

*Université Assane Seck de Ziguinchor*



UFR SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Département de Physique

**Mémoire de Master**

Mention : Physique et Applications

Spécialité : Physique des Matériaux ; Option énergie solaire

*Sujet : Influence du champ magnétique sur une photopile bifaciale au silicium sous éclairage monochromatique par la face arrière en régime statique : Détermination de l'épaisseur optimum de la base*

Présenté par

LANDING DIATTA

Sous la direction de : Moustapha THIAME

Sous la supervision du Professeur Grégoire SISSOKO (FST/UCAD)

Soutenu publiquement le 01/02/2020 devant le jury composé de :

<b>NOM Prénom (s)</b>	<b>Grade</b>	<b>Qualité</b>	<b>Etablissement</b>
<b>CAMARA Moctar</b>	Professeur Titulaire	Président de jury	UASZ
<b>THIAO Serigne</b>	Assistant	Rapporteur	UASZ
<b>NDIAYE Ababacar</b>	Maître-Assistant CAMES	Examineur	UASZ
<b>TINE Modou</b>	Assistant	Examineur	UASZ
<b>BA Mamadou Lamine</b>	Docteur en énergies renouvelables	Examineur	EPT/ UT
<b>THIAME Moustapha</b>	Maître-Assistant CAMES	Encadrant	UASZ

## Dédicace

A toute ma famille,

Ma mère, Mon défunt père, Ma défunte tante, Mes  
frères et sœurs...

Ma Femme NdèyeAïssatou MBAYE et mes enfants

Malang, Abdourahmane et Sofiatou.

A mes amis.

A tous ceux et celles qui me sont chér(e)s

## Remerciements

Il m'est agréable d'exprimer ma profonde gratitude et ma reconnaissance à mon encadrant, le Docteur Moustapha THIAME du Département de physique. Vous étiez mon interlocuteur privilégié tout le long de ce travail. Vos conseils et vos encouragements ont été très bénéfiques pour moi, et le Professeur Grégoire SISSOKO, sans qui ce travail n'aurait pas existé.

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements aux membres du jury : le président du jury Professeur Moctar CAMARA, le rapporteur Dr Serigne THIAO et les examinateurs Dr Modou TINE, Dr Ababacar NDIAYE et Dr Mamadou Lamine BA, qui m'ont fait l'honneur de bien vouloir examiner ce travail.

Mes remerciements vont aussi à mes collègues du laboratoire de chimie et de physique des matériaux (LPCM), surtout Laurent Basséne, Fatou Bintou Mané, Ndeye Maguette Seck et aux camarades au LOSEC.

J'exprime ma gratitude à tous les collègues du lycée Djignabo de Ziguinchor, de l'équipe pédagogique à l'équipe administrative, particulièrement les collègues de la cellule pédagogique de physique et chimie.

J'exprime mes profonds remerciements à Moussa Camara, Philippe B. Himbane, Rémi NDioukane, Ndeye Coumba Y. Fall, Abdoukhadre Diallo, Seydou Ba, Fanta Baldé, Sada Traoré, Omar Kata Faye, tous les Doctorants au LPCM pour leurs conseils, qui m'ont été très utiles tout au long de l'élaboration de ce document. Merci pour tout !

Je ne saurais continuer sans remercier aussi les enseignants chercheurs du département de physique, de chimie et mathématiques de l'UASZ et ma famille qui m'a été d'un grand soutien tout au long de mes années d'études.

Enfin, je remercie toutes les personnes qui, d'une manière ou d'une autre, ont contribué au bon déroulement de ce travail, tant au niveau humain qu'au niveau scientifique.

## Résumé

Dans ce travail, nous avons d'abord effectué une étude bibliographique dans laquelle nous avons présenté une photopile polycristalline et son fonctionnement avant de présenter quelques travaux faites sur la modélisation des paramètres de recombinaison surfacique de la photopile et sur l'optimisation de sa base, à partir du concept de vitesses de recombinaison en face arrière. Ensuite, une étude théorique de modélisation d'une photopile bifaciale au silicium polycristallin en régime statique, sous l'influence champ magnétique et sous l'éclairement monochromatique par la face arrière est présentée. En résolvant l'équation de continuité correspondant au model d'étude, l'expression de la densité des porteurs minoritaires en excès dans la base est obtenue. Cette expression de la densité des porteurs de charge a permis de déterminer celle de la densité de photocourant. A partir de l'expression de la densité de photocourant, nous avons déterminé les expressions des vitesses de recombinaison en face arrière ( $S_{b1}$  et  $S_{b2}$ ).

En fin, le travail est orienté vers la détermination de l'épaisseur optimale de la base de la photopile en fonction du champ magnétique auquel elle est soumise et de la longueur d'onde de l'éclairement. Une corrélation entre l'épaisseur optimale et le champ magnétique est établie pour différentes longueurs d'onde.

**Mots clés : Champ magnétique, Épaisseur optimale, Longueur d'onde, Photopile, Régime statique.**

## Abstract

In this work, we first carried out a bibliographic study in which we presented a polycrystalline solar cell and its functioning before presenting some modeling works made on the surface recombination velocities parameter of the solar cell and the optimizations of its base, from the concept of recombination velocities on the rear side.

Then, a theoretical modeling study of a bifacial polycrystalline silicon photocell under static regime, under the influence of the magnetic field and under the monochromatic illumination at the rear side is presented. By solving the continuity equation corresponding to the study model, the expression of the excess minority carrier's density is obtained. This expression of the excess minority carrier's density made it possible to determine the photocurrent density expression, we determined the expressions of the rear side recombination velocities ( $S_{b1}$  and  $S_{b2}$ ).

Finally, the work is oriented towards determining the optimal thickness of the base of the solar cell as a function of the magnetic field to which it is subjected and the wavelength of the illumination. A correlation between the optimal thickness and the magnetic field is established for different wavelengths.

**Keyword:** Magnetic Field, Optimal Thickness, Solar Cell, Static regime, Wavelength.

# TABLE DES MATIERES

SOMMAIRE.....	vi
NOMMENCLATURE.....	viii
LISTE DES FIGURES.....	viii
INTRODUCTION GENERALE.....	2
CHAPITRE I: ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE.....	4
Introduction.....	5
I.1. Présentation de la cellule solaire polycristalline.....	5
I.2. Fonctionnement de la photopile.....	6
I.3. Présentation de quelques travaux.....	7
Conclusion.....	12
CHAPITRE II: ETUDE THEORIQUE.....	13
Introduction.....	14
II.1: Présentation du model d'étude.....	14
II.2: Principe de fonctionnement.....	15
II.3: Taux de génération.....	15
II.4: Taux de recombinaison.....	16
II.5: Equation de continuité.....	16
II.6: Les conditions aux limites.....	17
II.7: Expression de la densité de photocourant.....	18
II.8: Vitesse de recombinaison en face arrière Sb.....	19
Conclusion.....	20
CHAPITRE III: RESULTATS ET DISCUSSIONS.....	21
Introduction.....	22
III.1 : Etude de la densité de porteurs minoritaires en excès dans la base.....	22
III.1.1 : Effet du champ magnétique sur la densité de porteurs minoritaires en excès dans la base.....	22
III.1.2 : Effet des faibles longueurs d'onde sur la densité de porteurs minoritaires en excès dans la base.....	23
III.1.3 : Effet des grandes longueurs d'onde sur la densité de porteurs minoritaires en excès dans la base.....	24
III.2: Etude de la densité de photocourant.....	25

III.2.1: Effet du champ magnétique sur la densité de photocourant.....	25
III.2.2: Effet des faibles longueurs d'onde sur la densité de photocourant.....	26
III.2.3: Effet des grandes longueurs d'onde sur la densité de photocourant.....	27
III.2.4: Effet de l'épaisseur de la base sur la densité de photocourant.....	28
III.3: Etude de l'optimisation de l'épaisseur de la base pour quelques valeurs de longueurs d'onde .....	29
Conclusion.....	34
CONCLUSION GENERALE.....	35
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	36

## NOMENCLATURE

Symbole	Dénomination	Unité
$\alpha$	Coefficient d'absorption du silicium	$(\text{cm}^{-1})$
$\lambda$	Longueur d'onde	$(\mu\text{m})$
<b>B</b>	Intensité du champ magnétique	(Tesla)
<b>D</b>	Coefficient de diffusion des porteurs minoritaires dans la base en présence de champ magnétique	$(\text{cm}^2.\text{s}^{-1})$
<b>D<sub>0</sub></b>	Coefficient de diffusion des porteurs minoritaires dans la base en absence de champ magnétique	$(\text{cm}^2.\text{s}^{-1})$
$\delta n(x)$	Densité des porteurs minoritaires photocréés dans la base en fonction de la profondeur $x$ dans la base	$(\text{cm}^{-3})$
<b>G (x)</b>	Taux de génération en fonction de la profondeur $x$ de la base	$(\text{cm}^{-3}.\text{s}^{-1})$
<b>H</b>	Epaisseur totale de la base	(cm)
<b>J<sub>ph</sub></b>	Densité de photocourant	$(\text{A}.\text{cm}^{-2})$
<b>SF</b>	Vitesse de recombinaison à la face avant	$(\text{cm}.\text{s}^{-1})$
<b>SB</b>	Vitesse de recombinaison en face arrière	$(\text{cm}.\text{s}^{-1})$

## LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Module de silicium polycristallin (a) silicium monocristallin (b).....	6
Figure I.2 : Schéma de récapitulation du fonctionnement d'une photopile .....	7
Figure I.3: structure de la cellule solaire de type n+-p-p+ sous champ magnétique et de température.....	9
Figure I.4 : Vitesse de recombinaison à la face arrière en fonction de l'épaisseur de la base...	9

Figure I.5 : Cellule solaire en silicium à jonction verticale en série sous éclairnement monochromatique en présence d'un champ magnétique .....	10
Figure I.6 : Vitesse de recombinaison à la face arrière en fonction de l'épaisseur de base pour différentes valeurs du champ magnétique.....	10
Figure I.7 : Vitesse de recombinaison à la face arrière en fonction de l'épaisseur de base pour différentes valeurs du coefficient de diffusion.....	11
Figure I.8 : Vitesse de recombinaison à la face arrière en fonction de l'épaisseur de base pour différentes valeurs d'énergie d'irradiation.....	12
Figure II.1 : Schéma illustratif d'une photopile bifaciale sous champ magnétique .....	14
Figure III.1 : Densité des porteurs minoritaires en fonction de la profondeur de la base pour différentes valeurs du champ magnétique : $S_f = 10 \text{ cm.s}^{-1}$ , $S_b = F(B)$ , $\lambda = 0.72 \text{ } \mu\text{m}$ , $\mu = 1448 \text{ cm}^2.\text{V}^{-1}.\text{s}^{-1}$ , $D_0=26\text{cm}^2.\text{s}^{-1}$ , $H=0.02\text{cm}$ .....	23
Figure III. 2 : Densité des porteurs minoritaires en fonction de la profondeur de la base pour différentes valeurs de faibles longueurs d'onde. $S_f = 10 \text{ cm.s}^{-1}$ , $S_b = F(\lambda)$ , $\mu = 1448 \text{ cm}^2.\text{V}^{-1}.\text{s}^{-1}$ , $D_0=26 \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}$ , $H = 0.02 \text{ cm}$ , $B = 10^{-3} \text{ T}$ .....	24
Figure III. 3 : Densité des porteurs minoritaires en fonction de la profondeur de la base pour différentes valeurs de faibles longueurs d'onde. $S_f = 10^6\text{cm.s}^{-1}$ , $S_b = F(\lambda)$ , $\mu = 1448 \text{ cm}^2.\text{V}^{-1}.\text{s}^{-1}$ , $D_0=26 \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}$ , $H = 0.02 \text{ cm}$ , $B = 10^{-3} \text{ T}$ .....	24
Figure III. 4 : Densité des porteurs minoritaires en fonction de la profondeur de la base pour différentes valeurs de grandes longueurs d'onde. $S_f = 10\text{cm.s}^{-1}$ , $S_b = F(\lambda)$ , $\mu = 1448 \text{ cm}^2.\text{V}^{-1}.\text{s}^{-1}$ , $D_0 = 26\text{cm}^2.\text{s}^{-1}$ , $H=0.02\text{cm}$ , $B=10^{-3}\text{T}$ .....	25
Figure III.5: Densité des porteurs minoritaires en fonction de la profondeur de la base pour différentes valeurs de grandes longueurs d'onde. $S_f = 10^6\text{cm.s}^{-1}$ , $S_b = F(\lambda)$ , $\mu = 1448 \text{ cm}^2.\text{V}^{-1}.\text{s}^{-1}$ , $D_0 = 26\text{cm}^2.\text{s}^{-1}$ , $H=0.02\text{cm}$ , $B=10^{-3}\text{T}$ .....	25
Figure III.6 : Densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs du champ magnétique .....	27
Figure III.7 : Densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la longueur d'onde.....	27
Figure III.8 : Densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de grandes longueurs d'onde.....	28
Figure III.9 : Densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de l'épaisseur de la base .....	29

Figure III.10 : Vitesse de recombinaison à la face arrière Sb1 et Sb2 en fonction de l'épaisseur de la base pour différentes valeurs du champ magnétique pour  $\lambda=0.98\mu\text{m}$ .....31

Figure III.11 : Vitesse de recombinaison à la face arrière Sb1 et Sb2 en fonction de l'épaisseur de la base pour différentes valeurs du champ magnétique pour  $\lambda = 0.88 \mu\text{m}$ ..... 31

Figure III.12 :Epaisseur optimale en fonction du champ magnétique ..... 32

Figure III.13 : Vitesse de recombinaison à la face arrière Sb1 et Sb2 en fonction de l'épaisseur de la base pour différentes valeurs du champ magnétique pour  $\lambda = 0.52 \mu\text{m}$ ..... 33

Figure III.14 : Vitesse de recombinaison à la face arrière Sb1 et Sb2 en fonction de l'épaisseur de la base pour différentes valeurs du champ magnétique pour  $\lambda = 0.42 \mu\text{m}$ ..... 34

Figure III.15: Epaisseur optimale Hop en fonction du champ magnétique ..... 35

### LISTE DES TABLEAUX

**Tableau III. 1** : Valeurs optimale de l'épaisseur de la pour  $\lambda = 0,98 \mu\text{m}$  .....32

**Tableau III. 2** : Valeurs optimale de l'épaisseur de la base pour  $\lambda = 0,88 \mu\text{m}$ .....32

**Tableau III.3** : Valeurs de  $\beta$  et  $\psi$  des différentes zones du champ magnétique pour de grandes longueurs d'onde.....32

**Tableau III.4** : Valeurs optimales de l'épaisseur de la base pour  $\lambda = 0.52 \mu\text{m}$ .....34

**Tableau III.5** : Valeur optimale de l'épaisseur de la base pour  $\lambda = 0.52 \mu\text{m}$ .....34

**Tableau III.6** : Valeurs de  $\beta$  et  $\psi$  des différentes zones du champ magnétique pour de grandes longueurs d'onde.....35

# **INTRODUCTION GENERALE**

## **INTRODUCTION GENERALE.**

L'énergie et son avenir se trouvent au centre des problématiques extrêmement importantes qui concernent l'ensemble de l'humanité. L'exploitation massive des énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz) aux réserves limitées, entraîne l'émission de gaz carbonique. Ce gaz, aggravant l'effet de serre d'origine anthropique, engendre un réchauffement planétaire [1].

