsi que de l'épaisseur de la base [19,20,50,53]. Les vitesses de recombinaison à la
74 jonction et à la surface arrière influencent directement les caractéristiques électriques de la photopile, notamment la
75 phototension de circuit ouvert et la densité de photocourant de court-circuit [15,16,26,30-32,46].Par ailleurs,
76 plusieurs travaux ont montré que l'optimisation de l'épaisseur de la base constitue un facteur essentiel dans
77 l'amélioration des performances des photopiles bifaciales au silicium [45,47,49,51-53]. Une augmentation excessive
78 de l'épaisseur favorise les recombinaisons volumiques des porteurs minoritaires avant leur collecte à la jonction,
79 tandis qu'une faible épaisseur réduit l'absorption des photons incidents dans la base [17,21,37,39]. L'étude de
80 l'épaisseur optimale permet ainsi d'établir un compromis entre absorption optique et limitation des pertes par
81 recombinaison afin d'améliorer les performances électriques de la photopile [12,19,20,45].

82



83

84

Figure 1 : Photopile bifaciale ($n^+/p/p^+$) au silicium éclairée par la face arrière

85 b) Équation de continuité

86 Compte tenu des phénomènes de génération, de recombinaison et de diffusion au sein de la photopile éclairée par la
 87 face arrière par une lumière monochromatique, l'équation de continuité des porteurs minoritaires de charges en
 88 excès dans la base en régime statique est donnée par la relation suivante[13,57]:

$$D \times \frac{\partial^2 \delta(x, \alpha_\lambda)}{\partial x^2} - \frac{\delta(x, \alpha_\lambda)}{\tau} + G(x, \alpha_\lambda) = 0 \quad (1)$$

89 Où :

90 D : représente le coefficient de diffusion des électrons dans la base ;

91 $\delta(x, \alpha_\lambda)$: représente la densité des porteurs minoritaires de charge en excès dans la base.

92 τ : représente la durée de vie des porteurs minoritaires de charge en excès dans la base.

$$\tau = \frac{L^2}{D} \quad (2)$$

93 L : représente la longueur de diffusion des porteurs minoritaires de charge en excès dans la base.

94

95 Le taux de génération des porteurs photogénérés est donné par la relation suivante [21] :

$$G(x, \alpha_\lambda) = \alpha_\lambda \times \phi_\lambda \times (1 - R_\lambda) \times \exp(-\alpha_\lambda \cdot (x - H)) \quad (3)$$

96 Les coefficients optiques jouent un rôle important dans l'absorption du rayonnement lumineux et la génération des
 97 porteurs photogénérés dans le silicium [22-24].

98 α_λ est le coefficient d'absorption monochromatique du matériau pour une longueur d'onde λ ,

99 R_λ est le coefficient de réflexion monochromatique du matériau pour une longueur d'onde λ ,

100 ϕ_λ est le flux incident de la lumière monochromatique,

101 x est profondeur dans la base de la photopile.

102 La résolution de l'équation (1) a donnée l'expression de la densité de porteurs minoritaires sous la forme suivante :

$$\delta(x, \alpha_\lambda) = A \times c \left(\frac{x}{L} \right) + B \times sh \left(\frac{x}{L} \right) + K(\alpha_\lambda) \times \exp(-\alpha_\lambda(H - x)) \quad (4)$$

103 avec : $K(\alpha_\lambda) = \frac{-\alpha_\lambda \times \phi_\lambda \times (1 - R_\lambda) \times L^2}{D \times [\alpha_\lambda^2 \times L^2 - 1]} \quad (5)$

104 Les conditions aux limites permettent de déterminer les constantes d'intégration A et B liées au transport des
 105 porteurs dans la base de la photopile [32,33].

106 A la jonction émetteur-base ($x = 0$)

$$\left. \frac{\partial \delta(x, \alpha_\lambda)}{\partial x} \right|_{x=0} = \frac{S_f}{D} \times \delta(0, \alpha_\lambda) \quad (6)$$

107 S_f représente la vitesse de recombinaison des porteurs de charge à la jonction imposée par la charge externe et
 108 interne (résistance shunt) et caractérise ainsi le point de fonctionnement de la cellule solaire, variant du circuit
 109 ouvert à la condition de court-circuit [26-36].

110 En face arrière ($x = H$)

$$\left. \frac{\partial \delta(x, \alpha_\lambda)}{\partial x} \right|_{x=H} = \frac{-S_b}{D} \delta(H, \alpha_\lambda) \quad (7)$$

111 S_b Représente la vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires à la surface arrière. Elle est la conséquence du
 112 champ électrique créé par la jonction p/p+ et caractérise la surface de jonction haut-bas [37-45].

113 c) Expression de la phototension

114 L'expression de la phototension aux bornes d'une photopile est donnée par la relation de Boltzmann ci-dessous :

115

$$V_{ph}(S_f, \alpha_\lambda, H_{opt}) = \frac{K_b}{q} \times T \times \ln \left[\frac{N_b}{n_i^2} \cdot \delta(0, \alpha_\lambda, H_{opt}) + 1 \right] \quad (8)$$

116 Cette relation est largement utilisée dans la modélisation des cellules photovoltaïques au silicium pour relier la
 117 densité des porteurs à la phototension développée aux bornes de la jonction [13,57].

