

AC BACK SURFACE RECOMBINATION VELOCITY AND OPTIMUM BASE THICKNESS IN AN IRRADIATED $n^+ - p - p^+$ SILICON SOLAR CELL UNDER TEMPERATURE AND FREQUENCY MODULATION.

Manuscript Info

Manuscript History

Received: xxxxxxxxxxxxxxxx

Final Accepted: xxxxxxxxxxxx

Published: xxxxxxxxxxxxxxxx

Key words:-

Silicon solar cell, AC recombination velocity, irradiation, optimum base thickness, frequency modulation, temperature.

Abstract

This work presents a theoretical study of an irradiated $n^+ - p - p^+$ bifacial silicon solar cell under AC polychromatic illumination and temperature variation, with the aim of determining the optimum base thickness using the back surface recombination velocity approach. The analysis is based on the resolution of the continuity equation of minority carriers in the base under frequency modulation, taking into account the combined effects of irradiation energy flux, damage coefficient, temperature, and modulation frequency. Analytical expressions of the two components of the back surface recombination velocity, Sb_1 and Sb_2 , are derived from the AC photocurrent density. The optimum base thickness is determined from the intersection of Sb_1 and Sb_2 profiles as a function of base thickness. Numerical results show that the optimum thickness strongly depends on modulation frequency, temperature, irradiation energy, and damage coefficient through their influence on the minority carrier diffusion coefficient and diffusion length. The optimum thickness decreases with increasing irradiation level and damage coefficient due to enhanced recombination effects, while temperature and frequency significantly modify carrier transport properties. This approach provides a reliable method for optimizing silicon solar cell base thickness under combined environmental and irradiation effects, contributing to the improvement of photovoltaic device performance.

Introduction:-

Les photopiles bifaciales au silicium représentent une technologie photovoltaïque [1,2-4] avancée permettant une conversion efficace de l'énergie solaire grâce à leur capacité à capter le rayonnement sur leurs deux faces. Les performances de ces dispositifs dépendent fortement des propriétés de transport et de recombinaison des porteurs minoritaires dans la base [5,6], ainsi que des paramètres géométriques et des conditions environnementales. Parmi ces paramètres, l'épaisseur de la base et les vitesses de recombinaison aux interfaces jouent un rôle fondamental dans la détermination des performances électriques de la photopile [7,8]. Des travaux récents ont montré que la réduction des pertes par recombinaison de surface constitue un levier majeur d'amélioration du rendement des cellules au silicium [9]

En particulier, les vitesses de recombinaison à la jonction et en face arrière constituent des paramètres essentiels qui caractérisent les pertes de porteurs minoritaires aux interfaces du dispositif [10,11]. Une recombinaison élevée à ces niveaux réduit le nombre de porteurs collectés, ce qui entraîne une diminution du photocourant et du rendement de conversion. L'influence conjointe de la vitesse de recombinaison de surface et de l'épaisseur de la base sur les paramètres électriques, notamment la tension en circuit ouvert et le courant de court-circuit, a été récemment analysée [12] qui montrent l'existence d'une épaisseur optimale dépendant des conditions de recombinaison [13,14]. De même, une étude numérique et expérimentale réalisée [15] met en évidence l'impact significatif de la largeur de la base et des vitesses de recombinaison sur l'efficacité quantique et le rendement global des cellules en silicium multicristallin [16,17].

Par ailleurs, les photopiles utilisées dans des environnements réels sont souvent soumises à des conditions extrêmes, notamment des irradiations élevées, des variations de température et des excitations dynamiques. L'irradiation

21 introduit des défauts dans la structure cristalline du silicium, qui agissent comme des centres de recombinaison et
22 modifient la durée de vie des porteurs minoritaires [18–23]. L'étude de la dégradation des paramètres électriques
23 sous irradiation en régime dynamique a été abordée qui montrent que la fréquence de modulation influence la
24 résistance shunt et les pertes associées [24,25]. La température influence également les propriétés de transport,
25 notamment la mobilité, la durée de vie et le coefficient de diffusion des porteurs [26]. L'effet combiné de la
26 température et de la modulation fréquentielle sur la vitesse de recombinaison en face arrière a été étudié [27],
27 mettant en évidence une dépendance significative des paramètres dynamiques aux conditions thermiques [28,29].

28 En outre, l'étude en régime dynamique fréquentiel, basée sur la modulation de l'éclairement, constitue une méthode
29 particulièrement efficace pour analyser les phénomènes de transport et de recombinaison des porteurs minoritaires
30 [30,31]. Contrairement au régime statique, ce régime introduit une dépendance fréquentielle des paramètres de
31 diffusion et permet une caractérisation plus fine des mécanismes de recombinaison [32,33]. Dans le cas des cellules
32 bifaciales, l'analyse de la réponse spectrale sous éclairage modulé a également permis d'évaluer l'influence de la
33 recombinaison à la jonction sur l'efficacité quantique [34, 35,36].

34 Dans ce contexte, l'objectif de ce travail est de déterminer et d'analyser les vitesses de recombinaison à la jonction
35 et en face arrière d'une photopile bifaciale au silicium soumise à une irradiation, à une température donnée et à une
36 excitation en régime dynamique fréquentiel sous éclairage polychromatique. Cette étude repose sur la résolution
37 de l'équation de continuité des porteurs minoritaires dans la base [37,38] et l'application des conditions aux limites
38 aux interfaces [39,40]. Les résultats obtenus permettront de mieux comprendre les mécanismes dynamiques de
39 recombinaison et de contribuer à l'optimisation des performances des photopiles fonctionnant dans des
40 environnements complexes [41,42].

41 **Théorie**

42 **a)Présentation de la photopile**

43 Dans ce travail, on considère d'une photopile bifaciale ($n^+/p/p^+$) au silicium, préalablement irradiée($kl, \Phi p$) par des
44 particules électriques chargées[43–48], est faite, dans un modèle à une dimension[49], éclairée par une lumière
45 polychromatique en modulation de fréquence[30,31] par la face avant et placée sous variation de la température(T)
46 [6,26]. La structure de la photopile au silicium considérée est représentée sur la figure (1),composée principalement
47 de l'émetteur ou face avant de type n^+ (comportant des grilles métalliques, fortement dopé en atomes de phosphore
48 et de faible épaisseur), suivie de la zone de charge d'espace(se trouvant entre l'émetteur et la base où règne un
49 champ électrique intense qui permet de séparer les paires électrons-trous créées.), la base (dopée faiblement en
50 atomes accepteurs trivalents, et d'épaisseur beaucoup plus importante que celle de l'émetteur) et enfin le BSF (back
51 surface Field) de type P^+ [7,10] (zone située en face arrière de la base, elle est surdopée en atomes accepteurs, où
52 règne un champ électrique arrière qui permet de renvoyer vers l'interface émetteur-base les porteurs minoritaires
53 générés près de la face arrière.) , est reconnu pour améliorer la collecte des porteurs minoritaires et réduire les pertes
54 par recombinaison en face arrière [11,13]. La symétrie des vitesses de recombinaison aux interfaces de la base
55 montre l'efficacité des photopiles bifaciales et à jonctions verticales connectées en parallèles ou en série[50,55]. Les
56 effets de la température et de l'irradiation par des particules énergétiques sont des facteurs importants[44–48,56–60].
57 Ces derniers changent la durée de vie, le coefficient de diffusion et les vitesses de recombinaison de porteurs
58 minoritaires de la photopile [6, 26,61]. L'augmentation de la recombinaison volumique et surfacique est produite par
59 les défauts cristallins dus à l'irradiation [46,48, 56,57].

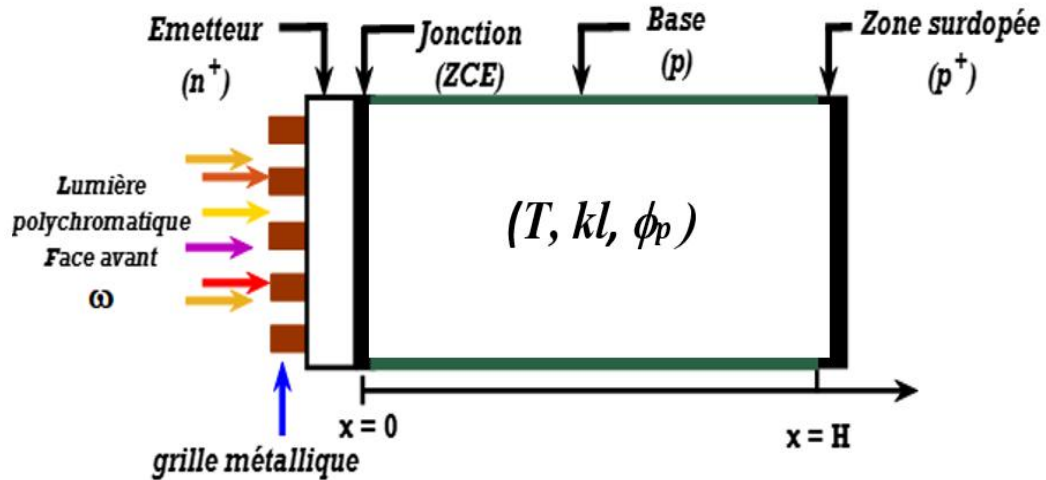


Figure 1: structure de la photopile bifaciale au silicium de type $(n^+/p/p^+)$

b) Équation de continuité

L'équation de continuité relative à la densité de porteurs de charge minoritaires photocréés $\delta(x, t)$ dans la base (p), de la photopile irradiée $(kl, \Phi p)$, sous illumination polychromatique en modulation de fréquence (ω) et sous température (T) , est donnée par la relation suivante [37,38]:

$\delta(x, t)$: La densité des porteurs minoritaires en excès dans la base (type p) en fonction de la profondeur (x) et du temps (t)

$G(x, t)$: Le taux de génération global des charges en fonction de la profondeur (x) et du temps (t)

Où $\delta(x)$ et $g(x)$ caractérisent respectivement les parties spatiales de la densité des porteurs de charge et du taux de génération et $e^{i\omega t}$ la partie temporelle.

