

# UNIVERSITE ASSANE SECK DE ZIGUINCHOR



UFR Sciences et Technologies

Ecole Doctorale Sciences, Technologies et Ingénierie (ED-STI)

Laboratoire de Chimie et de Physique des Matériaux (LCPM)

## THESE DE DOCTORAT UNIQUE

Présentée par :

**Moussa CAMARA**

**Spécialité** : Matériaux pour l'Electronique et l'Energie/Photovoltaïque

**Spécialisation** : Sciences des matériaux et Applications

---

**Sujet : Etude à trois dimensions d'une photopile au silicium polycristallin : Effet du taux de dopage, de la taille des grains et des vitesses de recombinaison aux joints de grain.**

---

Sous la direction de : Pr Grégoire SISSOKO

Soutenue publiquement le 26 / 02 / 2022 l'université Assane Séck de Ziguinchor devant le jury composé de :

Jury	Nom et prénom(s)	Grade	Etablissement
Président	CAMARA Moctar	Professeur Titulaire	UFR-ST / UASZ
Rapporteurs	MBODJI Senghane	Professeur Titulaire	UFR SATIC / UADB
	DIAGNE Issa	Professeur Titulaire	FST / UCAD
	SOW Ousmane	Maître de conférences	IUT / UT
Examineurs	NDIAYE Ababacar	Maitre de conférences	ESP/UCAD
	THIAME Moustapha	Maître de conférences	UFR-ST / UASZ
Directeur(s)	SISSOKO Grégoire	Professeur Titulaire	FST / UCAD

## **DEDICACES**

A toute ma famille,

Ma mère, Mon père, Mon grand frère feu Malamine  
Sima Camara, Mes frères et sœurs...

Mes tuteurs feu S. Badio, W. Camara, D. Badio, G.  
Badio et tous leurs enfants.

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 Directeur de Thèse, Monsieur **Grégoire SISSOKO** Professeur Titulaire des universités de classe exceptionnel sous l'ordre national du lion à la Faculté des Sciences et Techniques de L'U.C.A.D du Département de physique et directeur du groupe international de recherche en énergie renouvelable. Vous étiez mon interlocuteur privilégié tout le long de ce travail. Vos conseils et vos encouragements ont été très bénéfiques pour moi.

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements aux membres du jury : le président du jury **Pr Moctar CAMARA**, les rapporteurs **Pr Senghane Mbodji**, **Pr Ousmane SOW** et **Pr Issa DIAGNE** et les examinateurs **Pr Moustapha THIAME** et **Pr Ababacar NDIAYE** 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, surtout Sada TRAORE, Abraham SAMBOU, Abdourahmane DIALLO, Omar. Kata FAYE, Abdou. Karim TAMBIDOU et Ismaila BIAYE et à ceux du LOSEC.

J'exprime mes profonds remerciements aux docteurs Moussa Touré, Philippe B. Himbane, Rémi Dioukane et à tous les Doctorants au laboratoire pour leurs conseils, qui m'ont été très utiles tout au long de l'élaboration de ce travail. 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.

Je remercie toute la famille du professeur **Grégoire SISSOKO**, et Docteur **Moustapha THIAME** pour leurs hospitalités.

À Dakar, j'ai eu la chance de côtoyer des personnes extraordinaires: Bousso FAYE (Mme GUEYE), Sécou GUEYE, Docteur Ibrahima DIATTA, Docteur Youssou TRAORE. Je veux les remercier pour leur indispensable et infaillible soutien et accompagnement tout au long de mes voyages.

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.

Je remercie vivement tous les membres du groupe GIRER mes camarades chercheurs du Laboratoire des Semi-conducteurs et d'Energie Solaire de 'Université Cheikh Anta Diop de Dakar (L.A.S.E.S) et de l'école polytechnique de THIES avec qui j'ai eu la chance et le plaisir de travailler.

Et pour finir, merci à mes parents, à mes frères et sœurs, ainsi qu'à Mamadou CAMARA, Tidiane CISSE, Ibrahima sol CISSE, Alassane DIEDHIOU, Ibrahima SABALY, Omar Kata FAYE, Saloum FATY, Ibrahima SONKO, Bacarri Dembo SONKO, Oumy SAMBOU, Souleyemane SYLLA, Angel Ségga SENGHOR pour leur soutien inébranlable depuis toutes ces années.

## Résumé

Nous avons présenté dans ce travail une étude théorique à trois dimensions d'une photopile monofaciale au silicium polycristallin en régime statique, sous éclairage polychromatique. Dans cette étude de la photopile, nous avons d'abord cherché l'effet du taux de dopage de la base, et de la taille des grains sur quelques paramètres tels que le coefficient de diffusion effective ( $D_{kj}$ ), la longueur de diffusion effective et de la durée de vie des porteurs minoritaires. L'étude révèle que le coefficient de diffusion effective, la longueur de diffusion et la durée de vie des porteurs minoritaires diminuent avec l'augmentation du taux de dopage de la base. L'augmentation de la taille des grains entraîne diminution du coefficient de diffusion effective et une augmentation la longueur de diffusion effective. L'exploitation des profils du coefficient  $D_{kj}$  en fonction du taux de dopage de la base pour différentes tailles de grains a permis de déterminer les maxima du  $D_{kj}$  pour différentes tailles de grains et d'établir une corrélation avec la taille des grains. Après l'étude des effets du taux de dopage et de la taille des grains sur ces paramètres, l'expression de la densité des porteurs minoritaires a été établie. Son profil est représenté en fonction du taux de dopage de la base respectivement pour différentes tailles de grain et épaisseurs de la base.

Nous avons montré que la densité de porteurs minoritaires augmente avec les faibles niveaux de dopage de  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$  à  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . Au-delà de cet intervalle, la valeur de la densité de porteurs minoritaires dans la base diminue considérablement avec le taux de dopage de la base. Egalement la densité des porteurs minoritaires améliorée lors du dopage de la base atteint un maximum qui correspond à un taux de dopage optimal de la base. Ce maximum augmente lorsque la taille des grains et l'épaisseur de la base croient. Par contre le taux de dopage optimal augmente légèrement avec la taille de grain alors qu'il diminue lorsque l'épaisseur de la base est grande. Ensuite nous avons établi une corrélation entre le taux de dopage optimal et la taille de grain d'une part et d'autre part entre le taux de dopage optimal et l'épaisseur de la base.

L'étude de la densité des porteurs minoritaires dans la base a permis de trouver les expressions de la densité de photocourant et de la phototension dont les profils sont tracés en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction. Nous avons observé que :

- ❖ les grandeurs électriques telles que la densité de photocourant et le courant de court-circuit diminuent lorsque le taux de dopage de la base augmente tandis qu'ils croient avec la taille de grain et l'épaisseur de la base ;
- ❖ quant aux grandeurs électriques phototension et tension en circuit ouvert, nous avons noté qu'elles croient fortement avec le taux de dopage de la base, la taille de grain, mais très faiblement avec l'épaisseur de la base.

La caractéristique I-V nous a permis de déterminer quelques valeurs de la tension de circuit ouvert et du courant de court-circuit pour différents valeurs du taux de dopage et ainsi de confirmer les variations de ces grandeurs électriques avec ces derniers.

Nous avons aussi tracé les profils de la puissance en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction et en fonction de la tension. L'étude de la puissance électrique de la photopile s'est avérée très importante car elle a permis la détermination des valeurs des puissances maximales  $P_{max}$  et des vitesses de recombinaison à la jonction correspondantes aux points de puissances maximales ( $S_{fmax}$ ) pour différentes valeurs du taux de dopage de la base.

Nous nous sommes intéressés aussi au rendement de conversion photovoltaïque et au facteur de forme. Les résultats obtenus montrent que les faibles taux de dopage donnent les meilleurs facteurs de formes et rendements.

Nous avons également étudié l'effet du taux de dopage, de la taille de grain et de l'épaisseur de la base sur les vitesses de recombinaison intrinsèques à la jonction et à la face arrière. Il ressort de cette étude qu'un taux de dopage de la base faible ( $10^{15} \text{ cm}^{-3}$  et  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ) s'avère bénéfique lorsque les recombinaisons en surface limitant la base sont élevées. Ces dernières diminuent pour des tailles de grains élevés. Quant à l'épaisseur de la base, elle devrait être contrôlée car son augmentation entraîne l'élévation des recombinaisons à la surface arrière.

La caractéristique I-V nous a permis d'établir les expressions des résistances série et shunt suivant les deux modes de fonctionnement de la photopile (situation de circuit ouvert et de court-circuit). Les profils de ces résistances ont été étudiés en fonction du taux de dopage, de la taille de grain et de l'épaisseur de la base. Nous notons une augmentation des résistances shunt et série avec le taux de dopage. Il ressort aussi que la résistance série diminue avec la taille de grain et l'épaisseur de la base alors que la résistance shunt augmente avec ces dernières. Quant à la capacité de la photopile, elle augmente avec la taille de grain, l'épaisseur de la base et les faibles taux de dopage (de  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$  à  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ).

**Mots clés : Photopile-Silicium-Régime statique-Taux de dopage-Taille de grain.**

## Abstract

In this work, we have presented a three-dimensional theoretical study of a monofacial polycrystalline silicon photocell in the static regime, under polychromatic illumination. In this study of the cell, we first investigated the effect of the doping rate of the base and the grain size on some parameters such as the effective scattering coefficient ( $D_{kj}$ ), the effective scattering length and the lifetime of the minority carriers. The study reveals that the effective diffusion coefficient, the diffusion length and the lifetime of minority carriers decrease with the increase of the base doping rate. The increase of the grain size leads to a decrease of the effective diffusion coefficient and an increase of the effective diffusion length. The exploitation of the profiles of the  $D_{kj}$  coefficient as a function of the doping rate of the base for different grain sizes allowed to determine the maxima of the  $D_{kj}$  for different grain sizes and to establish a correlation with the grain size. After studying the effects of doping rate and grain size on these parameters, the expression of the minority carrier density was established. Its profile is represented as a function of the doping rate of the base respectively for different grain sizes and thicknesses of the base.

We have shown that the minority carrier density increases with low doping levels from  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$  to  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . Beyond this range, the value of minority carrier density in the base decreases significantly with the doping level of the base. Also the density of minority carriers improved during the doping of the base reaches a maximum which corresponds to an optimal doping rate of the base. This maximum increases when the grain size and the thickness of the base increase. On the other hand, the optimal doping rate increases slightly with the grain size while it decreases when the thickness of the base is large. Then we established a correlation between the optimal doping rate and the grain size on the one hand and on the other hand between the optimal doping rate and the thickness of the base.

The study of the density of minority carriers in the base allowed us to find the expressions of the photocurrent density and the photovoltage whose profiles are plotted as a function of the recombination rate at the junction. We observed that:

- ❖ electrical quantities such as photocurrent density and short-circuit current decrease when the doping rate of the base increases while they increase with the grain size and the thickness of the base;
- ❖ as for the electrical quantities photovoltage and open circuit voltage, we noted that they increase strongly with the doping rate of the base, the grain size, but very weakly with the thickness of the base.

The I-V characteristic allowed us to determine some values of the open circuit voltage and the short circuit current for different values of the doping rate and thus to confirm the variations of these electrical quantities with the latter.

We have also plotted the power profiles as a function of the recombination rate at the junction and as a function of the voltage. The study of the electrical power of the photocell was very important because it allowed the determination of the values of the maximum powers  $P_{max}$  and the junction recombination velocities corresponding to the maximum power points ( $S_{fmax}$ ) for different values of the doping rate of the base.

We were also interested in the photovoltaic conversion efficiency and the form factor. The results obtained show that low doping rates give the best form factors and efficiencies.

We also studied the effect of doping rate, grain size and base thickness on the intrinsic recombination rates at the junction and backside. It appears from this study that a low base doping rate ( $10^{15} \text{cm}^{-3}$  and  $10^{17} \text{cm}^{-3}$ ) is beneficial when the base limiting surface recombinations are high. These recombinations decrease for high grain sizes. As for the thickness of the base, it should be controlled because its increase leads to the elevation of recombinations at the back surface.

The I-V characteristic allowed us to establish the expressions of the series and shunt resistances according to the two modes of operation of the solar cell (open circuit and short circuit situation). The profiles of these resistances were studied as a function of the doping rate, the grain size and the thickness of the base. We note an increase of the shunt and series resistances with the doping rate. It also appears that the series resistance decreases with the grain size and the thickness of the base while the shunt resistance increases with the latter.

As for the capacitance of the solar cell, it increases with the grain size, the thickness of the base and the low doping rates (from  $10^{15} \text{cm}^{-3}$  to  $10^{17} \text{cm}^{-3}$ ).

**Keywords: Solar Cell- Silicon-Static Regime-Doping Rate-Grain Size.**



## Table des matières

<b>Dédicaces</b> .....	<b>i</b>
<b>Remerciements</b> .....	<b>ii</b>
<b>Résumé</b> .....	<b>iv</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>vi</b>
<b>Sommaire</b> .....	<b>viii</b>
<b>Nomenclatures</b> .....	<b>xiii</b>
<b>Liste des figures</b> .....	<b>xiii</b>
<b>Liste des tableaux</b> .....	<b>xix</b>
<b>Introduction générale</b> .....	<b>1</b>
<b>Chapitre I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE</b> .....	<b>4</b>
Introduction.....	6
I.1 : Les semi-conducteurs.....	6
I.2 : Principe de préparation.....	7
I.3 : Dopage des semi-conducteurs.....	7
I.3.1 : Rôle du dopage .....	7
I.3.1.1 : Les types de dopage.....	7
I.3.1.2 : Les critères de choix d'un dopage.....	9
I.3.2 : Silicium dopé N.....	10
I.3.3 : Silicium dopé P.....	10
I.3.4 : Formation de la zone de charge d'espace ZCE.....	11
I.3.5 : Fort dopage .....	12
I.3.5.1 : Rétrécissement de la bande interdite (Bandgap-Narrowing).....	12
I.3. 6: Techniques de dopage.....	13
I.3.6.1 : La diffusion thermique.....	14
I.3.6.2 : La croissance épitaxie.....	14
I.3.6.3 : L'implantation ionique.....	14
I.4 : Types de photopile.....	17
I.5 : Techniques de caractérisation.....	17
I.5.1 : Technique de caractérisation en régime statique.....	18
I.5.2 : Technique de caractérisation en régime dynamique.....	18
I.5.2.1 : Technique de caractérisation en régime dynamique fréquentiel.....	18
I.5.2.2 : Technique de caractérisation en régime dynamique transitoire.....	19
I.6 : Technique de modélisation.....	19

I.6.1 : Technique de modélisation pour le model unidimensionnel en régime statique.....	19
I.6.1.1 : Densité de porteurs minoritaires en excès dans la base.....	19
I.6.1.2 : Densité de photocourant.....	20
I.6.1.3 : Phototension.....	21
I.6.2: Technique de modélisation pour le model tridimensionnel en régime statique.....	21
I.6.2.1 : Densité de porteurs minoritaires en excès dans la base.....	21
I.6.2.2 : Densité de photocourant.....	23
I.6.2.3 : Phototension.....	23
I.7 : Effet de la taille de grain et de la vitesse de recombinaison aux joints de grain sur la densité de porteurs minoritaires de charge.....	24
I.8 : Effet de la taille de grain et de la vitesse de recombinaison aux joints de grain sur la densité de photocourant.....	25
I.9 : Effet de la taille de grain et de la vitesse de recombinaison aux joints de grain sur la phototension.....	25
I.10 : Résistance shunt.....	26
I.11 : Résistance série.....	27
Conclusion.....	30
<b>Chapitre II : ETUDE DE LA DENSITE DES PORTEURS MINORITAIRES DANS LA BASE.....</b>	<b>31</b>
Introduction.....	32
II.1 : Présentation de la photopile.....	32
II.2 : Taux de génération.....	35
II.3 : Equation de continuité.....	35
II.4 : Les conditions aux limites.....	37
II.5 : Etude des valeurs propres d'espaces de $C_k$ et $C_j$ .....	38
II.6 : Etude du coefficient de diffusion.....	41
II.7 : Etude du coefficient de diffusion effective $D_{kj}$ .....	42
II.8 : Etude de la durée de vie.....	44
II.9 : Etude de la longueur de diffusion effective des porteurs minoritaires.....	45
II.10 : Influence du taux de dopage de la base sur la densité de porteurs minoritaires.....	46
II.11 : Influence de la profondeur sur la densité de porteurs minoritaires.....	51
II.12 : Influences des épaisseurs suivant x et y sur la répartition de la densité de porteurs minoritaires.....	52
II.13 : Influence de l'épaisseur de la base sur la densité de porteurs minoritaires.....	54

Conclusion.....	56
<b>Chapitre III : ETUDE DE QUELQUES PARAMETRES ELECTRIQUES .....</b>	<b>58</b>
Introduction.....	59
III.1 : Etude de la densité de photocourant.....	59
III.1.1 : Influence de la vitesse de recombinaison à la jonction et du taux de dopage de la base sur la densité de photocourant.....	60
III.1.2 : : Influence de la vitesse de recombinaison à la jonction et de l'épaisseur de la base sur la densité de photocourant .....	61
III.1.3 : : Influence de la vitesse de recombinaison à la jonction et de la taille des grains sur la densité de photocourant .....	62
III.2 : Etude du courant de court-circuit.....	62
III.2.1 : Influence du taux de dopage de la base sur le courant de court-circuit pour différentes tailles de grain.....	63
III.2.2 : Influence de l'épaisseur de la base sur le courant de court-circuit.....	64
III.3 : Etude de la phototension.....	65
III.3.1 : Influence de la vitesse de recombinaison à la jonction du taux de dopage de la base sur la phototension .....	65
III.3.2 : Influence de la vitesse de recombinaison à la jonction et de la taille des grains sur la phototension.....	66
III.3.3 : Influence de la vitesse de recombinaison à la jonction et de l'épaisseur de la base sur la phototension.....	67
III.4 : Etude de la phototension en circuit-ouvert.....	67
III.4.1 : Influence du taux de dopage de la base et de la taille des grains sur la phototension en circuit-ouvert .....	68
III.4.2 : Influence de l'épaisseur de la base sur la phototension en circuit-ouvert.....	69
III.5 : Etude du courant de diode.....	70
III.5.1 : Influence du courant de diode en fonction du taux de dopage de la base pour différentes valeurs de la taille de grain.....	71
III.5.2 : Influence de l'épaisseur de la base sur le courant de diode .....	71
III.6 : Etude de la caractéristique courant-tension.....	72
III.7 : Etude de la puissance.....	73
III.7.1 : Influence du taux de dopage de la base sur la puissance de la photopile.....	74
III.7.2 : Influence de la taille de grain sur la puissance de la photopile.....	75
III.7.3 : Influence du taux de dopage de la base sur la caractéristique puissance-tension...	75
III.8 : Etude du facteur de forme.....	76

III.9 : Etude du rendement.....	77
<b>Conclusion.....</b>	<b>80</b>
<b>Chapitre IV : ETUDE DES VITESSES DE RECOMBINAISONS SURFACIQUES, DES RESISTANCES SERIE ET SHUNT ET DE LA CAPACITE DE LA PHOTOPILE.....</b>	<b>81</b>
Introduction.....	82
IV.1 : Etude de la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction.....	82
IV.1.1 : Influence du taux de dopage de la base sur la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction.....	82
IV.1.2 : Influence de l'épaisseur de la base sur la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction.....	84
IV.2 : Etude de la vitesse de recombinaison à la face arrière.....	85
IV.2.1 : Influence du taux de dopage de la base sur la vitesse de recombinaison à la face arrière.....	85
IV.2.2 : Influence de l'épaisseur de la base sur la vitesse de recombinaison à la face arrière.....	86
IV.3 : Etude de la résistance série.....	87
IV.3.1 : Influence du taux de dopage de la base sur la résistance série.....	88
IV.3.2 : Influence de l'épaisseur sur la résistance série.....	88
IV.4 : Etude de la résistance shunt.....	89
IV.4.1 : Influence du taux de dopage de la base sur la résistance shunt.....	91
IV.4.2 : Influence de l'épaisseur sur la résistance shunt.....	92
IV.5 : Etude de la capacité.....	92
IV.5.1 : Influences de la vitesse de recombinaison à la jonction et de la taille de grains sur la capacité.....	93
IV.5.2 : Influence de la vitesse de recombinaison à la jonction et du taux de dopage sur la capacité.....	94
IV.5.3 : Influence du taux de dopage sur la capacité.....	96
IV.5.4 : Influence du taux de dopage sur la capacité d'une photopile en court-circuit.....	98
IV.5.5 : Influence de l'épaisseur de la base sur la capacité.....	98
<b>Conclusion.....</b>	<b>101</b>
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>102</b>
<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>103</b>
<b>Annexe mathématique.....</b>	<b>111</b>

## NOMENCLATURES

$x$ (cm)	Abscisse dans le grain, à la profondeur $z$
$y$ (cm)	Ordonnée dans le grain, à la profondeur $z$
$z$ (cm)	Profondeur dans la base, comptée à partir de la jonction ( $z = 0$ )
$g_x$	Dimension du grain dans la direction $x' o x$
$g_y$	Dimension du grain dans la direction $y' o y$
$\delta n$ (cm <sup>-3</sup> )	Densité des porteurs minoritaires en excès dans la base de la photopile
$a_i, b_i$	Coefficients obtenus à partir des valeurs tabulées de l'éclairement solaire
$D_n$ (cm <sup>2</sup> /s)	Coefficient de diffusion des porteurs de charge dans la base de la photopile
$H$ (cm)	Epaisseur de la base de la photopile
$L_n$ (cm)	Longueur de diffusion des porteurs minoritaires de charge dans la base de la Photopile
$K, j$	Indices relatives aux directions $x$ et $y$ respectivement
$C_k, C_j$	Solutions des équations transcendantes
$L_{kj}$	Pseudo longueur de diffusion associée aux modes $k$ et $j$ dans la base
$S_f$ (cm/s)	Vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires à la jonction
$S_b$ (cm/s)	Vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires en face arrière de la photopile
$\tau$ (s)	Durée de vie des porteurs minoritaires de charge dans la base de la photopile
$J_{ph}$ (A/cm <sup>2</sup> )	Densité de photocourant
$N_B$ (cm <sup>-3</sup> )	Taux de dopage de la base en atomes d'impureté
$n_i$ (cm <sup>-3</sup> )	Concentration intrinsèque des porteurs dans la base
$K_B$ (J/°K)	Constante de Boltzmann
$T$ (K)	Température
$V_{ph}$ (V)	Phototension
$V_T$ (V)	Tension thermique
$V_{co}$	Phototension de circuit ouvert
$J_{cc}$ (A/cm <sup>2</sup> )	Densité de courant de court-circuit