118 n_i représente la concentration intrinsèque égale à 10^{10} cm^{-3} ,

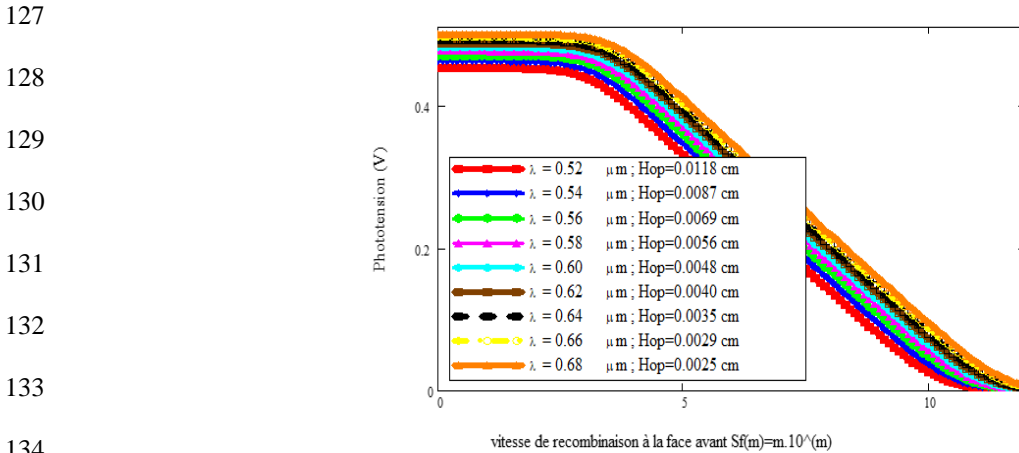
119 N_b représente le taux de dopage en atomes accepteurs dans la base et égal à 10^{16} cm^{-3} ,

120 K_b représente la constante de Boltzmann égale à $1,381 \cdot 10^{-23}$,
 121 T : la température absolue égale à 300°K ,
 122 q représente le charge élémentaire de l'électron égale à $1,610^{-19}$ C.

123 **d) Résultats et discussions**

124 **Phototension en fonction de la vitesse de recombinaison**

125 La figure 2 présente le profil de la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la face avant S_f pour
 126 différentes longueurs d'onde λ associées à différentes profondeurs optimales H_{opt} .



135 Figure 2: Phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes faibles valeurs de la
 136 longueur d'onde.

137 La figure 2 montre que pour $S_f < 4.10^4$ cm/s, l'amplitude de la phototension est maximale et constante
 138 correspondante à la tension de circuit ouvert. Cependant cette amplitude augmente avec l'augmentation de la
 139 longueur d'onde. Ensuite la phototension décroît linéairement avec la vitesse de recombinaison à la jonction, au-delà
 140 de $S_f > 4.10^4$ cm/s pour devenir quasi nulle aux grandes vitesses de recombinaison à la jonction (voisinage du court-
 141 circuit). Cette situation correspond à un gradient très élevé de la densité des porteurs à la jonction pouvant traverser
 142 celle-ci.

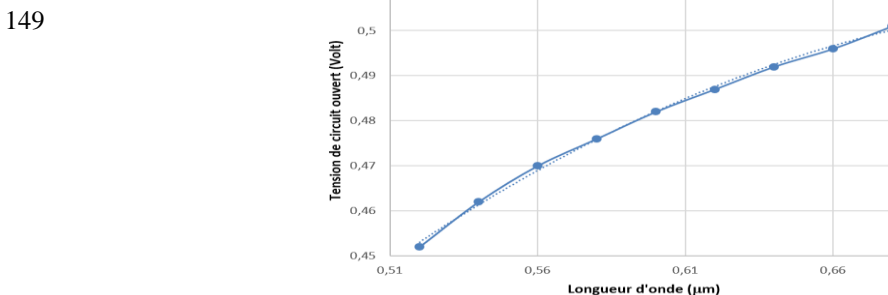
143 Le tableau 1 ci-après matérialise les valeurs de la tension de circuit ouvert (V_{co}) extraite de la figure 2 pour chaque
 144 cas de la longueur d'onde de gamme faible correspondant à une épaisseur optimum de la base de la photopile.

145 Tableau 1 : Phototension de circuit ouvert en fonction de la longueur d'onde

λ (μm)	0.52	0.54	0.56	0.58	0.60	0.62	0.64	0.66	0.68
Hopt(cm)	0.0118	0.0087	0.0069	0.0056	0.0048	0.004	0.0035	0.0029	0.0025
Vco(V)	0.453	0.462	0.470	0.477	0.482	0.487	0.492	0.496	0.501

146 Le tableau 1a permis de tracer les profils de la tension de circuit ouvert en fonction de la longueur d'onde (figure 3)
 147 et de l'épaisseur optimum (figure 4).

148 La figure 3 présente le profil de la tension de circuit ouvert en fonction de la longueur d'onde λ .



150
151
152
153
154
155

Figure 3 : Tension de circuit ouvert en fonction de la longueur d'onde

156 L'équation de corrélation mathématique est donnée par:

157

$$158 V_{co} (Volt) = -0,8577\lambda^2 + 1,3234\lambda - 0,0032(9)$$

159 Nous constatons au niveau de la figure 3, que l'amplitude de la tension de circuit ouvert (V_{co}) augmente lorsque la
160 longueur d'onde augmente. La tension de circuit ouvert (V_{co}) croît paraboliquement lorsque la longueur d'onde
161 augmente.