La composante spatiale du taux de génération de porteurs minoritaires est donnée par l'expression suivante [63,64]:

a_i et b_i représentent les coefficients obtenus à travers les valeurs tabulées de l'éclairement solaire et dépendent du coefficient d'absorption du silicium avec la longueur d'onde. Il permet de corrélérer le niveau d'éclairement expérimental au niveau d'éclairement de référence pris sous AM 1.5. .

En remplaçant chaque grandeur (Eq. 2 et 3) par leurs expressions dans (Eq.1) nous obtenons :

80 **c) Expression du coefficient de diffusion $D^*(\omega, kl, \Phi_p, T)$**

81 L'expression du coefficient de diffusion des porteurs minoritaires dans la base (type p) d'une photopile ($n^+/p/p^+$) au
82 silicium soumise à une irradiation sous température et en modulation de fréquence est donnée par la relation
83 suivante [64,65]:

$$D^*(\omega, kl, \Phi_p, T) = \frac{L^*(\omega, kl, \Phi_p, T)^2}{\tau^*}$$
$$\tau^*(\omega) = \frac{\tau}{1 + j\omega\tau}$$

84 Cette formulation est largement utilisée pour l'étude du transport dynamique des porteurs minoritaires [28,29].

85 $D^*(\omega, kl, \Phi_p, T)$: Coefficient de diffusion complexe

86 $\tau^*(\omega)$: Durée de vie complexe

87 $L^*(\omega, kl, \Phi_p, T)$: Longueur de diffusion complexe.

88 **d) Expression de la longueur de diffusion $L^*(\omega, kl, \Phi_p, T)$**

89 L'expression de la longueur de diffusion des porteurs minoritaires dans la base (type p) d'une photopile ($n^+/p/p^+$) au
90 silicium soumise à une irradiation sous température et en modulation de fréquence est donnée par la relation
91 suivante [5,26]:

92

93

94

95 **e) Expression de la densité du photocourant.**

96 La densité de photocourant est obtenue à partir du gradient de porteurs minoritaires à la jonction suivant la loi de
97 Fick [38,62] :

98 **f) Expression des vitesses de recombinaison en face arrière**

99 La représentation du profil de la densité du photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison des porteurs
100 minoritaires de charge à la jonction, présente aux grandes valeurs de S_f [10, 11,39] un palier correspondant à la

101 densité de photocourant de court-circuit .Dans cet intervalle le gradient de la densité de photocourant est nul et
 102 s'écrit :

$$\frac{\partial J_{pha}(\omega, kl, \Phi p, T)}{\partial Sf} = 0 \quad (18)$$

103 La résolution de l'équation (18) donne deux solutions distinctes Sb1 et Sb2 correspondant aux vitesses
 104 caractéristiques en face arrière [58, 62,70], représentées par les équations (19) et (20) suivantes :

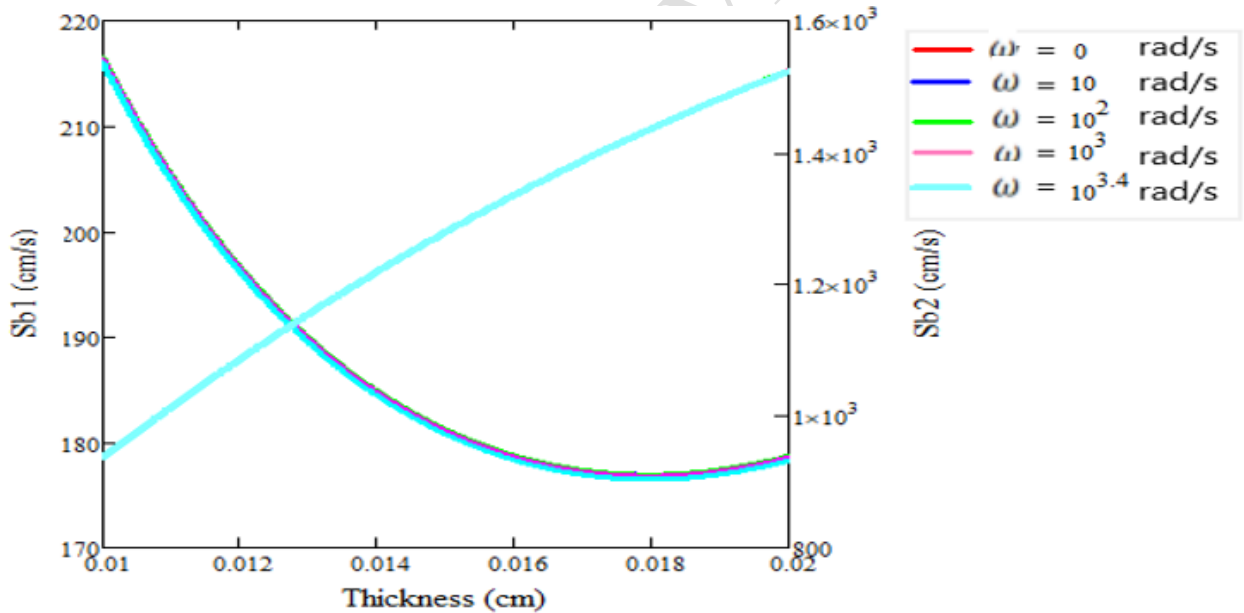
$$Sb1(\omega, kl, \phi p, T, H) = \sum_{i=1}^3 \left\{ D(\omega, kl, \Phi p, T) \frac{b_i \left(ch\left(\frac{H}{L(\omega, kl, \phi p, T)}\right) - e^{-b_i H} \right) - \frac{1}{L(\omega, kl, \phi p, T)} sh\left(\frac{H}{L(\omega, kl, \phi p, T)}\right)}{\left(ch\left(\frac{H}{L(\omega, kl, \phi p, T)}\right) - e^{-b_i H} - b_i L(\omega, kl, \phi p, x) sh\left(\frac{H}{L(\omega, kl, \phi p, T)}\right) \right)} \right\} \quad (19)$$

$$Sb2(\omega, kl, \phi p, T, H) = -\frac{D(\omega, kl, \Phi p, T) sh\left(\frac{H}{L(\omega, \phi p, kl, T)}\right)}{L(\omega, kl, \phi p, T) ch\left(\frac{H}{L(\omega, kl, \phi p, T)}\right)} \quad (20)$$

106

107 g) Résultats de détermination de l'épaisseur optimum de la base à partir de Sb1 et Sb2

108 La méthode graphique basée sur l'intersection des courbes Sb1 et Sb2 pour déterminer l'épaisseur optimale de la
 109 base est conforme aux approches d'optimisation développées dans la littérature [13, 16,67-78].



110

111 Figure 2 : Sb1 (cm/s) et Sb2 (cm/s) en fonction de l'épaisseur de la base pour des valeurs de fréquences comprises
 112 entre $0 \text{ rad/s} < \omega < 10^4 \text{ rad/s}$ ($\phi p = 100 \text{ MeV}$, $kl = 5 \text{ cm}^2/\text{MeV}$ et $T = 300 \text{ K}$)