Il existe aussi une autre énergie très performante pour la production d'énergie électrique qui est l'énergie nucléaire, mais elle pose le problème de la gestion des déchets radioactif à longue durée de vie (plusieurs millions d'années). De plus les risques de détournement du nucléaire civil à des fins militaires ou terroristes sont à prendre en compte.

Pour faire face à cette situation, les énergies renouvelables deviennent une alternative incontournable. Parmi les énergies renouvelables, l'énergie solaire est en bonne position du fait de sa disponibilité, sa quantité inépuisable et non polluante. Cette dernière repose sur la transformation directe de l'énergie solaire en énergie électrique à travers des photopiles[2].

Aujourd'hui, la quasi-totalité des photopiles commercialisées sont fabriquées en utilisant du silicium monocristallin ou polycristallin. Le taux de conversion de ces cellules solaires peut atteindre des rendements photovoltaïques de l'ordre de 24,7 % [3]. Des études ont montrées que ce rendement dépend fortement des paramètres externes auxquelles sont soumises les photopiles comme le champ magnétique, la température, l'irradiation etc.

Pour améliorer le rendement de ces cellules en fonctionnement réelle, plusieurs études sont menées pour maîtriser les phénomènes macroscopiques et microscopiques se déroulant en leurs seins, lorsqu'elles sont éclairées. La maîtrise de ces phénomènes est un défi, surtout quand la photopile est soumise à ces paramètres externes.

Dans le but de contribuer à la maîtrise de ces phénomènes, nous nous sommes proposés d'effectuer une modélisation de la photopile bifaciale éclairée par la face arrière et l'optimisation de sa base en minimisant les recombinaisons en face arrière, tout en étudiant l'influence du champ magnétique auquel serait soumise la photopile.

Ainsi, au chapitre I, nous ferons une étude bibliographique sur les photopiles au silicium polycristallin, où nous passerons en revue de quelques travaux sur la caractérisation de photopiles en fonction du champ magnétique et sur l'optimisation de leur base.

Le chapitre II sera consacré à l'étude en modélisation à 1D en régime statique d'une photopile bifaciale polycristalline sous éclairage monochromatique. Ici nous ferons la description du modèle d'étude et l'établissement de l'équation de continuité. La résolution de cette équation nous donnera l'expression de la densité des porteurs minoritaires de charges en excès qui

permettra d'aboutir à celle de la densité de photocourant et ensuite en tirer les expressions de la vitesse de recombinaison en face arrière.

Le chapitre III sera consacré aux résultats de simulations de quelques paramètres de la photopile. Nous étudierons l'influence des faibles et grandes longueurs d'ondes, du champ magnétique, de l'épaisseur de la base sur ces derniers. Nous aborderons enfin optimisation de la base de la photopile en fonction du champ magnétique, pour quelques valeurs de longueur d'onde.

**CHAPITRE I :**  
**ETUDE**  
**BIBLIOGRAPHIQUE**

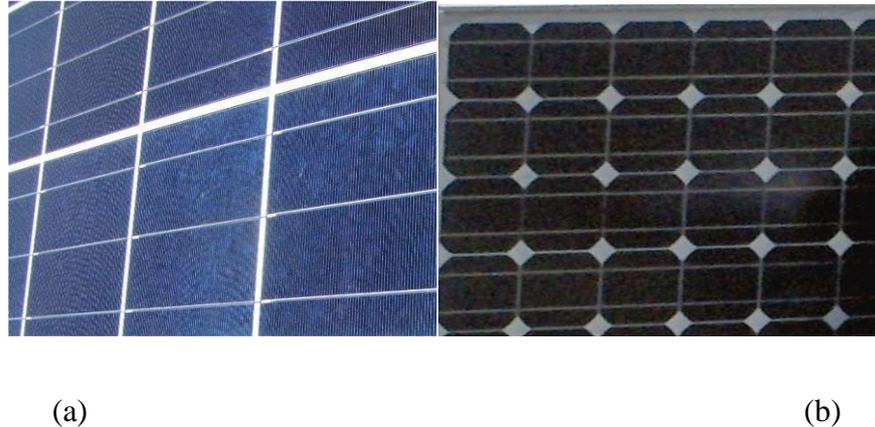
## **INTRODUCTION**

L'effet photovoltaïque est la conversion directe du rayonnement solaire en électricité. Cette transformation peut se faire par une photopile mono ou poly cristalline. Lors de cette transformation, il existe plusieurs pertes dues à la nature, à la technologie utilisée pour la fabrication de celle-ci etc. Elles sont étroitement liées aux paramètres de recombinaisons que sont la longueur de diffusion, la durée de vie et les vitesses de recombinaisons à la face avant et arrière, qui influencent le rendement de la photopile. Ainsi, c'est dans cette optique qu'un bon nombre de chercheurs ont développé des méthodes afin d'améliorer ce rendement. Parmi ces méthodes, nous avons l'optimisation de l'épaisseur de la base afin de minimiser ses recombinaisons en face arrière.

Dans cette séquence, nous allons faire la présentation de la photopile polycristalline et de son fonctionnement et ensuite présenter quelques travaux de modélisation des recombinaisons en face arrière de et d'optimisation de l'épaisseur de sa base pour différents paramètres, extrinsèques et intrinsèques, auxquels la photopile est soumise.

### **I.1. LA PRESENTATION DE LA PHOTOPILE POLYCRISTALLINE**

Les photopiles Poly-Si sont fabriquées avec du Silicium pur fondu dans un moule de section carrée, le refroidissement est une étape essentielle parce qu'il détermine la grosseur du grain et la distribution des impuretés. Les lingots obtenus sont coupés en barres avec une section transversale, finalement ils sont sciés pour obtenir les disques minces. Ce procédé de fabrication donne une structure cristalline multi-grain. Comparé au Si monocristallin, la structure est moins idéale, ce qui a pour résultat une perte d'efficacité de conversion, comparé au silicium monocristallin, mais cet inconvénient est surmonté par des coûts inférieurs de production. Un deuxième avantage est l'agencement des cellules qui sont rectangulaires, comparé au « pseudo-carré » du mono-Si ; ainsi ils peuvent être agencés de façon optimisée dans les modules PV. L'aspect du poly-Si est distinctement bleu (voir la figure I.1(a) dû à l'absorption manquante des photons de plus haute énergie. En fait, ces photons de haute énergie de la partie supérieure du spectre visible sont réfléchis et ne sont pas absorbés.



**Figure I.1** : modules de silicium polycristalline (a) silicium monocristallin (b)

## I.2. FONCTIONNEMENT DE LA PHOTOPILE

La photopile constitue l'élément de base de la conversion photovoltaïque. Il s'agit d'un dispositif semi-conducteur qui transforme l'énergie lumineuse fournie par une source d'énergie inépuisable, le soleil, en énergie électrique. Elle exploite les propriétés des matériaux semi-conducteurs utilisés dans l'industrie de l'électronique : diodes, transistors et circuits intégrés. L'effet photovoltaïque se manifeste quand un photon est absorbé dans un matériau composé de semi-conducteurs dopés p (positif) et n (négatif), dénommé jonction p-n (ou n-p). Sous l'effet de ce dopage, un champ électrique est présent dans le matériau de manière permanente (comme un aimant possède un champ magnétique permanent). Quand un photon incident (grain de lumière) interagit avec les électrons du matériau, il cède son énergie  $h\nu$  à l'électron qui se retrouve libéré de sa bande de valence et subit donc l'effet du champ électrique intrinsèque. Sous l'effet de ce champ, l'électron migre vers la face supérieure laissant place à un trou qui migre en direction inverse. Des électrodes placées sur les faces supérieure et inférieure permettent de récolter les électrons et de leur faire réaliser un travail électrique pour rejoindre le trou de la face antérieure. Et comme dans les cellules photovoltaïques, une partie des électrons ne revient pas à son état initial. Les électrons " décrochés " créent une tension électrique continue faible. Une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi directement transformée en énergie électrique : c'est l'effet photovoltaïque [4].

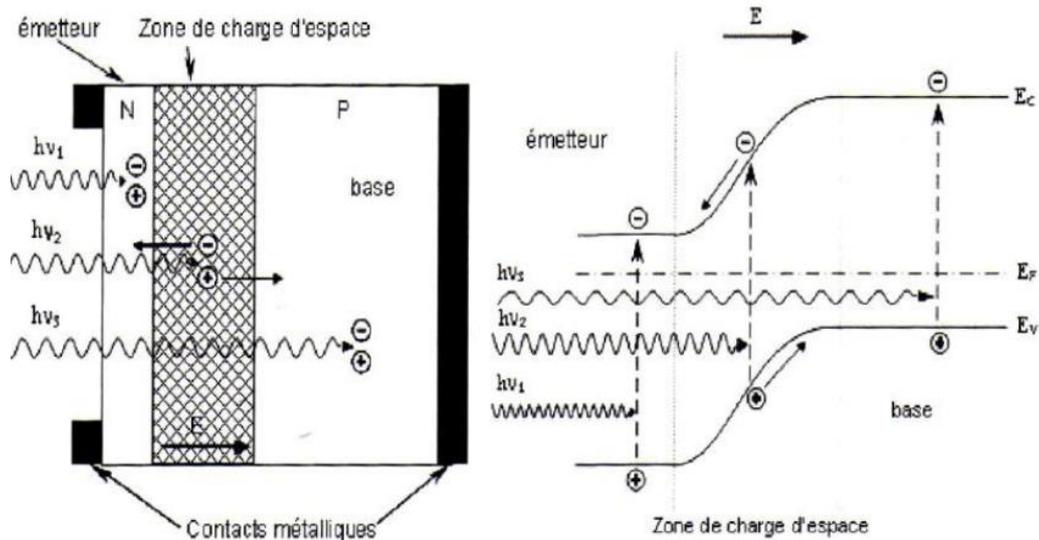


Figure I.2 : Schéma illustratif du fonctionnement d'une photopile [4]

### I.3 : PRESENTATION DE QUELQUES TRAVAUX DE MODELISATION ET OPTIMISATION DE LA BASE DE LA POTOPILE

« *Mesure de la longueur de diffusion de porteurs minoritaires dans une photopile en silicium sous un éclairage multispectral* » [5] :

Lorsque la photopile est conventionnelle, c'est-à-dire à contact arrière ohmique, les porteurs de charge qui y arrivent sont perdus par recombinaison. Il n'y a donc pas de porteurs de charge en face arrière (la densité des porteurs de charge est égale à zéro :  $\delta n(H) = 0$ ) alors l'équation

$$\left[ \frac{\partial \delta n(x)}{\partial x} \right]_{x=H} = -SB \cdot \frac{\delta n(H)}{D} \text{ permet de dire que } SB \text{ tend vers l'infini. I.1}$$

Pour améliorer le photocourant de la photopile, un champ électrique est réalisé en face arrière à l'aide d'une jonction p-p+ suivant la qualité de cette jonction, la vitesse de recombinaison associée  $SB_0$  prend une valeur fini (zéro pour le cas idéal).

Cependant, les études ont montré que ce champ n'est actif que pour les grandes longueurs d'onde ( $\lambda > 0.70 \mu\text{m}$ ). Ce comportement de la face arrière de la photopile montre qu'une valeur constante de la vitesse de recombinaison à la face arrière ( $SB_0$ ) ne suffit pas pour la décrire. L'idée d'une composante de la vitesse de recombinaison  $SB$  en face arrière dépendant de la longueur d'onde  $\lambda$ , par le coefficient d'absorption, conduit à l'expression :  $SB = SB_0 + SB_\lambda$ . Ainsi, suivant la qualité spectrale de l'éclairage, il y'aura compétitivité entre les deux phénomènes.