162 La figure 4 présente le profil de la tension de circuit ouvert en fonction de l'épaisseur optimum.

163

164

165

166

167

168

169

170

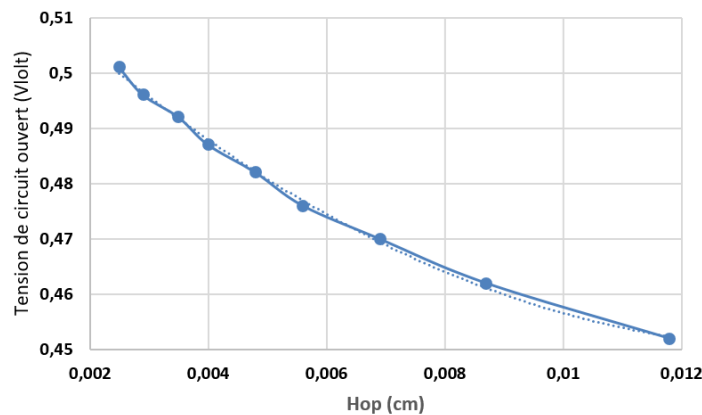
171

172

173

174

175



176

177 Figure 4: Tension de circuit ouvert en fonction de l'épaisseur optimum

178 L'équation de corrélation mathématique est donnée par:

$$179 V_{co} (Volt) = -371,57Hop^2 - 10,42Hop + 0,5236(10)$$

180 Nous constatons au niveau de la figure 4, que l'amplitude de la tension de circuit ouvert (V_{co}) décroît lorsque
181 l'épaisseur optimum augmente. La tension de circuit ouvert (V_{co}) décroît paraboliquement lorsque l'épaisseur
182 optimum augmente.

183 Caractéristique $I(Sf, \alpha_i, Hopt)$ - $V(Sf, \alpha_i, Hopt)$

184 Les figures 5 et 6 matérialisent les profils de la densité de photocourant en fonction de la phototension pour
185 différentes valeurs de la longueur d'onde (faibles, moyennes et élevées) et d'épaisseur optimum correspondante.

186 La figure 5 matérialise le profil de la densité de photocourant en fonction de la phototension pour différentes faibles
187 valeurs de la longueur d'onde et de l'épaisseur optimum correspondante.

188

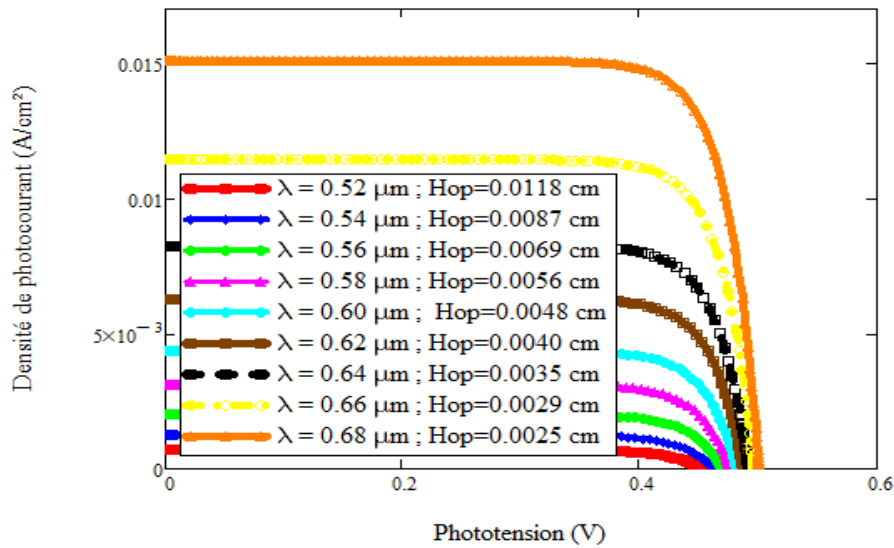


Figure 5 : Densité de photocourant en fonction de la phototension avec $Sb_2=f(\alpha\lambda)$

189
190

191 La figure 5 montre que, pour de faibles valeurs de la phototension, la densité de photocourant est maximale et
 192 constante, correspondant au régime de court-circuit. Elle décroît ensuite progressivement jusqu'à s'annuler lorsque
 193 la phototension atteint sa valeur maximale associée au circuit ouvert. Par ailleurs, la longueur d'onde incidente et
 194 l'épaisseur optimale de la base n'affectent pas la forme générale de la caractéristique I-V, mais influencent
 195 uniquement les valeurs du photocourant de court-circuit et de la phototension de circuit ouvert.

196 Le tableau 2 présente les valeurs de la densité de photocourant de court-circuit, extraites de la figure 5 pour
 197 différentes faibles longueurs d'onde et les épaisseurs optimales correspondantes de la base de la photopile.