## Liste des figures

<b>FigureI.1</b> : Population des électrons et des trous du silicium intrinsèque, position du niveau de fermi $E_{FI}$ .....	6
<b>FigureI.2</b> : Modules photovoltaïques au silicium à différents stades de leurs fabrications.....	8
<b>FigureI.3</b> : Dopage du silicium par du phosphore (type N) et le schéma des bandes.....	10
<b>FigureI.4</b> : Dopage du silicium par le bore (type P) et le schéma des bandes.....	11
<b>FigureI.5</b> : Formation de la jonction P-N.....	12
<b>FigureI.6</b> : Distribution des densités d'états.....	13
<b>FigureI.7</b> : Schéma d'un implantateur ionique avec séparation de masse.....	15
<b>FigureI.8</b> : Illustration du processus de l'implantation ionique.....	16
<b>FigureI.9</b> : Four koyo.....	17
<b>FigureI.10</b> : An n+-p-p+ structure of a silicon solar cell.....	19
<b>FigureI.11</b> : The columnar geometry of grain used in the model.....	21
<b>FigureI.12</b> : Profil de la densité de porteurs minoritaires en excès dans la base en fonction de la profondeur de la base pour respectivement quelques valeurs de la vitesse de recombinaison aux joints de grain et de la taille des grains : $g = 0.005 \text{ cm}$ , $S_f = 3.10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ , $S_b = 3.10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ , $W_b = 0.03 \text{ cm}$ , $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ .....	24
<b>FigureI.13</b> : Profil de la densité de photocourant en fonction de la profondeur de la base pour respectivement quelques valeurs de la vitesse de recombinaison aux joints de grain et de la taille des grains : $g = 0.005 \text{ cm}$ , $S_f = 3.10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ , $S_b = 3.10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ , $W_b = 0.03 \text{ cm}$ , $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ .....	25
<b>FigureI.14</b> : Profil de la phototension en fonction de la profondeur de la base pour respectivement quelques valeurs de la vitesse de recombinaison aux joints de grain et de la taille des grains : $g = 0.005 \text{ cm}$ , $S_f = 3.10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ , $S_b = 3.10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ , $W_b = 0.03 \text{ cm}$ , $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ .....	26
<b>FigureI.15</b> : Schéma équivalent de la photopile en fonctionnement au voisinage du court-circuit.....	26
<b>FigureI.16</b> : Résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour quelques valeurs différentes de la vitesse de recombinaison aux joints de grain.....	27
<b>FigureI.17</b> : Résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour quelques valeurs différentes de la taille des grains.....	28
<b>FigureI.18</b> : Schéma équivalent de la photopile en fonctionnement au voisinage du circuit-ouvert.....	29

<b>FigureI.19 :</b> Résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour quelques valeurs différentes de la vitesse de recombinaison aux joints de grain.....	29
<b>FigureI.20 :</b> Résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour quelques valeurs différentes de la taille des grains.....	30
<b>FigureII.1 :</b> Schéma illustratif des joints de grain d'un silicium polycristallin.....	32
<b>FigureII.2 :</b> Schéma du model colonnaire des joints de grain d'un silicium polycristallin....	33
<b>FigureII.3 :</b> Schéma d'un grain de silicium de la photopile.....	33
<b>FigureII.4 :</b> Valeurs propres $S_g \leq 10^3 \text{cm.s}^{-1}$ , $N_b = 10^{16} \text{cm}^{-3}$ et $N_b = 10^{17} \text{cm}^{-3}$ .....	38
<b>FigureII.5 :</b> Valeurs propres $10^3 \text{cm.s}^{-1} < S_g < 10^5 \text{cm.s}^{-1}$ , $N_b = 10^{16} \text{cm}^{-3}$ et $N_b = 10^{17} \text{cm}^{-3}$ ....	39
<b>FigureII.6 :</b> Valeurs propres $S_g > 10^5 \text{cm.s}^{-1}$ , $N_b = 10^{16} \text{cm}^{-3}$ et $N_b = 10^{17} \text{cm}^{-3}$ .....	40
<b>FigureII.7 :</b> Valeurs propres $S_g = 10^2 \text{cm.s}^{-1}$ , $N_b = 10^{16} \text{cm}^{-3}$ .....	40
<b>FigureII.8 :</b> Profil du coefficient de diffusion $D_n$ en fonction du taux de dopage de la base.....	41
<b>FigureII.9 :</b> Profil du coefficient de diffusion relatif $D_{kj}$ en fonction de la taille des grains pour différents taux de dopage de la base : $S_g = 10^3 \text{cm.s}^{-1}$ .....	42
<b>FigureII.10 :</b> Profil du coefficient de diffusion relatif $D_{kj}$ en fonction du taux de dopage de la base pour différentes taille des grains : $S_g = 10^3 \text{cm.s}^{-1}$ .....	43
<b>FigureII.11 :</b> Logarithme des maximas de $D_{kj}$ en fonction de logarithme de la taille des grains.....	44
<b>FigureII.12 :</b> Profil de la durée de vie des porteurs minoritaires en fonction du taux de dopage de la base.....	45
<b>FigureII.13 :</b> Profil de la longueur de diffusion effective en fonction du taux de dopage de la base pour différentes tailles de grain : $S_g = 10^3 \text{cm.s}^{-1}$ .....	46
<b>FigureII.14 :</b> Profil de la densité de porteurs minoritaires en fonction du taux de dopage de la base : $S_g = 10^3 \text{cm.s}^{-1}$ , $S_f = 3.10^3 \text{cm.s}^{-1}$ , $S_b = F(N_b) \text{cm.s}^{-1}$ , $g_x = g_y = 64 \mu\text{m}$ , $H = 120 \mu\text{m}$ .....	48
<b>FigureII.15 :</b> Profil de la densité de porteurs minoritaires en fonction du taux de dopage de la base pour différentes tailles de grain : $S_g = 10^3 \text{cm.s}^{-1}$ , $S_f = 3.10^3 \text{cm.s}^{-1}$ , $S_b = F(g, N_b) \text{cm.s}^{-1}$ , $H = 120 \mu\text{m}$ .....	49
<b>FigureII.16 :</b> Logarithme des maximas de la densité de porteurs minoritaires .....	50
a) En fonction de logarithme de la taille des grains	
b) En fonction de logarithme du taux de dopage de la base optimal	

<b>FigureII.17 :</b> Profil de la densité de porteurs minoritaires en fonction de la profondeur de la base pour différents taux de dopage de la base : $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ , $S_f = 3.10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ , $S_b = F(Nb) \text{ cm.s}^{-1}$ , $g_x = g_y = 64 \mu\text{m}$ , $H = 120 \mu\text{m}$ .....	51
<b>FigureII.18 :</b> Répartition de la densité de porteurs minoritaires en fonction de la profondeur suivant x et y pour un taux de dopage de la base donné ( $N_b \leq 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ): $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ , $S_f = 3.10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ , $S_b = F(Nb) \text{ cm.s}^{-1}$ , $g_x = g_y = 64 \mu\text{m}$ , $H = 120 \mu\text{m}$ , .....	52
<b>FigureII.19 :</b> Répartition de la densité de porteurs minoritaires en fonction de la profondeur suivant x et y pour un taux de dopage de la base donné ( $N_b \geq 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ): $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ , $S_f = 3.10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ , $S_b = F(Nb) \text{ cm.s}^{-1}$ , $g_x = g_y = 64 \mu\text{m}$ , $H = 120 \mu\text{m}$ , .....	53
<b>FigureII.20:</b> Profil de la densité de porteurs minoritaires dans la base en fonction de la profondeur x et y pour différents taux de dopage optimal de la base et de la taille de grain : $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ , $S_f = 3.10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ , $H = 120 \mu\text{m}$ .....	54
<b>FigureII.21 :</b> Profil de la densité de porteurs minoritaires en fonction du taux de dopage de la base pour différentes valeurs de l'épaisseur de la base : $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ , $S_f = 3.10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ , $S_b = F(H, Nb) \text{ cm.s}^{-1}$ , $g_x = g_y = 64 \mu\text{m}$ .....	55
<b>FigureII.22 :</b> Profil du taux de dopage optimal en fonction de l'épaisseur de la base.....	56
<b>FigureIII.1 :</b> Profil de la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différents taux de dopage de la base : $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ , $S_b = F(Nb) \text{ cm.s}^{-1}$ , $g_x = g_y = 64 \mu\text{m}$ , $H = 120 \mu\text{m}$ .....	60
<b>FigureIII.2 :</b> Profil de la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes épaisseurs de la base : $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ , $S_b = F(H) \text{ cm.s}^{-1}$ , $g_x = g_y = 64 \mu\text{m}$ , $N_b = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ .....	61
<b>FigureIII.3 :</b> Profil de la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes tailles de grain : $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ , $S_f = 3.10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ , $S_b = F(g, Nb) \text{ cm.s}^{-1}$ , $H = 120 \mu\text{m}$ .....	62
<b>FigureIII.4 :</b> Profil du courant de court-circuit en fonction du taux de dopage de la base pour différentes tailles de grain : $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ , $S_b = F(g, Nb) \text{ cm.s}^{-1}$ , $H = 120 \mu\text{m}$ .....	63
<b>FigureIII.5 :</b> Profil du courant de court-circuit en fonction du taux de dopage de la base pour différentes valeurs de l'épaisseur de la base : $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ , $S_b = F(H, Nb) \text{ cm.s}^{-1}$ , $g = 64 \mu\text{m}$ .....	64
<b>FigureIII.6 :</b> Profil de la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différents taux de dopage de la base : $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ , $S_b = F(Nb) \text{ cm.s}^{-1}$ , $g_x = g_y = 64 \mu\text{m}$ , $H = 120 \mu\text{m}$ .....	65



<b>FigureIII.7</b> : Profil de la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour quelques tailles de grains : $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ , $S_b = F(g) \text{ cm.s}^{-1}$ , $H = 120 \text{ }\mu\text{m}$ , $N_b = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ .....	66
<b>FigureIII.8</b> : Profil de la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes épaisseurs de la base : $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ , $S_b = F(H) \text{ cm.s}^{-1}$ , $g = 64 \text{ }\mu\text{m}$ , $N_b = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ .....	67
<b>FigureIII.9</b> : Profil de la tension en circuit-ouvert en fonction du taux de dopage de la base pour différentes tailles de grain : $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ , $S_b = F(N_b, g) \text{ cm.s}^{-1}$ , $H = 120 \text{ }\mu\text{m}$ .....	68
<b>Figure III.10</b> : Profil de la tension en circuit-ouvert en fonction du taux de dopage optimal de la base pour différents tailles de grains : $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ , $S_b = F(g, N_b) \text{ cm.s}^{-1}$ , $H = 120 \text{ }\mu\text{m}$ , $N_b = 10^{16} \text{ cm.s}^{-1}$ .....	69
<b>FigureIII.11</b> : Profil de la tension en circuit-ouvert en fonction du taux de dopage de la base pour différentes épaisseurs de la base : $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ , $g = 64 \text{ }\mu\text{m}$ , $S_b = F(N_b, H) \text{ cm.s}^{-1}$ .....	69
<b>FigureIII.12</b> : Profil de la tension en circuit-ouvert en fonction du taux de optimal de la base pour différentes épaisseurs de la base : $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ , $g = 64 \text{ }\mu\text{m}$ , $S_b = F(N_b, H) \text{ cm.s}^{-1}$ ...	70
<b>FigureIII.13</b> : Profil du courant de diode en fonction du taux de dopage pour différentes tailles de grains : $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ , $S_b = F(N_b, g) \text{ cm.s}^{-1}$ , $H = 120 \text{ }\mu\text{m}$ .....	71
<b>FigureIII.14</b> : Profil du courant de diode en fonction du taux de dopage pour différentes épaisseurs de la base : $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ , $S_b = F(N_b, H) \text{ cm.s}^{-1}$ , $g = 64 \text{ }\mu\text{m}$ .....	72
<b>FigureIII.15</b> : Profil du courant en fonction de la tension pour quelques valeurs du taux de dopage de la base : $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ , $S_b = F(N_b) \text{ cm.s}^{-1}$ , $g_x = g_y = 64 \text{ }\mu\text{m}$ , $H = 120 \text{ }\mu\text{m}$ .....	73
<b>FigureIII.16</b> : Profil de la puissance en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différents taux de dopage de la base : $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ , $S_b = F(N_b) \text{ cm.s}^{-1}$ , $g_x = g_y = 64 \text{ }\mu\text{m}$ , $H = 120 \text{ }\mu\text{m}$ .....	74
<b>FigureIII.17</b> : Profil de la puissance en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes tailles de grains : $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ , $S_b = F(g) \text{ cm.s}^{-1}$ , $H = 120 \text{ }\mu\text{m}$ , $N_b = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ .....	75
<b>FigureIII.18</b> : Profil de la puissance en fonction de la tension pour différents taux de dopage de la base : $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ , $S_b = F(N_b) \text{ cm.s}^{-1}$ , $g_x = g_y = 64 \text{ }\mu\text{m}$ , $H = 120 \text{ }\mu\text{m}$ .....	76
<b>FigureIII.19</b> : Profil du facteur de forme en fonction du taux de dopage de la base : $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ , $S_b = F(N_b) \text{ cm.s}^{-1}$ , $g_x = g_y = 64 \text{ }\mu\text{m}$ , $H = 120 \text{ }\mu\text{m}$ .....	77
<b>FigureIII.20</b> : Profil du rendement en fonction des faibles taux de dopage de la base : $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ , $S_b = F(N_b) \text{ cm.s}^{-1}$ , $g_x = g_y = 64 \text{ }\mu\text{m}$ , $H = 120 \text{ }\mu\text{m}$ .....	78

<b>Figure III.21</b> : Profil du rendement en fonction des forts taux de dopage de la base : $S_{fm} = 5.10^5 \text{ cm. s}^{-1}$ , $S_b = F(Nb) \text{ cm.s}^{-1}$ , $g_x = g_y = g = 64 \mu\text{m}$ , $H = 120 \mu\text{m}$ .....	79
<b>FigureIV.1</b> : Profil de la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction en fonction du taux de dopage de la base : $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ , $S_f = 3.10^3 \text{ cm. s}^{-1}$ , $S_b = F(Nb) \text{ cm.s}^{-1}$ , $g_x = g_y = 64 \mu\text{m}$ , $H = 120 \mu\text{m}$ .....	83
<b>FigureIV.2</b> : Profil de la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction en fonction de l'épaisseur de la base : $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ , $S_f = 3.10^3 \text{ cm. s}^{-1}$ , $S_b = F(H) \text{ cm.s}^{-1}$ , $g = 64 \mu\text{m}$ , $N_b = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ .....	84
<b>FigureIV.3</b> : Profil de la vitesse de recombinaison à la face arrière en fonction du taux de dopage de la base : $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ , $S_f = 3.10^3 \text{ cm. s}^{-1}$ , $S_b = F(Nb) \text{ cm.s}^{-1}$ , $g = 64 \mu\text{m}$ , $H = 120 \mu\text{m}$ ,.....	85
<b>FigureIV.4</b> : Profil de la vitesse de recombinaison à la face arrière en fonction de l'épaisseur de la base : $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ , $S_f = 3.10^3 \text{ cm. s}^{-1}$ , $S_b = F(H) \text{ cm.s}^{-1}$ , $g = 64 \mu\text{m}$ , $N_b = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ,.....	86
<b>FigureIV.5</b> : Profil de la densité de photocourant en fonction de la phototension.....	87
<b>FigureIV.6</b> : Circuit électrique équivalent de la photopile fonctionnant pratiquement en circuit-ouvert.....	87
<b>FigureIV.7</b> : Profil de la résistance série en fonction du taux de dopage de la base : $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ , $S_f = 3.10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ , $S_b = F(Nb) \text{ cm.s}^{-1}$ , $g_x = g_y = 64 \mu\text{m}$ , $H = 120 \mu\text{m}$ .....	88
<b>FigureIV.8</b> : Profil de la résistance série en fonction de l'épaisseur de la base : $S_f = 2.10^2 \text{ cm.s}^{-1}$ , $S_b = F(H) \text{ cm.s}^{-1}$ , $S_g = 10^2 \text{ cm.s}^{-1}$ , $g = 64 \mu\text{m}$ , $N_b = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ .....	89
<b>FigureIV.9</b> : Profil de la densité de photocourant en fonction de la phototension.....	90
<b>FigureIV.10</b> : Circuit électrique équivalent de la photopile fonctionne pratiquement en court-circuit.....	90
<b>FigureIV.11</b> : Profil de la résistance shunt en fonction du taux de dopage de la base : $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ , $S_f = 3.10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ , $S_b = F(Nb) \text{ cm.s}^{-1}$ , $g_x = g_y = 64 \mu\text{m}$ , $H = 120 \mu\text{m}$ .....	91
<b>FigureIV.12</b> : Profil de la résistance shunt en fonction de l'épaisseur de la base : $S_f = 6.10^6 \text{ cm.s}^{-1}$ , $S_b = F(H) \text{ cm.s}^{-1}$ , $S_g = 10^2 \text{ cm.s}^{-1}$ , $g = 64 \mu\text{m}$ , $N_b = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ .....	92
<b>FigureIV.13</b> : Profil de la capacité en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes tailles de grain : $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ , $S_b = F(g) \text{ cm.s}^{-1}$ , $N_b = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , $H = 120 \mu\text{m}$ ..	93
<b>FigureIV.14</b> : Profil de la capacité en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différents faibles taux de dopage : $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ , $S_b = F(Nb) \text{ cm.s}^{-1}$ , $H = 120 \mu\text{m}$ , $g_x = g_y = 64 \mu\text{m}$ .....	94

<b>FigureIV.15</b> : Profil de la capacité en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différents taux de dopage : $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ , $S_b = F(N_b) \text{ cm.s}^{-1}$ , $H = 120 \text{ }\mu\text{m}$ , $g_x = g_y = 64 \text{ }\mu\text{m}$ .....	95
<b>FigureIV.16</b> : Profil de la capacité en fonction des faibles taux de dopage de la base : $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ , $S_b = F(N_b) \text{ cm.s}^{-1}$ , $H = 120 \text{ }\mu\text{m}$ , $g_x = g_y = 64 \text{ }\mu\text{m}$ .....	96
<b>FigureIV.17</b> : Profil de la capacité en fonction des forts taux de dopage de la base : $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ , $S_f = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ , $S_b = F(N_b) \text{ cm.s}^{-1}$ , $H = 120 \text{ }\mu\text{m}$ , $g = 64 \text{ }\mu\text{m}$ .....	97
<b>FigureIV.18</b> : Profil de la capacité en fonction du taux de dopage de la base : $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ , $S_f = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ , $S_b = F(N_b) \text{ cm.s}^{-1}$ , $H = 120 \text{ }\mu\text{m}$ , $g_x = g_y = 64 \text{ }\mu\text{m}$ .....	97
<b>FigureIV.19</b> : Profil de la capacité en fonction du taux de dopage de la base pour une photopile en court-circuit : $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ , $S_b = F(N_b) \text{ cm.s}^{-1}$ , $H = 120 \text{ }\mu\text{m}$ , $g = 64 \text{ }\mu\text{m}$ .....	98
<b>FigureIV.20</b> : Profil de la capacité en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes épaisseurs : $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ , $S_b = F(H) \text{ cm.s}^{-1}$ , $N_b = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , $g = 64 \text{ }\mu\text{m}$ .....	99
<b>FigureIV.21</b> : Profil de la capacité en fonction du taux de dopage pour quelques épaisseurs : $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ , $S_f = 10^6 \text{ cm.s}^{-1}$ , $S_b = F(N_b, H) \text{ cm.s}^{-1}$ , $g = 64 \text{ }\mu\text{m}$ .....	99

## Liste des tableaux

<b>Tableau II.1</b> : Valeurs propres $C_k$ pour $Sg = 10^2 \text{ cm.s}^{-1}$ .....	39
<b>Tableau II.2</b> : Valeurs propres $C_k$ pour $Sg = 6.10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ .....	39
<b>Tableau II.3</b> : Valeurs propres $C_k$ pour $Sg = 6.10^5 \text{ cm.s}^{-1}$ .....	40
<b>Tableau II.4</b> : Valeurs propres $C_k$ pour $Sg = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ .....	41
<b>Tableau II.5</b> : Maximum du $D_{kj}$ pour différentes tailles de grain obtenu par la méthode graphique.....	43
<b>Tableau II.6</b> : Maximum de la densité de porteurs minoritaires et du taux de dopage optimal pour différentes tailles de grain obtenu par la méthode graphique.....	49
<b>Tableau II.7</b> : maximum de la densité de porteurs minoritaires et du taux de dopage optimal pour différentes épaisseurs de la base obtenu par la méthode graphique .....	55
<b>Tableau III.1</b> : Les paramètres électriques obtenus en variant le taux de dopage du substrat de silicium Nb de $10^{15} \text{ cm}^{-3}$ à $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . Pour $g = 64 \text{ }\mu\text{m}$ , $H = 120 \text{ }\mu\text{m}$ , $Sg = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ , $Sb = F$ (Nb) $\text{cm.s}^{-1}$ .....	79
<b>Tableau III.2</b> : Les paramètres électriques obtenus en variant la taille de grain du substrat de silicium. Pour $Nb = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , $H = 120 \text{ }\mu\text{m}$ , $Sg = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ , $Sb = F$ (g) $\text{cm.s}^{-1}$ .....	80
<b>Tableau III.3</b> : Les paramètres électriques obtenus en variant l'épaisseur de la base du substrat de silicium. Pour $Nb = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , $g = 64 \text{ }\mu\text{m}$ , $Sg = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ , $Sb = F$ (H) $\text{cm.s}^{-1}$ .....	80
<b>Tableau IV.1</b> : Valeurs des résistances (série et shunt) obtenues en variant le taux de dopage du substrat de Silicium Nb de $1.10^{14} \text{ cm}^{-3}$ à $1.10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . Pour $g = 64 \text{ }\mu\text{m}$ , $H = 120 \text{ }\mu\text{m}$ , $Sg = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ .....	100
<b>Tableau IV.2</b> : Valeurs des résistances (série et shunt) obtenues en variant la taille de grain du substrat de Silicium Nb de $1.10^{14} \text{ cm}^{-3}$ à $1.10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . Pour $Nb = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , $H = 120 \text{ }\mu\text{m}$ , $Sg = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ , $Sb = F$ (g) $\text{cm.s}^{-1}$ .....	100
<b>Tableau IV.3</b> : Valeurs des résistances (série et shunt) obtenues en variant l'épaisseur de la base du substrat de Silicium. Pour $Nb = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , $g = 64 \text{ }\mu\text{m}$ , $Sg = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ , $Sb = F$ (H) $\text{cm.s}^{-1}$ .....	101

# **INTRODUCTION GENERALE**

## Introduction générale

La situation énergétique mondiale actuelle et son évolution dans le futur sont des problématiques extrêmement importantes qui concernent l'ensemble de l'humanité. L'utilisation massive des énergies fossiles (gaz, pétrole, charbon) dont les réserves sont par ailleurs limitées, entraîne l'émission de gaz carbonique. Ce gaz aggravant l'effet de serre, est responsable d'un bouleversement climatique [1] qui entrainera d'après les plus récentes modélisations une hausse de la température de la planète de 1,5 à 6° C au cours des cents prochaines années [2]. Cette hausse de température aura des conséquences désastreuses pour l'humanité. Des territoires risquent d'être submergés par la montée du niveau des océans. Quant à l'énergie nucléaire, elle est performante pour la production d'énergie électrique, [2] mais le problème lié à la gestion des déchets radioactifs à longue durée de vie (plusieurs millions d'années) n'est toujours pas résolu. De plus les risques de détournement du nucléaire civil à des fins militaires ou terroristes sont à prendre en compte. C'est pour ces raisons que les énergies renouvelables sont donc amenées à jouer un rôle important dans la crise énergétique mondiale. Selon l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE), le soleil pourrait être la plus importante source mondiale d'électricité d'ici 2050, devant les combustibles fossiles, le vent, l'hydroélectricité et le nucléaire [1]. Les deux « feuilles de route » technologiques de l'AIE montrent que l'énergie solaire photovoltaïque (PV) pourrait générer jusqu'à 16 % de l'électricité mondiale d'ici 2050 tandis que l'électricité solaire thermique (STE) de l'énergie solaire concentrée (CSP) pourrait fournir un montant supplémentaire de 11 % (Figure I-1) [1]. Ensemble, ces deux technologies solaires pourraient éviter l'émission de plus de 6 milliards de tonnes de dioxyde de carbone par an d'ici 2050, ce qui est supérieur au CO<sub>2</sub> émis par les États Unis ou encore équivalent à la quasi-totalité des émissions actuelles du secteur des transports dans le monde entier [1].