**« Effet du spectre lumineux sur les paramètres de recombinaison d'une photopile en silicium »[6] :**

Les courbes de densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction SFn des porteurs ont montré qu'au voisinage du court-circuit (grandes valeurs de SFn), le photocourant est constant. Des études récentes ont déjà mis en évidence ce phénomène. Cela est traduit par l'équation :

$$\frac{\partial J_{ph}}{\partial SFn} = 0 \quad \text{I.2}$$

et cette équation admet deux solutions qui sont :

$$SB1 = -\frac{Dn}{Ln} \cdot th\left(\frac{H}{Ln}\right) \quad \text{I.3}$$

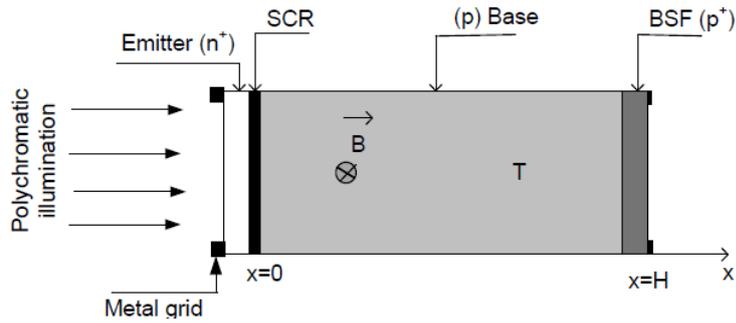
$$SB2 = Dn \cdot \frac{-\frac{1}{Ln} \cdot sh\left(\frac{H}{Ln}\right) + b_i \cdot \left[ ch\left(\frac{H}{Ln}\right) - \exp^{-b_i \cdot H} \right]}{-Ln \cdot b_i \cdot sh\left(\frac{H}{Ln}\right) + ch\left(\frac{H}{Ln}\right) - \exp^{-b_i \cdot H}} \quad \text{I.4}$$

Ces solutions montrent que la vitesse de recombinaison sur la face arrière(SB) des électrons dans la base peut prendre deux expressions possibles dont l'une (SB1) dépend seulement des paramètres de la base et l'autre (SB2) dépend, en plus des paramètres de la base, de la nature de la radiation excitatrice. La solution SB1 est proportionnelle, à un coefficient multiplicatif près (th (H/L)), à la vitesse de diffusion D/L (pour un éclaircissement monochromatique).

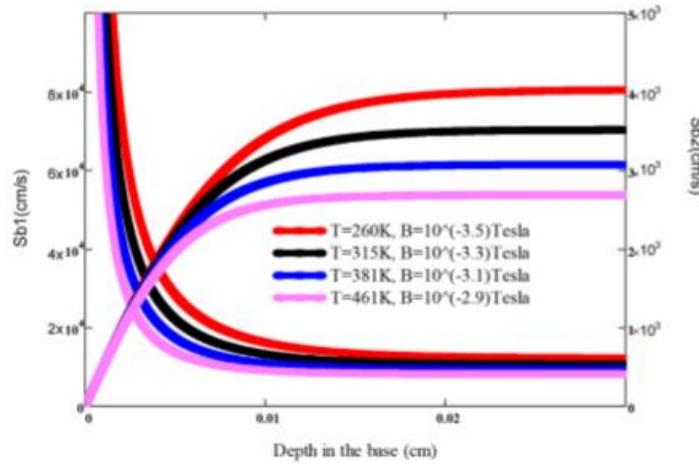
La solution SB2 dépend des termes de génération  $b_i$ . Elle sera alors assimilée à la vitesse de génération. Pour une variation du spectre lumineux, SB2 est l'effet cumulé de chacune des radiations monochromatiques. Alors dans ce cas, SB est obtenue par sommation sur toute la série de chacune des valeurs SB2.

**'Influence du champ magnétique et de la température sur une photopile en silicium : détermination de l'épaisseur optimale'[7] :**

Dans cette étude, les auteurs ont utilisé les vitesses de recombinaison à la jonction et en surface arrière pour modéliser et déterminer l'épaisseur optimale de la base d'une photopile de type n<sup>+</sup>-p-p<sup>+</sup>, sous éclaircissement polychromatique en régime statique par la face avant, sous l'effet combiné du champ magnétique et de la température (T).



**Figure I.3 :** Structure de la photopile de type  $n^+ - p - p^+$  sous champ magnétique à la température  $T$



**Figure I.4 :** Vitesses de recombinaison en face arrière en fonction de l'épaisseur de la base.

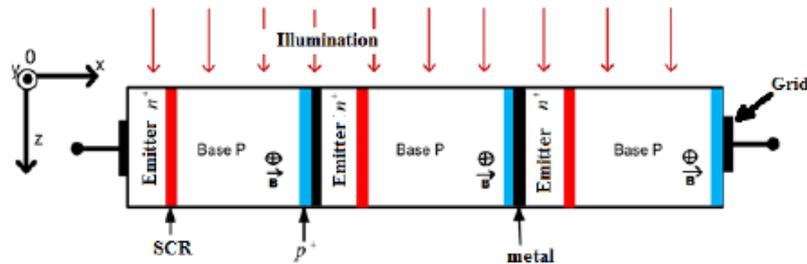
Le profil des deux vitesses de recombinaison des porteurs minoritaires sur la face arrière en fonction de l'épaisseur de la base de la photopile pour différentes valeurs du coefficient de diffusion des porteurs minoritaires dans la base est tracé (Figure I.4). Les projections des intersections des courbes des vitesses de recombinaison à la face arrière sur l'axe des abscisses donnent les épaisseurs optimales de la base de la photopile, pour chaque coefficient de diffusion qui est fonction de la température et du champ magnétique.

Ensuite, une corrélation entre l'épaisseur optimale et le coefficient de diffusion qui est en fonction de la température et du champ magnétique est établie. Elle est donnée par :

$$H(m) = -2 \cdot 10^{-6} D(\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}) + 2 \cdot 10^{-4} D(\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}) + 24 \cdot 10^{-4} \tag{I.5}$$

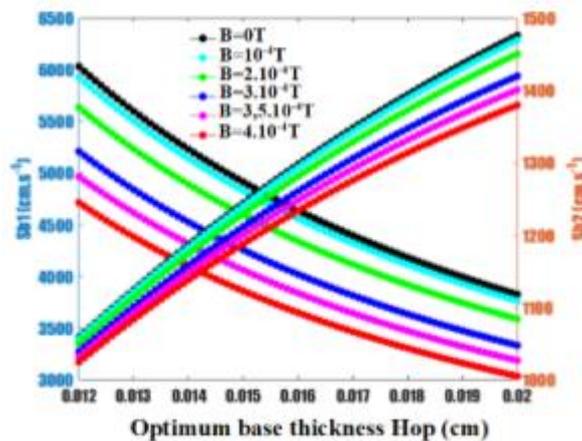
“Optimisation de l’épaisseur de la base d’une photopile à jonctions verticales multiples série en silicium sous champ magnétique par le concept de la vitesse de recombinaison à la surface arrière” [8] :

Dans ce travail, les auteurs ont élaboré l’optimisation de l’épaisseur de la base d’une photopile au silicium à jonction verticale multiple série de type n+-p-p+ sous champ magnétique.



**Figure I.5 :** Photopile à jonctions verticales multiples en série sous éclairage monochromatique en présence d’un champ magnétique

A partir de la résolution de la dérivée de la densité de photocourant par rapport à la vitesse de recombinaison à la jonction lorsque celle-ci tend vers les grandes valeurs, ils ont déterminé deux expressions des vitesses de recombinaison à la surface arrière ( $S_{b1}$  et  $S_{b2}$ ) fonction de l’épaisseur de la base et du champ magnétique et tracé dans un même repère ces deux vitesses en fonction de l’épaisseur de la base pour différentes valeurs du champ magnétique. Le point d’intersection des courbes  $S_{b1}$  et  $S_{b2}$ , permet d’obtenir l’épaisseur optimale de la photopile à jonction verticale pour différentes valeurs du champ magnétique.



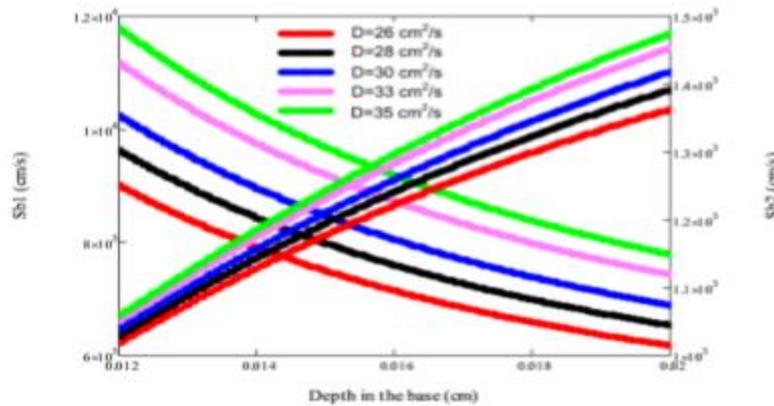
**Figure I.6 :** Vitesse de recombinaison en face arrière en fonction de l’épaisseur de base pour différentes valeurs du champ magnétique

Une corrélation entre l’épaisseur optimale et le champ magnétique est donnée par:

$$H(m) = 6,8 \cdot 10^3 \cdot B^3 + 5,1 \cdot 10^2 \cdot B^2 - 1,9 \cdot B(T) + 0,015. \quad \text{I.6}$$

« *Concept de la vitesse de recombinaison de surface appliqué pour déterminer l'épaisseur optimale des cellules solaires au silicium avec effet du niveau de dopage* »[9] :

Dans cet article, les auteurs ont cherché la dérivé de la densité de photocourant par rapport à la vitesse de recombinaison à la jonction d'une photopile au silicium de type n<sup>+</sup>-p-p<sup>+</sup> sous éclairage polychromatique lorsque celle-ci tend vers les grandes valeurs pour différents coefficients de diffusion qui dépendent du taux de dopage de la base.



**Figure I.7 :** Vitesse de recombinaison en face arrière en fonction de l'épaisseur de base pour différentes valeurs du coefficient de diffusion.

La résolution de cet équation, leurs a permis de déterminer deux expressions de la vitesse de recombinaison à la face arrière (\$Sb\_1\$ et \$Sb\_2\$) qui sont fonction de l'épaisseur de base et du coefficient de diffusion qui à son tour fonction du taux de dopage de la base. Ils ont pu déterminer les épaisseurs optimales de la base de la photopile et établir une corrélation entre l'épaisseur optimale et le coefficient de diffusion des porteurs minoritaires en excès dépendante du taux de dopage :

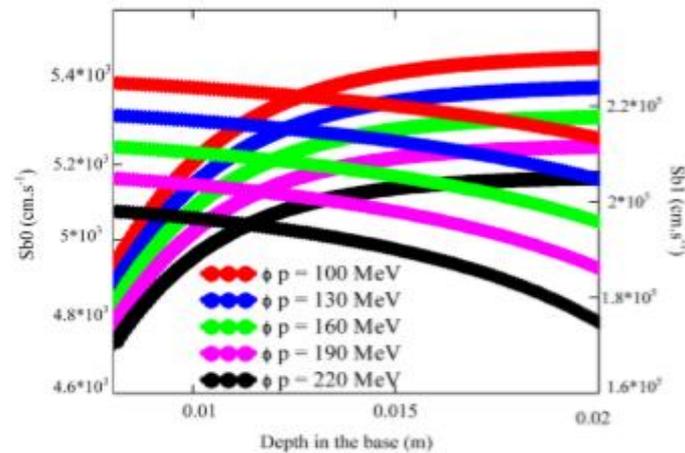
$$H(cm) = [2 \cdot D(Nb) + 102] \cdot 10^{-4} \tag{I.7}$$

***Optimisation de l'épaisseur de la base d'une photopile au silicium (n<sup>+</sup>-p-p<sup>+</sup>) en régime statique sous irradiation de particules chargées [10]:***

Dans ce travail, les auteurs ont déterminé l'épaisseur optimale d'une photopile éclairée par la face avant sous flux d'irradiation de particules chargées à partir des deux vitesses de recombinaison en face arrière qui sont obtenues à partir de la résolution de la dérivé de la densité de photocourant par rapport à la vitesse de recombinaison à la jonction qui s'annule lorsque la vitesse de recombinaison à la jonction (\$SF\$) tend vers les grandes valeurs.

En traçant les profils de ces deux vitesses dans un même repère pour différentes valeurs

respectivement de l'énergie d'irradiation et du coefficient de dommage, ils ont pu déterminer l'épaisseur optimale de la base pour différentes énergies d'irradiation et coefficient de dommage.



**Figure I.8 :** Vitesse de recombinaison à la face arrière en fonction de l'épaisseur de base pour différentes valeurs d'énergie d'irradiation

Puis ils ont établi une corrélation entre l'épaisseur optimale de la base et respectivement le flux d'irradiation et le coefficient de dommage :

$$H(cm) = 2 \cdot 10^{-3} \phi_p^2 - 2 \cdot 10^{-5} \phi_p + 0,014 \quad \text{I.8}$$

### CONCLUSION :

Dans cette étude bibliographique, nous avons présenté les caractéristiques de la photopile polycristalline et son fonctionnement d'une part. D'autre part, nous avons présenté des études faites dans le but d'optimiser de sa base en fonction des conditions extérieures et des conditions intrinsèques. Cette littérature nous a permis de mieux comprendre les techniques d'optimisation de la base de la photopile, en fonction du mode d'éclairage.

Nous allons utiliser dans notre étude une photopile bifaciale qui est conçue pour intercepter à travers sa face arrière un éclairage comme l'albédo, afin d'augmenter son rendement.