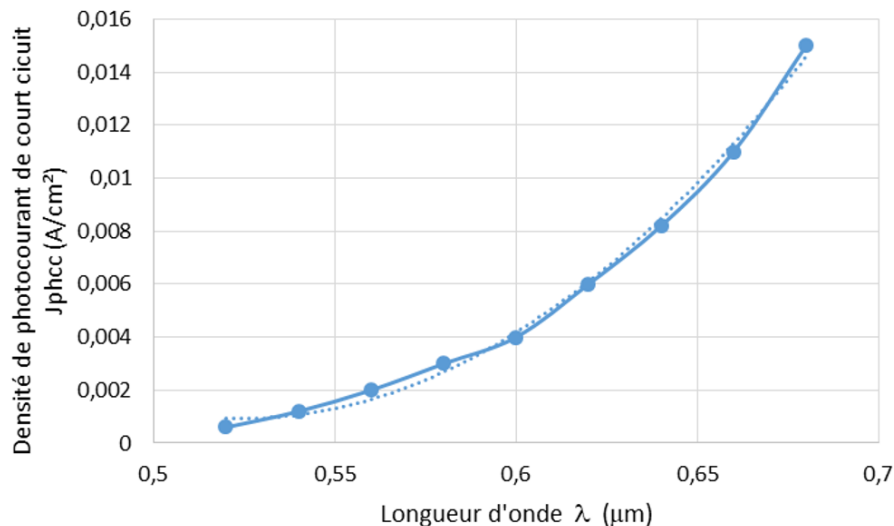
198 Tableau 2 : Densité de photocourant de court-circuit en fonction de la longueur d'onde et de l'épaisseur optimum

$\lambda(\mu\text{m})$	0.52	0.54	0.56	0.58	0.60	0.62	0.64	0.66	0.68
$H_{opt}(\text{cm})$	0.0118	0.0087	0.0069	0.0056	0.0048	0.004	0.0035	0.0029	0.0025
$J_{phcc}(\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$	0.0006	0.0012	0.002	0.003	0.004	0.006	0.0082	0.011	0.015

199 Le tableau 2a permis de tracer les profils de la densité du photocourant de court circuit en fonction de la longueur
 200 d'onde (figure 6) et de l'épaisseur optimum (figure 7).

201 La figure 6 présente le profil de la densité du photocourant de court circuit en fonction de la longueur d'onde λ .

202
203
204
205
206
207
208
209
210
211
212
213



214

215

216 Figure 6 : Profil de la densité de photocourant de court-circuit en fonction de la longueur d'onde

217 L'équation de corrélation mathématique est donnée par:

218 $Jph_{cc} (A/cm^2) = 0,5617\lambda^2 - 0.5887\lambda + 0.1552(11)$

219 Nous constatons au niveau de la figure 6, que l'amplitude de la densité de photocourant de court-circuit (Jph_{cc}) augmente lorsque la longueur d'onde augmente. La densité de photocourant de court-circuit (Jph_{cc}) croît paraboliquement lorsque la longueur d'onde augmente.

222

223 La figure 7 présente le profil de la densité de photocourant de court-circuit en fonction de l'épaisseur optimum.

224

225

226

227

228

229

230

231

232

233

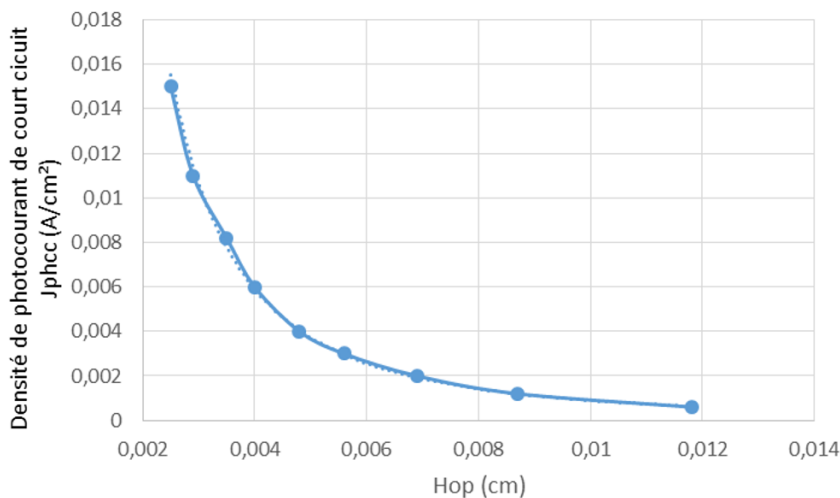
234

235

236

237

238



239

240

241

242

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

243 L'équation de corrélation mathématique est donnée par :

244 $Jph_{cc} (A/cm^2) = 7 * 10^{-8} Hop^{-2.063} (12)$

245 Nous constatons au niveau de la figure 6, que l'amplitude de la densité de photocourant de court-circuit (Jph_{cc}) diminue avec l'épaisseur optimum.

247 **Conclusion**

248 Cette étude a permis d'analyser l'influence de l'épaisseur optimale de la base sur les caractéristiques courant-tension (I-V) d'une photopile bifaciale au silicium soumise à un éclairage monochromatique de faibles longueurs d'onde en régime statique. L'analyse des profils de la phototension et de la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction a mis en évidence le rôle déterminant des paramètres optiques et géométriques dans le fonctionnement de la photopile.

252 Les résultats obtenus montrent que la phototension demeure maximale et constante aux faibles vitesses de recombinaison, correspondant au régime de circuit ouvert, avant de décroître progressivement lorsque la vitesse de recombinaison augmente. L'étude révèle également que la tension de circuit ouvert augmente avec la longueur d'onde de la lumière incidente alors qu'elle diminue lorsque l'épaisseur optimale de la base devient plus importante. Par ailleurs, la densité de photocourant de court-circuit augmente avec la longueur d'onde tandis qu'elle décroît avec l'augmentation de l'épaisseur optimale de la base. Les caractéristiques I-V obtenues montrent ainsi que les variations de la longueur d'onde et de l'épaisseur de la base influencent significativement les performances électriques de la photopile bifaciale au silicium.