De nos jours, l'évolution du marché de l'électricité est caractérisée par une croissance active des énergies renouvelables. Parmi les sources d'énergie, nous pouvons citer l'énergie hydroélectrique, l'énergie géothermique, l'énergie éolienne, l'énergie de la biomasse et l'énergie photovoltaïque.

L'une des énergies renouvelables très utilisées dans le monde, non polluante est l'énergie photovoltaïque. Cette dernière repose sur la transformation directe de l'énergie solaire en énergie électrique à des photopiles et possède un potentiel important parmi les différentes énergies renouvelables. En effet, la puissance moyenne du rayonnement solaire au niveau du

sol est d'environ  $950 \text{ W.m}^{-2}$  [3]. L'énergie solaire présente, en plus de tous les avantages des énergies renouvelables, ses propres avantages :

- énergie maîtrisable et adaptable aux situations de toutes les régions ;
- frais de maintenance relativement faibles ;
- production d'énergie électrique sans dégradation de l'environnement ;
- une ressource pratiquement inépuisable ;
- les systèmes exigeant peu d'entretien, fiables et silencieux.

De nos jours, la plupart des photopiles commercialisées sont fabriquées en utilisant du silicium monocristallin ou polycristallin.

L'Afrique étant bien irradiée par le soleil, son problème énergétique devrait être réglé par cette source d'énergie.

Deux problèmes se posent principalement pour cette d'énergie : le rendement des photopiles et le coût des panneaux. Les rendements les plus élevés ne dépassent guère 24,7% [4] pour les photopiles de la première génération parce que la photopile est une boîte noire au sein de laquelle les processus de recombinaison en volume et aux interfaces limitent considérablement la durée de vie et la longueur de diffusion des porteurs minoritaires surtout.

Depuis le 18 octobre 1973, date de la naissance de la première crise pétrolière, la communauté mondiale pense remédier les problèmes énergétiques en faisant appel aux énergies renouvelables, le solaire en particulier.

L'amélioration du rendement de la photopile passant nécessairement par la maîtrise des paramètres de recombinaison, la caractérisation des cellules s'est constituée en discipline. La caractérisation permet de déterminer les paramètres phénoménologiques et les paramètres électriques des photopiles. Elle peut se faire en régime :

- Statique [5-6]
- Dynamique
  - ✓ dynamique transitoire [7-8]
  - ✓ dynamique fréquentielle [9-10].

Dans notre travail nous allons proposer une approche de la modélisation des paramètres électrique d'une photopile à base de silicium polycristallin en régime statique. Ce model doit être simple, général, capable de prédire le niveau de dopage de la base; et cela en tenant compte des phénomènes physiques influencés par la structure des tailles de grain.

Dans le chapitre I, nous ferons une étude bibliographique sur les techniques de caractérisation des photopiles en régime statique en vue d'adopter une méthode pour faire une étude de caractérisation et de modélisation d'une photopile monofaciale.

Dans le chapitre II, nous présenterons une étude en modélisation de notre photopile monofaciale sous éclairage polychromatique en régime statique. Dans cette partie, nous allons étudier l'effet du taux de dopage, de l'épaisseur de la base et de la taille des grains sur la densité des porteurs minoritaires.

Dans le chapitre III, après modélisation, nous allons analyser la densité de photocourant, le courant de court-circuit, la phototension, la tension en circuit-ouvert et le courant de diode, puis la puissance fournie par la photopile, le facteur de forme et le rendement de conversion.

Enfin dans le chapitre IV, notre étude portera sur la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction, la vitesse de recombinaison à la face arrière, la résistance série et shunt et sur la capacité de la photopile.

Nous finirons ce travail par une conclusion générale sur les différents résultats obtenus au cours de cette thèse et nous dégagerons quelques perspectives pour une meilleure efficacité des photopiles.



# **CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE**

## **Introduction**

La photopile est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériau semi-conducteur et elle transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique. Toute amélioration de sa performance est un surplus pour la production d'énergie. C'est dans le but d'améliorer leur rendement que différentes techniques de caractérisation ont été mises en œuvre notamment en régime statique, dynamique transitoire, et dynamique fréquentiel. La détermination des paramètres électriques permet de mieux appréhender le fonctionnement de la photopile et d'en améliorer son rendement et diminuer son coup de fabrication.

Dans ce chapitre nous allons d'abord présenter les semi-conducteurs, leur principe de préparation et quelques méthodes de dopage. Nous allons ensuite présenter des techniques de caractérisation et de modélisation qui ont été utilisées précédemment pour l'étude d'une photopile au silicium polycristallin afin de pouvoir adapter une méthode de modélisation de notre photopile au silicium polycristallin sous éclairage polychromatique de la face avant en régime statique.

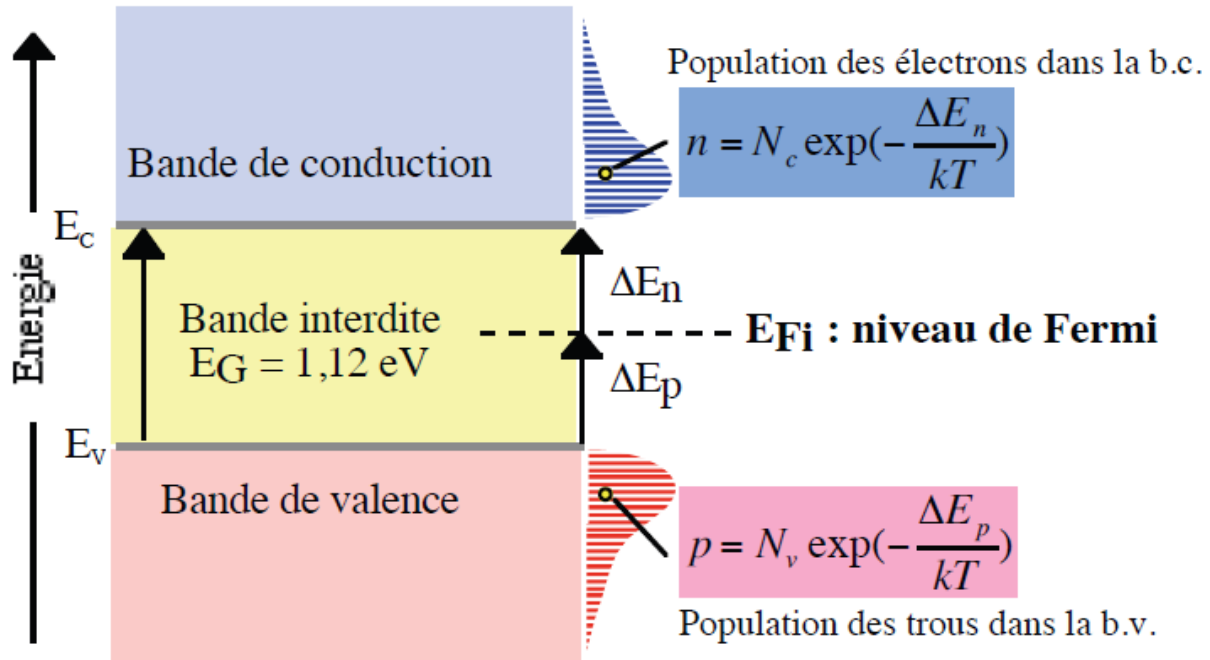
### **I.1 : Les semi-conducteurs**

Un semi-conducteur, comme son nom l'indique possède des caractéristiques électriques intermédiaires entre celles des conducteurs et des isolants.

Le comportement électrique des semi-conducteurs est généralement modélisé à l'aide de la théorie des bandes d'énergie. Selon celle-ci, un matériau semi-conducteur possède une bande interdite suffisamment petite pour que des électrons de la bande de valence puissent facilement rejoindre la bande de conduction. Si un potentiel électrique est appliqué à ses bornes, un faible courant électrique apparaît, provoqué à la fois par le déplacement des électrons et par celui des «trous» qu'ils laissent dans la bande de valence.

Les semi-conducteurs typiques sont le silicium et le germanium. Ils appartiennent à la colonne IV du tableau périodique des éléments. Certains cristaux composés de différents éléments peuvent également présenter des propriétés semi-conductrices. Il existe notamment des semi-conducteurs dits III-V et II- VI. Les semi-conducteurs composés III-V comprennent des éléments des colonnes III et V du tableau périodique des éléments, comme par exemple l'arséniure de gallium GaAs (largeur du gap 1,424 eV) ou le phosphure d'indium InP. Les semi-conducteurs composés II-VI sont constitués par des éléments des colonnes II et VI comme le sulfure de cadmium CdS.

Beaucoup de ces semi-conducteurs composés restent à l'heure actuelle des sujets de recherche, car ils sont difficiles et coûteux à fabriquer, et leurs propriétés et capacités encore mal maîtrisées. En outre, leur application est rarement l'électronique logique ou petit signal, mais bien souvent l'optoélectronique (diodes laser, photorécepteur...) ou l'électronique de puissance.



**Figure I.1** : Population des électrons et des trous du silicium intrinsèque, position du niveau de Fermi EF<sub>i</sub> [11]

Il existe également des semi-conducteurs organiques. En effet, écrans de Smartphones, sources de lumière colorée, photopile portables et écrans de télévision incurvés ne sont que quelques exemples de la présence croissante de l'électronique organique dans nos vies quotidiennes. Bien que les molécules et les polymères organiques semi-conducteurs ne puissent pas encore rivaliser avec leurs homologues inorganiques en termes de performances, de transport de charges (une forte mobilité des porteurs de charge à température ambiante) et de développement industriel, ils détiennent des avantages inégalés tels que la réduction des coûts de production, la polyvalence des processus de synthèse, et la compatibilité avec une vaste gamme de substrats transparents tels que du verre ou du plastique flexible. Les semi-conducteurs organiques présentent donc un énorme potentiel en complément des semi-conducteurs inorganiques classiques en étant utilisés comme matériaux actifs dans des appareils électroniques tels que des diodes électroluminescentes (OLED) pour l'affichage et l'éclairage, des transistors à effet de champ (OFET) ou des photopiles (OPV). [11]

Les photopiles à base de silicium ne sont pas les plus performantes, comme le montrent en effet T. Baghdadli et al dans leur article : « Nous avons procédé après cela à une étude comparative

des deux matériaux photovoltaïques qui sont l'arsenic de gallium et le silicium. Ce qui nous a permis de définir le matériau photovoltaïque le plus performant. Nous avons à cette fin utilisé une méthode d'optimisation de recherche globale adéquate pour la recherche du rendement optimal en fonction des paramètres de structure (dopants et épaisseurs) des cellules solaires. Cette méthode d'optimisation dite 'méthode complexe' nous a permis d'obtenir un rendement de 26,15 % pour une photopile à base de GaAs et de 18,15 % pour une photopile à base de Si » [12].

Cependant, le silicium est le matériau semi-conducteur le plus courant à l'échelle mondiale, le plus utilisé commercialement (représentant plus de 90% des cellules PV mises sur le marché [13]), du fait de ses bonnes propriétés (il n'est pas toxique comme certains semi-conducteurs III-V et il peut se doper facilement [14]), de son abondance naturelle, et il est très facile à extraire et à traiter.

Bien que du silicium impur ait été isolé, en 1824, par le Suédois Jöns Jacob Berzelius, ce n'est qu'en 1854 que le français Henri Sainte-Claire-Deville obtient un échantillon pur et cristallisé. Le nom silicium vient du latin silicis signifiant silex.

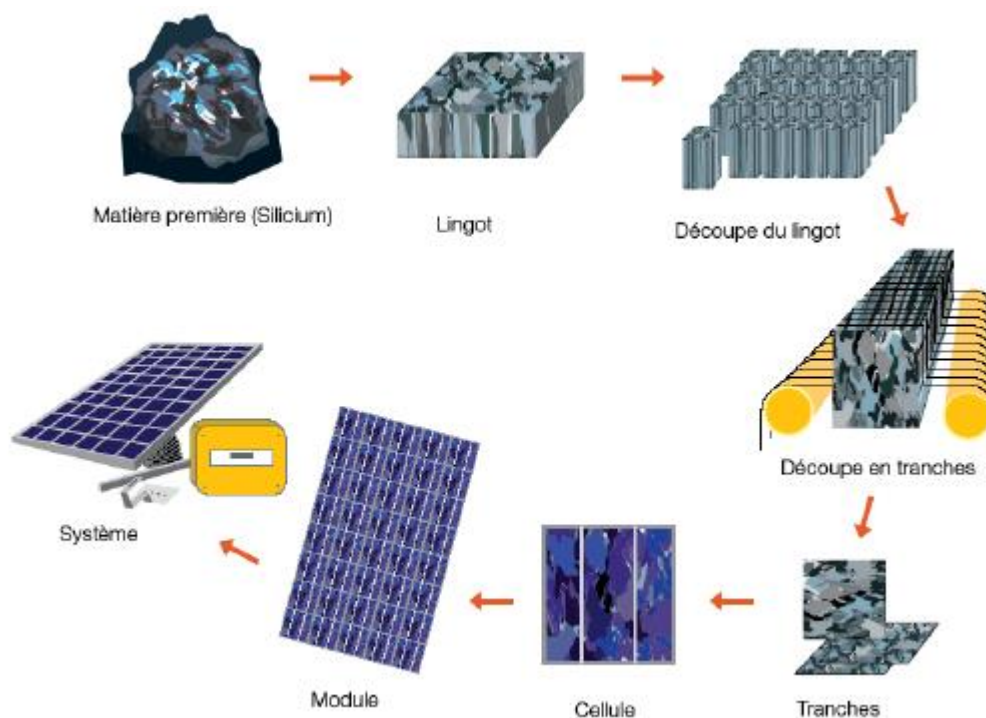
Le silicium est un élément chimique (symbole : Si) non métallique, de numéro atomique 14, de masse atomique 28,08. Il existe trois isotopes naturels stables  $^{28}\text{Si}$  (92,3%),  $^{29}\text{Si}$  (4,7%),  $^{30}\text{Si}$  (3%). Le silicium abonde dans toutes les roches courantes (excepté les calcaires); sa teneur dans la croûte terrestre est estimée à 27 % en masse, ce qui le classe au second rang, après l'oxygène. On ne le trouve jamais à l'état natif, mais plutôt sous forme de silice (dioxyde de silicium,  $\text{SiO}_2$ , composant principal du sable) et de silicates (en particulier d'aluminosilicates). Les feldspaths, constituants prédominants de la plupart des roches magmatiques (tels les granites) et métamorphiques, sont des aluminosilicates.

## **I.2 : Principe de préparation**

Le silicium est un élément chimique de symbole Si. Il n'existe pas à l'état pur dans la nature. Il est extrait de la silice ( $\text{SiO}_2$ ) grâce à la réaction chimique suivante :  $\text{SiO}_2 + 2\text{C} \rightarrow \text{Si} + 2\text{CO}$ .

Cette réaction se réalise dans un four à arc, car elle nécessite de faire fondre la silice. La puissance du four peut aller jusqu'à 30 MW [15], afin de déclencher les réactions chimiques. Après cette opération, le silicium est obtenu sous forme liquide. Sa pureté est de 98 %. Il faut le purifier encore de plusieurs ordres de grandeurs afin d'obtenir un matériau adéquate pour les applications photovoltaïques. De nombreux procédés ont été développés par les différents producteurs mondiaux de silicium [15].

Pour obtenir le silicium polycristallin, le silicium liquide est mis dans un creuset en graphite. La technique est simple et peu énergétique. Le silicium Polycristallin est obtenu par coulage en lingotière dans laquelle s'opère un refroidissement lent, de l'ordre de quelques dizaines d'heures. On obtient au final des lingots parallélépipédiques. Cette forme est recherchée afin d'optimiser l'espace lorsque les plaques seront placées en série sur un module photovoltaïque [15]. Les lingots parallélépipédiques de silicium obtenus à l'issue de l'étape de solidification sont ensuite sciés en fines plaques de 200 micromètres d'épaisseur qui sont appelés « wafer ». La coupe des lingots peut s'effectuer avec plusieurs méthodes. Compte tenu de la faible épaisseur des tranches à découper (300  $\mu\text{m}$ ), le principal problème du sciage est la perte au découpage. Afin de minimiser ces pertes, la solution technique retenue est la scie à fil [15].



**Figure I.2 :** Modules photovoltaïques au silicium à différents stades de leurs fabrications [15].

Pour éliminer les perturbations provoquées par la scie, on procède :

- ❖ A un découpage à la soude.
- ❖ A la désoxydation de la surface des plaques.
- ❖ A la diffusion de  $\text{POCl}_3$  afin de former la jonction.
- ❖ A la réalisation des contacts ohmiques des faces d'éclairage.
- ❖ A l'ouverture de la diode dans un plasma de  $\text{CF}_4$  plus 8% de  $\text{O}_2$ .
- ❖ A un dépôt d'une couche antireflet  $\text{TiO}_2$  afin d'éliminer les réflexions parasites.

La structure colonnaire est peu perturbée le long du substrat ; la révélation chimique permet d'observer les défauts cristallins. La zone solidifier en premier lieu présente une faible densité

de défauts structuraux et une grande taille des grains. La zone du milieu présente quant à elle une légère augmentation du nombre de défauts par rapport à la précédente. La zone solidifiée en dernier lieu présente une très grande densité de défauts structuraux.

### **I.3 : Dopage des semi-conducteurs**

Le dopage consiste à introduire des impuretés à l'intérieur d'un semi-conducteur intrinsèque. Le silicium intrinsèque a en effet des applications pratiques limitées : photorésistance, thermistance. La technique du dopage augmente la densité des porteurs à l'intérieur du matériau semi-conducteur. Les matériaux ainsi dopés sont appelés semi-conducteurs extrinsèques.

#### **I.3.1 : Rôle du dopage**

On dope les semi-conducteurs pour :

- ✓ Le contrôle local de la résistivité, ajustement de la tension seuil, etc.
- ✓ La création de barrières de potentiel ou jonctions
- ✓ La réalisation de couches d'arrêt de gravure (etch-stop)

##### **I.3.1.1 : Les types de dopage**

On distingue trois types de dopage:

- ✓ Homogène (au tirage du monocristal)
- ✓ Homogène en surface (pendant l'épitaxie)
- ✓ Localisé en profondeur et en volume

##### **I.3.1.2 : Les critères de choix d'un dopage**

Les différents critères pour le choix d'un dopant sont:

- ✓ Le type (N/P)
- ✓ La concentration en surface (solubilité limite)
- ✓ Les contraintes minimales dans le réseau
- ✓ La diffusion
- ✓ L'enlèvement du matériau de surface « verre au bore »
- ✓ La reproductibilité
- ✓ Le coût de productivité

On peut aussi faire le dopage des semi-conducteurs organiques, ce qui est très avantageux dans la photopile organique. Cependant, dans notre étude, on va se focaliser uniquement au dopage du silicium.

Dans le processus de fabrication d'une photopile, les wafers, obtenus par sciage des lingots de silicium purifié, subiront soit un dopage de type N soit un dopage de type P.

### I.3.2 : Silicium dopé N

On obtient un semi-conducteur de type N en dopant le cristal de silicium avec des atomes pentavalents. On utilise ainsi le phosphore ou l'arsenic appartenant à la colonne V dans le tableau de classification périodique des éléments.

Quatre de ces cinq électrons de valence du phosphore sont mis en commun avec les atomes de silicium voisins pour réaliser des liaisons covalentes. Le 5<sup>ème</sup> électron inutilisé, est très faiblement lié à l'atome pentavalent. Une très faible énergie suffit pour le libérer et il se retrouve "libre" dans la bande de conduction. L'atome de phosphore qui a fourni un électron libre est appelé atome donneur. Il a perdu sa neutralité pour devenir un ion positif fixe.

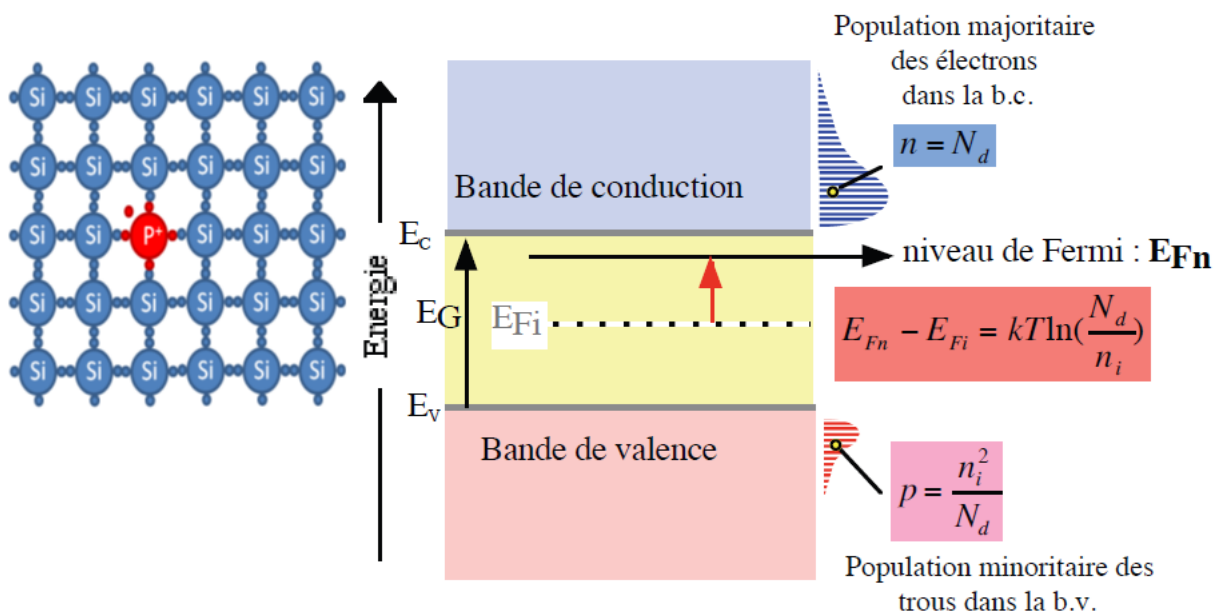
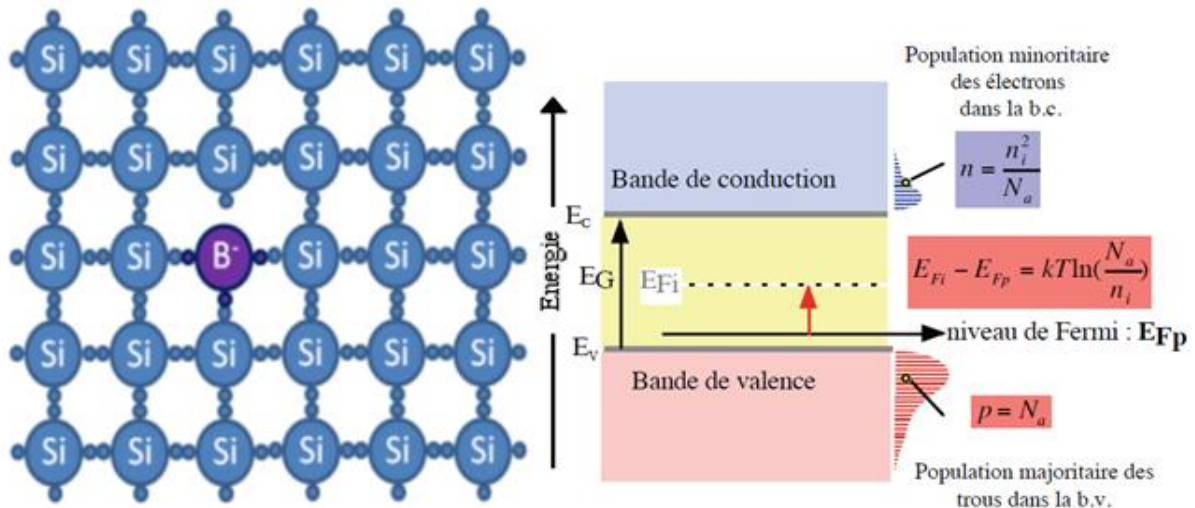


Figure I.3: Dopage du silicium par le phosphore (type N) et schéma des bandes d'énergie [11]

### I.3.3 : Silicium dopé P

On obtient un semi-conducteur de type P en injectant dans le silicium des atomes trivalents comme le bore (ou l'indium). Il manque un électron à l'atome de bore pour réaliser des liaisons covalentes avec les quatre atomes de silicium qui l'entoure. En fait, les électrons participant aux liaisons sont indiscernables les uns des autres. Tout se passe alors comme si un des atomes de silicium voisins avait cédé un électron à l'atome trivalent de bore, créant ainsi un trou dans le cristal de silicium. L'atome de bore qui capte un électron d'un atome de silicium voisin est appelé accepteur, il a perdu sa neutralité pour devenir un ion négatif fixe.