Des études ont montré que lorsqu'elle est éclairée par la face arrière, nous avons de fortes recombinaisons sur cette face, d'où la nécessité de limiter ces recombinaisons par une optimisation. Notre contribution dans ce travail est de proposer l'optimisation de la base de la photopile, éclairée par la face arrière avec une lumière monochromatique, et sous l'effet d'un champ magnétique. Pour cela nous aborderons dans la partie qui suit, une étude théorique de modélisation de la photopile dans ces conditions.

# **CHAPITRE II**

## **ETUDE THEORIQUE**

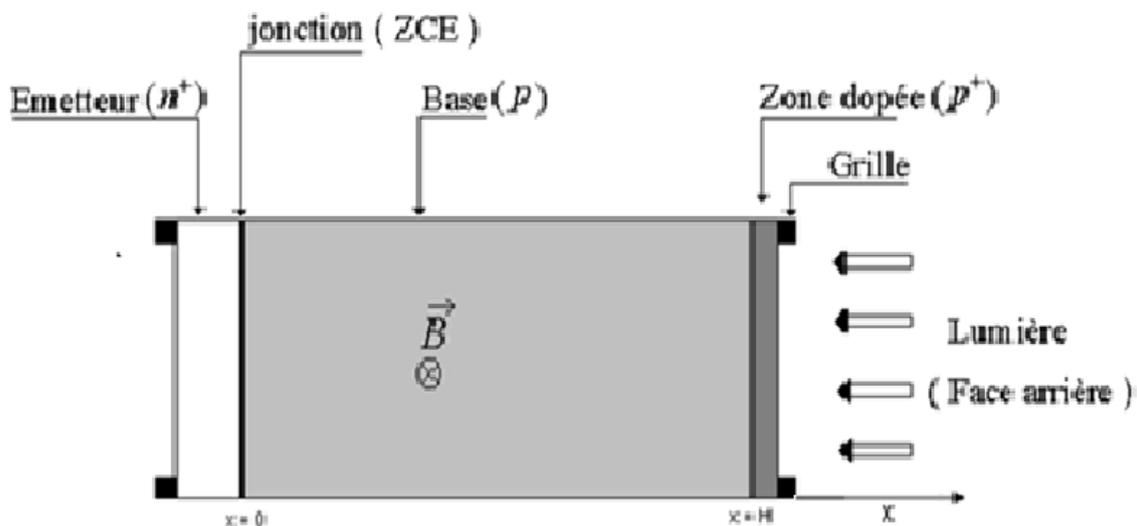
## Introduction

Dans ce chapitre nous ferons une étude de modélisation en une dimension en régime statique d'une photopile bifaciale au silicium polycristallin sous éclairage monochromatique par la face arrière.

Nous allons dans un premier temps présenté le modèle à partir duquel nous ferons cette étude. A travers ce modèle, nous allons établir l'équation de continuité des porteurs minoritaires de charges en excès dans la base de la photopile pour un éclairage monochromatique par la face arrière. La résolution de cette équation de continuité en régime statique va nous permettre de déterminer l'expression de la densité des porteurs minoritaires de charges en excès dans la base. A partir de cette expression de la densité de porteurs minoritaires, nous déterminons l'expression de la densité de photocourant. Nous déduisons de celle-ci les expressions de la vitesse de recombinaison en face arrière lorsque la photopile est soumise à nos conditions d'étude.

### II.1 : Présentation du modèle d'étude

La photopile bifaciale de type  $n^+ - p - p^+$  [13-14] que nous utilisons est schématisée à la figure II-1 suivante :



**Figure II -1:**Schéma d'une photopile bifaciale sous champ magnétique appliqué

Cette photopile comprend quatre parties essentielles :

- ✚ Emetteur : zone frontale de type  $n^+$  (dopé en atomes donneurs) où le taux de dopage varie de  $10^{17}$  à  $10^{19}$   $\text{atom.cm}^{-3}$ , de faible épaisseur (0.5 à 1  $\mu\text{m}$ ), qu'on appelle

également face avant.

- ✚ Base : zone de type p peu dopée (en atomes accepteurs) ( $10^{15}$  à  $10^{17}$  atom.cm<sup>-3</sup>) dont l'épaisseur varie de 100 à 400  $\mu$ m, où les porteurs minoritaires sont les électrons.
- ✚ Zone de charge d'espace (ZCE) : zone qui se trouve entre l'émetteur et la base où règne un champ électrique intense qui permet la séparation des paires électron-trou créées.
- ✚ Zone arrière : zone surdopée p<sup>+</sup> (en atomes accepteurs) située sur la face arrière de la base où un champ électrique de surface (Back Surface Field) jouant le rôle d'un réflecteur, renvoie les porteurs photocréés près de la face arrière (qui est caractérisée par une vitesse de recombinaison très élevée) vers la jonction pour optimiser le rendement de conversion énergétique.
- ✚ Les contacts métalliques (grilles) à l'émetteur et au substrat servent à collecter le courant de porteurs photogénérés. Les contacts doivent être ohmiques, c'est-à-dire que la caractéristique  $I=f(V)$  du contact doit être linéaire. La résistance des contacts est un paramètre très important. La forte résistance des contacts augmente la résistance série de la cellule et baisse le facteur de forme et le rendement. [15]

## II.2 : Principe de fonctionnement [16,17]

Une photopile est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants:

- ✚ absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif ;
- ✚ Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires électron/trou dans le matériau semi-conducteur (lorsqu'une énergie lumineuse frappe la cellule solaire, les électrons se détachent des atomes du matériau semi-conducteur);
- ✚ Collecte des particules générées dans le dispositif.

## II.3 : Taux de génération.

Lorsque la photopile est éclairée sur la face arrière par une radiation convenable ( $h\nu > E_g$ ), il y a création de paires électron-trou sous une vitesse diminuant de façon exponentielle en profondeur de la base ; cette vitesse de génération est mesurée par le taux de génération G. Il est donné par la relation qui suit [16, 18]:

$$G(x, \lambda) = \alpha(\lambda) \cdot I_{ph}(\lambda) \cdot (1 - R(\lambda)) \cdot \exp(-\alpha(\lambda) \cdot (H - x)) \quad \text{II.1}$$

Avec :  $\alpha(\lambda)$  étant le coefficient d'absorption du matériau en  $\text{cm}^{-1}$ ,  
 $I_{ph}(\lambda)$  représente l'intensité du flux incident en Watt (W),  $x$  est la profondeur dans la base en cm et  $R(\lambda)$  est le coefficient de réflexion du matériau.

#### II.4 : Taux de recombinaison.

La génération des porteurs dans la photopile éclairée s'accompagne de phénomènes de pertes ou de recombinaisons en volume, en surface ainsi qu'aux joints de grain.

Pour ce qui est des pertes en volume, le modèle linéaire de Shockley-Read-Hall permet, en faible injection, d'en mesurer la vitesse par la donnée du taux de recombinaison  $R(x)$  :

$$R = \frac{\delta n}{\tau} \text{ en atomes.cm}^{-3}.\text{s}^{-1} \text{ [19] II.2}$$

Avec  $\delta n$  : Densité des porteurs minoritaires en excès.

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

#### II.5 : Equation de continuité

La densité des porteurs minoritaires en excès dans la base est régie par l'équation de continuité décrivant les phénomènes de diffusions et les mécanismes de recombinaisons en volume et en surface limitant la base.

Cette équation de continuité des porteurs minoritaires photogénérés est donnée de façon générale par la relation suivante :

$$\frac{1}{e} \nabla J - R + G = \frac{\partial \delta n(x, B, \lambda)}{\partial t} \text{ II.3}$$

$G$  est le taux de génération

$R$  est le taux de recombinaison ;  $\tau$

$J = J_c + J_d$  est la densité de courant en  $\text{A.cm}^{-2}$ .

$\delta n(x)$  est la densité des porteurs minoritaires dans la base de la photopile.

$J_c$  est la densité de courant de conduction et  $J_d$  la densité de courant de diffusion.

Comme la photopile n'est pas polarisée, la densité de courant de conduction deviendra nulle.

Ainsi l'équation (II.5) devient :

$$J = e \cdot D(B) \cdot \nabla \delta n(x) \text{ II.4}$$

$D(B)$  est le coefficient de diffusion des électrons dans la base en fonction du champ magnétique. Son expression est donnée par [7, 8,10, 20]

$$Dn(B) = \frac{D0}{1 + (\mu \cdot B)^2} \text{ II.5}$$

B est le champ magnétique,  $\mu$  la mobilité des porteurs minoritaires, et  $e$  la charge électrique.

L'équation (II.3) devient :

$$\frac{1}{e} \nabla(e \cdot D(B) \cdot \delta n(x, B, \lambda)) - \frac{\partial \delta n(x, B, \lambda)}{\tau} + G(x) = \frac{\partial \delta n(x, B, \lambda)}{\partial t} \text{ II.6}$$

En régime statique on a :

$$\frac{\partial \delta n(x, B, \lambda)}{\partial t} = 0 \text{ II.7}$$

L'équation de continuité (II.6) devient alors

$$\frac{\partial^2 \delta n(x, B, \lambda)}{\partial x^2} - \frac{\delta n(x, B, \lambda)}{Ln(B)^2} = -\frac{G(x, \lambda)}{D(B)} \text{ II.8}$$

$Ln(B)$  est la longueur de diffusion des électrons dans la base qui dépend du champ magnétique

B auquel la base est soumise, elle est donnée par :

$$Ln(B) = \sqrt{Dn(B) \cdot \tau} \text{ II.9}$$

$G(x)$  est le taux de génération des porteurs minoritaires de charge à la profondeur  $x$ .

Pour résoudre l'équation de continuité (II.8), nous allons utiliser la solution de type [17, 20] :

$$\delta n(x) = N \cdot \cosh\left(\frac{x}{Ln(B)}\right) + M \cdot \sinh\left(\frac{x}{Ln(B)}\right) - K(B, \lambda) \exp(-\alpha(\lambda) \cdot (H - x)) \text{ II.10}$$

$$\text{Avec : } K(B, \lambda) = \frac{\alpha(\lambda) I_{ph}(\lambda) \cdot (1 - R(\lambda)) \cdot Ln(B)^2}{Dn(B) [\alpha(\lambda)^2 \cdot Ln(B)^2 - 1]} \text{ II.11}$$

M et N seront déterminés à partir des conditions aux limites de la jonction émetteur-base et à la face arrière [8, 17, 20] qui seront données ci-dessous.

## II.6 : Les conditions aux limites

Les phénomènes de recombinaisons surfaciques auxquels les porteurs photocréés sont soumis, au niveau des faces de la photopile conduisent à considérer les conditions aux limites ci-dessous :

✓ A la jonction Emetteur-Base

$$D(B) \cdot \left( \frac{\partial \delta n(x,)}{\partial x} \right)_{x=0} = S_f \cdot \delta n(0) \text{ II.12}$$

$S_f$  est la vitesse de recombinaison à la jonction (en  $\text{cm.s}^{-1}$ ) [8, 21].

✓ En face arrière.

$$D(B) \cdot \left( \frac{\partial \delta n(x)}{\partial z} \right)_{x=H} = -Sb \cdot \delta n(H) \text{ II.13}$$

$S_b$  est la vitesse de recombinaison en face arrière en  $\text{cm.s}^{-1}$  [8, 21].

$$M(B, \lambda) = -K(B, \lambda) \cdot \frac{Ln(B) \cdot \exp(-\alpha(\lambda) \cdot H) \cdot X \cdot \left( \frac{SF}{D(B)} - \alpha(\lambda) \right) + \left( \alpha(\lambda) + \frac{Sb}{Dn(B)} \right)}{\frac{SF}{Dn(B)} \cdot Ln(B) X + Y} \text{ II.14}$$

$$N(B, \lambda) = K \cdot \frac{\frac{SF}{D(B)} \cdot Ln(B) \cdot \left( Y \cdot \exp(-\alpha(\lambda) \cdot H) - \alpha(\lambda) - \frac{Sb}{Dn(\lambda)} \right) - \alpha(\lambda) \cdot Ln(B) Y \cdot \exp(-\alpha(\lambda) \cdot H)}{\frac{SF}{Dn(B)} \cdot Ln(B) \cdot X + Y} \text{ II.15}$$

$$X = \frac{1}{Ln(B)} \cdot \cosh\left(\frac{H}{Ln(B)}\right) + \frac{Sb}{Dn(B)} \cdot \sinh\left(\frac{H}{Ln(B)}\right) \text{ II.16}$$

$$Y = \frac{1}{Ln(B)} \cdot \sinh\left(\frac{H}{Ln(B)}\right) + \frac{Sb}{Dn(B)} \cdot \cosh\left(\frac{H}{Ln(B)}\right) \text{ II.17}$$

## II.7. Expression de la densité de photocourant

La fraction de la lumière absorbée par la photopile provoque la création de paires électron-trou dans l'émetteur et aussi dans la base. Les porteurs libres ne sont plus uniformément distribués, mais sont plutôt soumis à un processus général de diffusion, de migration et de recombinaison. Le mouvement de ces charges s'effectue dans un sens qui tend à uniformiser leur distribution spatiale en charge électrique.

Les porteurs ayant échappé aux processus de recombinaison sont collectés par les grilles et conduits au circuit extérieur pour la production du courant.