261 Ces résultats confirment l'importance de l'optimisation de l'épaisseur de la base dans l'amélioration des performances des cellules photovoltaïques bifaciales. Cette optimisation permet de limiter les phénomènes de

262

263 recombinaison des porteurs minoritaires tout en favorisant une meilleure collecte des charges
264 photogénérées[12,19,20,45,47,49,52].
265 En perspective, cette étude pourrait être approfondie par la prise en compte de l'influence de la température, de
266 l'irradiation particulière, des effets fréquentiels ainsi que des conditions réelles d'éclairément sur les performances
267 des photopiles bifaciales au silicium.
268

269 Références

- 270 1. Green, M.A. (1995) Silicon Solar Cells Advanced Principles & Practice. Bridge Printer Pty. Ltd., Clayton
271 North.
- 272 2. Navruz, T.S. and Saritas, M. (2012) Determination of the Optimum Material Parameters for Intermediate Band
273 Solar Cells Diffusion Model. Progress in Photovoltaics Research and Applications, 22, 593-602.
274 <https://doi.org/10.1002/pip.2283>
- 275 3. Yadav, P., Pandey, K., Tripathi, B., Kumar, C.M., Srivastava, S.K., Singh, P.K. and Kumar, M. (2015) An
276 Effective Way to Analyze the Performance Limiting Parameters of a Poly-Crystalline Silicon Solar Cell
277 Fabricated in the Production Line. Solar Energy, 122, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.08.005>
- 278 4. R. Aliev, A. Mirzaalimov, S. Aliev (2013). Development and some photovoltaic parameters of a silicon solar
279 generator with vertical p-n junctions. Applied Solar Energy, Vol. 49 issue 2, Pp 59-61
280 <http://dx.doi.org/10.3103/s0003701x13020011>
- 281 5. Chung F; Chung-Feng Jeffery Kuo, Hung-Min Tu, Shin-Wei Liang, Wei-Lun Tsai (2010). Optimization of
282 microcrystalline silicon thin film solar cell isolation processing parameters using ultraviolet laser. Optics &
283 Laser Technology, Vol. 42 issue 6, Pp. 945-955. <http://dx.doi.org/10.1016/j.optlastec.2010.01.013>
- 284 6. Lago-Aurrekoetxea, R.M., Del Can, C., Izo, Pou, I. and Luque, A. (2001) Fabrication Process for Thin Silicon
285 Solar Cells. Proceeding 17th European PVSEC, Munich, 1519-1522.
- 286 7. Yasar, S., Kahraman, S., Cetinkaya, S., Apaydin, S., Bilican, I. and Uluer, I. (2016). Numerical Thickness
287 Optimization Study of CIGS Based Solar Cells with wxAMPS, Optik, 127, 8827-8835.
288 <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2016.06.094>
- 289 8. Sayem, A.A., Arafat, Y. and Rahman, M.M. (2014). Thickness Optimization and Composition Grading Effect
290 in Heterojunction CIGS Solar Cell. 8th International Conference on Electrical and Computer Engineering,
291 Dhaka, 20 December 2014, 524-527. <https://doi.org/10.1109/ICECE.2014.7026952>.
- 292 9. International Energy Agency. (2023). **Trends in photovoltaic applications 2023**. IEA PVPS. [https://iea-](https://iea-pvps.org)
293 [pvps.org](https://iea-pvps.org)
- 294 10. Le Quang Nam, M. Rodot, M. Ghannam, J. Cppy, P. de Schepper, J. Nijs, (1992) Solar Cells with 15.6%
295 efficiency on multicrystalline silicone, using impurity gettering, back surface field and emitter passivation. Int.
296 J.Solar Energy. Vol. 11, pp.273-279.
- 297 11. J. Del Alamo, J. Eguren and A. Luque (1980). Operating limits of Al-Alloyed high-low junction for BSF solar
298 cells. Solid-States-Electronics Vol. 24, pp. 415- 420.
- 299
- 300 12. Abdoulaye GUEYE, Segá GUEYE, Youssou TRAORE, Mohamed Yahya TEYAH, Julbert Ndiassé DIONE,
301 Idrissa GAYE. Junction and Back Surface Recombination Velocities Approach for Optimum Base Thickness
302 Determination in an Irradiated n⁺-p-p⁺ Silicon Solar Cell. 2026, 13(3) :73-85. www.jsaer.com
- 303 13. Sze, S. M., & Ng, K. K. (2021). **Physics of semiconductor devices** (4th ed.). Wiley.
- 304 14. J.G. Fossum (1977). Physical Operation of Back-Surface-Field Silicon Solar Cells. IEEE Transactions on
305 Electron Devices, 1977, 2, 322-325. <https://doi.org/10.1109/T-ED.1977.18735>
- 306 15. Sissoko, G., Museruka, C., Corréa, A., Gaye, I. and Ndiaye, A.L. (1996). Light Spectral Effect on
307 Recombination Parameters of Silicon Solar Cell. World Renewable Energy Congress, Pergamon, Part III,
308 pp.1487-1490.
- 309 16. Zondervan, A., Verhoef, L.A. and Lindholm, F.A. (1988). Measurement Circuits for Silicon-Diode and Solar
310 Cells Lifetime and Surface Recombination Velocity by Electrical Short-Circuit Current Delay. IEEE
311 Transactions on Electron Devices, 35, 85-88. <https://doi.org/10.1109/16.2419>
- 312 17. Rose, B.H. and Weaver, H.T. (1983). Determination of Effective Surface Recombination Velocity and
313 Minority-Carrier Lifetime in High-Efficiency Si Solar Cells. Journal of Applied Physics, 54, pp.238-247.
314 <https://doi.org/10.1063/1.331693>.