**Figure I.4 :** Dopage du silicium par le bore (type P) et schéma des bandes [11]

Lorsqu'un semi-conducteur N (respectivement P) contient une importante proportion de dopants, sans être pour autant dégénéré, il est parfois dit dopé  $N^+$  (respectivement  $P^+$ ).

### I.3.4 : Formation de la zone de charge d'espace ZCE

Lorsqu'une surface de cristal de semi-conducteur dopé P est mise en contact avec une surface de cristal de semi-conducteur dopé N, les électrons de la zone N diffusent vers la zone P et les trous de la zone P diffusent vers la zone N. A l'équilibre, il existe donc une zone sans charge mobile, appelée zone de déplétion ou zone de charge d'espace (ZCE) constituée par les ions donneurs positifs dans la zone N et les ions accepteurs négatifs dans la zone P; une différence de potentiel entre la zone N et la zone P, appelée potentiel de jonction apparaît également à l'équilibre. Pour les diodes à base de Silicium, ce potentiel est de l'ordre de 0,6V. La barrière de potentiel équilibre les phénomènes de diffusion et de conduction et provoque l'apparition d'un champ électrique interne qui permet de séparer les paires électrons-trous photogénérées.

La ZCE peut être plus large d'un côté ou d'un autre selon les concentrations relatives en électrons et en trous. Si les trous sont en plus grandes proportions que les électrons, ils se diffuseront plus et la ZCE sera plus large dans la zone N que dans la zone P. Inversement, si les électrons sont majoritaires par rapport aux trous, la ZCE sera plus large dans la zone P que dans la zone N.



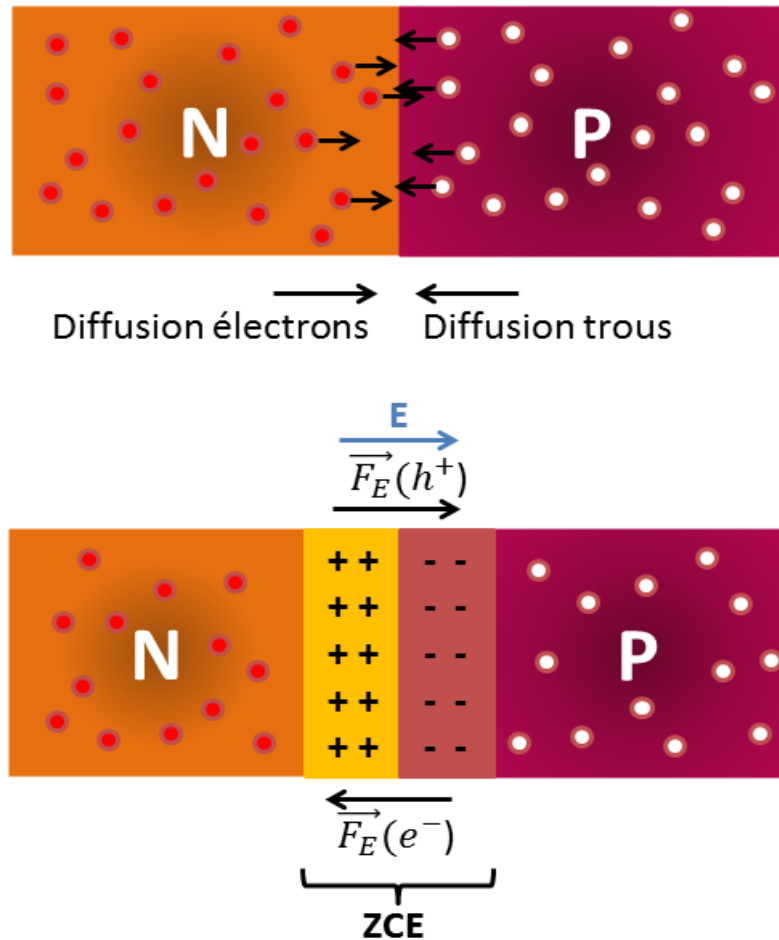


Figure I.5 : Formation de la jonction P-N [11]

### I.3.5 : Fort dopage

Lorsqu'on accroît la concentration en impuretés dans un semi-conducteur, le niveau de Fermi peut se confondre avec le bord de la bande permise (de conduction ou de valence selon son type). Alors, le semi-conducteur est complètement dégénéré si le niveau de Fermi se trouve à une distance supérieure à  $5 k_b T$  du bord de bande. Cette forte densité en dopants réduit la largeur de la bande interdite (rétrécissement de la bande interdite, Bandgap Narrowing en Anglais), puisque les niveaux associés aux impuretés recouvrent alors les bandes d'énergie (figure I.6).

#### I.3.5.1 : Rétrécissement de la bande interdite (Bandgap-Narrowing)

Le mécanisme physique associé à la distorsion des limites des bandes d'énergies résulte principalement d'une interaction atomes donneurs – porteurs libres. Ces interactions provoquent ainsi un élargissement du niveau initialement discret des impuretés, ce qui conduit à la réunion de cette bande d'énergie des impuretés ionisées en excès avec la bande la plus

proche (la bande de conduction ou de valence selon le type de dopage). Dans les semi-conducteurs fortement dopés (supérieur à  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ), le mécanisme physique associé à la distorsion des limites des bandes d'énergies se présente selon trois cas différents [16, 17] :

- les limites des bandes de valence et de conduction développent des queues et pénètrent dans la bande interdite ;
- si la concentration des impuretés donneuses est élevée, les niveaux énergétiques de ces impuretés s'élargissent en une bande d'impuretés qui chevauche avec la bande de conduction ;
- une concentration d'atomes donneurs très élevée provoque une variation spatiale de la largeur de la bande interdite, résultat d'une déformation du réseau cristallin.

En conséquence, toutes ces modifications entraînent une réduction de la largeur de la bande interdite. Ce phénomène est plus connu sous le nom de « Bandgap- Narrowing ».

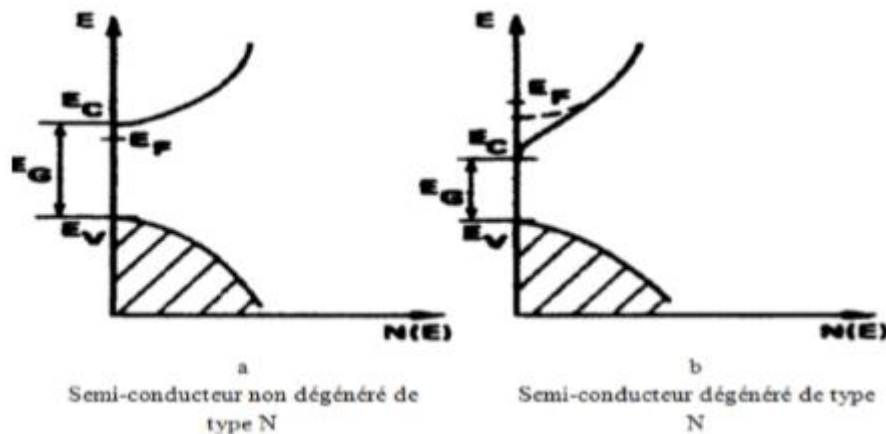


Figure I.6 : Distribution des densités d'états [16, 17]

### I.3.6 : Techniques de dopage

Il existe différents moyens pour introduire des impuretés dans le cristal de silicium : la diffusion thermique, l'implantation ionique et la croissance par épitaxie. Cependant la diffusion et l'implantation ionique sont les procédés les plus importants de dopage en technologie des composants semi-conducteurs.

La densité maximum d'impuretés que l'on peut introduire dans un semi-conducteur est imposée par la solubilité limite de l'impureté (par exemple  $10^{21} \text{ cm}^{-3}$  pour l'arsenic dans le silicium). Elle fixe la résistivité minimum du matériau dopé.

La densité minimum est fixée par les possibilités de raffinage du matériau (par exemple  $10^{13} \text{ cm}^{-3}$  pour le bore dans le silicium). Elle fixe la résistivité maximum du matériau raffiné.

### **I.3.6.1 : La diffusion thermique**

Les principaux facteurs du dopage par diffusion sont:

- Le gradient de concentration
- La température
- Les défauts cristallins : dislocations, joints de grain
- En pratique, le dopage par diffusion thermique se fait en deux étapes:
- Le pré-dépôt : les plaquettes sont maintenues dans un milieu saturé en dopant (concentration constante), pendant un temps  $t$ , à une température  $T$ .
- La redistribution : la source étant coupée, les plaquettes sont maintenues à haute température pour répartir les dopants en profondeur (cette étape est accompagnée d'oxydation)

Les températures typiques de dopage sont de 800 - 900°C.

Les sources dopantes susceptibles de fournir une concentration constante, de corps purs disponibles dans le four de diffusion porté à haute température peuvent être solides, liquides ou gazeuses.

### **I.3.6.2 : La croissance par épitaxie**

Cette méthode utilise toujours un four, mais cette fois-ci les atomes du dopant sont déposés sur le silicium qui se présente sous la forme d'une plaquette. On a ainsi un dépôt en surface, et non pas une insertion comme pour la méthode de dopage par diffusion. La température du four doit avoisiner les 1200 °C.

### **I.3.6.3 : L'implantation ionique**

L'implantation ionique est utilisée depuis longtemps dans l'industrie électronique. L'idée est de Schockley (un des inventeurs du transistor) qui proposa l'implantation ionique pour le dopage des semi-conducteurs dès 1951. A partir de 1971, le procédé fut industrialisé pour la fabrication des circuits intégrés. Proposé dès 1973 pour des applications mécaniques il fut rapidement utilisé avec succès. Des applications ont vu le jour dans l'industrie mécanique, aéronautique, biomédicale.

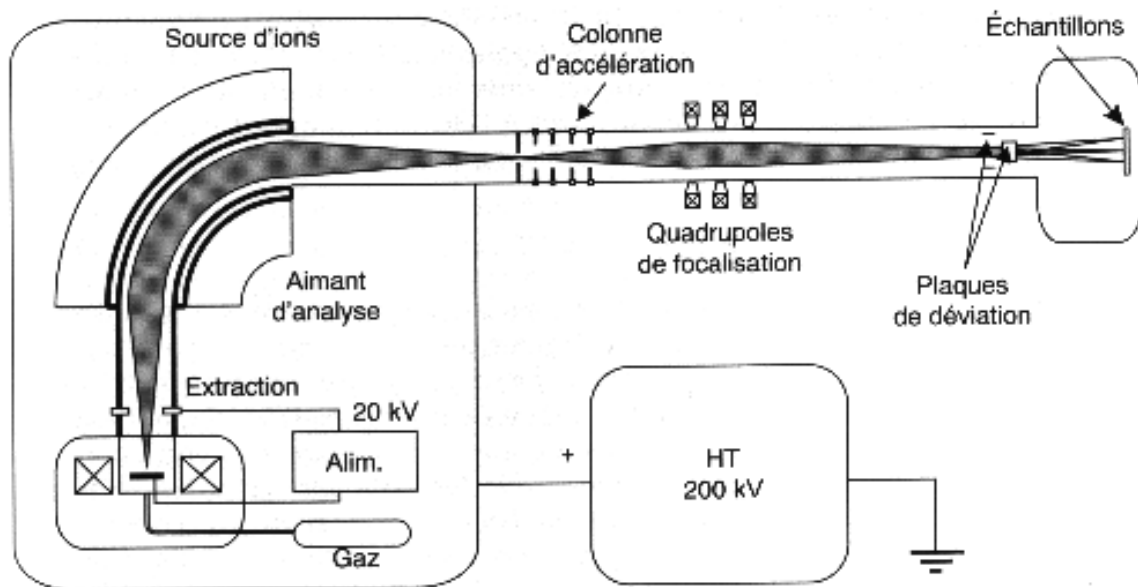
L'implantation consiste à ioniser les atomes de l'impureté choisie, à accélérer les ions par un champ électrique de grande énergie (jusqu'à 500 KeV) et à les faire pénétrer dans les régions exposées de la structure.

Les ions sont générés à partir de sources solides, liquides ou gazeuses (type plasma). Elles émettent toujours des quantités non négligeables d'ions d'autres éléments que l'impureté

requis. La sélection des ions « utiles » se fait donc grâce à un champ magnétique qui sélectionne les ions par le rapport masse sur charge. Les ions sont alors accélérés à l'énergie d'implantation souhaitée puis le faisceau d'ions est mis en forme par des lentilles électrostatiques. Un dispositif de balayage en X et Y permet d'assurer une implantation uniforme sur la surface désirée.

En fonction de la nature du matériau implanté, de la nature de l'ion accéléré et de l'énergie d'accélération, la profondeur moyenne de pénétration peut aller de 100 Å à 1 mm.

Le schéma d'un implanteur ionique est illustré sur la figure I.7.



**Figure I.7 :** Schéma d'un implanteur ionique avec séparation de masses [11]

L'implantation ionique présente beaucoup d'avantages par rapport à la diffusion :

- Une haute pureté du dopant (vide, séparation)
- Une grande variété de profils (selon l'énergie) et de dopants
- Une dose précise (bon contrôle de la concentration)
- Un processus à basse température (77-300 K)
- Un processus hors équilibre thermodynamique (possibilité de dépasser la solubilité limite)

A part l'équipement lourd, le gros inconvénient de la technique d'implantation est le dommage provoqué dans le réseau cristallin par le bombardement ionique. Celui-ci déplace les atomes du réseau en dehors de leurs positions d'équilibre, créant un grand nombre de défauts. Lorsque les doses sont élevées ( $> 10^{16}$  at.cm<sup>-3</sup>), le nombre d'atomes hors site par unité de volume devient comparable à la densité atomique du semi-conducteur. Dans ce cas, le semi-conducteur devient

amorphe. Un recuit thermique est indispensable après implantation. A cet effet, les fours de diffusion sont utilisés.

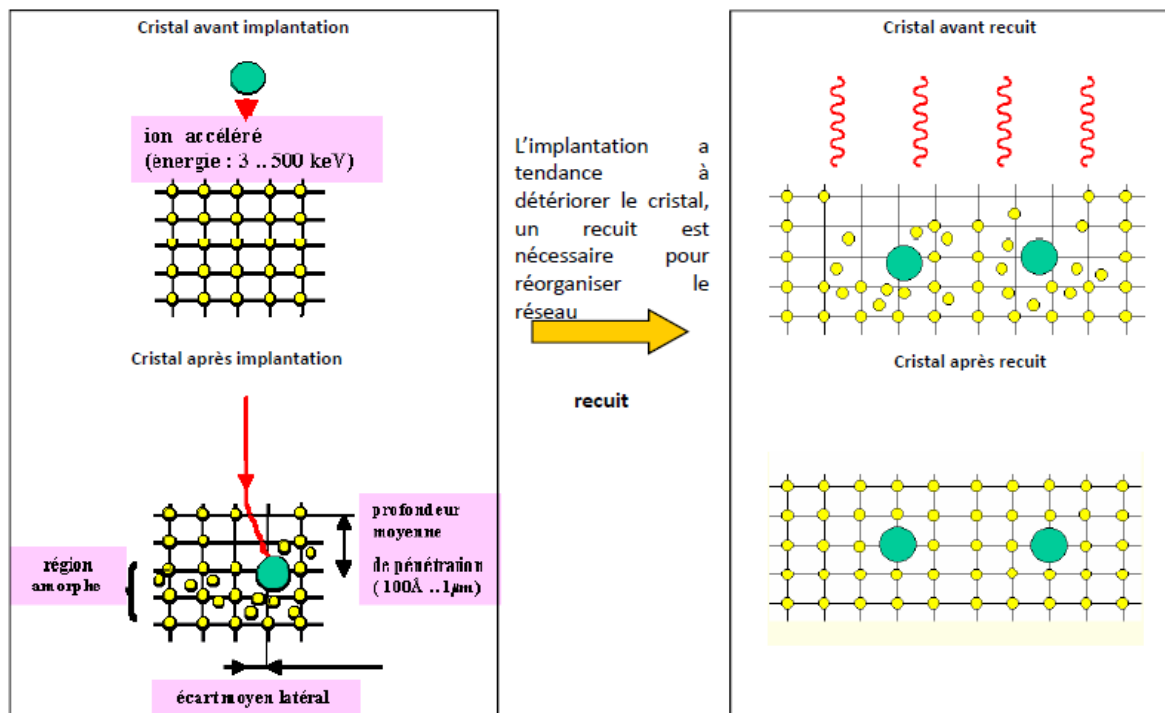
Le recuit doit être réalisé à une température suffisamment basse ( $< 600\text{ }^{\circ}\text{C}$  pour le silicium par exemple) pour éviter la diffusion des impuretés à l'intérieur du cristal.

Une pratique de plus en plus courante consiste à effectuer des recuits thermiques à plus haute température ( $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) mais durant des temps très brefs (ms) à l'aide de faisceaux d'électrons, de faisceaux laser ou de lampes flash.

Ce recuit thermique permet aussi une redistribution des atomes dopants et donc une modification du profil de dopage par phénomène de diffusion. Il peut aussi permettre l'activation du dopant implanté.

La figure I.8 illustre le processus de l'implantation ionique.

## L'implantation ionique



**Figure I.8:** Illustration du processus de l'implantation ionique [11]

Pour le dopage dans le four, ainsi que pour l'activation et la diffusion des dopants dans la production de circuits intégrés modernes, les fours verticaux sont utilisés. Ils sont disponibles en différents modèles et tailles, pour la recherche et le développement (Koyo VF1000), et aussi pour la production de masse (Koyo VF5100/VF5300 ou Koyo VF5700/VF5900). Les fours Koyo verticaux sont équipés d'un LGO élément chauffant, ce qui permet d'économiser des coûts.

La figure I.9 montre des images de ces types de fours.



**Figure I.9 :** Fours Koyo [11]

#### **I.4 : Types de photopile**

La performance d'une photopile, utilisée pour la conversion photovoltaïque, dépend de plusieurs paramètres, dont l'un est le type de la photopile.

Nous pouvons citer :

- Les photopiles monofaciales [18, 19, 20]
- Les photopiles bifaciales [21, 22]
- Les photopiles à jonctions verticales [23, 24]

Pour les photopiles monofaciales ou bifaciales, les rayons lumineux arrivent perpendiculairement au plan de la jonction P-N. Si le plan de la jonction est disposé de façon verticale, alors les rayons lumineux seront horizontaux.

Quant à la photopile à jonction verticale, les rayons lumineux arrivent parallèlement au plan de la jonction.

#### **I.5 : Techniques de caractérisation**

Il existe plusieurs techniques de caractérisation de ces photopiles. L'ensemble de ces techniques est basé sur la mesure des effets optiques et/ou électriques [25] des imperfections contenues dans la photopile.

Dans les différentes techniques de caractérisation, les paramètres les plus importants sont le coefficient de diffusion  $D_n$  (en relation avec le dopage de la base), la longueur de diffusion des porteurs de charge  $L_n$ , les vitesses de recombinaisons à la jonction ( $S_f$ ), en face arrière ( $S_b$ ), aux joints de grains ( $S_g$ ) et la durée de vie  $\tau$ .

Les techniques de caractérisation se définissent selon la nature de l'excitation et la détection de la réponse de la photopile. Ces techniques se subdivisent en deux grandes familles : les techniques en régime statique et les techniques en régime dynamique.

### **I.5.1 : Techniques de caractérisation en régime statique [25, 26, 27, 28, 29, 30]**

Les techniques de caractérisation en régime statique (ou le stockage n'est pas temporaire) permettent de mesurer le photocourant suite à :

- Une excitation optique monochromatique ou polychromatique constante ;
- Un bombardement par faisceau d'électrons ;
- Une excitation électrique.

### **I.5.2 : Techniques de caractérisation en régime dynamique [31, 32, 33, 34]**

Les techniques de caractérisation en régime dynamique (ou le stockage est temporaire) se divisent en deux catégories : celles en régime dynamique fréquentiel et celles en régime dynamique transitoire.

#### **I.5.2.1 : Techniques de caractérisation en régime dynamique fréquentiel (ou de modulation de fréquence et changement de phase) [35, 36, 37]**

La réponse enregistrée dépend de la nature de l'excitation ; lorsque l'excitation est un signal électrique périodique de pulsation  $\omega$ , les réponses enregistrées sont : l'impédance  $Z(\omega)$ , la capacitance  $C(\omega)$ , et la conductance  $G(\omega)$ .

Lorsque, par contre, l'excitation est un signal optique périodique de pulsation  $\omega$ , les réponses enregistrées sont la phototension alternative  $V_{ph}(\omega)$  et le photocourant alternatif  $I_{ph}(\omega)$ .

#### **I.5.2.2 : Technique de caractérisation en régime dynamique transitoire [35, 36, 37, 38]**

Les techniques en régimes transitoires permettent de mesurer le courant de court-circuit. Ce courant de court-circuit  $I_{cc}(t)$  est enregistré selon que l'excitation est :

- Un faisceau d'électrons : EBIC (Electron Beam Induced Current) ;
- Un signal électrique : ESCCD (Electrical Short Circuit Current Decay) ;
- Un signal optique : OBIC (Optical Beam Induced Current), O-DLTS (Optical Deep Level Transient Spectroscopy);

- Un signal électromagnétique.