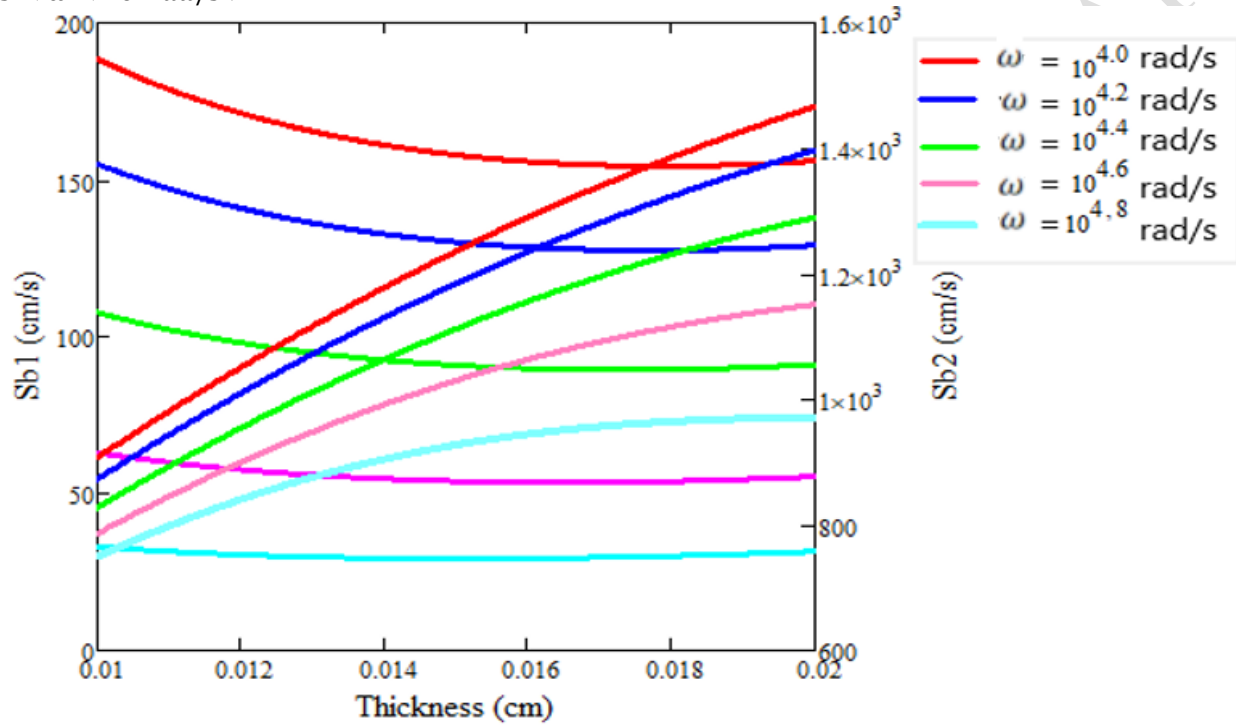
113 Pour des valeurs données de la fréquence de modulation (ω) comprises entre $0 \text{ rad/s} < \omega < 10^4 \text{ rad/s}$, la
 114 projection sur l'axe des abscisses de l'intersection des courbes des expressions de **Sb1** et **Sb2** correspond à la valeur
 115 de l'épaisseur optimum. L'ensemble des valeurs de H_{opt} correspondant à différentes valeurs de la fréquence(ω) de
 116 modulation sont données dans le **tableau 1**.

117 **Tableau 1** : H_{opt} en fonction de la fréquence (ω) de modulation ($\phi p = 100 \text{ MeV}$, $kl = 5 \text{ cm}^2/\text{MeV}$ et $T = 300 \text{ K}$)

W(rad/s)	0	10^1	10^2	10^3	$10^{3,2}$
Sb1(cm/s)	190,94	190,94	190,94	190,94	190,94
Sb2(cm/s)	1135	1135	1135	1135	1135
Hop(cm)	0,0120	0,0120	0,0120	0,0120	0,0120
D(cm ² /s)	30,586	30,586	30,586	30,586	30,586

118

119 La technique de détermination de l'épaisseur optimum de la base, s'appuie pour cette fois-ci sur la représentation à
 120 **la figure 3** des profils, en fonction de l'épaisseur (H) de la base, des expressions des vitesses de recombinaison des
 121 porteurs minoritaires de charge en face arrière **Sb1** et **Sb2** pour des valeurs de fréquences comprises entre **$10^4 rad/s$**
 122 **$s < \omega < 10^6 rad/s$** .



123

124 Figure 3 : Sb1 (cm/s) et Sb2 (cm/s) en fonction de l'épaisseur de la base pour des valeurs de fréquences comprises
 125 entre **$10^4 rad/s < \omega < 10^6 rad/s$** ($\phi p = 100$ MeV, $kl = 5$ cm²/MeV et $T = 300$ K)

126 Pour une valeur donnée de la fréquence de modulation (ω), la projection sur l'axe des abscisses de l'intersection des
 127 courbes des expressions de **Sb1** et **Sb2** correspond à la valeur de l'épaisseur optimum. L'ensemble des valeurs
 128 de **Hopt** correspondant à différentes valeurs de la fréquence(ω) de modulation sont données dans le **tableau 2**.

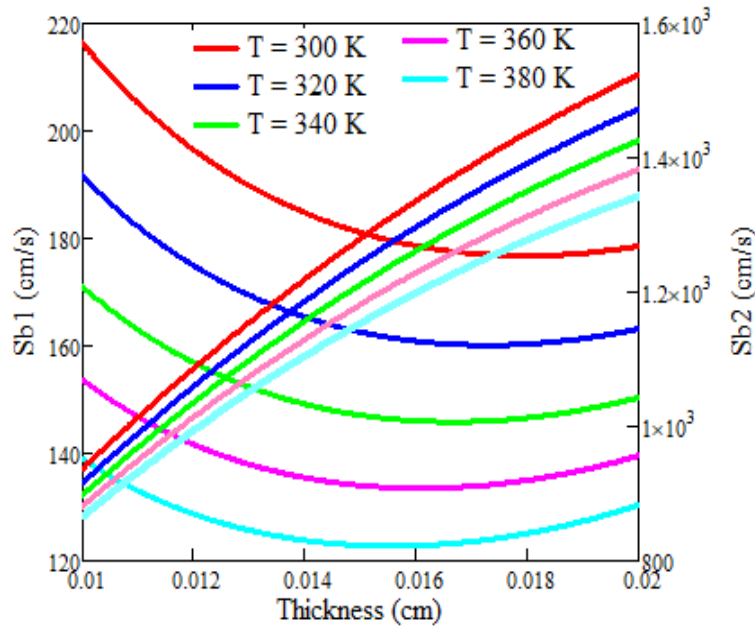
129 **Tableau 2 :** Hopt en fonction de la fréquence (ω) de modulation ($\phi p = 100$ MeV, $kl = 5$ cm²/MeV et $T = 300$ K)

W(rad/s)	10^4	$10^{4,2}$	$10^{4,4}$	$10^{4,6}$	$10^{4,8}$
Sb1(cm/s)	154,47	128,62	92,455	57,751	33,029
Sb2(cm/s)	1372,4	1243,1	1062,3	888,76	765,14
Hop(cm)	0,01772	0,01618	0,01402	0,0118	0,01032
D(cm ² /s)	28,478	25,619	20,751	14,89	9,768

130

131 Les variations observées avec la fréquence de modulation confirment les résultats obtenus en régime dynamique
 132 fréquentiel [28, 31].

133 La technique de détermination de l'épaisseur optimum de la base, s'appuie pour cette fois-ci sur la représentation à
 134 **la figure 4** des profils, en fonction de l'épaisseur (H) de la base, des expressions des vitesses de recombinaison des
 135 porteurs minoritaires de charge en face arrière **Sb1** et **Sb2** pour des valeurs de températures données.



136

137 Figure 4 : Sb1 (cm/s) et Sb2 (cm/s) en fonction de l'épaisseur de la base pour des valeurs de températures : 138
 139 $\omega = 10^3$ rad/s, $k_l = 5$ cm²/MeV et $\phi_p = 100$ MeV

140 Pour une valeur donnée de la température, la projection sur l'axe des abscisses de l'intersection des courbes des
 141 expressions de **Sb1** et **Sb2** correspond à la valeur de l'épaisseur optimum. L'ensemble des valeurs de H_{opt}
 142 correspondant à différentes valeurs de la température (T) sont données dans le **tableau 3**.

143 **Tableau 3** : H_{opt} en fonction de la température ($\omega = 10^3$ rad/s, $k_l = 5$ cm²/MeV et $\phi_p = 100$ MeV)

T (K)	300	320	340	360	380
Sb1(cm/s)	180,44	166,64	154,21	144,05	134,86
Sb2(cm/s)	1286,6	1173,1	1073,7	992,41	918,87
H _{opt} (cm)	0,01508	0,01378	0,01260	0,01166	0,0108
D(cm ² /s)	30,573	28,351	26,383	24,630	23,061

144 La technique de détermination de l'épaisseur optimum de la base, s'appuie pour cette fois-ci sur la représentation à
 145 **la figure 5** des profils, en fonction de l'épaisseur (H) de la base, des expressions des vitesses de recombinaison des
 146 porteurs minoritaires de charge en face arrière **Sb1** et **Sb2** pour de valeurs de températures données.