L'expression générale de la densité de photocourant est définie par la relation suivante [7, 8, 9, 10, 22] :

$$J_{ph}(B, H, \lambda) = q \cdot D(B) \cdot \left[ \frac{\partial \delta n(B, H, \lambda, x)}{\partial x} \right]_{x=0} \text{ II.18}$$

Ce qui donne :

$$J_{ph}(B, H, \lambda) = q \cdot Dn(B) \left[ \frac{N}{Ln(B)} + K(B, \lambda) \cdot \alpha(\lambda) \cdot \exp(-\alpha(\lambda) \cdot H) \right] \text{ II.19}$$

## II.8. La vitesse de recombinaison en face arrière(Sb)

La vitesse de recombinaison en face arrière quantifie avec précision les pertes de porteurs à la face arrière [22, 24].

Pour obtenir l'expression de la vitesse de recombinaison  $S_b$ , on dérive l'expression de la densité de photocourant par rapport à  $S_f$ , avec  $S_f$  tendant vers ses grandes valeurs. En effet pour les grandes valeurs de  $S_f$ , la densité de photocourant présente un gradient nul; cela nous permet d'écrire[7, 8, 9, 10, 23, 25]:

$$\left[ \frac{\partial J_{ph}}{\partial S_f} \right] = 0 \quad \text{II.20}$$

L'équation II.20 donne deux solutions de la vitesse de recombinaison en face arrière  $S_b$  des porteurs minoritaires dans la base dont l'une  $S_{b1}$  dépendant seulement des paramètres de la base et l'autre  $S_{b2}$  dépendant en plus des paramètres de la base, de la nature de la radiation excitatrice et du champ magnétique.

Les solutions sont les suivant:

$$S_{b1} = -\frac{D}{L} \operatorname{th}\left(\frac{H}{L}\right) \quad \text{II.21}$$

Cette solution est indépendante de la longueur d'onde  $\lambda$  pour une longueur de diffusion supposée invariante vis-à-vis de la longueur d'onde et se réduit à  $S_b = -D/L$  pour une photopile épaisse ( $H \gg L$ ). Elle est ainsi assimilée à la vitesse de diffusion.

$$S_{b(B,H,\lambda)} = Dn(B) \cdot \frac{\alpha(\lambda) \cdot \left( \cosh\left(\frac{H}{Ln(B)}\right) \cdot \exp(-\alpha(\lambda) \cdot H) - 1 \right) + \frac{1}{Ln(B)} \cdot \sinh\left(\frac{H}{Ln(B)}\right) \exp(-\alpha(\lambda) \cdot H)}{1 - \left( \cosh\left(\frac{H}{Ln(B)}\right) + \alpha(\lambda) \cdot Ln(B) \cdot \sinh\left(\frac{H}{Ln(B)}\right) \right) \cdot \exp(-\alpha(\lambda) \cdot H)} \quad \text{II.22}$$

Cette solution qui dépend du coefficient d'absorption  $\alpha(\lambda)$  sera assimilée à la vitesse de génération, elle est différente des vitesses de recombinaison en face arrière obtenues respectivement par un éclairage de la face avant seule et par éclairage simultanée.

## **Conclusion**

Dans cette partie nous avons fait une étude théorique pour modéliser les expressions de la densité des porteurs minoritaires de charge en excès, la densité de photocourant et les vitesses de recombinaison en face arrière. En effet, à partir du modèle unidimensionnel, nous avons établi l'équation de continuité de la concentration des électrons dans la base de la photopile.

La résolution de l'équation différentielle obtenue, nous a permis d'obtenir l'expression de la densité des porteurs minoritaires de charge en excès. A partir de cette expression, nous avons déduit l'expression de la densité de photocourant. En se basant sur la densité de photocourant, nous avons déterminé les expressions de la vitesse de recombinaison en face arrière. Ces expressions tiennent en compte le type d'éclairement et le champ magnétique appliqué.

# **CHAPITRE III**

## **RESULTATS ET DISCUSIONS**

## **Introduction**

L'augmentation de l'efficacité des photopiles est un objectif majeur des chercheurs dans le domaine photovoltaïque. L'amélioration des performances de ces photopiles nécessite un contrôle qualitatif. Ainsi, plusieurs méthodes de caractérisation ont été développées. Certaines de ces méthodes utilisées sont théoriques et permettent de prédire les phénomènes physiques se déroulant en leur sein.

Afin d'évaluer l'effet de la longueur d'onde de l'éclairement, du champ magnétique et des recombinaisons surfacique sur la photopile, nous allons effectuer, dans la partie qui suit, la simulation des paramètres électriques et des paramètres de recombinaison établies dans la partie théorique.

### **III.1 : Etude de la densité de porteurs minoritaires en excès dans la base**

#### **III.1.1 : Effet du champ magnétique sur la densité de porteurs minoritaires en excès dans la base**

Nous allons dans cette partie étudier l'influence du champ magnétique sur la densité des porteurs minoritaires en excès dans la base.

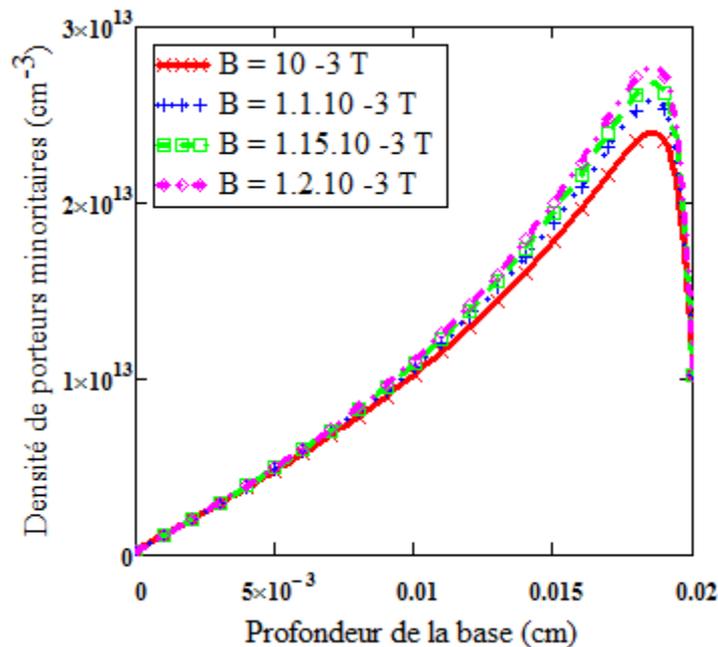
Ainsi sur la figure III.1, nous représentons la densité de porteurs minoritaires en excès en fonction de la profondeur de la base pour différentes valeurs du champ magnétique.

Aux voisinages de la face arrière, la densité des porteurs minoritaires augmente avec le champ magnétique. Ceci résulte du fait que le champ magnétique en déviant les porteurs, les bloque en volume. Cependant en profondeur, vers le milieu de la base, la densité des porteurs minoritaires est presque indépendante du champ magnétique. On peut expliquer ce phénomène par le fait que le champ magnétique externe favorise les recombinaisons des porteurs dans les photopiles en réduisant leur mobilité (la longueur de diffusion diminue avec le champ magnétique). En présence de champ magnétique, les coefficients de diffusion des électrons et des trous sont affectés ; ces coefficients diminuent avec le champ magnétique [25].

Aussi, le maximum de porteurs se trouve au voisinage de celle-ci parce que l'éclairement se fait par cette face et le taux de génération étant exponentiellement décroissante en s'éloignant de cette face.

Loin de la surface éclairée, il y aura moins de porteurs. En effet plus on entre en profondeur dans la base plus la densité des porteurs diminue. Cela s'explique par le fait que plus on entre

en profondeur plus l'absorption des photons est faible (l'énergie des photons diminue) donc il y a moins de porteurs photogénérés.



**Figure III.1 :** Densité des porteurs minoritaires en fonction de la profondeur de la base pour différentes valeurs du champ magnétique :  $S_f = 10^3 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $S_b = F(B)$ ,  $\lambda = 0.72 \text{ } \mu\text{m}$ ,  $\mu = 1448 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $D_0 = 26 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $H = 0.02 \text{ cm}$ .

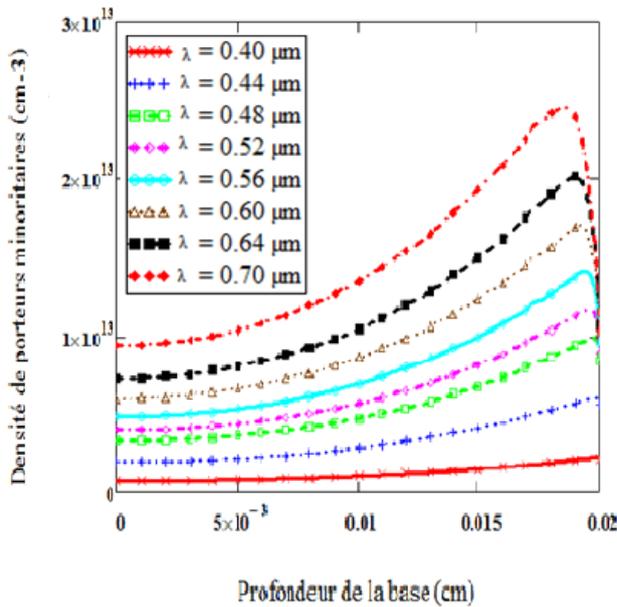
### III.1.2 : Effet des faibles longueurs d'onde sur la densité des porteurs minoritaires en excès

L'influence de la longueur d'onde sur la densité des porteurs minoritaires est étudiée lorsque la photopile éclairée par sa face arrière pour deux modes de fonctionnement de la photopile.

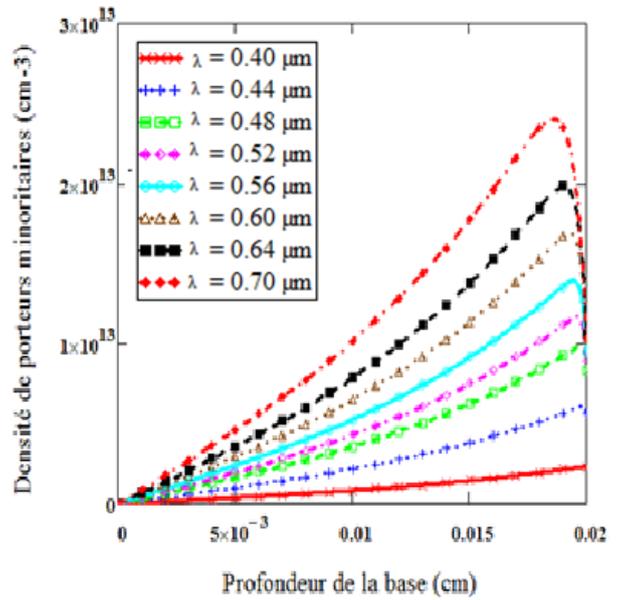
Ainsi sur la figure 2, la situation de fonctionnement de la photopile en mode circuit-ouvert est représentée par le profil de la densité de porteurs en excès en fonction de la profondeur de la base pour différents valeurs de courtes longueurs d'onde. Dans cette gamme de longueur d'onde nous observons l'amélioration de la densité des porteurs lorsque la longueur d'onde augmente. Ce que l'on peut expliquer par le fait que le coefficient d'absorption est très élevé pour le matériau provoquant ainsi l'arrêt des porteurs sans arriver à la base de la photopile[24].

Sur la figure III. 3,nous avons présentons le profil de la densité des porteurs minoritaires en excès en fonctionde la profondeur de la base pour différentes valeurs de faibles longueurs d'onde de la photopile en fonctionnement court -circuit.

Ces courbes montrent que, pour la gamme des faibles longueurs d'onde, la densité des porteurs minoritaires augmente avec la longueur d'onde.



**Figure III.2 :** Densité des porteurs minoritaires en fonction de la profondeur de la base pour différentes valeurs de faibles longueurs d'onde :  $S_f=10 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $S_b=F(\lambda)$ ,  $\mu = 1448 \text{ cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $D_0 = 26 \text{ cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $H = 0.02 \text{ cm}$ ,  $B = 10^{-3} \text{ T}$ .



**Figure III.3 :** Densité des porteurs minoritaires en fonction de la profondeur de la base pour différentes valeurs de faibles longueurs d'onde :  $S_f=10^6 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $S_b=F(\lambda)$ ,  $\mu = 1448 \text{ cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $D_0 = 26 \text{ cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $H = 0.02 \text{ cm}$ ,  $B = 10^{-3} \text{ T}$ .

### III.1. 3 : Effet des grandes longueurs d'onde sur la densité des porteurs minoritaires en excès

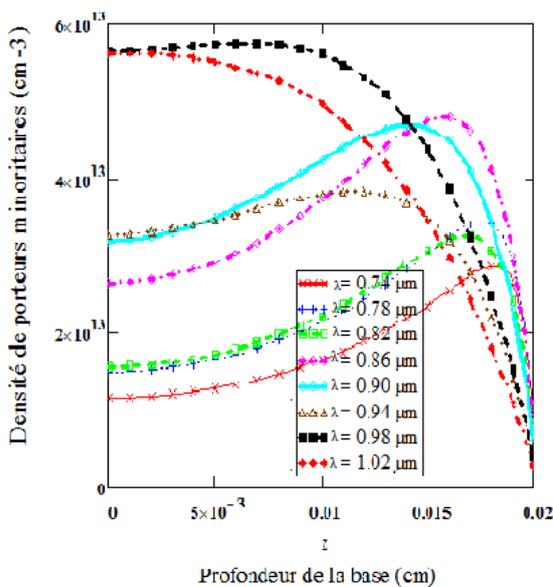
La situation de circuit-ouvert de la photopile est représentée par la figure III.4, elle donne la variation de la densité des porteurs minoritaires en fonction de la profondeur de la base pour des éclairagements de grandes longueurs d'onde. En effet les fortes longueurs d'onde correspondent aux faibles coefficients d'absorption du matériau donc une forte création de porteurs minoritaires dans la base de la photopile avec la longueur d'onde [27]. Ainsi le maximum de la densité des porteurs croît de  $0,74$  à  $0,86 \mu\text{m}$  et à partir de la valeur de  $0,86 \mu\text{m}$  la densité des porteurs diminue en allant en profondeur de la base de la photopile lorsque la longueur d'onde augmente. Nous pouvons expliquer cela par des fuites de porteurs liées aux phénomènes de recombinaison en volume et des coefficients de diffusion faibles. Nous remarquons aussi une forte sensibilité au niveau de la base et une croissance avec la longueur d'onde.