Ces techniques permettent aussi de mesurer la tension de circuit ouvert obtenus principalement par :

- Une excitation électrique : E-DLTS (Electric al Deep Level Transient Spectroscopy) ;
- Une excitation optique : PVD (Photo Voltage Decay), SPV (Surface Photo Voltage).

Ils mesurent la photoconductivité obtenus suite à une excitation par ondes micrométriques de l'échantillon massif.

## I.6 : Techniques de modélisation

Les techniques de modélisation reposent sur des modèles unidimensionnels et tridimensionnels [31, 39].

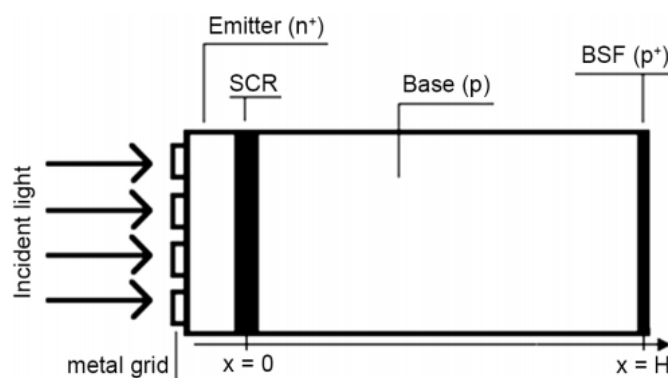
La modélisation de ces modèles dépend du type de la photopile (monofaciale, bifaciale [40, 41], et à jonction vertical [42, 43]), des techniques de caractérisation des photopiles sous excitation optique (mono ou polychromatique) : régime statique [44], régime dynamique fréquentiel [45, 46] et le régime dynamique transitoire [47, 48]. La modélisation tient compte également des conditions d'exposition des photopiles notamment la concentration solaire ( $n$ ), l'angle d'incidence variable  $\Theta$  [49,50], la température [51], le champ magnétique [19,52] et l'irradiation [53].

Dans le cadre de cette étude bibliographique, nous allons nous limiter sur les travaux basés sur les photopiles à base de silicium polycristallin en régime statique sous excitation optique polychromatique (sous éclairage polychromatique).

### I.6.1 : Technique de modélisation pour le model unidimensionnel en régime statique

#### I.6.1.1 : Densité de porteurs minoritaires en excès dans la base

L'étude porte sur une photopile de type  $n^+-p-p^+$  et sa structure unidimensionnelle est présentée sur la figure I.10 [51, 54].



**Figure I.10:** Structure d'une photopile de type  $n^+-p-p^+$  [51, 54].



Quand la photopile est éclairée, il y'a création de pair électron-trou dans la base. La densité de porteurs minoritaires dans la base est modélisée à partir de l'équation de continuité suivante :

$$\frac{\partial^2 \delta n(x)}{\partial x^2} - \frac{\delta n(x)}{Ln^2} = -\frac{G(x)}{Dn} \quad \text{I.1}$$

$\delta n(x)$  est la densité de porteurs minoritaires dans la base à la position  $x$

$G(x)$  est le taux de génération des porteurs minoritaires dans la base à la position  $x$  [51, 55] et est donnée par :

$$G(x) = \sum_{i=1}^3 a_i \cdot e^{-b_i \cdot x} \quad \text{I.2}$$

$a_i$  et  $b_i$  sont des coefficients obtenus à partir des valeurs tabulées de l'éclairement solaire sous les conditions AM 1,5 [51, 54, 56]:

$Ln$  et  $Dn$  sont respectivement la longueur de diffusion et le coefficient de diffusion des porteurs minoritaires.

L'équation I.3 est la solution générale de l'équation I.1 qui est l'expression de la densité des porteurs minoritaires dans la base.

$$\delta n(x, T) = A \cdot \cosh\left(\frac{x}{L(T)}\right) + B \cdot \sinh\left(\frac{x}{L(T)}\right) + \sum_{i=1}^3 \frac{a_i \cdot L(T)^2}{D(T) \cdot [L(T)^2 \cdot b_i^2 - 1]} \quad \text{I.3}$$

Les expressions de A et B sont déterminés à partir des conditions aux limites suivantes [51, 54] :

A la jonction ( $x = 0$ )

$$\left[ \frac{\partial \delta n(x, T)}{\partial x} \right]_{x=0} = \frac{Sf}{D(T)} \delta n(x = 0, T) \quad \text{I.4}$$

A la face arrière ( $x = H$ )

$$\left[ \frac{\partial \delta n(x, T)}{\partial x} \right]_{x=H} = -\frac{Sb}{D(T)} \cdot \delta n(x = H, T) \quad \text{I.5}$$

$Sf$  est la vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires en excès à la jonction. Elle caractérise le point de fonctionnement de la cellule [51, 54].

$Sb$  est la vitesse de recombinaison à la face arrière des porteurs minoritaires en excès dans la base [51, 54].

### I.6.1.2 : Densité de photocourant

La densité de photocourant de la photopile est déterminée à partir de l'expression de la densité de porteurs minoritaires dans la base par la relation suivante [51, 56]:

$$J_{ph}(S_f, T) = q \cdot D(T) \left[ \frac{\partial \delta n(S_f, T)}{\partial x} \right]_{x=0} \quad \text{I.6}$$

### I.6.1.3 : Phototension

La relation de Boltzmann permet d'obtenir l'expression de la phototension [51, 56]:

$$V_{ph}(S_f, T) = V_T \cdot \ln \left[ \frac{N_b}{n_i^2(T)} \cdot \delta n(x, S_f, T) + 1 \right] \quad \text{I.7}$$

Dans la partie qui suit nous allons mettre en évidence la technique de modélisation à trois dimensions d'une photopile à base de silicium polycristallin sous éclairage polychromatique en régime statique.

## I.6.2 : Technique de modélisation pour le model tridimensionnel en régime statique

### I.6.2.1 : Densité de porteurs minoritaires en excès dans la base

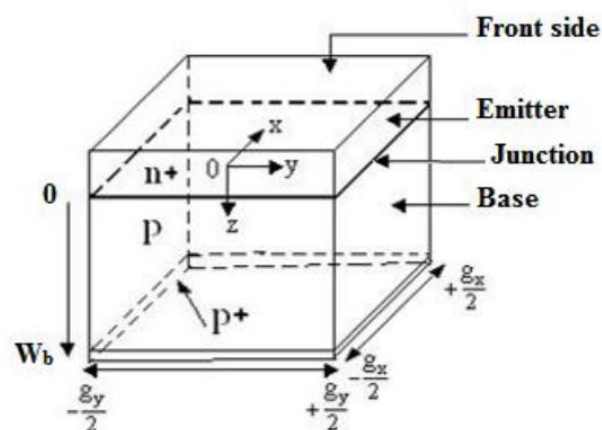
Le substrat polycristallin est composé de plusieurs grains ou cristallites de toutes formes et tailles. Pour une étude de modélisation tridimensionnelle, nous utiliserons le modèle colonnaire où chaque grain est supposé avoir une forme parallélépipédique [27, 39, 57, 58, 59, 60].

La photopile au silicium sur la quelle porte cette étude est monofaciale de type  $n^+ - p - p^+$ .

Elle est formée de quatre parties essentielles :

L'émetteur (de type  $n^+$ ), zone fortement dopée ( $10^{17} - 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  atome de phosphore), qui est appelé la face avant de la photopile. Son épaisseur est comprise entre 0.3 à  $1 \mu\text{m}$ .

La base (type  $p$ ), d'épaisseur variant de 100 à  $400 \mu\text{m}$ , qui est faiblement dopée (de  $10^{15} - 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  atomes de bore).



**Figure I.11:** Schéma d'un grain de silicium de la photopile [60]

L'émetteur et la base sont séparés par une zone dépourvue de charge appelée région de charge d'espace (ZCR) où un fort champ électrique règne est appelé la jonction.

La surface arrière (Type p<sup>+</sup>) est constituée d'une zone sur dopée (de 10<sup>17</sup> à 10<sup>19</sup> cm<sup>-3</sup>) où règne un champ électrique qui permet les porteurs photogénérés près de la face arrière d'atteindre la jonction.

Dans le cas tridimensionnel ou le grain de semi-conducteur est représenté sur la figure I.11 ; la densité de porteurs minoritaires en excès dans la base est régit par l'équation de continuité ci-dessous [27, 39, 60, 61] :

$$\frac{\partial^2 \delta n(x, y, z)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \delta n(x, y, z)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \delta n(x, y, z)}{\partial z^2} = \frac{\delta n(x, y, z)}{L^2} - \frac{1}{D} \cdot G(z) \quad \text{I.8}$$

Dans cette équation, L est la longueur de diffusion et D le coefficient de diffusion.

G(x) est le taux de génération des porteurs minoritaires dans la base et son expression est [26] :

$$G(z) = \sum_{m=1}^3 a_m \exp^{-b_m \cdot z} \quad \text{I.9}$$

La solution générale de l'équation (I.8), qui est l'expression de la densité de porteurs minoritaires dans la base est donnée par [60] :

$$\delta n(x, y, z) = \sum_k \sum_j Z_{kj}(z) \cdot \cos(c_k x) \cdot \cos(c_j y) \quad \text{I.10}$$

C<sub>k</sub> et C<sub>j</sub> sont des valeurs propres obtenues à partir des conditions aux limites des joints de grain données ci-dessous :

$$\left[ \frac{\partial \delta n(x, y, z)}{\partial x} \right]_{x=\pm \frac{g_x}{2}} = \mp \frac{S_{gb}}{D} \cdot \delta n\left(\pm \frac{g_x}{2}, y, z\right) \quad \text{I.11}$$

$$\left[ \frac{\partial \delta n(x, y, z)}{\partial y} \right]_{y=\pm \frac{g_y}{2}} = \mp \frac{S_{gb}}{D} \cdot \delta n\left(x, \pm \frac{g_y}{2}, z\right) \quad \text{I.12}$$

S<sub>gb</sub> est la vitesse de recombinaison aux joints de grain des porteurs minoritaires aux limites des grains.

En remplaçant l'équation (I.10) dans l'équation (I.8) et en utilisant la condition d'orthogonalité des cos(c<sub>k</sub>x) et cos(c<sub>j</sub>y), l'équation (I.13) est obtenue.

$$\frac{\partial^2 Z_{kj}(z)}{\partial z^2} - \frac{1}{L_{kj}^2} \cdot Z_{kj} = -\frac{1}{D_{kj}} \cdot G(z) \quad \text{I.13}$$

L<sub>kj</sub> et D<sub>kj</sub> sont respectivement la longueur de diffusion et le coefficient de diffusion effectif des porteurs minoritaires dans la base de la photopile

$$\text{Avec } L_{kj} = \left[ c_k^2 + c_j^2 + L^{-2} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad \text{I.14}$$

$$D_{kj} = \frac{D \cdot [\sin(c_k \cdot g_x) + c_k \cdot g_x] \cdot [\sin(c_j \cdot g_y) + c_j \cdot g_y]}{16 \cdot \sin\left(c_k \cdot \frac{g_x}{2}\right) \cdot \sin\left(c_j \cdot \frac{g_y}{2}\right)} \quad \text{I.15}$$

$Z_{kj}(z)$  représente la fonction spatiale de la densité de porteurs minoritaires en excès en fonction de la profondeur  $z$ .

$$Z_{kj}(z) = A_{kj} \cdot \cosh\left(\frac{z}{L_{kj}}\right) + B_{kj} \cdot \sinh\left(\frac{z}{L_{kj}}\right) - \sum_{m=1}^3 K_m \cdot \exp^{-b_m \cdot z} \quad \text{I.16}$$

$$K_m = \frac{L_{kj}^2}{D_{kj} [b_m^2 \cdot L_{kj}^2 - 1]} \cdot a_m \quad \text{I.17}$$

Les constantes  $A_{kj}$  et  $B_{kj}$  sont obtenues avec les conditions aux limites à la jonction et à la face arrière [21, 40, 57] :

$$\left[ \frac{\partial \delta n(x, y, z)}{\partial z} \right]_{z=0} = \frac{Sf}{D} \delta n(x, y, 0) \quad \text{I.18}$$

$$\left[ \frac{\partial \delta n(x, y, z)}{\partial z} \right]_{z=wb} = -\frac{Sb}{D} \cdot \delta n(x, y, wb) \quad \text{I.19}$$

### I.6.2.2 : Densité de photocourant

A partir de l'expression de la densité des porteurs minoritaires dans la base, l'expression générale de la densité de photocourant est donnée comme suit [21, 40, 57] :

$$J_{ph} = \frac{q \cdot D}{g_x \cdot g_y} \int_{-\frac{g_x}{2}}^{+\frac{g_x}{2}} \int_{-\frac{g_y}{2}}^{+\frac{g_y}{2}} \left[ \frac{\partial \delta n(x, y, z)}{\partial z} \right]_{z=0} dx dy \quad \text{I.20}$$

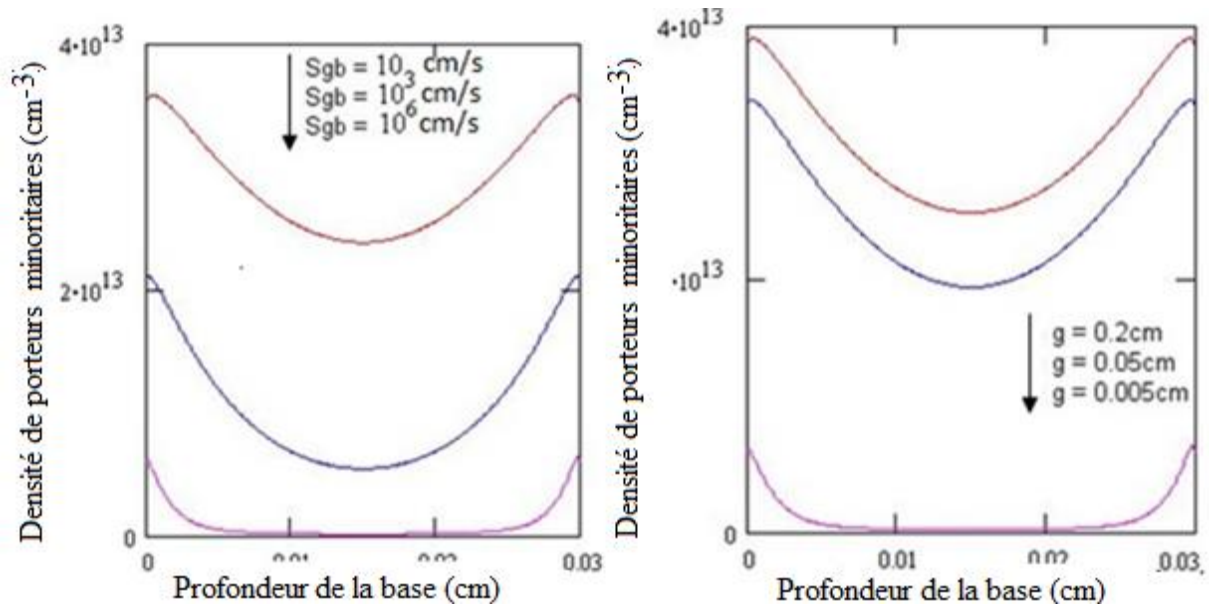
### I.6.2.3 : Phototension

L'expression de la phototension est obtenue à travers la relation de BOLTZMANN suivante [21, 40, 57] :

$$V_{ph} = V_T \cdot \log \left[ 1 + \frac{N}{n_i} \int_{-\frac{g_x}{2}}^{+\frac{g_x}{2}} \int_{-\frac{g_y}{2}}^{+\frac{g_y}{2}} \delta n(x, y, 0) dx dy \right] \quad \text{I.21}$$

## I.7: Effet de la taille de grain et de la vitesse de recombinaison aux joints de grain sur la densité de porteurs minoritaires de charge

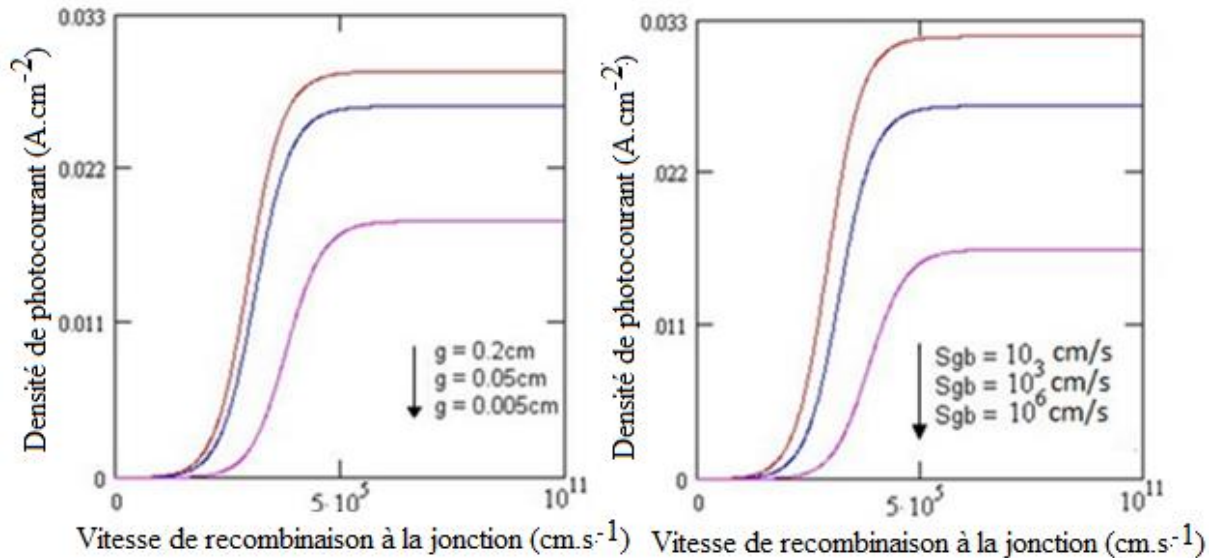
Nous présentons dans la figure I.12 le profil de la densité de porteurs minoritaires pour quelques valeurs de la vitesse de recombinaison aux joints et de la taille de grain pour un éclairage simultané des deux faces (avant et arrière).



**Figure I.12** : Profil de la densité de porteurs minoritaires en fonction de la profondeur dans la base pour respectivement quelques valeurs de la vitesse de recombinaison aux joints de grain et de la taille des grains :  $g = 0.005$  cm,  $S_f = 3 \cdot 10^3$  cm.s<sup>-1</sup>,  $S_b = 3 \cdot 10^3$  cm.s<sup>-1</sup>,  $w_b = 0.03$  cm,  $S_{gb} = 10^5$  cm.s<sup>-1</sup> [21]. Ces figures montrent que pour un éclairage simultané de la photopile par les deux faces, la densité de porteurs minoritaires dans la base diminue lorsque nous nous déplaçons en profondeur dans la base. La densité de porteurs est faible à l'approche du centre de la base [21, 57, 62]. Ce qui est conforme à la loi de fick sur l'effet des grandes profondeurs dans la base. Ces profils soulignent également l'effet de la taille de grain et de la vitesse de recombinaison aux joints de grain sur la densité de porteurs minoritaires. La diminution de la taille des grains provoque une réduction de la densité de porteurs [21, 57]. En effet, la décroissance de la taille de grain conduit à une augmentation des centres de recombinaison aux joints de grains. Nous notons également que plus la vitesse de recombinaison aux joints de grain est élevée, plus la densité de porteurs est faible. Cette variation met en évidence l'effet des recombinaisons aux joints de grains.

### I.8 : Effet de la taille de grain et de la vitesse de recombinaison aux joints de grain sur la densité de photocourant

Nous présentons sur la figure I.13 le profil de la densité de photocourant pour quelques valeurs de la vitesse de recombinaison aux joints et de la taille de grain.



**Figure I.13 :** Profil de la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour respectivement quelques valeurs de la vitesse de recombinaison aux joints de grain et de la taille des grains :  $S_{gb} = 10^5 \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $S_b = 3 \cdot 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $w_b = 0.03 \text{ cm}$ ,  $g = 0.005 \text{ cm}$  [21].

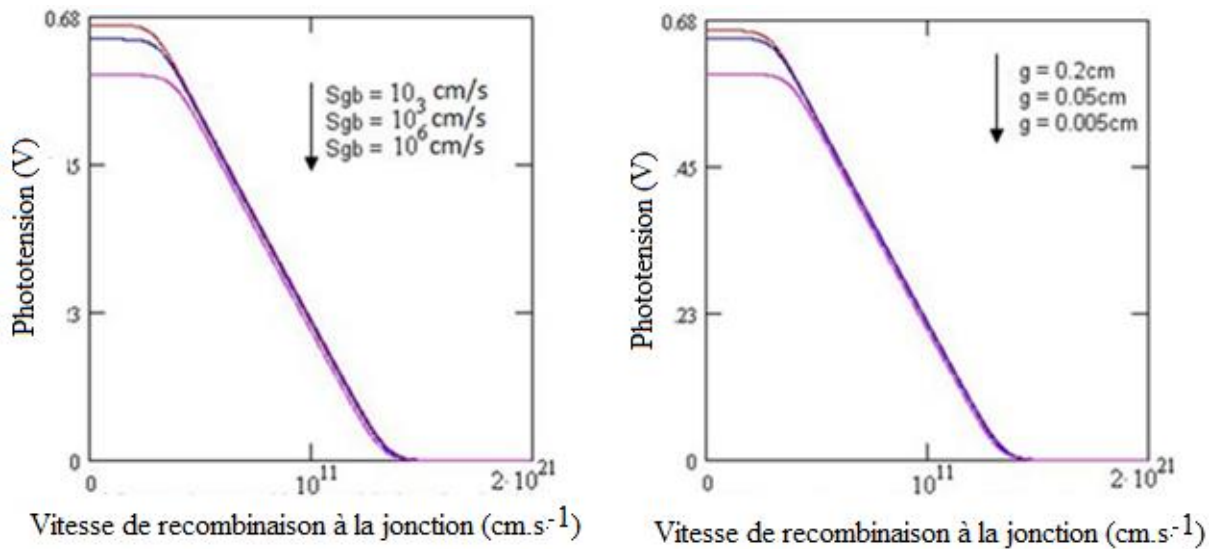
Les courbes de la figure I.13 montrent que la densité de photocourant a deux niveaux :

Le premier correspond à une photopile en mode circuit-ouvert obtenu pour les faibles vitesses de recombinaison à la jonction ( $S_f < 2 \cdot 10^2 \text{ cm.s}^{-1}$ ).

Le second correspondant à une cellule solaire en mode de court-circuit, obtenue pour les grandes vitesses de recombinaison à la jonction ( $S_f > 5 \cdot 10^5 \text{ cm.s}^{-1}$ ). Entre ces deux niveaux, la densité de photocourant augmente progressivement avec la vitesse de recombinaison à la jonction qui correspond à différents points de fonctionnement de la cellule solaire [21]. La densité de photocourant diminue lorsque la taille des grains décroît et lorsque la vitesse de recombinaison aux joints de grain augmente.

### I.9 : Effet de la taille de grain et de la vitesse de recombinaison sur la phototension

La figure I.14 illustre la variation de la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction ( $S_f$ ) respectivement pour différentes valeurs de la vitesse de recombinaison aux joints et de la taille de grain.