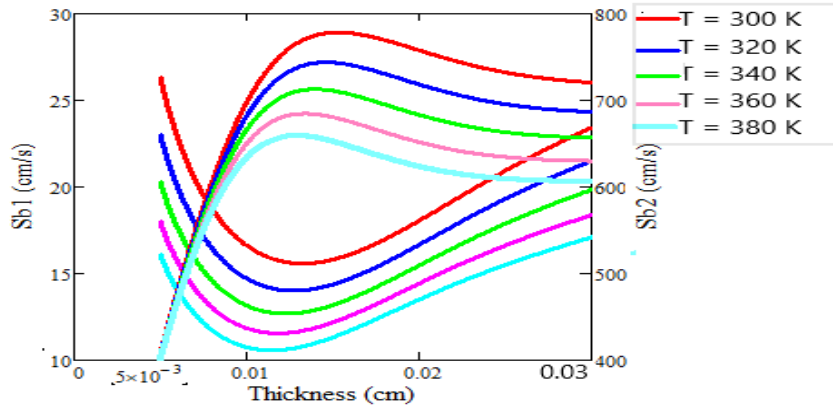


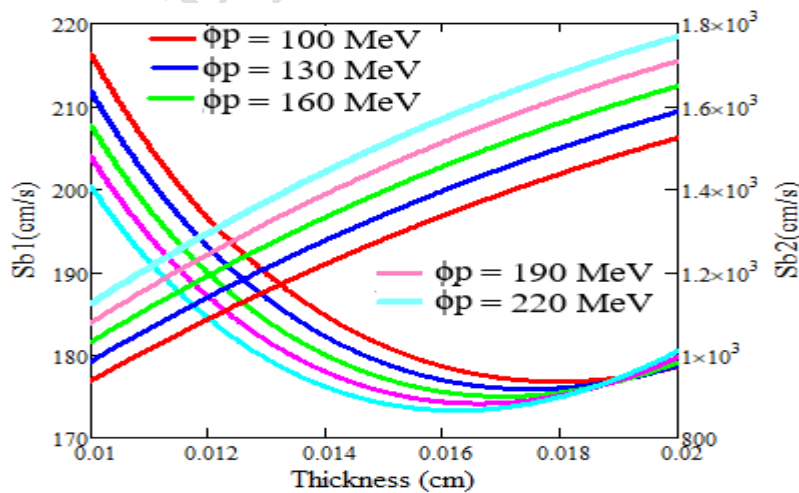
Figure 5 : Sb1 (cm/s) et Sb2 (cm/s) en fonction de l'épaisseur de la base pour des valeurs de la température : $\omega = 10^5$ rad/s, $kl = 5$ cm²/MeV et $\phi p = 100$ MeV

150 Pour une valeur donnée de la température, la projection sur l'axe des abscisses de l'intersection des courbes des
 151 expressions de **Sb1** et **Sb2** correspond à la valeur de l'épaisseur optimum. L'ensemble des valeurs de H_{opt}
 152 correspondant à différentes valeurs de la température (T) sont données dans le **tableau 4**.

153 **Tableau 4** : H_{opt} en fonction de la température ($\omega = 10^5$ rad/s, $kl = 5$ cm²/MeV et $\phi p = 100$ MeV)

T (K)	300	320	340	360	380
Sb1(cm/s)	19,608	17,886	16,518	15,362	14,191
Sb2(cm/s)	592,16	557,72	530,36	507,23	483,82
Hopt(cm)	0,00748	0,00718	0,00682	0,00652	0,00592
D(cm ² /s)	6,117	5,585	5,127	4,730	4,382

155 La technique de détermination de l'épaisseur optimum de la base, s'appuie pour cette fois-ci sur la représentation à
 156 **la figure 6** des profils, en fonction de l'épaisseur (H) de la base, des expressions des vitesses de recombinaison des
 157 porteurs minoritaires de charge en face arrière **Sb1** et **Sb2** pour différentes valeurs d'irradiation.



158
 159

160

161 Figure 6 : Sb1 (cm/s) et Sb2 (cm/s) en fonction de l'épaisseur de la base pour des valeurs de ϕ_p ($\omega = 10^3$ rad/s, $kl = 5$
 162 cm^2/MeV et $T = 300$ K)

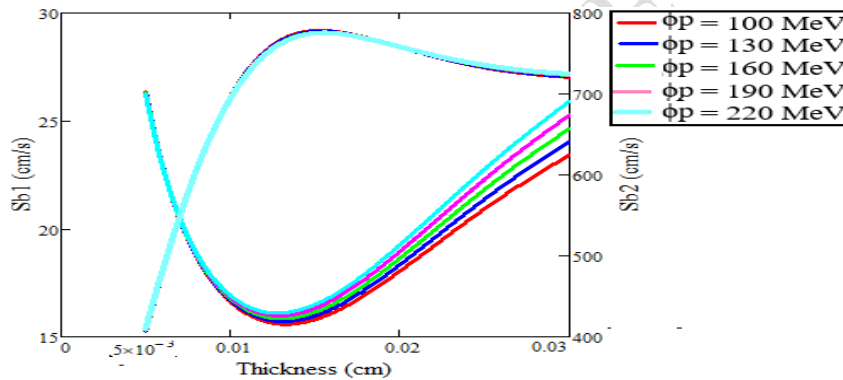
163 Pour une valeur donnée de l'irradiation, la projection sur l'axe des abscisses de l'intersection des courbes des
 164 expressions de **Sb1** et **Sb2** correspond à la valeur de l'épaisseur optimum. L'ensemble des valeurs de H_{opt}
 165 correspondant à différentes valeurs de l'irradiation (ϕ_p) sont données dans le **tableau 5**.

166 **Tableau 5** : H_{opt} en fonction de l'irradiation ϕ_p ($\omega = 10^3$ rad/s, $kl = 5 \text{ cm}^2/\text{MeV}$ et $T = 300$ K)

Φ_p (MeV)	100	130	160	190	220
Sb1(cm/s)	188,44	189,13	189,85	190,33	191,12
Sb2(cm/s)	1168,9	1182,6	1197,1	1206,6	1222,4
Hop(cm)	0,01329	0,01236	0,01172	0,01138	0,01102
D(cm^2/s)	30,573	28,979	27,543	26,242	25,059

167

168 La technique de détermination de l'épaisseur optimum de la base, s'appuie pour cette fois-ci sur la représentation à
 169 **la figure 7** des profils, en fonction de l'épaisseur (H) de la base, des expressions des vitesses de recombinaison des
 170 porteurs minoritaires de charge en face arrière **Sb1** et **Sb2** pour différentes valeurs d'irradiation.



171

172

173 Figure 7 : Sb1 (cm/s) et Sb2 (cm/s) en fonction de l'épaisseur de la base pour des valeurs de ϕ_p ($\omega = 10^5$ rad/s, $kl = 5$
 174 cm^2/MeV et $T = 300$ K)

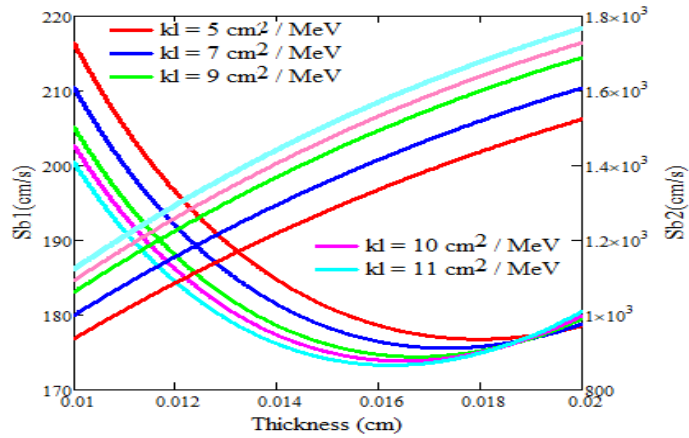
175 Pour une valeur donnée de l'irradiation, la projection sur l'axe des abscisses de l'intersection des courbes des
 176 expressions de **Sb1** et **Sb2** correspond à la valeur de l'épaisseur optimum. L'ensemble des valeurs de H_{opt}
 177 correspondant à différentes valeurs de l'irradiation (ϕ_p) sont données dans le **tableau 6**.

178 **Tableau 6** : H_{opt} en fonction de l'irradiation ϕ_p ($\omega = 10^5$ rad/s, $kl = 5 \text{ cm}^2/\text{MeV}$ et $T = 300$ K)

Φ_p (MeV)	100	130	160	190	220
Sb1(cm/s)	20,725	20,725	20,725	20,725	20,725
Sb2(cm/s)	552,32	552,32	552,32	552,32	552,32
Hop(cm)	0,00694	0,00694	0,00694	0,00694	0,00694
D(cm^2/s)	6,117	6,104	6,089	6,074	6,058

179

180 La technique de détermination de l'épaisseur optimum de la base, s'appuie pour cette fois-ci sur la représentation à
 181 **la figure 8** des profils, en fonction de l'épaisseur (H) de la base, des expressions des vitesses de recombinaison des
 182 porteurs minoritaires de charge en face arrière **Sb1** et **Sb2** pour différentes valeurs du coefficient de dommage (kl).



183

184 Figure 8 : Sb_1 (cm/s) et Sb_2 (cm/s) en fonction de l'épaisseur de la base pour des valeurs de kl ($\omega = 10^3$ rad/s, $\phi_p =$
 185 100 MeV et $T = 300$ K)

186 Pour une valeur donnée du coefficient de dommage, la projection sur l'axe des abscisses de l'intersection des
 187 courbes des expressions de Sb_1 et Sb_2 correspond à la valeur de l'épaisseur optimum. L'ensemble des valeurs
 188 de H_{opt} correspondant à différentes valeurs du coefficient de dommage (kl) sont données dans le **tableau 7**.