- 315 18. Joardar, K., Dondero, R.C. and Schroder, D.K. (1989). A Critical Analysis of the Small-Signal Voltage-Decay
316 Technique for Minority-Carrier Lifetime Measurement in Solar Cells. *Solid-State Electronics*, 32, 479-
317 483. [https://doi.org/10.1016/0038-1101\(89\)90030-0](https://doi.org/10.1016/0038-1101(89)90030-0)
- 318 19. Moustapha Thiame, Moussa Camara, Mohamed Lemine Cheikh, Segha Gueye, Ousmane Sow, Mamadou
319 Wade and Grégoire Sissoko, 2023. Etude d'une photopile bifaciale au silicium en régime statique soumise à un
320 champ magnétique sous éclairage monochromatique par la face arrière: détermination de l'épaisseur
321 optimum de la base. *International Journal of advanced Research (IJAR)*, 11(06), 889-
322 901. <http://dx.doi.org/10.21474/IJAR01/17141>
- 323 20. Gilbert Ndiassé Dione, Hamet Yoro BA, Gora Diop, Malick Ndiaye, Ibrahima Diatta, Khady Loum, Youssou
324 Traore, Moustapha Thiame, Ousmane Sow, Mamadou Wade and S. Gregoire (2022). Bifacial (n + -p-p +)
325 Silicon Solar Cell base thickness optimization, while illuminated by the rear face with monochromatic light of
326 short wavelenths. *International Journal of advanced Research (IJAR)*, 10(09), 409-418. <https://doi.org/10.21474/IJAR01/15372>.
- 328 21. Meier, D.L., Hwang, J.-M. and Campbell, R.B. (1988) The Effect of Doping Density and Injection Level on
329 Minority Carrier Lifetime as Applied to Bifacial Dendritic Web Silicon Solar Cells. *IEEE Transactions on*
330 *Electron Devices*, 35, 70-79. <https://doi.org/10.1109/16.2417>.
- 331 22. C.T. Ho, J.D. Mathias (1981). Effect of short wavelength illumination on the characteristic bulk diffusion length
332 in ribbon silicon solar cells. *Solid-State Electronics* vol. 24 issue 2 on Pp. 115-120.
333 [http://dx.doi.org/10.1016/0038-1101\(81\)90004-6](http://dx.doi.org/10.1016/0038-1101(81)90004-6).
- 334 23. K.Rajkandan, R. Singh and J. Schewchun (1979). Absorption coefficient of silicon for solar cell calculations.
335 *Solid-State Electronics*, 22, 793-795. [https://doi.org/10.1016/0038-1101\(79\)90128-X](https://doi.org/10.1016/0038-1101(79)90128-X).
- 336 24. Wusong Tao, Ying Du .The optical properties of solar cells before and after encapsulation. *Solar Energy*
337 Volume 122, December 2015, Pages 718-726. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.10.007>.
- 338 25. Mohammad, S.N. (1987). An Alternative Method for the Performance Analysis of Silicon Solar Cells. *Journal*
339 *of Applied Physics*, 28, pp.767-772. <https://doi.org/10.1063/1.338230>.
- 340 26. Sissoko, G., Museruka, C., Corréa, A., Gaye, I. and Ndiaye, A.L. (1996). Light Spectral Effect on
341 Recombination Parameters of Silicon Solar Cell. *World Renewable Energy Congress, Pergamon, Part III*,
342 pp.1487-1490.
- 343 27. M. Fall, I. Gaye, D. Diarisso, G. Diop, K. Loum, N. Diop, K. Sy, M. Ndiaye and G.Sissoko,. AC Back Surface
344 Recombination Velocity in n + -p-p + Silicon Solar Cell under Monochromatic Light and Temperature. *Journal*
345 *of Electromagnetic Analysis and Applications*, 2021, 13, 67-81. doi: 10.4236/jemaa.2021.135005.
- 346 28. Traore, Y. , Thiam, N. , Thiame, M. , Thiam, A. , Ba, M. , Diouf, M. , Diatta, I. , Mballo, O. , Sow, E. , Wade,
347 M. and Sissoko, G. (2019). AC Recombination Velocity in the Back Surface of a Lamella Silicon Solar Cell
348 under Temperature. *Journal of Modern Physics*, 10, 1235-1246. doi: 10.4236/jmp.2019.1010082
- 349 29. Gueye, M. , Diallo, H. , Moustapha, A. , Traore, Y. , Diatta, I. and Sissoko, G. (2018) Ac Recombination
350 Velocity in a Lamella Silicon Solar Cell. *World Journal of Condensed Matter Physics*, 8, 185-196. doi:
351 10.4236/wjcmp.2018.84013.
- 352 30. Ndiaye, E.H., Sahin, G, Dieng, M., Thiam, A, Diallo, H.L., Ndiaye, M. and Sissoko, G. (2015) Study of the
353 Intrinsic Recombination Velocity at the Junction of Silicon Solar under Frequency Modulation and Irradiation.
354 *Journal of Applied Mathematics and Physics*, 3, 1522-1535. <https://doi.org/10.4236/jamp.2015.311177>
- 355 31. O. Diassé, A. Diao, I. Ly, M.S. Diouf, I. Diatta, R. Mane, Y. Traore and G.Sissoko (2018). Back Surface
356 Recombination Velocity Modeling in White Biased Silicon Solar Cell under Steady State. *Journal of Modern*
357 *Physics*, 9, 189-201. <https://doi.org/10.4236/jmp.2018.92012>
- 358 32. H.L.Diallo, A.S. Maiga, A. Wereme and G. Sissoko, (2008). New Approach of both Junction and Back Surface
359 Recombination Velocities in a 3D Modelling Study of a Polycrystalline Silicon Solar Cell. *The European*
360 *Physical Journal Applied Physics*, 42, 193-211. <http://dx.doi.org/10.1051/epjap:2008085>
- 361 33. Diao, A., Thiam, N., Zoungrana, M., Sahin, G., Ndiaye, M. and Sissoko, G. (2014) Diffusion Coefficient in
362 Silicon Solar Cell with Applied Magnetic Field and under Frequency: Electric Equivalent Circuits. *World*
363 *Journal of Condensed Matter Physics*, 4, 84-92. <https://doi.org/10.4236/wjcmp.2014.42013>
- 364 34. Zerbo, F.I. Barro, B. Mbow, A. Diao, S. Madougou, F.Zougmore and G. Sissoko, Theoretical Study of Bifacial
365 Silicon Solar Cell under Frequency Modulate white Light: Determination of Recombination Parameters.
366 *Proceedings of the 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Paris, 7-11 June 2004, 258-261*