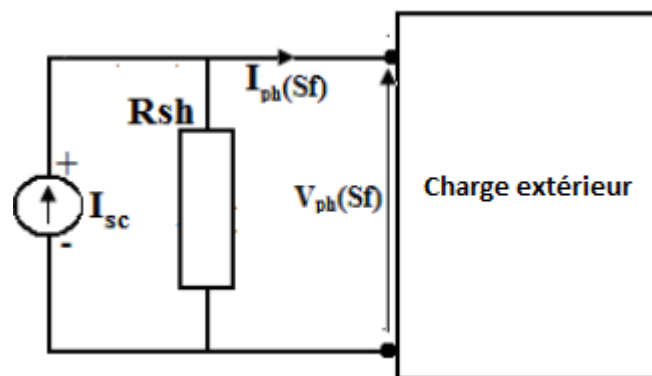


**Figure I.14 :** Profil de la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour respectivement quelques valeurs de la vitesse de recombinaison aux joints de grain et de la taille des grains :  $g = 0.005 \text{ cm}$ ,  $S_b = 3.10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $w_b = 0.03 \text{ cm}$ ,  $S_{gb} = 10^5 \text{ cm.s}^{-1}$  [21].

Les courbes de la figure I.14 montrent que la phototension est important pour les faibles vitesses de recombinaisons à la jonction ( $S_f \leq 2.10^2 \text{ cm.s}^{-1}$ ). Dans cette zone, la tension est maximum, ce qui correspond au fonctionnement en mode de circuit-ouvert de la cellule solaire. Il diminue en suite lorsque la vitesse de recombinaison à la jonction augmente. Nous notons aussi une diminution globale de la tension photoélectrique lorsque la vitesse de recombinaison aux joints de grain augmente et lorsque la taille des grains décroît [21].

### I.10: Résistance shunt

La résistance shunt traduit les courants de fuite au sein de la photopile. On se place en situation de court-circuit de la caractéristique I-V et à ce niveau, les défauts qui ont poussé à ne pas avoir une courbe tout à fait horizontale sont assimilables à une résistance shunt ( $R_{sh}$ ). Ainsi la photopile est assimilable à un générateur de courant idéal qui débite un courant  $J_{phcc}$  en parallèle avec une résistance  $R_{sh}$ .

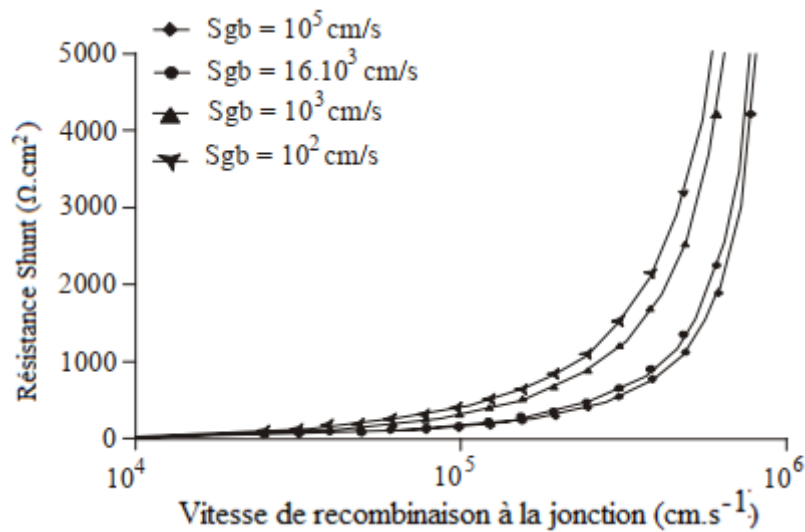


**Figure I.15 :** Schéma équivalent de la photopile en fonctionnement au voisinage du court-circuit [63]

En appliquant la loi des mailles au circuit de la figure I.15, on détermine l'expression de la résistance shunt qui est donnée par l'équation I.22 [63]:

$$R_{sh}(S_f, S_b, S_{gb}, g) = \frac{V_{ph}(S_f, S_b, S_{gb}, g)}{J_{cc}(S_b, S_{gb}, g) - J_{ph}(S_f, S_b, S_{gb}, g)} \quad \text{I.22}$$

La résistance shunt étant fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction ( $S_f$ ), on représente sur la figure I.16 et I.17 ces profils en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour quelques valeurs de la vitesse de recombinaison aux joints de grain et pour différentes valeurs de la taille des grains.



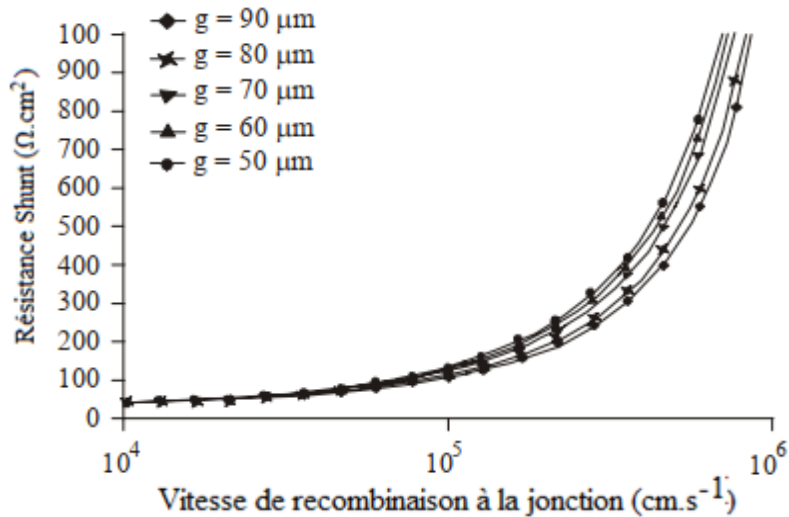
**Figure I.16:** Résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour quelques valeurs différentes de la vitesse de recombinaison aux joints de grain [63] :

Pour les valeurs faibles appartenant au domaine de validité de notre modèle, la résistance shunt reste constante et augmente considérablement lorsque la vitesse de recombinaison atteint  $10^6 \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ . La résistance shunt croît linéairement avec la vitesse de recombinaison à la jonction pour tendre vers le maximum. Or, si la résistance shunt est petite et en particulier tend vers zéro, alors on assiste à un court-circuit de la photopile. C'est pourquoi, celle-ci doit être suffisamment grande.

Ceci pose le problème du domaine d'applicabilité de cette méthode de détermination de la résistance shunt d'une photopile. Cette technique est valable seulement pour des vitesses de recombinaisons élevées donnant de grandes résistances.

Nous notons que l'augmentation de la vitesse de recombinaison aux joints de grain entraîne une réduction de la résistance shunt de la photopile (Figure I.16). Qui est due à l'augmentation des centres de recombinaison





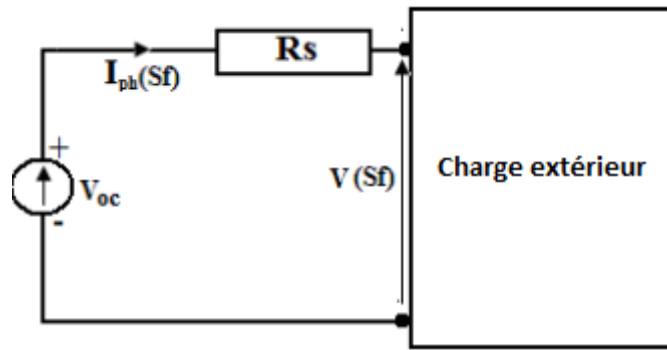
**Figure I.17:** Résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour quelques valeurs différentes de la taille des grains [63]:

Sur la figure I.17, l'augmentation de la taille des grains entraîne la croissance de la résistance shunt. Ceci s'explique par une diminution des fuites de courant. Ce qui améliore la performance de la photopile [63].

### I.11 : Résistance série

Les grilles de collecte du photocourant (contacts métalliques) et en particulier leurs interfaces avec le semi-conducteur constituent des sources dissipatrices de l'énergie photoélectrique. Ces sources de dissipation d'énergie sont caractérisées par une résistance appelée résistance série de la photopile. La résistance série représente alors les pertes résistives au sein de la photopile liée à la structure du matériau et à la métallisation.

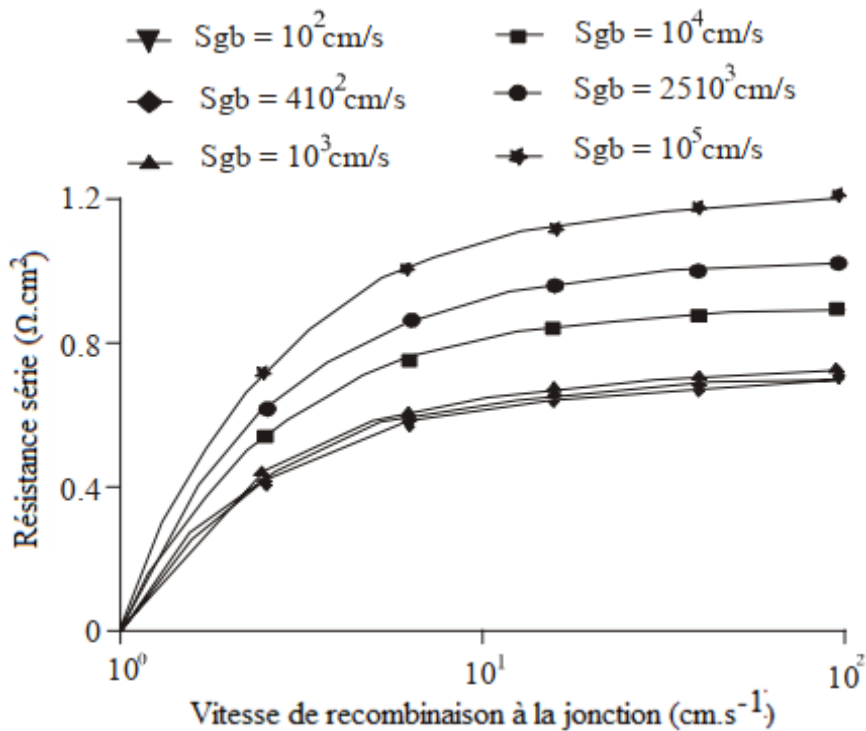
La chute de la tension de charge provoquée par l'augmentation de la résistance série sous l'influence de la vitesse de recombinaison à la jonction est liée à une intensification des recombinaisons dans le matériau silicium. Pour déterminer la résistance série de la photopile, on se place en situation de circuit ouvert de la caractéristique I-V où on a une droite oblique, or pour un générateur de tension idéale la droite devait être verticale. Cette imperfection est symbolisée par la résistance série. Par conséquent pour la déterminer, on adopte un schéma électrique équivalent d'une photopile qui fonctionne au voisinage du circuit ouvert représenté à la figure I.18.



**Figure I.18:** Schéma équivalent de la photopile en fonctionnement au voisinage du circuit ouvert [63]  
 En appliquant la loi des mailles à ce circuit, on a l'expression de la résistance série qui est donnée par [63]:

$$R_s(Sf, Sb, Sgb, g) = \frac{V_{oc}(Sb, Sgb, g) - V_{ph}(Sf, Sb, Sgb, g)}{J_{ph}(Sf, Sb, Sgb, g)} \quad \text{I.23}$$

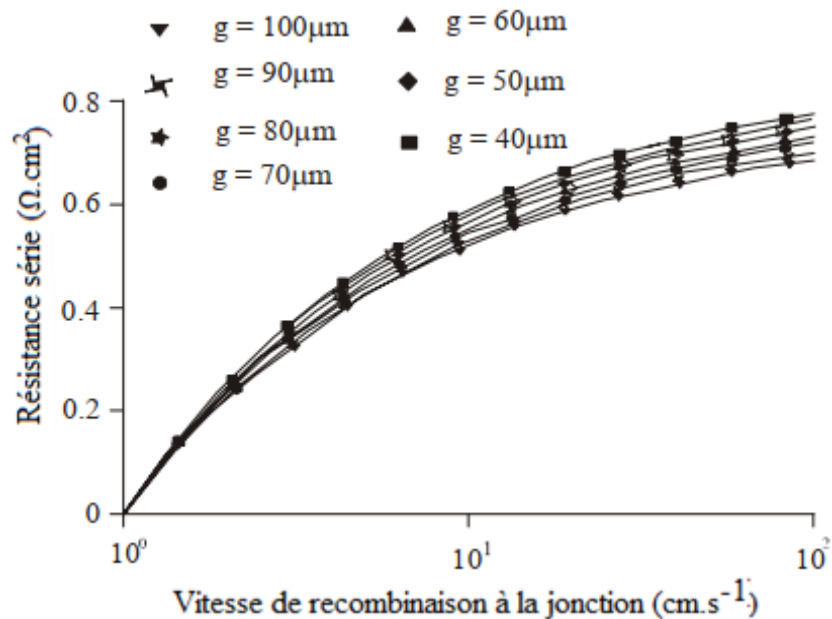
A partir de cette expression, on étudie le profil de la résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction donné par les figures I.19 et I.20 respectivement pour quelque vitesse de recombinaison aux joints de grain et de la taille de grain.



**Figure I.19:** Résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour quelques valeurs différentes de la vitesse de recombinaison aux joints de grains [63] :

On constate que la résistance série croît avec la vitesse de recombinaison à la jonction. L'augmentation de la résistance série aux grandes valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction n'est pas souhaitable pour la photopile. Pour satisfaire cette condition, dans notre modèle, la valeur de la résistance série doit être faible. Ceci pose le problème de l'applicabilité

de cette technique. Elle est valable pour des vitesses de recombinaison à la jonction faibles correspondant à de faibles résistances série provoquant ainsi des chutes de tensions faibles.



**Figure I.20** : Résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour quelques valeurs différentes de la taille de grains [63].

Nous observons aussi sur les figures I.19 et I.20 que la résistance série croit lorsque les activités de recombinaisons aux joints de grain augmentent et la taille des grains diminue. Cette croissance est beaucoup plus marquée lorsque la recombinaison Sf est élevée. La vitesse de recombinaison aux joints de grain diminue donc la tension aux bornes de la photopile [63].

### Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le principe de préparation des photopiles à base de silicium polycristallin, puis nous avons présenté les types de photopiles, leurs techniques de caractérisation et de modélisation. Ensuite nous avons évalué l'origine et les causes des recombinaisons au sein d'une photopile à base de silicium polycristallin dans le but d'améliorer le rendement de conversion photovoltaïque.

En se basant sur cette étude bibliographique, nous allons, dans le chapitre suivant, faire une étude à trois dimensions du profil des porteurs minoritaires de charge en excès dans la base d'une photopile bifaciale en régime statique sous éclairage polychromatique.

**CHAPITRE II : ETUDE DE LA  
DENSITE DES  
PORTEURS MINORITAIRES DANS  
LA BASE**

## INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous allons faire une étude à trois dimensions d'une photopile au silicium polycristallin en régime statique, sous éclairage polychromatique.

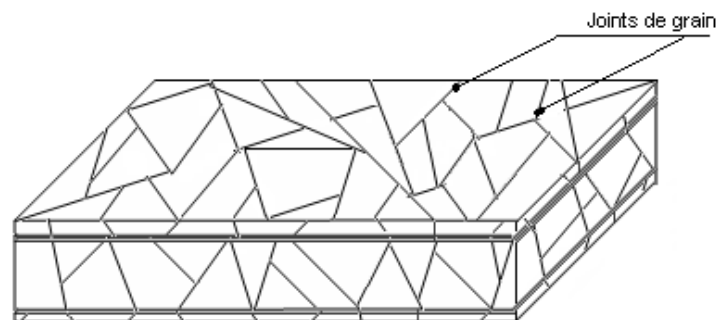
Pour ce faire, nous utiliserons le modèle colonnaire [27] comme le montre la figure (II.2). En effet, le silicium polycristallin est composé de plusieurs grains de tailles et de formes diverses figure (II.1). Il est obtenu par fusion puis par la recristallisation du substrat de base (silicium de qualité électronique) et c'est au cours de la recristallisation qu'il y a formation de ces grains.

Nous supposons que ces grains ont une forme régulière parallélépipédique, ce qui simplifiera la modélisation des joints de grain.

Ainsi nous analyserons la distribution des porteurs minoritaires dans la base de la photopile dans un repère à trois dimensions et nous étudierons l'effet du taux de dopage de la base, de la taille de grain et de l'épaisseur de la base.

### II.1 : Présentation de la photopile

Notre étude porte sur une photopile à base de silicium polycristallin. Le substrat polycristallin est constitué par l'association de plusieurs grains de très petites tailles. Ces grains sont séparés par des zones de transition appelées joints de grains. Aussi, bien que chaque grain soit caractérisé par un arrangement tridimensionnel périodique des atomes, il n'y a pas de cohérence entre les orientations cristallines des différents grains de l'échantillon qui sont séparés par des zones de transition où l'arrangement atomique est perturbé [64]. Les joints de grain sont de grands centres de recombinaison, donc des facteurs influençant des paramètres macroscopiques et microscopiques de la photopile.

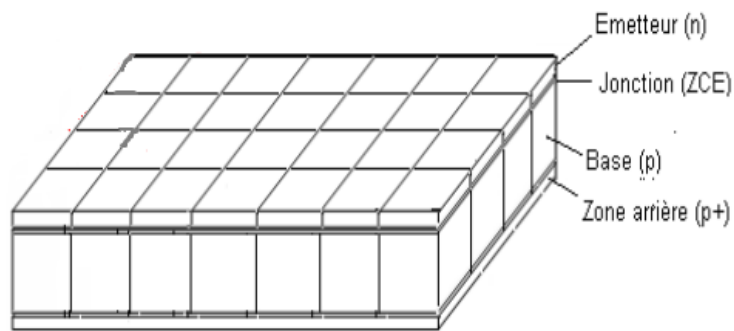


**Figure II.1** : Schéma illustratif des joints de grain d'un silicium polycristallin.

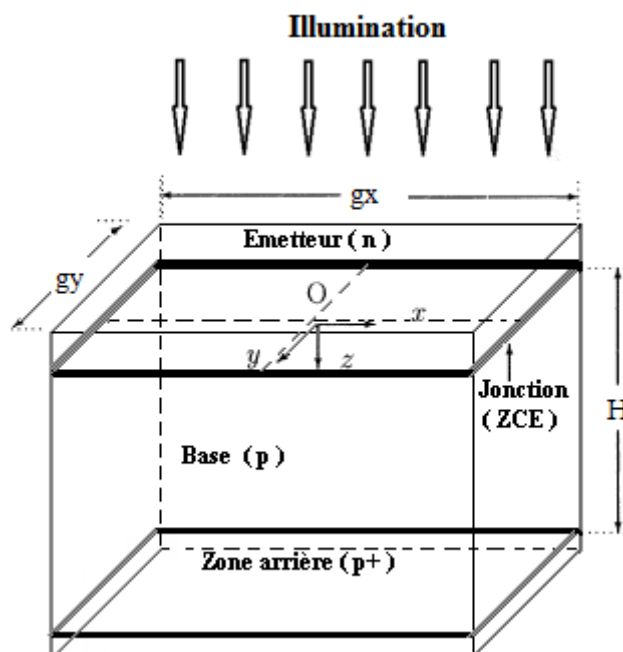
Comme le montre la figure II. 1, les cristaux sont de tailles et de formes différentes. Ainsi, nous considérons dans la modélisation que tous les grains ont une forme parallélépipédique et sont de même taille (figure II. 2) [57, 64, 65].

Dans notre modélisation, chaque grain a une forme parallélépipédique avec  $g_x = g_y$  comme l'indique la figure II.3. Les plans de recombinaison sont les surfaces adjacentes de deux grains

et sont localisés aux positions  $x = \pm \frac{g_x}{2}$  et  $y = \pm \frac{g_y}{2}$ . Ces plans sont perpendiculaires aux axes (O x) et (O y) dans le système de coordonnées cartésiennes.



**Figure II.2** : Schéma du modèle colonnaire des joints de grain d'un silicium polycristallin.



**Figure II.3** : Schéma d'un grain de silicium de la photopile

La photopile au silicium sur la quelle porte notre étude est bifaciale de type n-p-p+ (figure II. 3). Elle est formée de quatre grandes parties essentielles :

- ✓ L'émetteur, zone du silicium fortement dopé en atomes de phosphore. Le dopage introduit dans cette zone des atomes susceptibles de libérer des électrons mobiles, on parle de couche N. L'épaisseur de l'émetteur est de l'ordre de 0.3 à 1  $\mu\text{m}$ .
- ✓ La base d'épaisseur plus importante (100 à 400  $\mu\text{m}$ ) est faiblement dopée en atomes de bore déficitaire en électron. Le bore étant un atome qui possède moins d'électron sur sa couche périphérique, il lui manque un électron pour la réalisation des liaisons. Le bore va donc capter un électron dans le reste du matériau. Cet électron laisse derrière lui un trou d'électron qui est mobile et de charge positive. Le dopage introduit dans cette couche des atomes susceptibles de libérer des trous mobiles on parle de couche P car la charge mobile est positive.

✓ L'émetteur et la base sont séparés par une zone dépourvue de charges appelée zone de charge d'espace (ZCE) où règne un champ électrique intense qui sépare les paires électron-trou : C'est la jonction.

✓ La face arrière de type  $P^+$  est constituée par une zone sur dopée par les impuretés trivalentes ( $10^{17}$  à  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ) où existe un champ électrique intense permettant de renvoyer les porteurs photogénérés près de la face arrière vers la jonction.

Lorsque les rayons du soleil frappent une cellule photovoltaïque, les photons de la lumière apportent l'énergie permettant la génération des porteurs de charges pour créer le courant électrique. Mais certains subissent au sein de la photopile des recombinaisons. Toutefois, la génération du photocourant est largement dominée par la contribution de la base de la photopile. Pour la collecte du courant résultant de l'absorption de la lumière (des photons), des électrodes sous forme de grille métalliques sont déposées par sérigraphies sur les faces avant et arrière servant de contacts électriques. Une couche antireflet est déposée sur ces deux électrodes pour augmenter la quantité de lumière absorbée par la cellule.

Le taux de génération des porteurs de la base à une position  $z$  est proportionnel à la quantité de lumière reçue à cette position. Le taux d'absorption de la lumière étant fonction de la profondeur de la base, il s'ensuit une génération non uniforme dans le volume de la base. Le maximum de photogénération se fait dans la région proche de la surface éclairée puis se réduit progressivement quand on s'éloigne de cette région.

Ce gradient de concentration des porteurs le long de l'axe (O-z) fait apparaître un champ électrique de direction (O-z) que l'on suppose négligeable [40, 57, 60]. La pénétration de la lumière se faisant le long de l'axe (O-z), la photogénération des porteurs se fait suivant cet axe [40]. Par conséquent, nous considérons que la concentration des électrons est uniforme le long des axes (O-x) et (O-y).

Dans le cadre de notre étude nous avons retenu le modèle mathématique tridimensionnel (figure II.1). La photopile est éclairée par sa face avant (figure II. 3) et la jonction de la photopile sera prise comme l'origine de l'axe  $z$ , le centre de ce plan contenant la jonction sera considéré comme l'origine de la base (x-o-y). Aussi nous négligerons la contribution de l'émetteur au photocourant par rapport à celle de la base [40, 57, 60] et seul le champ électrique à la jonction sera pris en compte. La face avant qui reçoit le rayonnement est recouvert d'un revêtement anti réfléchissant [18]. Les joints de grain sont perpendiculaires à la jonction [18, 31, 57] et leurs vitesses de recombinaisons indépendantes du taux de génération. Donc les conditions aux limites de l'équation de continuité sont linéaire [18].