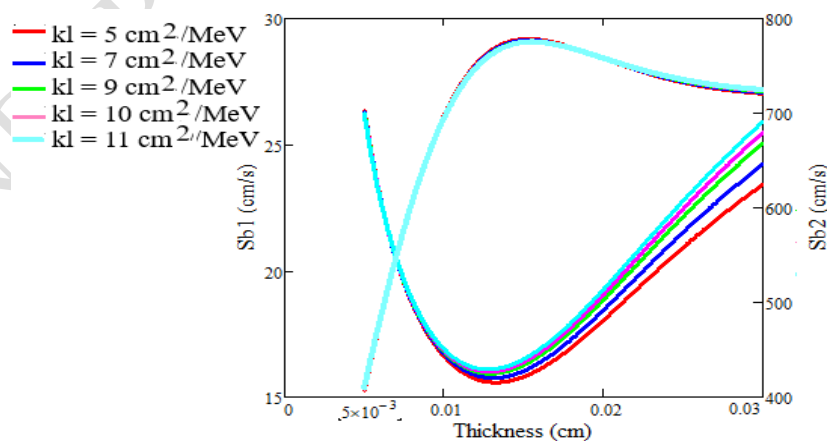
189 **Tableau 7** : H_{opt} en fonction du coefficient de dommage ($\omega = 10^3$ rad/s, $\phi_p = 100$ MeV et $T = 300$ K)

$Kl(cm^2/MeV)$	5	7	9	10	11
$Sb_1(cm/s)$	188,23	188,86	189,56	190,00	190,65
$Sb_2(cm/s)$	1164,6	1177,3	1191,1	1200,00	1213,00
$H_{opt}(cm)$	0,01328	0,01264	0,01200	0,01156	0,01108
$D(cm^2/s)$	30,573	28,482	26,662	25,836	25,059

190

191 La technique de détermination de l'épaisseur optimum de la base, s'appuie pour cette fois-ci sur la représentation à
 192 **la figure 9** des profils, en fonction de l'épaisseur (H) de la base, des expressions des vitesses de recombinaison des
 193 porteurs minoritaires de charge en face arrière Sb_1 et Sb_2 pour différentes valeurs du coefficient de dommage (kl).

194



195

196 Figure 9 : Sb_1 (cm/s) et Sb_2 (cm/s) en fonction de l'épaisseur de la base pour des valeurs de kl ($\omega = 10^5$ rad/s, $\phi_p =$
 197 100 MeV et $T = 300$ K)

198 Pour une valeur donnée du coefficient de dommage, la projection sur l'axe des abscisses de l'intersection des
 199 courbes des expressions de **Sb1** et **Sb2** correspond à la valeur de l'épaisseur optimum. L'ensemble des valeurs
 200 de **Hopt** correspondant à différentes valeurs du coefficient de dommage (**kl**) sont données dans le **tableau 8**.

201 **Tableau 8** : **Hopt** en fonction du coefficient de dommage ($\omega = 10^5$ rad/s, $\phi p = 100$ MeV et $T = 300$ K)

Kl(cm ² /MeV)	5	7	9	10	11
Sb1(cm/s)	20,5	20,5	20,5	20,5	20,5
Sb2(cm/s)	549,32	549,32	549,32	549,32	549,32
Hop(cm)	0,00692	0,00692	0,00692	0,00692	0,00692
D(cm ² /s)	6,117	6,099	6,079	6,069	6,058

202 Les variations observées avec la fréquence de modulation confirment les résultats obtenus en régime dynamique
 203 fréquentiel [29, 32,45].L'influence de la température sur l'épaisseur optimale est cohérente avec les études sur la
 204 dépendance thermique des paramètres de transport [27].Les effets de l'irradiation (*kl*, Φp) sur la réduction de la
 205 longueur de diffusion et du coefficient de diffusion sont en accord avec les travaux sur la dégradation sous particules
 206 énergétiques [44–49, 57,58].

207 Conclusion

208 Cette étude a permis de déterminer et d'analyser les vitesses de recombinaison à la jonction et en face arrière d'une
 209 photopile bifaciale au silicium soumise simultanément à une irradiation, à une température donnée et à une
 210 excitation en régime dynamique fréquentiel sous éclairage polychromatique. L'approche adoptée repose sur la
 211 résolution de l'équation de continuité des porteurs minoritaires et l'exploitation des conditions aux limites aux
 212 interfaces du dispositif. Les résultats obtenus mettent clairement en évidence le rôle déterminant de la
 213 recombinaison en face arrière dans le fonctionnement de la photopile. En effet, la face arrière constitue une zone
 214 critique où les porteurs minoritaires peuvent se recombinaison avant d'être collectés, ce qui entraîne une réduction du
 215 photocourant généré. Une vitesse de recombinaison élevée en face arrière accentue les pertes de porteurs et dégrade
 216 les performances du dispositif. Par conséquent, la maîtrise des propriétés de recombinaison à cette interface
 217 constitue un facteur essentiel pour l'optimisation des performances des photopiles bifaciales. L'étude montre
 218 également que la fréquence de modulation de l'éclairage exerce une influence dominante sur les vitesses de
 219 recombinaison. Lorsque la fréquence augmente, la durée de vie effective des porteurs minoritaires diminue en raison
 220 de la nature dynamique du transport, ce qui modifie leur longueur de diffusion et leur probabilité de recombinaison
 221 aux interfaces. Cette dépendance fréquentielle confirme l'importance du régime dynamique fréquentiel pour la
 222 caractérisation des mécanismes de recombinaison dans les photopiles. Par ailleurs, les résultats révèlent une
 223 influence couplée des paramètres d'irradiation, notamment le coefficient de dommage *kl*, le flux de particules Φp
 224 et la température *T*. L'irradiation introduit des défauts cristallins qui agissent comme des centres de recombinaison,
 225 réduisant ainsi la durée de vie des porteurs minoritaires. La température, quant à elle, modifie les propriétés de
 226 transport des porteurs, notamment leur mobilité et leur coefficient de diffusion. L'effet combiné de ces paramètres
 227 entraîne une modification significative des vitesses de recombinaison et du comportement global de la photopile.
 228 Enfin, la méthode graphique basée sur l'égalité des vitesses de recombinaison à la jonction et en face arrière (**Sb1** =
 229 **Sb2**) s'est révélée être une méthode efficace et fiable pour l'analyse des mécanismes de recombinaison dans la
 230 photopile. Cette approche permet d'identifier les conditions de fonctionnement optimales et de caractériser avec
 231 précision l'influence des paramètres physiques et environnementaux sur les performances du dispositif. Ainsi, cette
 232 étude contribue à une meilleure compréhension des phénomènes de recombinaison dans les photopiles bifaciales au
 233 silicium en régime dynamique fréquentiel et fournit des outils d'analyse utiles pour l'optimisation de leurs
 234 performances, en particulier dans des environnements soumis à des irradiations et à des conditions thermiques
 235 variables.

236 REFERENCES*

- 237 [1] M.A. Green, (March 1995). Silicon Solar cells advanced principles & practice Printed by Bridge printer
 238 Pty. Ltd. 29-35 Dunning Avenue, Roseberry, Center for photovoltaic Devices and systems; pp.29-35.
 239 [2] A. A. Cuevas, A. luque, and J. M. Ruiz, A, (1980). n+/p/n+ double-sided solar cell for optimal static
 240 concentration, in Proc. 14th IEEE Ptotov. Spec. Conf., San Diego, pp.76-81.