Sur la figure 5, notons qu'au voisinage de la face arrière, la génération des porteurs est plus importante quel que soit la lorsque la longueur.

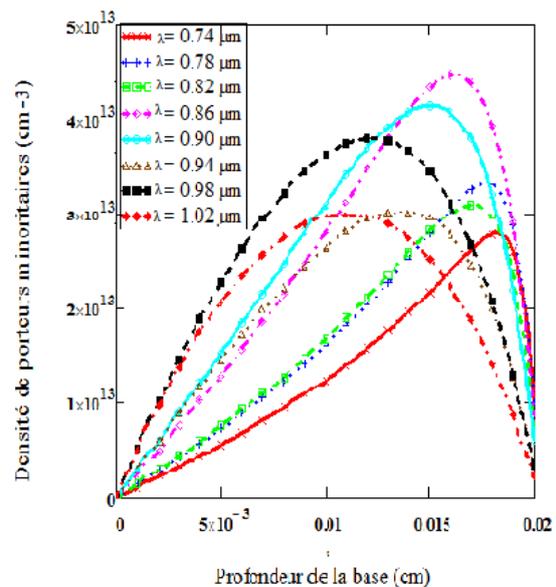
Le maximum de la densité des porteurs augmente globalement lorsque la longueur d'onde augmente de 0,74 à 0,86  $\mu\text{m}$  avant de décroître au-delà de 0.86  $\mu\text{m}$ . Mais la position de ce maximum de la densité de porteurs minoritaires s'éloigne de la face arrière lorsque la longueur d'onde augmente.

Cela résulte du fait qu'à ce niveau, le coefficient d'absorption du silicium commence à décroître au-delà de cette valeur [27].

Donc nous pouvons dire que la densité des porteurs générés dans la base de la photopile est plus importante à la face arrière qu'au niveau de la jonction. Le gradient des porteurs à la jonction étant élevé, les porteurs photocréés peuvent traverser la zone de charge d'espace vers l'émetteur mais la plupart se recombinent en volume à cause de leur faible longueur de diffusion.



**Figure III.4 :** Densité des porteurs minoritaires en fonction de la profondeur de la base pour différentes valeurs de grandes longueurs d'onde :  
 $S_f = 10 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $S_b = F(\lambda)$ ,  $\mu = 1448 \text{ cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $D_0 = 26 \text{ cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ,  
 $H = 0.02 \text{ cm}$ ,  $B = 10^{-3} \text{ T}$ .



**Figure III.5 :** Densité des porteurs minoritaires en fonction de la profondeur de la base pour différentes valeurs de grandes longueurs d'onde :  
 $S_f = 10^6 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $S_b = F(\lambda)$ ,  $\mu = 1448 \text{ cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $D_0 = 26 \text{ cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ,  
 $H = 0.02 \text{ cm}$ ,  $B = 10^{-3} \text{ T}$ .

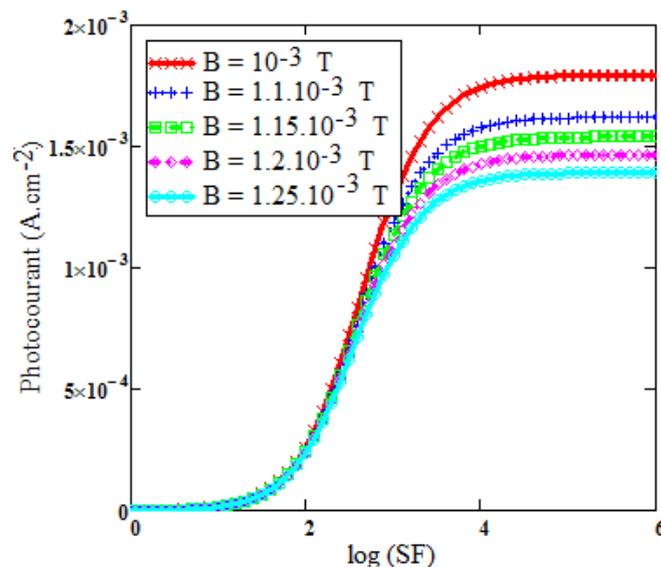
## III.2 : Etude de la densité de photocourant

### III.2.1 : Effet du champ magnétique sur la densité de photocourant

La densité de photocourant croît avec la vitesse de recombinaison à la jonction (SF) et présente deux paliers : l'un aux faibles valeurs de SF et l'autre aux grandes valeurs de SF. Le premier palier traduit une situation de circuit ouvert tandis que le second correspond au fonctionnement en court-circuit de la photopile.

Nous observons que la densité de photocourant diminue avec le champ magnétique. En effet, l'augmentation du champ magnétique est synonyme (d'après la figure III.6) de la diminution du gradient des porteurs à la jonction et par conséquent de la réduction des porteurs pouvant la traverser [11]. Cela pourrait expliquer la réduction de la densité de photocourant.

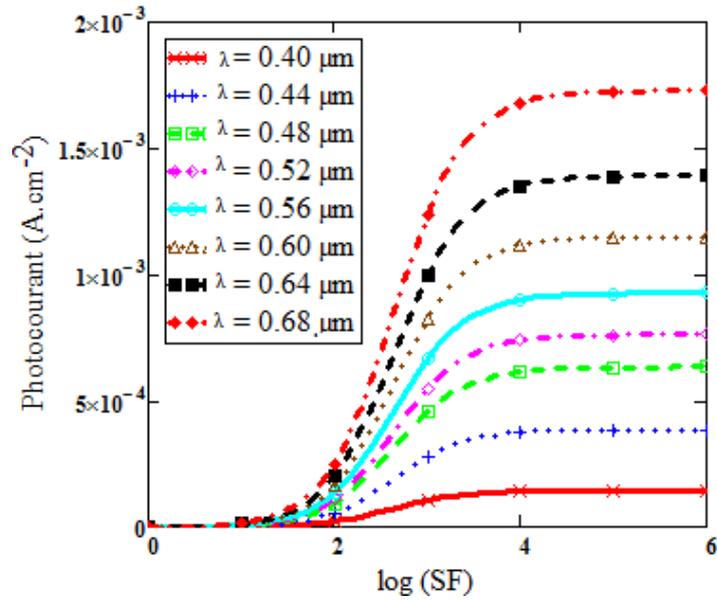
Le champ magnétique crée aussi des forces magnétiques qui dévient les porteurs photogénérés de leur trajectoire initiale vers les surfaces latérales, réduisant ainsi leur mobilité, leur diffusion et leur conduction dans la base de la photopile [20, 26].



**Figure III.6 :** Densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs du champ magnétique  $S_b = F(B)$ ,  $\lambda = 0.72 \mu\text{m}$ ,  $\mu = 1448 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $D_0 = 26 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $H = 0.02 \text{ cm}$ .

### III.2.2 : Effet des faibles longueurs d'onde sur la densité de photocourant

La figure III. 7 donne la variation de la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour des éclairagements de faibles longueurs d'onde.



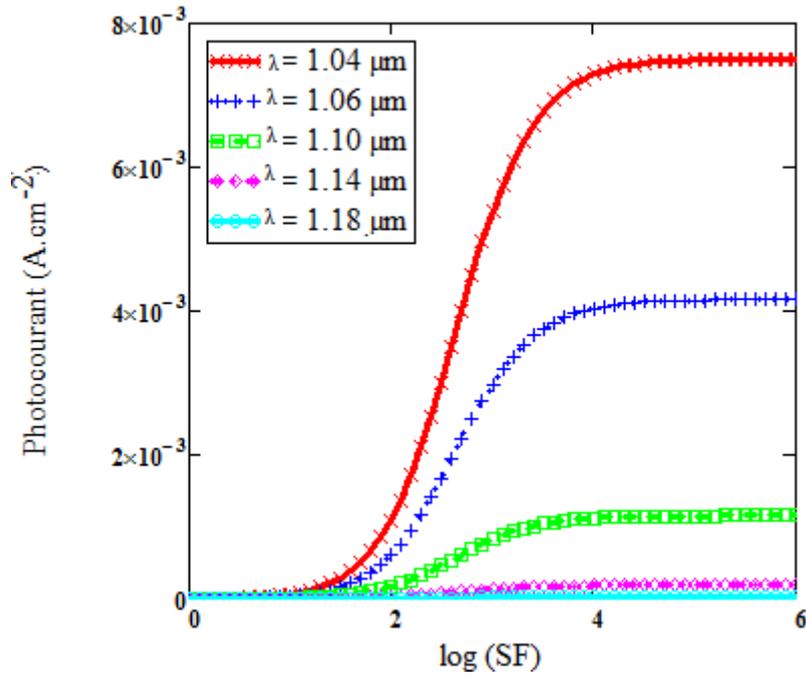
**Figure III.7 :** Densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la longueur d'onde  $S_b = F(\lambda)$ ,  $\mu = 1448 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $D_0 = 26 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $H = 0.02 \text{ cm}$ ,  $B = 10^{-3} \text{ T}$ .

Ces courbes montrent une génération de photocourant plus importante lorsque la longueur d'onde augmente.

A noter que dans cette gamme les porteurs photocréés peuvent atteindre la jonction du fait du coefficient d'absorption du silicium.

### III.2.3 : Effet des grandes longueurs d'onde sur la densité de photocourant

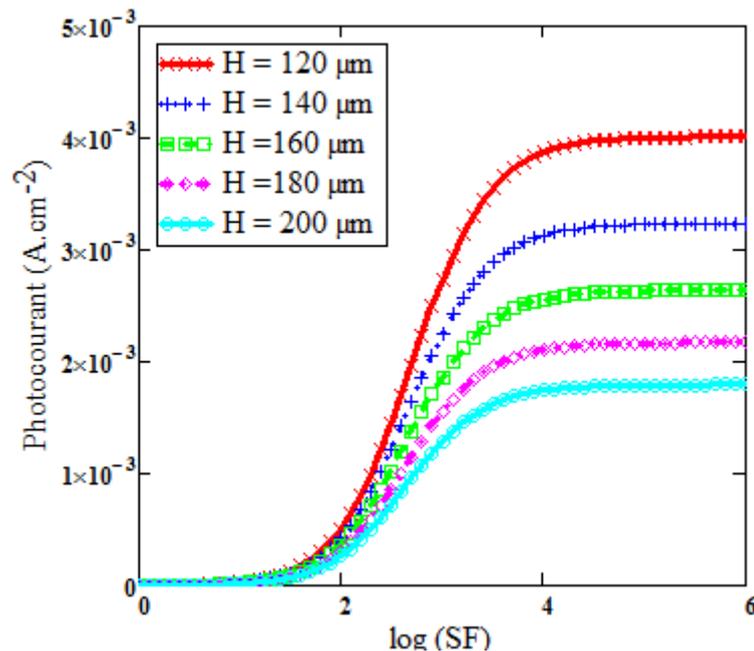
Sur la figure III.8, nous représentons le profil de la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de grandes longueurs d'onde.



**Figure III.8 :** Densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de grandes longueurs d'onde  $S_b = F(\lambda)$ ,  $\mu = 1448 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $D_0 = 26 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $H=0.02 \text{ cm}$ ,  $B = 10^{-3} \text{ T}$ .

Les courbes de la figure III.8 montre une diminution de la densité de photocourant lorsque la longueur d'onde augmente. Cette diminution est très élevée pour des longueurs d'onde supérieures à 1 μm. Cela est lié au fait que l'absorption diminue très fortement.

### III.2.4 : Effet de l'épaisseur de la base sur la densité de photocourant



**Figure III.9 :** Densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de l'épaisseur de la base  $Sb = F(H)$ ,  $\lambda = 0.72 \mu\text{m}$ ,  $\mu = 1448 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $Dn = 26 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $B = 10^{-3} \text{ T}$ .

En analysant la figure III.9, nous constatons que pour les faibles valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction  $SF$  ( $SF < 2.10^2 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ), c'est-à-dire lorsque la photopile est en circuit-ouvert, l'épaisseur de la base n'a presque pas d'effet sur la densité de photocourant.

En revanche, pour les grandes vitesses de recombinaison à la jonction, c'est-à-dire lorsque la photopile est en court-circuit, la densité de photocourant diminue quand l'épaisseur de la base augmente. Cela s'explique par l'augmentation du volume de la base lorsque l'épaisseur de la base croît. Les porteurs photogénérés auront plus de chance de se recombiner en volume, lorsque l'épaisseur de la base augmente. Aussi, les faibles épaisseurs de la base correspondent à une croissance de la densité des porteurs minoritaires. Par conséquent, l'influence des porteurs minoritaires semble être accentuée dans des photopiles de plus en plus épaisses du fait du volume plus important de la base conduisant donc à un plus grand nombre de porteurs minoritaires dans cette partie de la cellule, capable de se recombiner.