## II.2 : Taux de génération

L'éclairement auquel sera soumise la photopile est considéré comme uniforme. Nous aurons donc un taux de génération ne dépendant que de la profondeur  $z$  dans la base. Son expression générale sera donnée par la relation suivante [51, 55, 57] :

$$G(z) = \sum_{i=1}^3 a_i \cdot \exp(-b_i \cdot z) \quad \text{II.1}$$

Les coefficients  $a_i$  et  $b_i$  sont obtenus à partir des valeurs tabulées de l'éclairement solaire et de la dépendance du coefficient d'absorption du silicium avec la longueur d'onde [51, 54, 56, 57] ; ces coefficients sont donnés pour AM 1,5 par :

$a_1 = 6,13 \cdot 10^{20}$	$a_2 = 0,54 \cdot 10^{20}$	$a_3 = 0,0991 \cdot 10^{20}$
$b_1 = 6630$	$b_1 = 1000$	$b_1 = 130$

$z$  est la profondeur de la base de la photopile éclairée par la face avant.

## II.3 : Equation de continuité

La densité des porteurs minoritaires 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 :

$$\frac{1}{e} \nabla J - R + G = \frac{\partial \delta n(x, y, z)}{\partial t} \quad \text{II.2}$$

$G$  est le taux de génération.

$$R = \frac{\delta n(x, y, z)}{\tau(Nb)} \quad \text{II.3}$$

$R$  est le taux de recombinaison ;  $\tau(Nb)$  la durée de vie des porteurs minoritaires dans la base qui dépend du taux de dopage de la base [66, 67] :

$$\tau(Nb) = \frac{12}{1 + \frac{Nb}{5 \cdot 10^{16}}} \quad \text{II.4}$$

$J$  est la densité de courant, elle est donnée par :

$$J = Jc + Jd = e \cdot \mu \cdot E \cdot \delta n(x, y, z) + e \cdot D(Nb) \cdot \nabla \delta n(x, y, z) \quad \text{II.5}$$

$D(Nb)$  est le coefficient de diffusion des électrons dans la base en fonction du taux de dopage de la base. Son expression est donnée par [66, 67] :



$$D(Nb) = \frac{1350 \cdot V_T}{\sqrt{1 + 81 \cdot \frac{Nb}{Nb + 3.2 \cdot 10^{18}}}} \quad \text{II.6}$$

Nb est le taux de dopage de la base, E le champ électrique de polarisation,  $\mu$  la mobilité des porteurs minoritaires, et e la charge électrique.

$\delta n(x, y, z)$  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 :

$$J = e \cdot D(Nb) \cdot \nabla \delta n(x, y, z) \quad \text{II.7}$$

L'équation (2) devient alors :

$$\frac{1}{e} \nabla (e \cdot D(Nb) \cdot \delta n(x, y, z)) - \frac{\delta n(x, y, z)}{\tau(Nb)} + G(z) = \frac{\partial \delta n(x, y, z)}{\partial t} \quad \text{II.8}$$

En régime statique on a :

$$\frac{\partial \delta n(x, y, z)}{\partial t} = 0 \quad \text{II.9}$$

L'équation de continuité (II.8) devient alors :

$$\frac{\partial^2 \delta n(x, y, z)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \delta n(x, y, z)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \delta n(x, y, z)}{\partial z^2} - \frac{\delta n(x, y, z)}{Ln(Nb)^2} = -\frac{G(z)}{D(Nb)} \quad \text{II.10}$$

$Ln(Nb)$  la longueur de diffusion des électrons dans la base qui dépende du taux de dopage de la base :

$$Ln(Nb) = \sqrt{Dn(Nb) \cdot \tau(Nb)} \quad \text{II.11}$$

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

Pour résoudre l'équation de continuité (II.10), nous allons utiliser des solutions de type [21, 40, 57, 60] :

$$\delta n(x, y, z) = \sum_k \sum_j Z(z) \cdot \cos(c_k \cdot x) \cdot \cos(c_j \cdot y) \quad \text{II.12}$$

$$\text{Avec } Z(z) = A_{kj} \cdot \cosh\left(\frac{z}{L_{kj}}\right) + B_{kj} \cdot \sinh\left(\frac{z}{L_{kj}}\right) - \sum_{i=1}^n K_i \cdot \exp(-b_i \cdot z) \quad \text{II.13}$$

$A_{kj}$  et  $B_{kj}$  seront déterminés à partir des conditions aux limites de la jonction émetteur-base et à la face arrière [21, 35, 38, 40, 57, 60, 68, 69] qui seront données ci-dessous.

## II.4 : Les conditions aux limites

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

✓ A la jonction Emetteur-Base

$$D(Nb) \cdot \left( \frac{\partial \delta n(x, y, z)}{\partial z} \right)_{z=0} = S_f \cdot \delta n(x, y, 0) \quad \text{II.14}$$

$S_f$  est la vitesse de recombinaison à la jonction (en  $\text{cm.s}^{-1}$ ). Elle est le flux de porteurs minoritaires qui traverse la jonction. Elle est la somme de deux termes ( $S_f = S_{f0} + S_{fj}$ ) [36] :  $S_{f0}$  est la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction induite par la résistance shunt. Elle est liée aux porteurs perdus au niveau de la jonction du fait des pièges et sites de recombinaisons dans cette zone. Et  $S_{fj}$  traduit le flux de courant imposé par la charge extérieure et elle définit le point de fonctionnement de la photopile en informant sur la densité de porteurs de charges qui ont réussi à traverser la jonction [38, 57, 63].

✓ En face arrière.

$$D(Nb) \cdot \left( \frac{\partial \delta n(x, y, z)}{\partial z} \right)_{z=H} = -S_b \cdot \delta n(x, y) \quad \text{II.15}$$

$S_b$  est la vitesse de recombinaison en face arrière en  $\text{cm.s}^{-1}$  [38, 57], elle quantifie le taux de porteurs minoritaires en excès perdus par recombinaison sur la surface arrière de la photopile.

✓ Aux joints de grains.

Les conditions aux limites prises aux joints de grains (frontière du grain de forme rectangulaire), tiennent compte de l'effet de capture, sur les porteurs minoritaires, des interfaces dans les quelles règnent d'intenses champs électriques qui les attirent augmentant de ce fait leur taux de recombinaisons. Ces champs électriques sont caractéristiques des courbures de bandes existant à ce niveau et qui sont dues à des liaisons dépendantes, des dislocations ou tout simplement des impuretés.

Les conditions aux limites proprement dites sont données par les équations (II.16) et (II.17) [21, 40, 57]

$$\left[ \frac{\partial \delta n(x, y, z)}{\partial x} \right]_{x=\pm \frac{g_x}{2}} = \mp \frac{S_g}{D(Nb)} \cdot \delta n \left( \pm \frac{g_x}{2}, y, z \right) \quad \text{II.16}$$

$$\left[ \frac{\partial \delta n(x, y, z)}{\partial y} \right]_{y=\pm \frac{g_y}{2}} = \mp \frac{S_g}{D(Nb)} \cdot \delta n \left( x, \pm \frac{g_y}{2}, z \right) \quad \text{II.17}$$

$S_g$  est la vitesse de recombinaison aux joints de grain en  $\text{cm.s}^{-1}$ ;  $g_x$  et  $g_y$  sont respectivement la longueur et la largeur du grain que nous prendrons, par la suite, égales à  $g$ . Quant aux signes  $\pm$ , ils découlent simplement du repère choisi au centre du grain.

### II.5 : Etude des valeurs propres d'espace $C_k$ et $C_j$

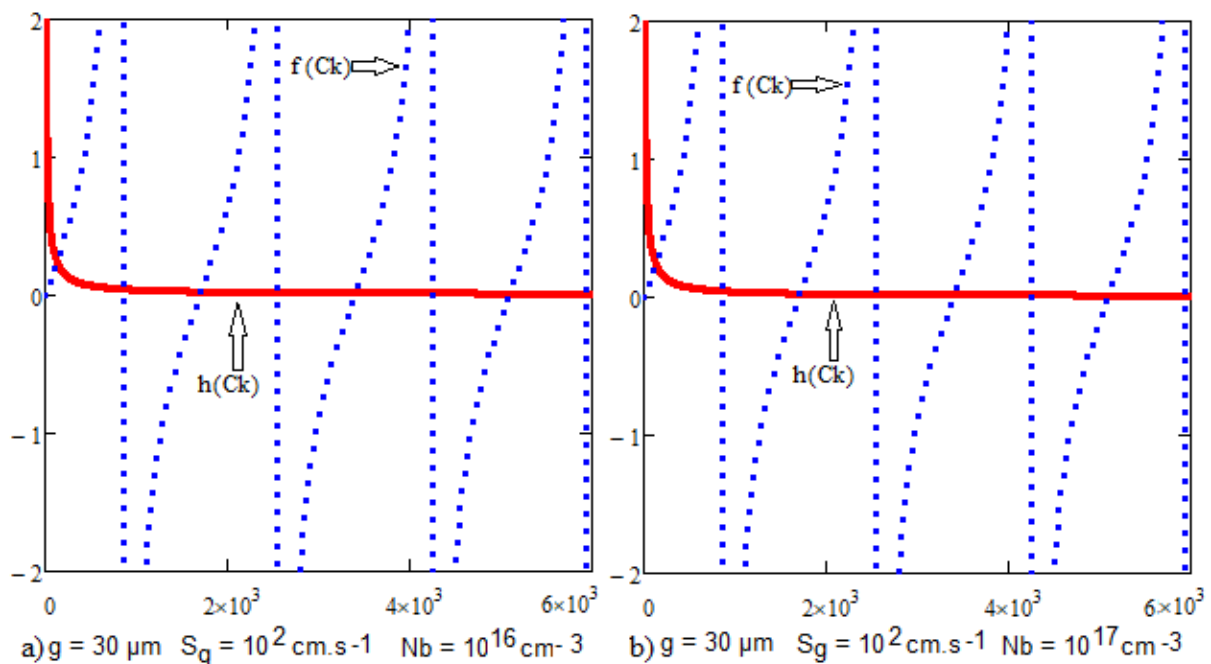
Les coefficients  $C_k$  et  $C_j$  sont les valeurs propres d'espace obtenus grâce aux équations transcendantes (II.16) et (II.17) soit graphiquement soit par un programme. Nous avons opté pour la méthode graphique en traçant les fonctions  $f(C_k)$  et  $h(C_k)$  ci-dessous dans un même repère, les points d'intersection des deux courbes donnent les valeurs des  $C_k$ . Les  $C_j$  sont obtenus de la même manière. En supposant  $g_x = g_y$  les  $C_k$  et  $C_j$  ont les mêmes valeurs [60].

$$f(C_k) = \tanh\left(C_k \cdot \frac{g_x}{2}\right) \quad \text{II.18}$$

$$h(C_k) = \frac{S_g}{C_k \cdot Dn(Nb)} \quad \text{II.19}$$

Nous constatons que l'équation transcendante lie  $C_k$  à la vitesse de recombinaison aux joints de grain  $S_g$ , à la taille de grain  $g_x$  et au taux de dopage de la base.

Sur la figure (II.4) nous présentons l'effet du taux de dopage sur les solutions  $C_k$ .



**Figure II.4 :** Valeurs propres  $S_g \leq 10^3 \text{cm.s}^{-1}$ ,  $Nb = 10^{16} \text{cm}^{-3}$  et  $Nb = 10^{17} \text{cm}^{-3}$

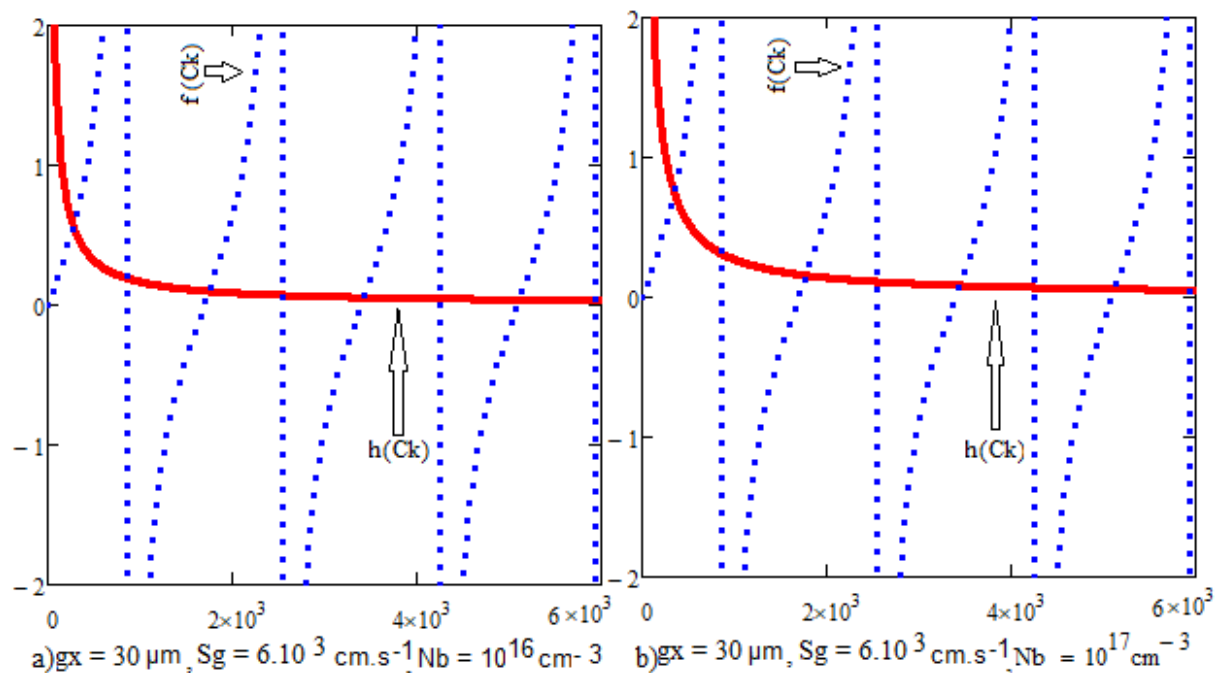
Nous remarquons que pour  $S_g \leq 10^3 \text{cm.s}^{-1}$  les valeurs des  $C_k$  (ou  $C_j$ ) sont pratiquement insensibles aux variations du taux de dopage de la base et de la vitesse de recombinaison aux

joints de grains ( $S_g$ ). Dans le tableau II.1 nous avons relevé les valeurs obtenues à partir de la figure II.4 (a et b).

**Tableau II.1** : Valeurs propres  $C_k$  pour  $S_g = 10^2 \text{ cm.s}^{-1}$

Taux de dopage de la base ( $\text{cm}^{-3}$ )	Valeurs propres $C_k$ ( $\text{cm}^{-1}$ ), $k=0, 1, 2, 3$ et $4$				
$10^{16}$	1699	3397	5095	6793	8491
$10^{17}$	1699	3397	5095	6793	8491

Nous avons vérifié pour plusieurs vitesses de recombinaison aux joints de grain  $S_g \leq 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$  et pour différentes valeurs du taux de dopage de la base ; les valeurs des  $C_k$  (ou  $C_j$ ) sont sensiblement égales aux valeurs données au tableau II.1.

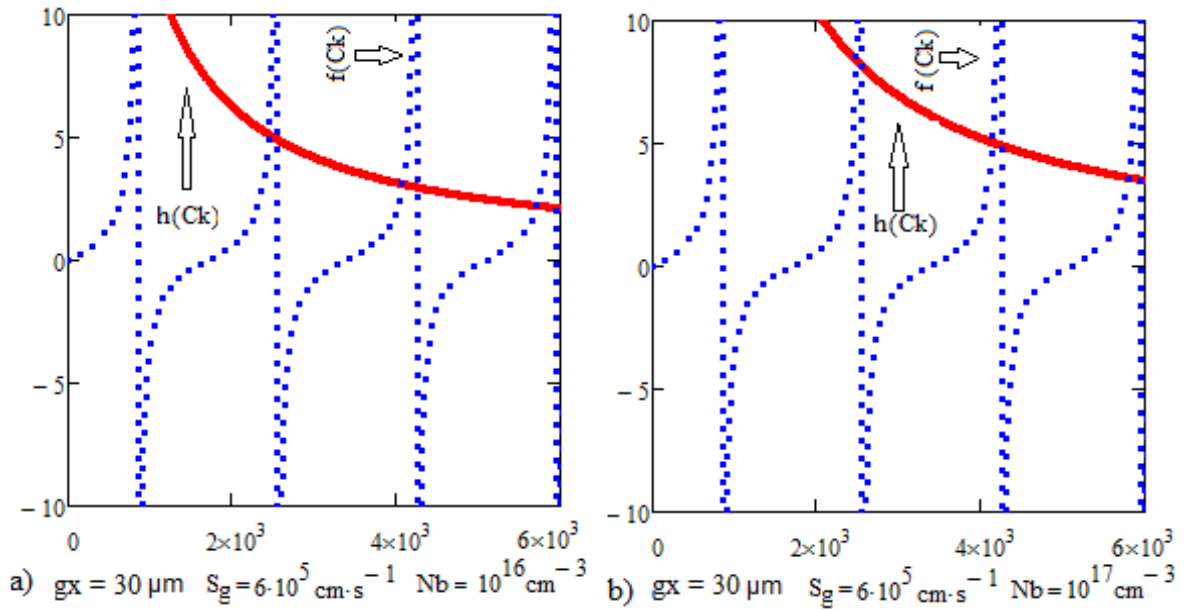


**Figure II.5** : Valeurs propres  $10^3 < S_g < 10^5 \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $N_b = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  et  $N_b = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$

**Tableau II.2** : Valeurs propres  $C_k$  pour  $S_g = 6.10^3 \text{ cm.s}^{-1}$

Taux de dopage de la base ( $\text{cm}^{-3}$ )	Valeurs propres $C_k$ ( $\text{cm}^{-1}$ ), $k=0, 1, 2, 3$ et $4$				
$10^{16}$	1842	3474	5147	6832	8523
$10^{17}$	1919	3522	5180	6858	8543

Pour  $10^3 \text{ cm.s}^{-1} < S_g < 10^5 \text{ cm.s}^{-1}$  les valeurs des  $C_k$  (ou  $C_j$ ) varient et croissent lorsque le taux de dopage de la base augmente (figures II.5 (a et b)) comme indiquent les valeurs relevées dans le tableau II.2.

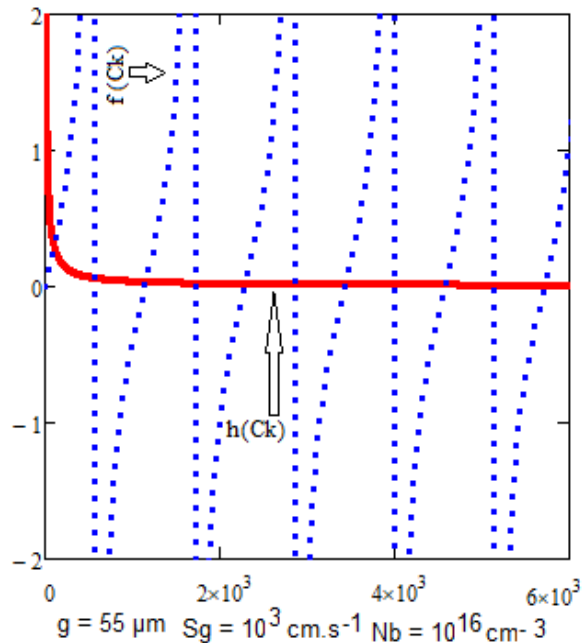


**Figure II.6 :** Valeurs propres  $S_g > 10^5 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $N_b = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  et  $N_b = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$

**Tableau II.3 :** Valeurs propres  $C_k$  pour  $S_g = 6 \cdot 10^5 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$

Taux de dopage de la base ( $\text{cm}^{-3}$ )	Valeurs propres $C_k$ ( $\text{cm}^{-1}$ ), $k = 0, 1, 2, 3$ et $4$		
$10^{16}$	2443	4075	5712
$10^{17}$	2483	4139	5797

Pour  $S_g > 10^5 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ , les valeurs des  $C_k$  ou  $C_j$  sont très sensibles aux variations du taux de dopage de la base comme indiquent les valeurs relevées dans le tableau II.3.



**Figure II.7 :** Valeurs propres  $S_g = 10^2 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $N_b = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ .

Aussi, la taille de grain  $g$  a une très grande influence sur les valeurs propres et ceci quel que soit la vitesse de recombinaison aux joints de grain et le taux de dopage de la base ; toutes les

courbes précédentes ont été tracées pour  $g = 30 \mu\text{m}$ . Pour les courbes de la figure II.7, nous avons pris  $g = 55 \mu\text{m}$ .

Nous remarquons que pour le même intervalle le nombre des valeurs propres  $C_k$  a pratiquement doublé.

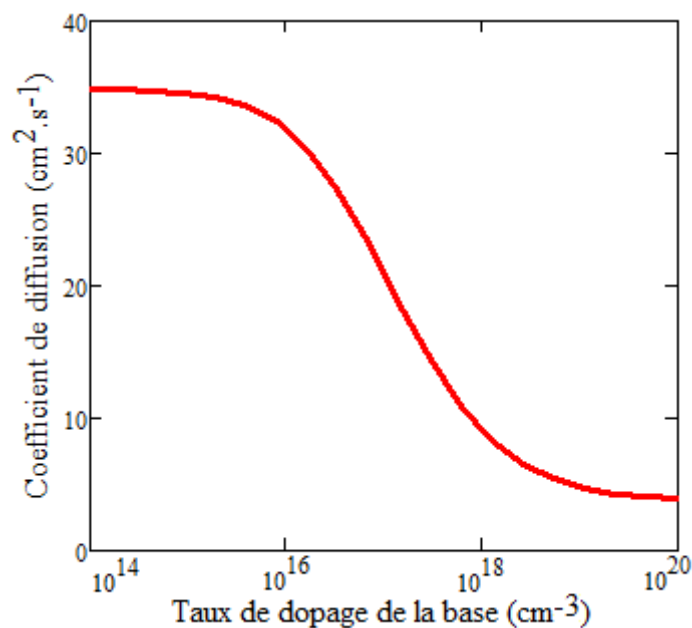
Cette même méthode nous a permis de déterminer graphiquement les valeurs propres correspondantes à des tailles de grain utilisées dans ce travail.