- 241 [3] Luque, A., Ruiz, J.M., Cuevas, A., Eguren, J. and Agost, M.G. (1997) Double Side Solar Cells to Improve
 242 Static Concentrator. Photovoltaic Solar Energy Conference, Luxembourg, 269-277.
 243 https://doi.org/10.1007/978-94-009-9840-7_25
- 244 [4] Hüber, A., Aberle, A.G. and Hezel, R. (2001) 20% Efficient Bifacial Silicon Solar Cells. Munich 14th
 245 European Photovoltaic Solar Energy Conference, 1796-1798.
- 246 [5] R.VanSteenwinkel, M.C. Carotta, G. Martinelli, M. Mercli, L. Passari and D. Palmeri (1990). Lifetime
 247 Measurement in Solar Cell of Various Thickness and Related Silicon Wafer. Solar Cells, 28, 287-292.
 248 [https://doi.org/10.1016/0379-6787\(90\)90063-BG](https://doi.org/10.1016/0379-6787(90)90063-BG).
- 249 [6] Konstantinos Misiakos and Dimitris Tsamakis, Electron and Hole Mobilities in Lightly Doped Silicon.
 250 Appl. Phys. Lett.1994, 64(15),2007-2009. <https://doi.org/10.1063/1.111721>
- 251 [7] O. Diasse, R. S. Sam, H. L. Diallo, M. Ndiaye, N. Thiam, S. Mbodji and G. Sissoko, Solar cell's
 252 classification by the determination of the specific values of the back surface recombination velocities in
 253 open circuit and short-circuit operating conditions. International Journal of Emerging Trends &
 254 Technology in Computer Science (IJETTCS), 2012, 2278/6856:18-23)
- 255 [8] Demesmaeker, E., Symons, J., Nijs, J. and Mertens, R. (1991) The Influence of Surface Recombination on
 256 the Limiting Efficiency and Optimum Thickness of Silicon Solar Cells. 10th European Photovoltaic Solar
 257 Energy Conference, Lisbon, 8-12 April 1991, 66-67.
 258 https://doi.org/10.1007/978-94-011-3622-8_17
- 259 [9] Wöhler, F., et al. (2024). Quantifying native and cut edge recombination of silicon solar cells. *Solar*
 260 *Energy Materials and Solar Cells*, 261, 112567.
- 261 [10] E.Gaubas and J. Vanhellemont (1996). A simple Technique for the Separation of Bulk and Surface
 262 Recombination Parameters in Silicon. Journal of Applied Physics, 80, 6293-6297.
 263 <https://doi.org/10.1063/1.363705M>
- 264 [11] H.L.Diallo, A. Seïdou. Maiga, A.Wereme and G.Sissoko, New Approach of Both Junction and Back
 265 Surface Recombination Velocities in a 3D Modelling Study of a Polycrystalline Silicon Solar Cell. The
 266 European Physical Journal Applied Physics,2008, 42, 203-211. <http://dx.doi.org/10.1051/epjap:2008085>
- 267 [12] Lin, Y., et al. (2025). The effect of thickness and surface recombination velocity on silicon solar cells.
 268 *Universe*, 6(3), 33.
- 269 [13] Masse Samba Diop , Hamet Yoro Ba , Ndeye Thiam , Ibrahima Diatta , Youssou Traore , Mamadou
 270 Lamine Ba , El Hadji Sow , Oulymata Mballo , Grégoire Sissoko, Surface Recombination Concept as
 271 Applied to Determinate Silicon Solar Cell Base Optimum Thickness with Doping Level EffectWorld
 272 Journal of Condensed Matter Physics, 2019, 9, 102-111 <https://www.scirp.org/journal/wjcmp>
- 273 [14] Sega Diagne, Ousmane Sow, Gora Diop, Richard Mane, Ibrahima Diatta, Djiby Ndongue ,
 274 Youssou Traore, LemrabottHabiboullahMamadou Wade and Gregoire Sissoko, Optimization of silicon
 275 solar cell base thickness, while illuminated by a long wavelength monochromatic light: influence of both
 276 Lorentz law and Umclapp process. International Journal of Advanced Research, 2022,10(08), 133-143.
- 277 [15] Abdouli, N., et al. (2023). Numerical and experimental study of surface recombination velocities
 278 and base width effect in multicrystalline silicon solar cells. *Crystals*, 13(3), 425.
 279 <https://doi.org/10.3390/cryst13030425>
- 280 [16] M.M.S.Dede, M.L. Ba, M.A. Ba, M. Ndiaye, S. Gueye, E.H. Sow, I. Diatta, M.S. Diop, M. Wade
 281 and G. Sissoko, Back Surface Recombination Velocity Dependent of Absorption Coefficient as Applied to
 282 Determine Base Optimum Thickness of an n+/p/p+ Silicon Solar Cell. Energy and Power Engineering,
 283 2020, 12, 445-458.
- 284 [17] IliasseFagnane Diouf, Ousmane Sow, Gora Diop, Malick Ndiaye, Ibrahima Diatta, Khady Loum,
 285 Moustapha Thiame, Mamadou Wade, Gregoire Sissoko. Optimization of the base thickness of a silicon
 286 solar cell with multi-vertical junctions connected in series, through dynamic expressions of the
 287 recombination velocity on the back side. Journal of Scientific and Engineering Research (JSERBR). [http://](http://www.jsaer.com)
 288 www.jsaer.com, Volume 9, Issue 10 pp: 10-20, 2022.

- 289 [18] Ba. M.L., Thiam, N., Thiame, M., Traore, Y., Diop, M.S., Ba, M., Sarr, C.T., Wade, M. and
 290 Sissoko, G. (2019). Base Thickness Optimization of a (n+-p-p+) Silicon Solar Cell in Static Mode under
 291 Irradiation of Charged Particles. *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, 11, 173-185.
 292 <https://doi.org/10.4236/jemaa.2019.1110012>
- 293 [19] Liou J JWong, W.W. (1992) Comparison and Optimization of the Performance of Si and GaAs
 294 Solar Cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 28, 9-28. [https://doi.org/10.1016/0927-](https://doi.org/10.1016/0927-0248(92)90104-W)
 295 [0248\(92\)90104-W](https://doi.org/10.1016/0927-0248(92)90104-W)
- 296 [20] Ohshima, T., T. Sumita, M. Imaizumi, S. Kawakita, K. Shimazaki, S. Kuwajima, A. Ohi, And H.
 297 Itoh (2005). Evaluation of the Electrical Characteristics of III-V Compounds Solar Cells Irradiated with
 298 Protons at Low Temperatures. *Proceedings of the 31st IEEE Photovoltaic Specialists Conference*: 806
- 299 [21] Kraner, H. W., Radiation damage in silicon detectors, 2nd Pisa Meeting on Advanced Detectors,
 300 Grosetto, Italy, June 3-7 1983.
- 301 [22] Goo-Hwan Shin and Kwangsun Ryu and Hyung-Myung Kim and Kyung-wook Min (2008).
 302 Radiation effect test for single-crystalline and polycrystalline silicon solar cells. *Journal of the Korean*
 303 *Physical Society*. Vol. 52, Pp. 843-847. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:120466620>
- 304 [23] M. A. Ould El Moujtaba, M. Ndiaye, A. Diao, M. Thiam, I. F. Barro and G. Sissoko (2012).
 305 Theoretical Study of Influence of Irradiation on a Silicon Solar Cell Under Multispectral Illumination.
 306 *Research Journal of Applied Sciences Engineering and Technology*, Vol. 23, Issue 4, pp.5068-5073, 2012.
- 307 [24] Van Dyk, E. E., & Meyer, E. L. (2004). Analysis of the effect of parasitic resistances on the
 308 performance of photovoltaic modules. *Renewable Energy*, 29(3), 333–344. doi
 309 :10.1016/s09601481(03)00250-7
- 310 [25] I. Ly, M. Wade, H. Ly Diallo, M. A. O. El Moujtaba, O. H. Lemrabott, S. Mbodji, O. Diasse, A.
 311 Ndiaye, I. Gaye, F. I. Barro, A. Wereme, G. Sissoko (2011). Irradiation effect on the electrical parameters
 312 of a bifacial silicon solar cell under multispectral illumination», *Proceedings of 26th European*
 313 *Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 1DV.4.52* (2011), pp 785-788; [http://www.eupvsce-](http://www.eupvsce-proceedings.com)
 314 [proceedings.com](http://www.eupvsce-proceedings.com)
- 315 [26] Ibrahima Tall, Boureima Seibou, Mohamed Abderrahim Ould El Moujtaba, Amadou Diao,
 316 Mamadou Wade, Gregoire Sissoko (2015). Diffusion Coefficient Modeling of a Silicon Solar Cell under
 317 Irradiation Effect in Frequency: Electric Equivalent Circuit. *International Journal of Engineering Trends*
 318 *and Technology (IJETT) – Volume 19 Number 2 – p.56-61, Jan 2015* (<http://www.ijettjournal.org>).
- 319 [27] Kabou, F., et al. (2020). AC back surface recombination in N⁺-P-P⁺ silicon solar cell: Effect of
 320 temperature. *International Journal of Advanced Research*, 8(10), 105–113.
 321 <https://doi.org/10.21474/ijar01/11273>
- 322 [28] Y. Traore, N. Thiam, M. Thiame, M. L. Ba, M. S. Diouf et G. Sissoko, AC Recombination
 323 Velocity in the Back Surface of a Lamella Silicon Solar Cell under Temperature. *Journal of Modern*
 324 *Physics*, 2019, 10, 1235-1246. <https://doi.org/10.4236/jmp.2019.1010082>
- 325 [29] Ndiaye, E.H., Sahin, G, Dieng, M., Thiam, A, Diallo, H.L., Ndiaye, M. and Sissoko, G. (2015)
 326 Study of the Intrinsic Recombination Velocity at the Junction of Silicon Solar under Frequency
 327 Modulation and Irradiation. *Journal of Applied Mathematics and Physics*, 3, 1522-1535.
 328 <https://doi.org/10.4236/jamp.2015.311177>
- 329 [30] Ly Diallo, H., Wade, M., Ly, I., NDiaye, M., Dieng, B., Lemrabott, O.H., Maïga, A.S. and
 330 Sissoko. G. (2012). 1D Modeling of a Bifacial Silicon Solar Cell under Frequency Modulation,
 331 Monochromatic Illumination: Determination of the Equivalent Electrical Circuit Related to the Surface
 332 Recombination Velocity. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 4, 1672-
 333 1676. <http://www.maxwell.org>.
- 334 [31] Denise, K., Mamadou, L.B., Mamour, A.B., Gora, D., El Hadj, S., Oulimata, M. and Gregoire, S.
 335 (2020) AC Back Surface Recombination in n⁺-p-p⁺ Silicon Solar Cell: Effect of Temperature.
 336 *International Journal of advanced Research (IJAR)*, 8, 140-151.
 337 <https://doi.org/10.21474/IJAR01/11273>