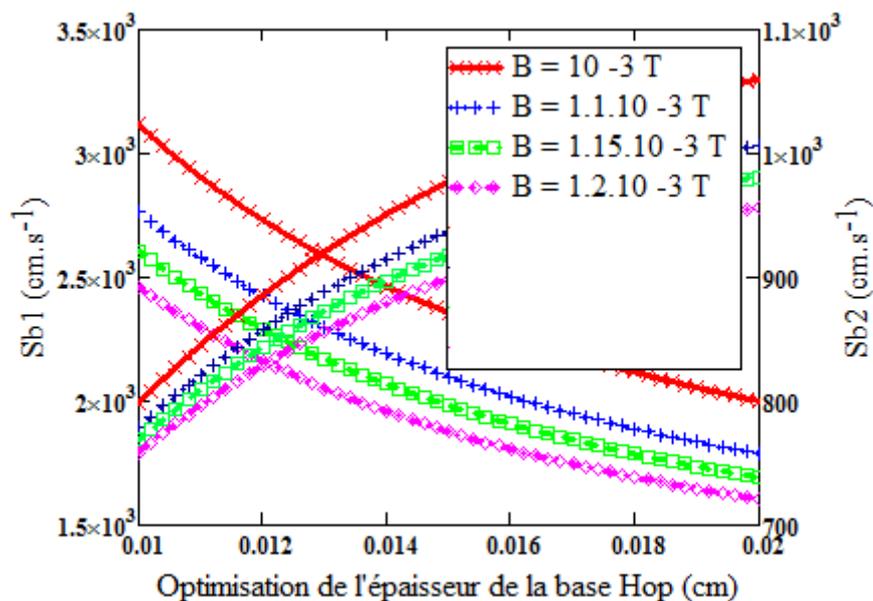
### III.3 : Etude de l'optimisation de l'épaisseur de la base pour quelques valeurs de longueur d'onde

Les figures III. 10, 11, 13, 14 présentent les profils des deux vitesses de recombinaison en face arrière Sb1 et Sb2 en fonction de l'épaisseur de la base de la photopile, pour différentes valeurs du champ magnétique et pour différentes valeurs de longueurs d'onde.

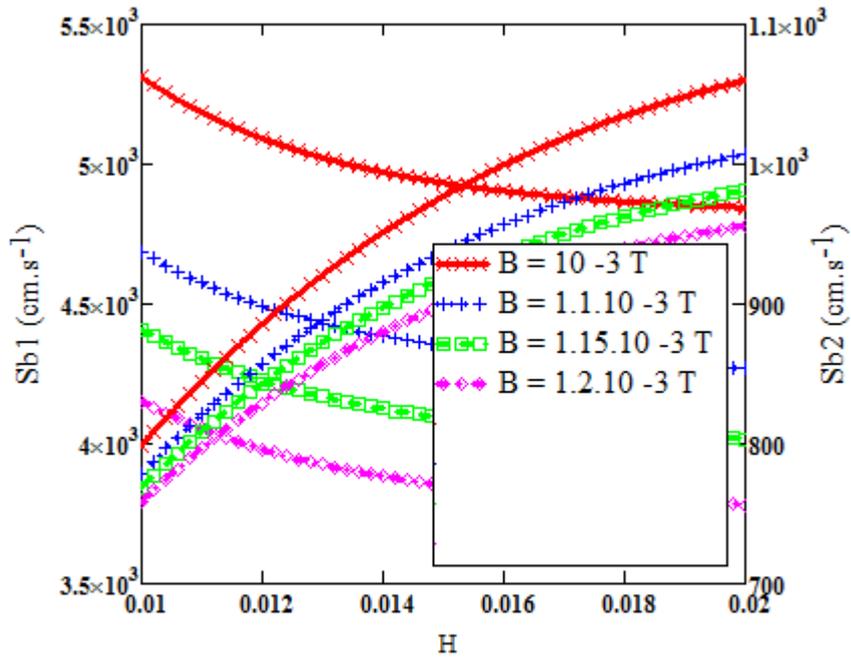
Les points d'intersection des courbes de Sb1 et Sb2 permettent d'obtenir l'épaisseur optimale de la base d'une photopile éclairée par la face arrière avec une lumière monochromatique, pour différentes valeurs du champ magnétique. Pour chaque point d'intersection, nous faisons une projection sur l'axe des abscisses pour relever la valeur optimale de l'épaisseur, à l'aide de notre logiciel de travail.

Cela nous a permis d'obtenir les valeurs optimales de l'épaisseur pour différentes valeurs du champ magnétique et selon une valeur de longueur d'onde donnée. Ces valeurs relevées sont dans les tableaux 1, 2, 4 et 5.

Nous notons que quel que soit la longueur d'onde choisie, l'épaisseur optimale de la base de la photopile diminue lorsque le champ magnétique croît. Donc, lorsque la photopile doit fonctionner dans des zones où il règne un fort champ magnétique, elle doit être conçue avec une épaisseur plus faible.



**Figure III.10** : Vitesse de recombinaison en face arrière Sb1 et Sb2 en fonction de l'épaisseur de la base pour différentes valeurs du champ magnétique, avec  $\lambda = 0.98 \mu\text{m}$



Optimisation de l'épaisseur de la base Hop (cm)

**Figure.III.11** : Vitesse de recombinaison en face arrière Sb1 et Sb2 en fonction de l'épaisseur de la base pour différentes valeurs du champ magnétique, avec  $\lambda = 0.88 \mu\text{m}$

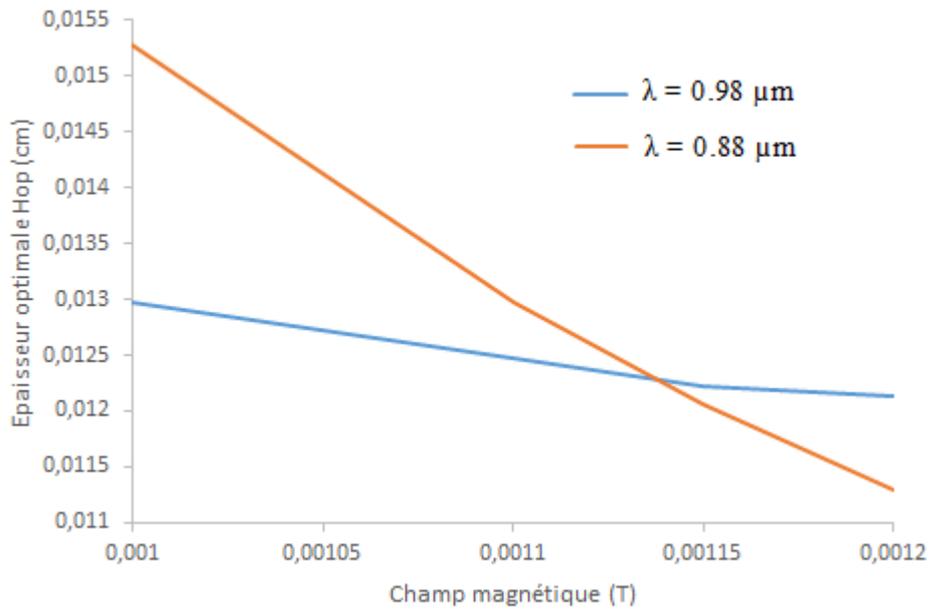
**Tableau III. 1** : Valeurs optimales de l'épaisseur de la base pour  $\lambda = 0.98 \mu\text{m}$

Hop (cm)	0.01298	0.01248	0.01222	0.01214
B (T)	0.00100	0.00110	0.00115	0.00120

**Tableau III.2** : Valeurs optimales de l'épaisseur de la base pour  $\lambda = 0.88 \mu\text{m}$

Hop (cm)	0.01528	0.01298	0.01206	0.0113
B (T)	0.00100	0.00110	0.00115	0.0012

A la figure III.12, nous présentons les profils de l'épaisseur optimale en fonction du champ magnétique pour deux grandes longueurs d'onde.



**Figure : III.12 :** Epaisseur optimale en fonction du champ magnétique

Les courbes de la figure : III.12 sont modélisées en fonction du champ magnétique par l'équation suivante :

$$Hop_{\lambda \text{ grandes}}(B) = \beta \cdot B + \psi$$

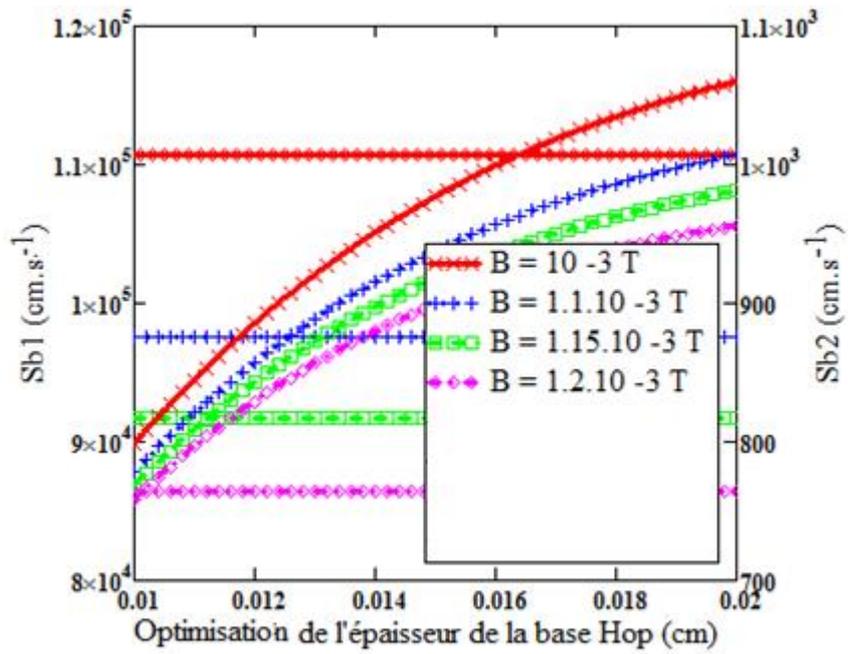
$\beta$  correspond à la pente et  $\psi$  ordonnée à l'origine.

Les valeurs de  $\beta$  et  $\psi$  sont donnés par le tableau 3.

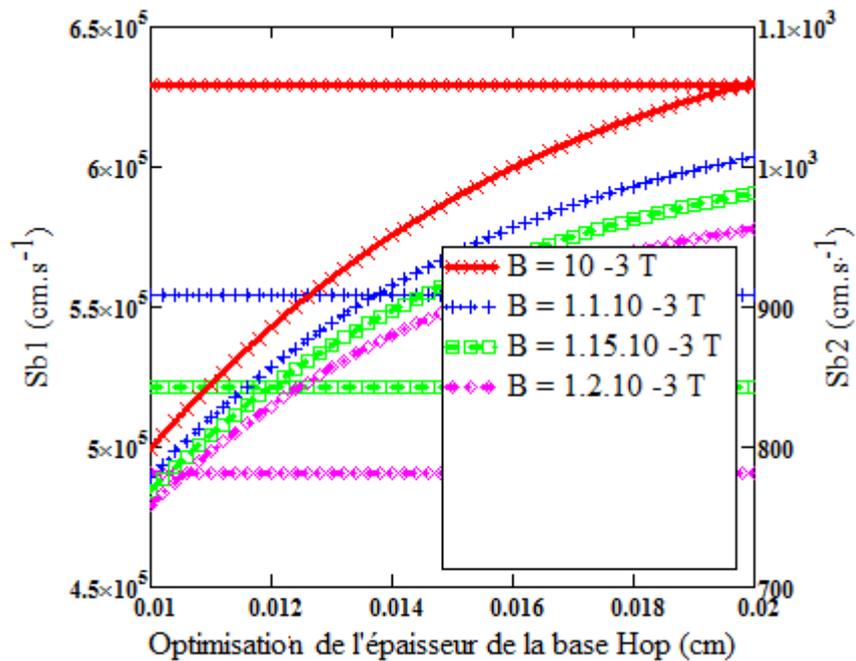
**Tableau : III.3 :** Valeurs de  $\beta$  et  $\psi$  des différentes zones du champ magnétique pour de grandes longueurs d'onde.

Longueur d'onde ( $\mu\text{m}$ )	Zone	$\beta$	$\psi$ (cm)
0,98	B (tesla) < 0,000115	-5	0,01798
	B (tesla) > 0,000115	-1,6	0,01406
0,88	B (tesla) < 0,00011	-23	0,03828
	0,0011 < B (tesla) < 0,000115	-18,4	0,03376
	B (tesla) < 0,000115	-15,2	0,02954

Nous remarquons dans ces tableaux une diminution de l'épaisseur optimum et très marquées pour 0,88 $\mu\text{m}$ . Cependant l'épaisseur optimale à l'origine la plus petite est obtenue avec 0,98 $\mu\text{m}$ .