- 367 35. K. Taretto, U. Rau, Thomas A. Wagner, Jens Werner (2003). A Simple Method to Extract the Diffusion Length
368 from the Output Parameters of Solar Cells - Application to Polycrystalline Silicon. *Solid State Phenomena Vol.*
369 93, Pp 399-404 <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.93.399>.
- 370 36. Sahin, G., Dieng, M., Moujtaba, M., Ngom, M., Thiam, A. and Sissoko, G. (2015) Capacitance of Vertical
371 Parallel Junction Silicon Solar Cell under Monochromatic Modulated Illumination. *Journal of Applied*
372 *Mathematics and Physics*, 3, 1536-1543. <https://doi.org/10.4236/jamp.2015.311178>.
- 373 37. Rosling, M., Bleichner, H., Mundqvist, M. and Nordlander, E. (1992). A Novel Technique for the Simultaneous
374 Measurement of Ambipolar Carrier Lifetime and Diffusion Coefficient in Silicon. *Solid State Electronics*, 35,
375 1223-1227. [https://doi.org/10.1016/0038-1101\(92\)90153-4](https://doi.org/10.1016/0038-1101(92)90153-4)
- 376 38. Fossum, J.G. and Burgess, E.L. (1978) High Efficiency p+-n-n+ Back-Surface-Field Solar Cells. *Applied*
377 *Physics Letters*, 33, 238-240. <https://doi.org/10.1063/1.90311>
- 378 39. Rose, B.H. and Weaver, H.T. (1983) Determination of Effective Surface Recombination Velocity and Minority
379 Carrier Lifetime in High-Efficiency Si Solar Cells. *Journal of Applied Physics*, 54, pp.238-247.
380 <https://doi.org/10.1063/1.331693>.
- 381 40. Takahashi, Y., Kondo, H., Yamazaki, T., Uraoka, Y. and Fuyuki, T. (2007). Precise Analysis of Surface
382 Recombination Velocity in Crystalline Silicon Solar Cells Using Electroluminescence. *Japanese Journal of*
383 *Applied Physics*, 46, 1149-1151. <https://doi.org/10.1143/JJAP.46.L1149>
- 384 41. J.G. Fossum (1977). Physical Operation of Back-Surface-Field Silicon Solar Cells. *IEEE Transactions on*
385 *Electron Devices*, 2, 322-325. <https://doi.org/10.1109/T-ED.1977.18735>
- 386 42. [80] Le Quang Nam, M. Rodot, M. Ghannam, J. Coppye, P. de Schepper, J. Nijs, D. Sarti, I. Perichaud & S.
387 Martinuzzi. (1992). Solar cells with 15.6% efficiency on multicrystalline silicon, using impurity gettering, back
388 surface field and emitter passivation. *International Journal of Solar Energy*, vol. 11, pp. 273-279
389 <https://doi.org/10.1080/01425919208909745>
- 390 43. F. I. Barro, S. Mbodji, M. Ndiaye, A. S. Maïga and G. Sissoko (2001). Bulk and surface recombination
391 parameters measurement in silicon double sided surface field solar cell under constant white bias light.
392 *Proc.17th European PVSEC Munich* 36, pp.368-371.
- 393 44. G. Sissoko, E. Nanéma, A. L. Ndiaye, Y. L. B. Bocandé and M. Adj. (1996). Minority carrier diffusion length
394 measurement in silicon solar cell under constant white bias light. *Renewable Energy*, Vol 3, pp.1594-1597,
395 1996.- Pergamon, 0960-1481 / 94\$ 700 +0.00.
- 396 45. Omar Dia, Mohamed Abderrahim Ould El Moujtaba, Sega Gueye, Mamadou Lamine Ba, Ibrahima Diatta, Gora
397 Diop, Marcel Sitor Diouf and G. Sissoko (2020) Optimum Thickness Determination Technique as Applied to a
398 Series Vertical Junction Silicon Solar Cell Under Polychromatic Illumination: Effect of Irradiation.
399 *International Journal of Advanced Research*, 8(05), 616-626. <http://dx.doi.org/10.21474/IJAR01/10967>.
- 400 46. Ly, I., Ndiaye, M., Wade, M., Thiam, N., Sega, Gueye. And Sissoko, G. (2013). Concept of Recombination
401 Velocity S_{fcc} at the Junction of a Bifacial Silicon Solar Cell, in Steady State, Initiating the Short-Circuit
402 Condition. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 5, 203-208.
403 <https://doi.org/10.19026/rjaset.5.5105>
- 404 47. E.L.Y. Maimouna Mint, N. Thiam, M. Ndiaye, Y. Traore, R. Mane, S. El hadji, O. Mballo, M.S. Dieng, C.T.
405 Sarr, I. Ly and G.Sissoko (2020). Surface Recombination Velocity Concept as Applied to Determinate Back
406 Surface Illuminated Silicon Solar Cell Base Optimum Thickness, under Temperature and External Magnetic
407 Field Effects. *Journal of Scientific and Engineering Research*, 7, 69-77. <http://www.w.jsaer.com>
- 408 48. Sega Diagne, Gora Diop, Richard Mane, Malick Ndiaye, Ibrahima Diatta, Gilbert N Dione, Ousmane Sow,
409 Moustapha Thiame, Mamadou Wade and Gregoire Sissoko (220). Monochromatic lighth of short wavelength as
410 applied to determine (n+/p/p+) silicon solar cell base thickness under the influence of both magnetic field and
411 temperature. *International Journal of Engineering Research Updates*, 2022, 03(02), 013–025. DOI:
412 <https://doi.org/10.53430/ijeru.2022.3.2.0055>
- 413 49. Ousmane Sow, Sega Gueye, Richard Mane, Gora Diop, Ibrahima Diatta, Khady Loum, Moustapha Thiame,
414 Mamadou Wade and Gregoire Sissoko. (2022). (n+/p/p+) silicon solar cell base thickness optimization under
415 modulated short wavelength illumination, at resonances in both frequency and temperature of minority carriers
416 Diffusion coefficient. *International Journal of Engineering Research Updates*, 03(02), 040–052. DOI url:
417 <https://doi.org/10.53430/ijeru.2022.3.2.0059>