- 338 [32] Thiam, N, Diao, A, Ndiaye, M, Dieng, A, Thiam, A, Sarr, M, Maiga, A.S and Sissoko G. (2012).
 339 Electric Equivalent Models of Intrinsic Recombination Velocities of a Bifacial Silicon Solar Cell under
 340 Frequency Modulation and Magnetic Field Effect. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and*
 341 *Technology*, 4, 4646-4655.
- 342 [33] Diao, A. , Thiam, N. , Zoungrana, M. , Sahin, G. , Ndiaye, M. and Sissoko, G. (2014) Diffusion
 343 Coefficient in Silicon Solar Cell with Applied Magnetic Field and under Frequency: Electric Equivalent
 344 Circuits. *World Journal of Condensed Matter Physics*, 4, 84-92. doi: [10.4236/wjcmp.2014.42013](https://doi.org/10.4236/wjcmp.2014.42013).
- 345 [34] Diao, Z., et al. (2023). Spectral response and quantum efficiency of bifacial silicon solar cells
 346 under monochromatic illumination. *American Journal of Materials Science and Engineering*, 11(2), 1–9.
 347 <http://pubs.sciepub.com/ajmse/12/2/2>
- 348 [35] Cuevas, A., Sinton, R.A. and King, R.R. (1991) A Technology-Based Comparison between Two-
 349 Sided and Back-Contact Silicon Solar Cells. The 10th European Photovoltaic Solar Energy Conference,
 350 Lisbon, 8-12 April 1991, 23-26.
- 351 [36] Fall, M. , Gaye, I. , Diarisso, D. , Diop, G. , Loum, K. , Diop, N. , Sy, K. , Ndiaye, M. and
 352 Sissoko, G. (2021). AC Back Surface Recombination Velocity in n^+ -p- p^+ Silicon Solar Cell under
 353 Monochromatic Light and Temperature. *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, 13, 67-81.
 354 doi: [10.4236/jemaa.2021.135005](https://doi.org/10.4236/jemaa.2021.135005).
- 355 [37] Gover, A. and Stella, P. (1974). Vertical Multijunction Solar-Cell One-Dimensional Analysis.
 356 *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. ED-21: 6. pp.351-356, [https://doi.org/10.1109/T-](https://doi.org/10.1109/T-ED.1974.17927)
 357 [ED.1974.17927](https://doi.org/10.1109/T-ED.1974.17927)
- 358 [38] Chih Hsin Wang and Arnost Neugroschel (1991). Minority-carrier lifetime and surface
 359 recombination velocity measurement by frequency-domain photoluminescence. *IEEE transactions on*
 360 *electron devices*, vol.38, no. 9, pp2169-2180.
- 361 [39] Flohr, Th. and Helbig, R. (1989). Determination of Minority-Carrier Lifetime and Surface
 362 Recombination Velocity by Optical-Beam-Induced-Current Measurements at Different Light
 363 Wavelengths. *Journal of Applied Physics*, 66, 3060-3065. <https://doi.org/10.1063/1.344161>
- 364 [40] O.Diasse. A. Diao, I. Ly, M.S. Diouf. I. Diatta. R.Mane. Y. Traore and G.Sissoko, Back Surface
 365 Recombination Velocity Modeling in White Biased Silicon Solar Cell under Steady State. *Journal of*
 366 *Modern Physics*, 2018, 9, 189-201.
- 367 [41] Rose, B.H. and Weaver, H.T. (1983) Determination of Effective Surface Recombination Velocity
 368 and Minority-Carrier Lifetime in High-Efficiency Si Solar Cells. *Journal of Applied Physics*, 54, 238-247.
 369 <https://doi.org/10.1063/1.331693>
- 370 [42] Gora Diop, Richard Mane, Ibrahima Diatta, Khady Loum, Sega Gueye, Moustapha Thiame,
 371 Ousmane Sow, Mamadou Wade, Gregoire Sissoko. Optimization of the base thickness of an (n+/p/p+)
 372 bifacial silicon solar cell illuminated from the back side, using short-wavelength light: Resonance Effect
 373 on the diffusion coefficient in temperature under applied magnetic field. *Journal of chemical, biological*
 374 *and physical sciences*, www.jcbcs.org, Volume 13, Issue 1, pp: 038 – 052, 2022.
- 375 [43] Ba. M.L., Thiam, N., Thiame, M., Traore, Y., Diop, M.S., Ba, M., Sarr, C.T., Wade, M. and
 376 Sissoko, G. (2019). Base Thickness Optimization of a (n+-p-p+) Silicon Solar Cell in Static Mode under
 377 Irradiation of Charged Particles. *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, 11, 173-185.
 378 <https://doi.org/10.4236/jemaa.2019.1110012>
- 379 [44] Nam, L.Q., Rodot, M., Ghannam, M., Cppye, J. and de Schepper, P.J. (1992) Solar
 380 Cells with 15.6% Efficiency on Multicrystalline Silicone, Using Impurity Gettering,
 381 back Surface Field and Emitter Passivation. *International Journal of Solar Energy*,
 382 11, 273-279. <https://doi.org/10.1080/01425919208909745>
- 383 [45] Ohshima, T., T. Sumita, M. Imaizumi, S. Kawakita, K. Shimazaki, S. Kuwajima, A. Ohi, And H.
 384 Itoh (2005). Evaluation of the Electrical Characteristics of III-V Compounds Solar Cells Irradiated with
 385 Protons at Low Temperatures. *Proceedings of the 31st IEEE Photovoltaic Specialists Conference*: 806

- 386 [46] Kraner, H. W., Radiation damage in silicon detectors, 2nd Pisa Meeting on Advanced Detectors,
387 Grosseto, Italy, June 3-7 1983.
- 388 [47] Goo-Hwan Shin and Kwangsun Ryu and Hyung-Myung Kim and Kyung-wook Min (2008).
389 Radiation effect test for single-crystalline and polycrystalline silicon solar cells. Journal of the Korean
390 Physical Society. Vol. 52, Pp. 843-847. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:120466620>
- 391 [48] M. A. Ould El Moujtaba, M. Ndiaye, A. Diao, M. Thiam, I. F. Barro and G. Sissoko (2012).
392 Theoretical Study of Influence of Irradiation on a Silicon Solar Cell Under Multispectral Illumination.
393 Research Journal of Applied Sciences Engineering and Technology, Vol. 23, Issue 4, pp.5068-5073, 2012.
- 394 [49] Wise, J.F. (1970) Vertical Junction Hardened Solar Cell. U.S. Patent 3, 690-953.
- 395 [50] Ayvazian, G.E., Kirakosyan, G.H. and Minasyan, G.A. (2004) Characteristics of Solar Cells with
396 Vertical p-n Junction. Proceedings of 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Paris, 7-11
397 June 2004, 117-119
- 398 [51] Cao, Y., Yang, D., Si, M., Shi, H., & Xue, D. (2018). Model for large magneto resistance effect in
399 p-n junctions. Applied Physics Express, 11(6), 061304. doi :10.7567/apex.11.061304
- 400 [52] Oumar DIA, Mamadou Lamine BA, Gora DIOP, Ibrahima DIATTA, Mor SARR, Mamadou
401 WADE and Gregoire SISSOKO (2021). Effet De L'energie D'irradiation Sur La Resistance Serie Dans
402 Une Photopile (N+/P/P+) Au Silicium A Jonctions Verticales Series.International Journal of Advanced
403 Research, 9(11), 985-997. <https://doi.org/10.21474/IJAR01/13832>
- 404 [53] Van Dyk, E. E., & Meyer, E. L. (2004). Analysis of the effect of parasitic resistances on the
405 performance of photovoltaic modules. Renewable Energy, 29(3), 333-344. doi
406 :10.1016/s09601481(03)00250-7
- 407 [54] Meyer, E. L., & Ernest van Dyk, E. (n.d.). The effect of reduced shunt resistance and shading on
408 photovoltaic module performance. Conference Record of the Thirty-First IEEE Photovoltaic Specialists
409 Conference, 2005. doi :10.1109/pvsc.2005.1488387
- 410 [55] Dione, M. M., Diallo, H. L., Wade, M., Ly, I., Thiame, M., Toure, F., Camara, A. G., Dieme, N.,
411 Bako, Z. N., Mbodji, S., Barro, F. I., & Sissoko, G. (2011). Determination of the shunt and series
412 resistances of a vertical multijunction solar cell under constant multispectral light. 26th European
413 Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 250-254
- 414 [56] I. Gaye, R. Sam, A. D. Seré, I. F. Barro, M. A. Ould El Moujtaba, R. Mané, G. Sissoko (2012).
415 Effect of irradiation on the transient response of a silicon solar cell; International journal of emerging
416 trends and technologies in computer science (IJETTCS) Volume 1, Issue 3, September-October 2012,
417 ISSN 2278-6856.
- 418 [57] Meier, D.L., Hwang, J.-M. and Campbell, R.B. (1988) The Effect of Doping Density and Injection
419 Level on Minority Carrier Lifetime as Applied to Bifacial Dendritic Web Silicon Solar Cells. IEEE
420 Transactions on Electron Devices, 35, 70-79. <https://doi.org/10.1109/16.2417>
- 421 [58] Ndeye Madeleine Diop, Boureima Seibou, Mamadou Wade, Marcel Sitor Diouf, Ibrahima Ly,
422 Hawa Ly Diallo, Gregoire Sissoko (2016). Theoretical Study of Vertical Parallel Junction Silicon Solar
423 Cell Capacitance under Modulated Polychromatic Illumination: Influence of Irradiation. International
424 Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE) ISSN:2278-3075, Volume-6 Issue-
425 3, August 2016).
- 426 [59] Mouhamadou Mousliou Diallo, Seni Tamba, Boureima Seibou, Mohamed Lemine Ould Cheikh,
427 Ibrahima Diatta, El Hadji Ndiaye, Youssou Traore, Cheikh Tidiane Sarr, Gregoire Sissoko (2017). Impact
428 of irradiation on the surface recombination velocity of a back side monochromatic illuminated bifacial
429 silicon solar cell under frequency modulation, Journal of Scientific and Engineering Research, 2017, 4(1):
430 29-40
- 431 [60] Ba, M.L., Diallo, H.L., Ba, H.Y., Traore, Y., Diatta, I., Diouf, M.S., Wade, M. and Sissoko, G.
432 (2018). Irradiation Energy Effect on a Silicon Solar Cell: Maximum Power Point Determination. Journal
433 of Modern Physics, 9, 2141-2155. <https://doi.org/10.4236/jmp.2018.912135>