**Figure.III.13** : Vitesse de recombinaison à la face arrière Sb1 et Sb2 en fonction de l'épaisseur de la base pour différentes valeurs du champ magnétique, avec  $\lambda = 0.52 \mu\text{m}$



**Figure.III.14** : Vitesse de recombinaison à la face arrière Sb1 et Sb2 en fonction de l'épaisseur de la base pour différentes valeurs du champ magnétique, avec  $\lambda = 0.42 \mu\text{m}$

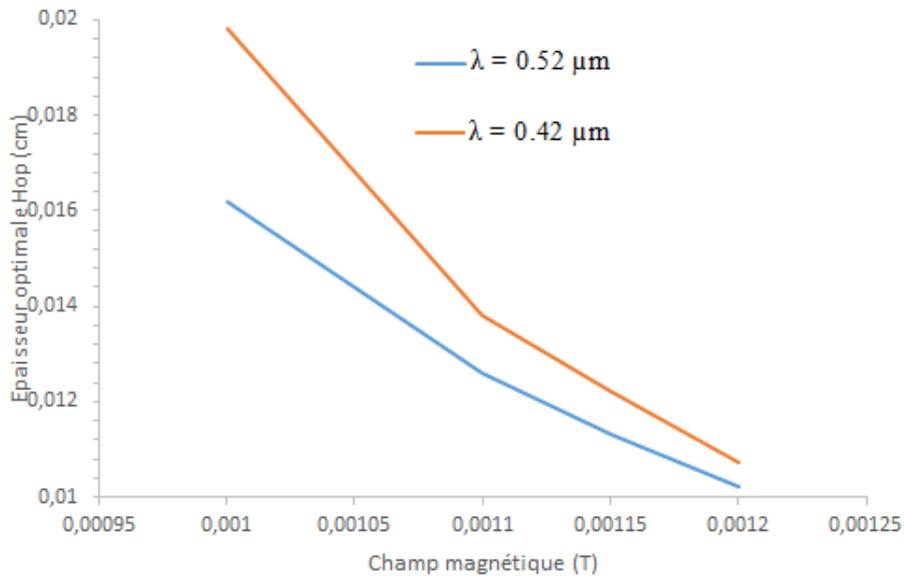
**Tableau III.4 :** Valeurs optimales de l'épaisseur de la base pour  $\lambda = 0.52 \mu\text{m}$

Hop (cm)	0.0162	0.0126	0.01132	0.0102
B (T)	0.0010	0.0011	0.00115	0.0012

**Tableau III.5 :** Valeurs optimales de l'épaisseur de la base pour  $\lambda = 0.42 \mu\text{m}$

Hop (cm)	0.0198	0.01382	0.01220	0.01072
B (T)	0.0010	0.001100	0.00115	0.001200

A la figure III.15, nous présentons les profils de l'épaisseur optimale en fonction du champ magnétique pour deux faibles longueurs d'onde.



**Figure III.15:** Epaisseur optimale Hop en fonction du champ magnétique

Les courbes de la figure : III.15 sont modélisées en fonction du champ magnétique par l'équation suivante :

$$Hop_{\lambda \text{ faibles}}(B) = \beta \cdot B + \psi$$

$\beta$  correspond à la pente et  $\psi$  ordonnée à l'origine.

Les valeurs de  $\beta$  et  $\psi$  sont donnés par le tableau 3.

**Tableau : III.6 :** Valeurs de  $\beta$  et  $\psi$  des différentes zones du champ magnétique pour de faibles longueurs d'onde.

Longueur d'onde ( $\mu\text{m}$ )	Zone	$\beta$	$\psi$ (cm)
0,52	B (tesla) < 0,00011	-36	0,0522
	B (tesla) > 0,00011	-22,4	0,03708
0,42	B (tesla) < 0,00011	-59,8	0,0796
	B (tesla) > 0,00011	-29,6	0,04624

Nous notons que quel que soit le champ magnétique, l'épaisseur optimale de la base de la photopile diminue avec l'augmentation du champ magnétique. Cette diminution est plus importante avec les faibles longueurs d'onde.

En effet, pour une longueur d'onde égale à  $0.42 \mu\text{m}$ , l'épaisseur optimale de la base diminue fortement en passant de  $0.02 \mu\text{m}$  à  $0.0105 \mu\text{m}$ , pour des valeurs de champ variant de  $0.001 \text{ T}$  à  $0.0012 \text{ T}$ .

### **Conclusion**

Dans cette partie, nous avons analysé l'effet du champ magnétique, de la longueur d'onde et de l'épaisseur de la base sur la densité des porteurs minoritaires en excès dans la base et la densité de photocourant.

En traçant le profil des deux vitesses de recombinaison en face arrière, obtenues à partir de la modélisation, en fonction de l'épaisseur de la base pour différentes valeurs de champ magnétique, et de longueurs d'onde, nous avons pu déterminer les épaisseurs optimales de la base de la photopile lorsqu'elle est éclairée par la face arrière, pour différentes valeurs de champs magnétique appliqué et pour différentes longueurs d'onde.

Nous notons que quel que soit la longueur d'onde, l'épaisseur optimale de la base diminue lorsque le champ magnétique augmente

En fin, une corrélation entre cette épaisseur optimale de la base et le champ magnétique pour différentes longueur d'onde est établie.

## CONCLUSION GENERALE

Dans ce travail, nous avons fait une étude en modélisation à une dimension d'une photopile bifaciale au silicium polycristallin en régime statique sous l'éclairement monochromatique par la face arrière. L'établissement de l'équation de continuité simplifiée sous la forme d'une équation différentielle à coefficient, en respectant un certain nombre de considération comme la non polarisation et l'existence d'un champ magnétique externe est faite.

A partir la résolution de l'équation de continuité, nous obtenons l'expression de la densité de porteurs minoritaires. La densité de photocourant a été établie à partir de cette dernière. Partant de l'expression de la densité de photocourant, nous avons obtenu celles de la vitesse de recombinaison en face arrière,  $S_{b1}$  et  $S_{b2}$ .

Ensuite, une étude de la densité des porteurs minoritaires et de la densité de photocourant est faite respectivement en fonction de la profondeur de la base et de la vitesse de recombinaison de porteurs minoritaires à la jonction, pour des gammes de longueurs d'ondes faibles et élevées, pour différents champ magnétique et épaisseur de la base.

Les résultats montrent que, pour notre type d'éclairement, la densité des porteurs minoritaires en excès dans la base est plus importante à la face arrière. Aussi, la longueur d'onde, le champ magnétique et l'épaisseur de la base influence les paramètres de la photopile, à savoir la densité de porteurs minoritaires de charge et la densité de photocourant.

Les profils des vitesses de recombinaisons en face arrière en fonction du champ magnétique, nous a permis de trouver les épaisseurs optimales de la base de la photopile, en minimisant les recombinaisons en face arrière, et ce pour différentes longueurs d'onde.

Une corrélation de cette épaisseur optimale de la base en fonction du champ magnétique pour différentes longueurs d'onde est aussi effectuée. Elle permet de dire que l'épaisseur optimale de la base de la photopile diminue avec l'augmentation du champ magnétique et qu'elle est plus grande lorsque les longueurs d'ondes diminuent.

Il serait intéressant pour la suite de tenir compte de l'éclairement simultané des deux faces pour optimiser l'épaisseur de la base. L'étude de cette optimisation de la base pourrait être faites lorsque la photopile en maintenue en régime dynamique transitoire.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] GIEC (Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat), 2001.
- [2] OBSERV'ER, Baromètre du Solaire Photovoltaïque, Système Solaires, (Avril 2004), N° 160, pp.68-83.
- [3] M. A. Green, K. Emery, D. L. King, Y. Hishikawa, and W. Warta, 'Solar Cell Efficiency Tables (version 28)', Progress in Photovoltaics: Research and Applications, vol. 14 (2006) pp. 455–461.
- [4] L. Remache (Mai 2011), Silicium poreux passivé par des nitrures et des oxydes de silicium. Thèse, Application Revêtement Anti Refléchissants, pp9-10
- [5] G. Sissoko, E. Nanema, Y. L. B. Bocande, A. L. Ndiaye, A.L. Ndiaye, (1996) "Light spectral effect on recombination parameters of silicon solar cell", In Proceedings World Renewable Energy Congress, pp. 1594-1597.
- [6] G. Sissoko, C. Museruka, A. Correa, I.Gaye, A.L. Ndiaye, (1996), Light spectral effect on recombination parameters of silicon solar cell, In Proceedings World Renewable Energy Congress, 15-21 June, Denver, USA, part 3, pp. 1487-1490.
- [7] N. M. M. O. Mohamed, O. Sow, S. Gueye, Y. Traore, I. Diatta, A. Thiam, M. A. Ba, R. Mane, I. Ly and G.Sissoko, (2019), Influence of Both Magnetic Field and Temperature on Silicon Solar Cell Base Optimum Thickness Determination, Journal of modern physics, pp.1596-1605
- [8] G. Diop, H. Y. Ba, N. Thiam, Y. Traore, B. Dione, M. A. Ba., P. Diop, M. S. Diop , O.Mballo and G.Sissoko,(2020), Base Thickness Optimization of a Vertical serie Junction Silicon Solar Cell Under Magnetic Field by the Concept of Back Surface Recombinaison Velocity of Minority Carrier, ARPN Journal of Engineering And Applied Sciences, pp.4077-4085
- [9] M. S. Diop., H. Y. Ba, N. Thiam, I. Diatta, Y. Traore, M. L. Ba, E. H. Sow., O. Mballo, and G. Sissoko, (2019), Surface Recombination Concept as Applied to Determinate Silicon Solar Cell Base Optimum Thickness with Doping Level Effect. World Journal of Condensed Matter Physics, 9, pp. 102-111.  
<https://doi.org/10.4236/wjcmp.2019.94008>
- [10] M. L. Ba, N. Thiam, M. Thiame, Y. Traore, M. S. Diop, M. Ba, C. T. Sarr, M., Wade and G. Sissoko, (2019), Base Thickness Optimization of a (n+-p-p+) Silicon Solar Cell in Static Mode under Irradiation of Charged Particles. Journal of El ectromagnetic Analysis and Applications , 11, pp. 173-185.

<https://doi.org/10.4236/jemaa.2019.1110012>

- [11] Y. Traore, N. Thiam, M. Thiame, A Thiam, M. L. Ba, M. S. Diouf, I. Diatta, O. Mballo, El H Sow, M. Wade and G. Sissoko, (2019), AC Recombination Velocity in the Back Surface of a Lamella Silicon Solar Cell under Temperature. *Journal of modern physics*, pp.1235-1246
- [12] O. Sow, M. L. Ba, H. Y. Ba, M. A. O. El Moujtaba, Y. Traore, M. S. Diop, H. Lemrabott, M. Wade, G. Sissoko, (2019), Shunt Resistance Determination in a Silicon Solar Cell: Effect of Flow Irradiation Energy and Base Thickness, *Journal of electromagnetic Analysis and Application*, pp.203-216
- [13] D. L. Meier, Jeong-Mo Hwang, R. B. Campbell. (1988) *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. ED-35, No.1, pp.70 – 78,
- [14] A. Hubner, A. Gaborle, and R. Hezel, (Munich, 2001), 20% Efficient Bifacial Silicon Solar Cells, *14<sup>th</sup> European PVSEC*, pp 1796 – 1798.
- [15] M. Bashahu and A. Habyarimana, (1995), Review and test of methods for determination of the solar cell series resistance. *Renewable Energy*, Vol. 6, pp. 129-138,.
- [16] B. Lakehal, (2009), Etude des propriétés électriques d'une photopile à base d'une structure Schottky, Mémoire de magister en microélectronique, Université de Batna.
- [17] H. Mathieu et H. Fanet, (2009), *Physique des semiconducteurs et des composantes électroniques 6eme éditions, Cours et exercices corrigés*, édition Dunod Paris, ISBN 978-2-10-054134-8
- [18] Mouhamadou Mousliou DIALLO, Seni TAMBA, Boureima SEIBOU, Mohamed Lamine OULD CHEIKH, Ibrahima DIATTA, El Hadji NDIAYE, Youssou TRAORE, Cheikh Tidiane SARR, Gregoire SISSOKO, (2017), Impact of irradiation on the surface recombination velocity of a back side monochromatic illuminated bifacial silicon solar cell under frequency modulation, *Journal of Scientific and Engineering Research*, 4(1), pp. 29-40
- [19] F. I. Barro, S. Mbodji, M. Ndiaye, A. S. Maiga and G. Sissoko, (2001), "Bulk and surface recombination parameters measurement in silicon double sided surface field solar cell under constant white bias light," *Proc. 17<sup>th</sup> European PVSEC Munich 36*, pp. 368-371.
- [20] R. Mané, H. L. Diallo, H. Y. Ba, I. Diatta, Y. Traoré, Ch. T. Sarr and G. Sissoko, (2018), Influence of both magnetic field and temperature on silicon solar cell photogenerated current, *Journal of scientific and engineering research*, pp. 2394-2630
- [21] M. Gueye, H. L. Diallo., M. K. A. Moustapha, Y. Traore, I. Diatta, and G. Sissoko, (2018), Ac Recombination Velocity in a Lamella Silicon Solar Cell, *World Journal of Condensed Matter Physics*, 8, pp. 185-196.

- [22] J. Ducas, (1994), *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 32, pp. 71-88.
- [23] M. S. Sze, (1981), “*Physics of semiconductor Devices*”, 2nd Edition, Wiley Interscience, New York (USA), p.145
- [24] G. Sissoko., E. Nanéma., A. Corróa., P. M. Biteye, M. Adj. and A. L. Ndiaye, (1998). Silicon Solar Cell Recombination Parameters Determination Using the Illuminated I-V Characteristic. *Renewable Energy*. 3, pp. 1848-1851.
- [25] M. Zougrana, I. LI, B. Zouma, F. I. Barro, G. Sissoko,(2007), 3D study of bifacial silicon solar cell under intense light concentration and under external constant magnetic field: effect of magnetic field and base depth on excess minority carrier generation. *J. Sci.*, 7(4), pp.73 – 81.
- [26] A. Diao, N.Thiam, M.Zougrana, G.Sahin, M.Ndiaye and G. Sissoko, (2014), Diffusion Coefficient in Silicon Solar Cell with Applied Magnetic Field and under Frequency: Electric Equivalent Circuits, *World Journal of Condensed Matter Physics*, 4, pp. 84-92.
- [27]J. Gervais,(1993), Mesure du coefficient d’absorption optique dans le silicium multicristallin de type P pour photopiles solaires. *Journal de Physique III*, EDP Sciences, 3 (7), pp. 1489-1495.