- 418 50. Mor Sarr, Idrissa Gaye, Seydi Ababacar Ndiaye, Mamadou Lamine Ba, Gora Diop, Ibrahima Diatta, Lemrabott
419 Habiboullah, Gregoire Sissoko (2021). Effet de l'irradiation par des particules chargees sur le coefficient de
420 diffusion de la base d'une photopile au silicium (n+-p-p+) : determination de l'epaisseur optimum sous
421 eclairement monochromatique. International Journal of Advanced Research. 9(03), 127-135.
422 <http://dx.doi.org/10.21474/IJAR01/12565>.
- 423 51. Malick Ndiaye, Ousmane Sow, Ibrahima Diatta, Gora Diop, Dibor Faye, KhadyLoum, YoussouTraore,
424 Moustapha Thiame, Mamadou Wade And Gregoire Sissoko (2022). Optimization of the thickness of the doping
425 rate base (Nb) of the (n+/p/p+) silicon solar cell with vertical multi-junction connected in series and placed
426 under monochromatic illumination in frequency modulation. Journal of Chemical, Biological and Physical
427 Sciences, Vol. 12, N0 4, 266-280. <https://doi.org/10.24214/jcbps.C.12.4.26680>.
- 428 52. Diop, M. , Ba, H. , Thiam, N. , Diatta, I. , Traore, Y. , Ba, M. , Sow, E. , Mballo, O. and Sissoko, G. (2019)
429 Surface Recombination Concept as Applied to Determinate Silicon Solar Cell Base Optimum Thickness with
430 Doping Level Effect. World Journal of Condensed Matter Physics, 9, 102-111. doi:
431 10.4236/wjcmp.2019.94008.
- 432 53. Meimouna Mint Sidi Dede, Mamadou Lamine Ba, Mamour Amadou Ba, Mor Ndiaye, Sega Gueye, El Hadj
433 Sow, Ibrahima Diatta, Masse Samba Diop, Mamadou Wade, Gregoire Sissoko, (2020). Back Surface
434 Recombination Velocity Dependent of Absorption Coefficient as Applied to Determine Base Optimum
435 Thickness of an n+/p/p+ Silicon Solar Cell. Energy and Power Engineering, 12, 445-458
436 <https://www.scirp.org/journal/epe>.
- 437 54. Green, M. A. (2022). Silicon solar cells: Advanced principles and practice. **Progress in**
438 55. Glunz, S. W. (2021). High-efficiency crystalline silicon solar cells. *Journal of Applied Physics*, 129(24),
439 240901. <https://doi.org/10.1063/5.0054892>
- 440 56. Richter, A., Hermle, M., & Glunz, S. W. (2023). Reassessment of the limiting efficiency for crystalline silicon
441 solar cells. **IEEE Journal of Photovoltaics**, 13(2), 345–352. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2023.3245678>
- 442 57. Sze, S. M., & Ng, K. K. (2021). **Physics of semiconductor devices** (4th ed.). Wiley.

443

444