- 434 [61] Rosenzweig, W. (1962) Diffusion Length Measurement by Mean of Ionization Radiation. The
 435 Bell System Technical Journal, 41, 1573-1588.
 436 <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1962.tb03995.x>
- 437 [62] S. Gupta, P. Ahmed and S. Garg, (1988). A Method for the Determination of the Material
 438 parameters D, L, S and α from Measured Short-Circuit Photocurrent. Solar Cells, 25, 61-72.
 439 [https://doi.org/10.1016/0379-6787\(88\)90058-0P](https://doi.org/10.1016/0379-6787(88)90058-0P).
- 440 [63] Richard Mane, Ibrahima Ly, Mamadou Wade, IbrahimaDatta, Marcel S. Douf, YoussouTraore,
 441 Mor Ndiaye, Seni Tamba, Grégoire Sissoko (2017). Minority Carrier Diffusion Coefficient D*(B, T):
 442 Study in Temperature on a Silicon Solar Cell under Magnetic Field. Energy and Power Engineering, 9,
 443 pp.1-10 <http://www.scirp.org/journal/epe>
- 444 [64] Seydina, D., Mor, N., Ndeye, T., Youssou, T., Mamadou, L.B., Ibrahima, D., Marcel, S.D.,
 445 Oulimata, M., Amary, T. and Grégoire, S. (2019). Influence of Temperature and Frequency on Minority
 446 Carrier Diffusion Coefficient in a Silicon Solar Cell Under Magnetic Field. Energy and Power
 447 Engineering, 11, 355-361. &<https://doi.org/10.4236/epe.2019.1110023>
- 448 [65] Diao, A. , Thiam, N. , Zoungrana, M. , Sahin, G. , Ndiaye, M. and Sissoko, G. (2014) Diffusion
 449 Coefficient in Silicon Solar Cell with Applied Magnetic Field and under Frequency: Electric Equivalent
 450 Circuits. *World Journal of Condensed Matter Physics*, 4, 84-92. doi: [10.4236/wjcmp.2014.42013](https://doi.org/10.4236/wjcmp.2014.42013).
- 451 [66] Sissoko, G., Nanema, E., Correa, A., Biteye, P.M., Adj, M. and Ndiaye, A. L (1998). Silicon Solar
 452 cell recombination parameters determination using the illuminated I-V characteristic. Renewable Energy,
 453 Elsevier Science Ltd, 0960-1481/#. Vol-3, pp.1848–1851.
- 454 [67] M.Diop, H. Ba, N. Thiam, I. Diatta, Y. Traore, M. Ba, E. Sow, O. Mballo and G.Sissoko, Surface
 455 Recombination Concept as Applied to Determinate Silicon Solar Cell Base Optimum Thickness with
 456 Doping Level Effect. *World Journal of Condensed Matter Physics*, 2019, 9, 102-111.
- 457 [68] F.M. Ndiaye, M.L. Ba, M.A. Ba, G. Diop, I. Diatta, E.H. Sow, O. Mballo and G.Sissoko (2020).
 458 Lamella Silicon Optimum Width Determination under Temperature. *International Journal of Advanced*
 459 *Research*, 2020, 8, 1409-1419.
- 460 [69] Thiaw, C., Ba, M., Ba, A.M., Diop, G., Diatta, I., Ndiaye, M. and Sissoko, G. (2020) n+ -p-p+
 461 Silicon Solar Cell Base Optimum Thickness Determination under Magnetic Field. *Journal of*
 462 *Electromagnetic Analysis and Applications*, 12, 103-113. <https://doi.org/10.4236/jemaa.2020.127009>
- 463 [70] Teya, M. , Sow, O. , Loum, K. , Diatta, I. , Diop, G. , Traore, Y. , Wade, M. and Sissoko, G.
 464 (2023) Determination of the Base Optimum Thickness of Back Illuminated (n⁺/p/p⁺) Bifacial Silicon Solar
 465 Cell, by Help of Diffusion Coefficient at Resonance Frequency. *Journal of Electromagnetic Analysis and*
 466 *Applications*, 15, 13-24. doi: [10.4236/jemaa.2023.152002](https://doi.org/10.4236/jemaa.2023.152002).
- 467 [71] Diop, G. , Sow, O. , Thiame, M. , Mane, R. , Diatta, I. , Loum, K. , Gueye, S. , Wade, M. and
 468 Sissoko, G. (2022). Diffusion Coefficient at Double Resonances in Frequency and Temperature, Applied
 469 to (n⁺/p/p⁺) Silicon Solar Cell Base Thickness Optimization under Long Wavelength Illumination. *Journal*
 470 *of Electromagnetic Analysis and Applications*, 14, 89-103. doi: [10.4236/jemaa.2022.148008](https://doi.org/10.4236/jemaa.2022.148008).
- 471 [72] Khady Loum, Ousmane Sow, Gora Diop, Richard Mane, Ibrahima Diatta, Malick Ndiaye,Sega
 472 Gueye, Moustapha Thiame, Mamadou Wade, Gregoire Sissoko. AC Back Surface Recombination
 473 Velocity as Applied to Optimize the Base Thickness under Temperature of an (n+-p-p+) Bifacial Silicon
 474 Solar Cell, Back Illuminated by a Light with Long Wavelength. *World Journal of Condensed Matter*
 475 *Physics*, <http://www.scirp.org/journal/wjcmp>. Volume 13, pp: 40 - 56, 2023.
- 476 [73] Ousmane Sow, Sega Gueye, Richard Mane, Gora Diop, Ibrahima Diatta, Khady Loum,
 477 Moustapha Thiame, Mamadou Wade, Gregoire Sissoko. (n+/p/p+) Silicon solar cell base thickness
 478 optimization under modulated short wavelength illumination, at resonances in both frequency and
 479 temperature of minority carriers' diffusion coefficient .*International Journal of Engineering Research*
 480 *Updates*, <https://orionjournals.com/ijeru>, Volume 3, Issue 2 pp : 040-052, 2022.
- 481 [74] Gora Diop, Richard Mane, Ibrahima Diatta, Khady Loum, Sega Gueye, Moustapha Thiame,
 482 Ousmane Sow, Mamadou Wade, Gregoire Sissoko. Optimization of the base thickness of an (n+/p/p+)

- 483 bifacial silicon solar cell illuminated from the back side, using short-wavelength light: Resonance Effect
484 on the diffusion coefficient in temperature under applied magnetic field. Journal of chemical, biological
485 and physical sciences, www.jcbssc.org, Volume 13, Issue 1, pp: 038 – 052, 2022.
- 486 [75] Khady Loum, Gora Diop, Ibrahima Diatta, Richard Mane, Youssou Traore, Segue Gueye, Ousmane
487 Sow, Gregoire Sissoko. Derivative of AC recombination velocity of minority carriers as applied to the
488 determination of the optimum base thickness of an (n+/p/p+) silicon solar cell. Journal of Scientific
489 and Engineering Research (JSERBR). [http:// www.jsaer.com](http://www.jsaer.com), Volume 10, Issue 3 pp: 1-10, 2023.
- 490 [76] Matar Niane, Richard Mane, Ibrahima Diatta, Gora Diop, Moussa Ibra Ngom, Mamadou Yacine
491 Ba, Khady Loum, Segue Gueye, Youssou Traore, Moustapha Thiame, Ousmane Sow, Mamadou Wade,
492 Gregoire Sissoko. AC back surface recombination, as applied to determine (p) base thickness of both
493 conventional and vertical series junction (n+/p/p+) silicon solar cells under white illumination. Journal of
494 chemical, biological and physical sciences, www.jcbssc.org, Volume 13, Issue 2, pp: 152 – 163, 2023.
- 495 [77] Khady Loum, Gora Diop, Ibrahima Diatta, Richard Mane, Malick Ndiaye, Youssou Traore, Segue
496 Gueye, Moustapha Thiame, Ousmane Sow, Mamadou Wade, Gregoire Sissoko. Derivative of Ac back
497 surface recombination velocity as applied to n + /p/p + silicon solar cell optimum base thickness
498 determination: Effect of both temperature and frequency. Journal of chemical, biological and physical
499 sciences, www.jcbssc.org, Volume 13, Issue 2, pp: 139 – 151, 2023.
- 500 [78] Khady Loum, Gora Diop, Ibrahima Diatta, Richard Mane, Moussa Ibra Ngom, Youssou Traore ,
501 Segue Gueye, Moustapha Thiame, Ousmane Sow, Mamadou Wade, Grégoire Sissoko. Optimization of the
502 base thickness of the (N + /P/P +) silicon solar cell in steady state under polychromatic illumination:
503 Influence of temperature and doping rate. Journal of chemical, biological and physical sciences,
504 www.jcbssc.org, Volume 13, Issue 2, pp: 164 – 175, 2023.