**Tableau II.4 :** Valeurs propres  $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $N_b = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$

Tailles ( $\mu\text{m}$ )	$C_k = C_j \text{ (cm}^{-1}\text{), } k=0, 1, 2, 3 \text{ et } 4$				
28	2249	4491	6734	8977	11220
46	1371	2734	4099	5465	6831
55	1148	2287	3429	4571	5713
64	986	1966	2947	3928	4910
73	865	1724	2584	3444	4305
82	771	1535	2300	3066	3832
91	695	1384	2073	2763	3453
100	633	1259	1887	2515	3143

## II.6 : Etude du coefficient de diffusion

Le profil du coefficient de diffusion en fonction du taux de dopage de la base est donné aux figures ci-dessous :



**Figure II.8:** Profil du coefficient de diffusion en fonction du taux de dopage de la base.

Nous constatons à partir de ce profil qu'aux faibles valeurs du taux de dopage de la base ( $N_b \leq 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ) le coefficient de diffusion est pratiquement constant. Nous pouvons conclure que les

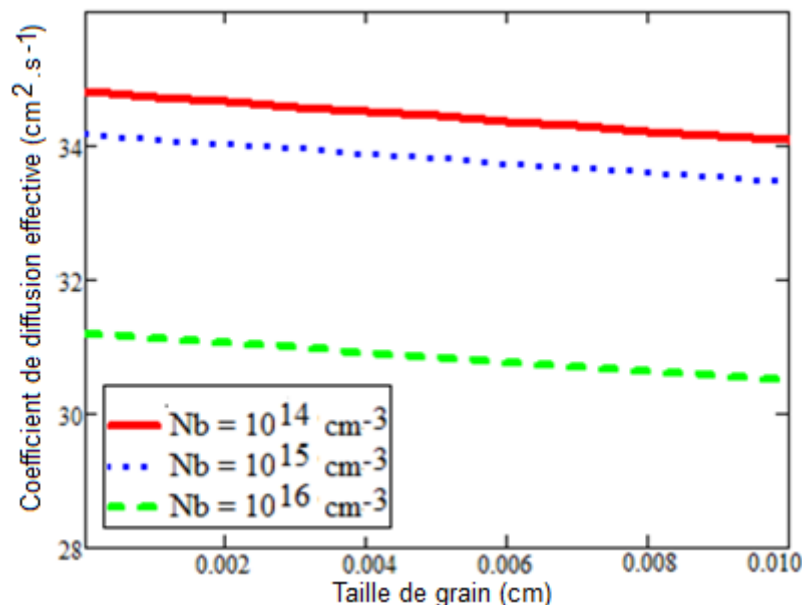
faibles taux de dopage de la base sont sans effet sur la diffusion des porteurs minoritaires de charge. Cependant, l'influence du taux de dopage est visible au-delà des valeurs supérieures à  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$ . Lorsque le taux de dopage de la base devient très important (au voisinage de  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ) la diffusion des porteurs devient totalement indépendante du taux de dopage de la base. Cette diminution du coefficient de diffusion lorsque le taux de dopage de la base augmente est due au fait que les impuretés introduites lors du dopage de la base favorisent les phénomènes de recombinaison des porteurs de charge et par conséquent une diminution de la possibilité qu'un porteur de charge de se diffuser.

## II.7 : Etude du coefficient de diffusion effective (Dkj)

Le coefficient de diffusion effective Dkj est le coefficient de diffusion qui dépend de la taille des grains, de la vitesse de recombinaison aux joints des grains [57, 61, 70] et maintenant avec le taux de dopage de la base, son expression est donnée comme suit :

$$D_{kj}(S_g, g, N_b) = \frac{D(N_b) \cdot [\sin(c_k \cdot g_x) + c_k \cdot g_x] \cdot [\sin(c_j \cdot g_y) + c_j \cdot g_y]}{16 \cdot \sin\left(c_k \cdot \frac{g_x}{2}\right) \cdot \sin\left(c_j \cdot \frac{g_y}{2}\right)} \quad \text{II.20}$$

Le profil du coefficient de diffusion effective (Dkj) en fonction de la taille des grains pour différentes valeurs du taux de dopage sont représentés sur la figure II.9

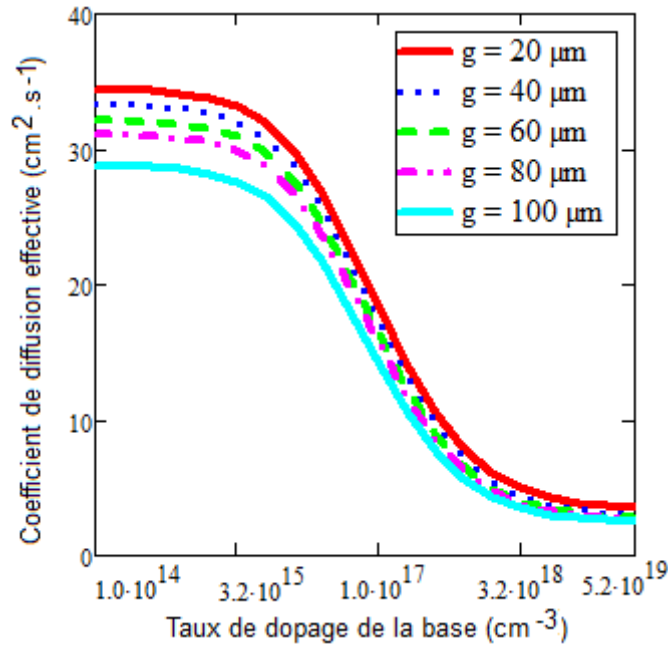


**Figure II.9:** Profil du coefficient de diffusion effective en fonction de la taille de grain pour différents taux de dopage de la base :  $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$

Sur la figure II.9, nous constatons que le coefficient de diffusion effective Dkj diminue avec l'augmentation de la taille des grains et du taux de dopage de la base. Nous pouvons noter aussi que le coefficient de diffusion effective est plus sensible à l'augmentation de la taille des grains

lorsque le taux de dopage  $N_b \geq 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ . Autrement dit il diminue fortement avec l'augmentation de la taille des grains pour les grands taux de dopage de la base.

La figure II.10 présente les profils du coefficient de diffusion effective en fonction du taux de dopage de la base pour différentes valeurs de la taille de grain.



**Figure II.10:** Profils du coefficient de diffusion effective en fonction du taux de dopage de la base pour différente taille de grain :  $S_g = 10^3 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$

Nous constatons à partir de ces profils qu'aux faibles valeurs du taux de dopage de la base ( $N_b \leq 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ) le coefficient de diffusion effective diminue légèrement avec le taux de dopage de la base. Nous pouvons donc conclure que l'effet des faibles taux de dopage est presque négligeable sur le coefficient de diffusion effective  $D_{kj}$ . Cependant l'influence du taux de dopage est visible au-delà des valeurs supérieures à  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$ . Lorsque le taux de dopage de la base devient très important (au voisinage de  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ), le coefficient de diffusion effective des porteurs devient totalement indépendant du taux de dopage de la base. Mais aussi il diminue avec la taille des grains comme le montre la figure II.9.

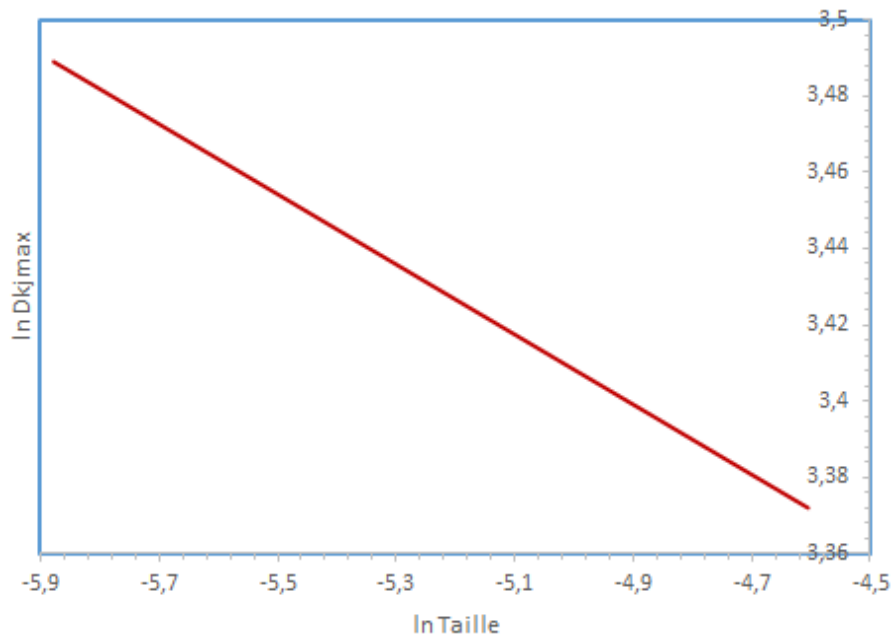
Pour la valeur d'une taille donnée, nous avons relevé la valeur maximale de  $D_{kj}$  ; ainsi nous donnons dans le tableau (II.5) les valeurs relevées graphiquement.

**Tableau II.5 :** maximums du  $D_{kj}$  pour différentes tailles de grains obtenus par la méthode graphique

Taille de grain Taille (cm)	0,0028	0,0046	0,0064	0,0082	0,01
$D_{kj}$ maximal ( $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )	32,766	31,661	30,702	29,866	29,134
Ln (Taille)	-5,878	-5,381	-5,051	-4,803	-4,605
Ln ( $D_{kj}$ )	3,489	3,455	3,424	3,396	3,372



A partir des résultats obtenus au tableau (II.5), nous avons représenté à la figure (II.11) logarithme du maximum de  $D_{kj}$  en fonction du logarithme de la taille des grains.



**Figure II.11** : logarithme des maxima de  $D_{kj}$  en fonction de logarithme de la taille des grains

Cette courbe nous permet d'écrire la relation suivante :

$$\ln D_{kj} = a_1 \cdot \ln Taille + \ln b_1 \quad \text{II.21}$$

Où  $a_1$  et  $b_1$  des coefficients réels obtenus de la courbe de la figure (11).

$$\begin{cases} 3.489 = -5.878a_1 + \ln b_1 \\ 3.372 = -4.605a_1 + \ln b_1 \end{cases} \quad \text{II.22}$$

Ce qui donne :

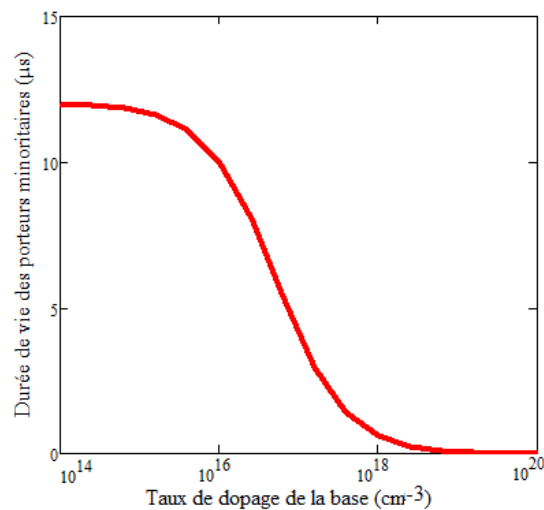
$$D_{kj} = b_1 \cdot Taille^{a_1} \quad \text{II.23}$$

$$D_{kj}(Taille) = 52,3872 \cdot 10^{-2} Taille^{-0.0918} \quad \text{II.24}$$

## II.8 : Etude de la durée de vie des porteurs minoritaires

La durée de vie des porteurs minoritaires en excès dans la base est un paramètre permettant de quantifier la qualité de la photopile. Elle caractérise les recombinaisons des paires électron-trous qui réduisent les performances des photopiles. La durée de vie des porteurs minoritaires en excès peut-être définie comme le temps moyen entre la formation d'un porteur par photogénération et sa disparition par recombinaison. Plus elle est grande, plus les porteurs auront le temps d'être extrait de la cellule et de participer à la production du courant électrique. Pour mieux voir l'effet du taux de dopage sur la durée de vie des porteurs minoritaires dans la base, nous avons présenté sur la figure II.12 le profil de la durée de vie des porteurs minoritaires

dans la base en fonction du taux de dopage de la base.



**Figure II.12 :** Profil de la durée de vie des porteurs minoritaires en fonction du taux de dopage de la base.

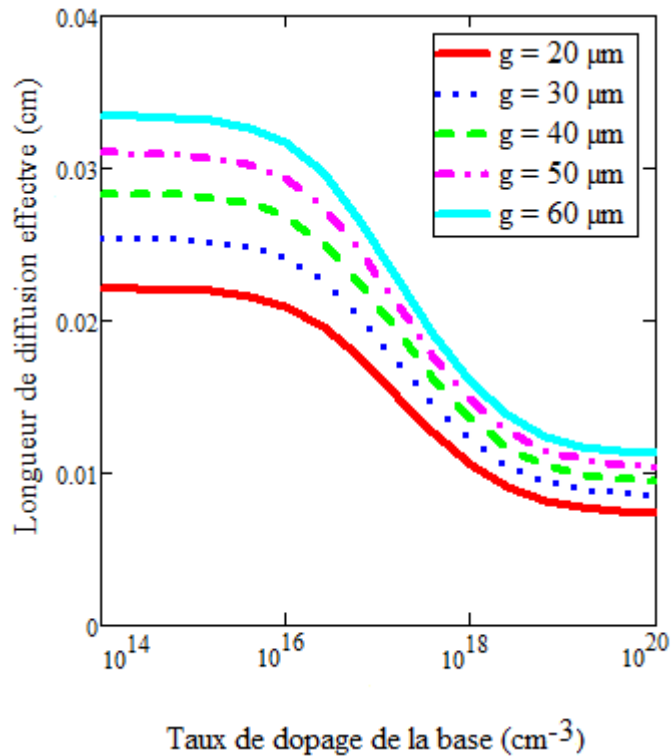
Comme nous pouvons s’y attendre avec la formule mathématique, la durée de vie des porteurs minoritaires dans la base diminue lorsque le taux de dopage de la base augmente.

Nous allons dans le paragraphe suivant présenter l’évolution du Pseudo-longueur de diffusion  $L_{kj}$ .

### **II.9: Etude de la longueur de diffusion effective des porteurs minoritaires**

La longueur de diffusion effective  $L_{kj}$  est la longueur de diffusion qui dépend de la taille des grains, de la vitesse de recombinaison aux joints des grains [57, 61] et du taux de dopage de la base.

Pour voir l’effet du taux de dopage de la base sur la longueur de diffusion effective des porteurs minoritaires dans la base, nous avons présenté sur la figure II.13 le profil de la longueur de diffusion effective en fonction du taux de dopage de la base pour différentes valeurs de la taille des grains.



**Figure II.13 :** Profil de la longueur de diffusion effective en fonction du taux de dopage de la base pour différente taille de grain :  $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$

Nous notons que pour les faibles valeurs du taux de dopage, la longueur de diffusion effective reste constante ( $N_b \leq 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ).

La figure II.13 montre également qu'au-delà de  $N_b = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ; la longueur de diffusion effective des porteurs minoritaires diminue. Doper c'est introduire des impuretés, ce qui favorise les phénomènes de recombinaison et par conséquent une diminution de la possibilité qu'à un porteur de charge de se diffuser. Par contre, la longueur de diffusion effective augmente avec la taille des grains comme l'ont montré **J. Dugas et J. Oualid en 1987**.

Dans le paragraphe suivant, une étude du taux de dopage de la base sur la densité des porteurs minoritaires a été effectuée.

### **II.10 : Influence du taux de dopage de la base sur la densité des porteurs minoritaires**

Le dopage étant l'une des étapes de la fabrication des photopiles, il est donc intéressant de connaître l'effet du niveau de dopage sur le rendement de la photopile avant la fabrication.

Ainsi, dans ce travail, comme notre étude porte sur une photopile éclairée par la face avant, nous avons fixé  $z = 0$  pour les figures à fin d'être situé à la jonction,  $S_f$  est fixé à  $3 \cdot 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$  car l'équation II.14 définit le concept de la vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires à la jonction. Elle apparait comme une caractéristique efficace des porteurs minoritaires à la jonction et est liée aux paramètres technologiques de la photopile notamment le taux dopage de

la base, l'épaisseur de la base... et aux conditions de fonctionnement (polarisation de la jonction).

Sf quantifie la façon dont le flux de porteurs minoritaires en excès traverse la jonction dans les conditions de fonctionnement réelles. Elle caractérise la jonction comme une interface active [33, 71].

Lorsque Sf tend vers zéro, aucun courant ne circule dans la jonction, donc les porteurs sont stockés des deux côtés de la jonction : c'est l'état de circuit-ouvert de la photopile idéale. Dans une photopile non idéale (cas réel avec des pertes à la jonction), il y'a un très petit courant qui traverse la jonction, ce qui signifie qu'une charge interne existe dans la photopile solaire : c'est la résistance shunt de la photopile. Cette résistance shunt induit une vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction Sf0 [35, 72] qui dépend que des paramètres intrinsèques de la photopile.

Sb est la vitesse de recombinaison effective de la surface arrière. Sa valeur est liée à la taille de grain, à la valeur de la vitesse de recombinaison aux joints de grain, aux taux de dopage de la base et à l'épaisseur de la base [21, 40, 57]. Son expression est donnée comme suit:

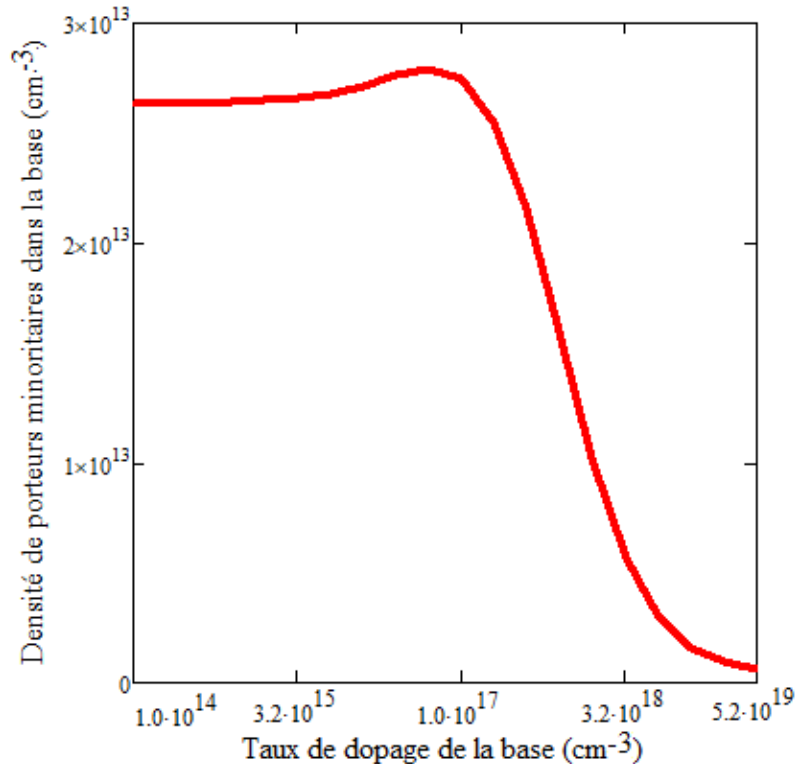
$$Sb(H, g, Nb) = D(Nb) \cdot \frac{\sum_{k=0}^5 \sum_{j=0}^5 \left( Rkj \left( \frac{D(Nb)}{Lkj} \right)^2 \sum_{i=1}^3 K_i \left[ b_i \exp(-b_i H) - b_i \cosh\left(\frac{H}{Lkj}\right) + \frac{1}{Lkj} \sinh\left(\frac{H}{Lkj}\right) \right] \right)}{\sum_{k=0}^5 \sum_{j=0}^5 \left( Rkj \left( \frac{D(Nb)}{Lkj} \right)^2 \sum_{i=1}^3 K_i \left[ \exp(-b_i H) - \cosh\left(\frac{H}{Lkj}\right) + b_i \cdot Lkj \cdot \sinh\left(\frac{H}{Lkj}\right) \right] \right)} \quad 25$$

Pour voir l'effet du taux de dopage de la base sur la densité de porteurs minoritaires dans la base, nous avons présenté sur la figure II.14 la densité de porteurs minoritaires en fonction du taux de dopage de la base.

La figure II.14 nous montre que la densité de porteurs minoritaires en excès dans la base augmente légèrement tout d'abord jusqu'à un taux de dopage de la base égal à  $5,12 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ . Au-dessus de cette valeur du taux de dopage, la densité de porteurs diminue de manière très significative. En effet, en dessous de  $5,12 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , l'augmentation du taux de dopage de la base entraîne une amélioration de la conductivité du silicium en modifiant ses propriétés électriques. Ceci provoque une légère augmentation de la densité de porteurs minoritaires dans la base. A partir de  $5,12 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , les processus de recombinaison deviennent de plus en plus prédominants, conduisant à une diminution de la densité de porteurs minoritaires. Cette explication est tout à fait plausible quand on sait que, d'après [16, 17] quand le taux d'impureté est supérieur à  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , le mécanisme physique associé à la distorsion des limites des bandes

d'énergies entraînent une réduction de la largeur de la bande interdite et donc les pertes de porteurs augmentent.

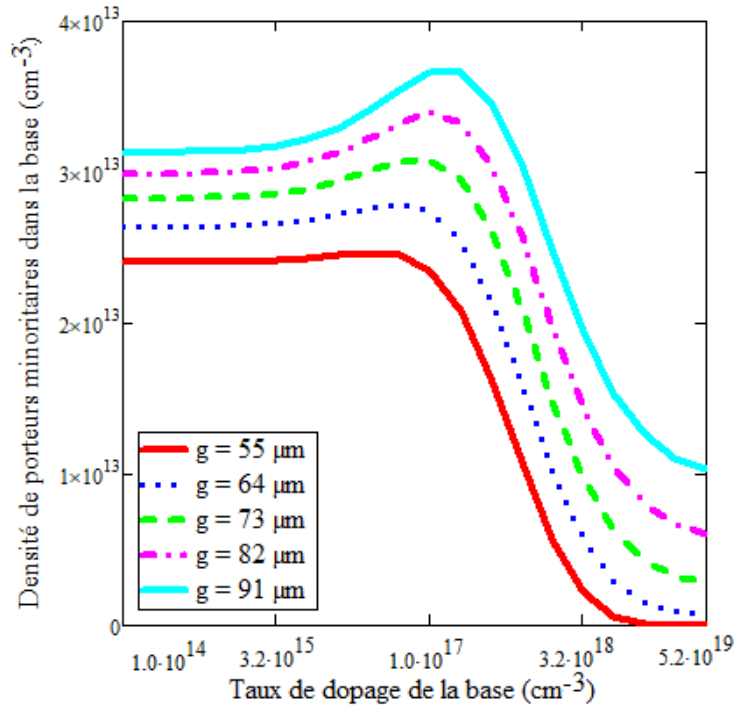
La figure II.15 illustre l'effet de la taille des grains sur la densité des porteurs minoritaires dans la base.



**Figure II.14:** Profil de la densité de porteurs minoritaires dans la base en fonction du taux de dopage de la base :  $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $S_f = 3.10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $S_b = F(\text{Nb}) \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $g_x = g_y = g = 64 \text{ } \mu\text{m}$ ,  $H = 120 \text{ } \mu\text{m}$ ,  $z = 0 \text{ } \mu\text{m}$ .

Sur la figure II.15, quand la taille de grain croît, nous notons une augmentation de la densité d'électrons en excès avec un léger déplacement des maxima de la densité de porteurs améliorés pour des taux de dopage de la base modérés entre  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$  et  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . Ce phénomène s'explique par le fait que lorsque la taille de grain est grande, le taux de recombinaison dans la base diminue donc les photopiles à gros grains sont meilleurs que celles à petits grains [39]. Comme selon [21, 57] les plus grandes valeurs de la densité de porteurs minoritaires sont obtenues aux grandes valeurs de la taille de grain.

Pour une taille de grain donnée, le taux de dopage optimal est obtenu lorsque la densité de porteurs minoritaires améliorée dans la base atteint son maximum. Ainsi, nous donnons dans le tableau II.5 les valeurs du taux de dopage optimales pour différentes tailles de grains et des maxima de la densité de porteurs minoritaires en excès amélioré.

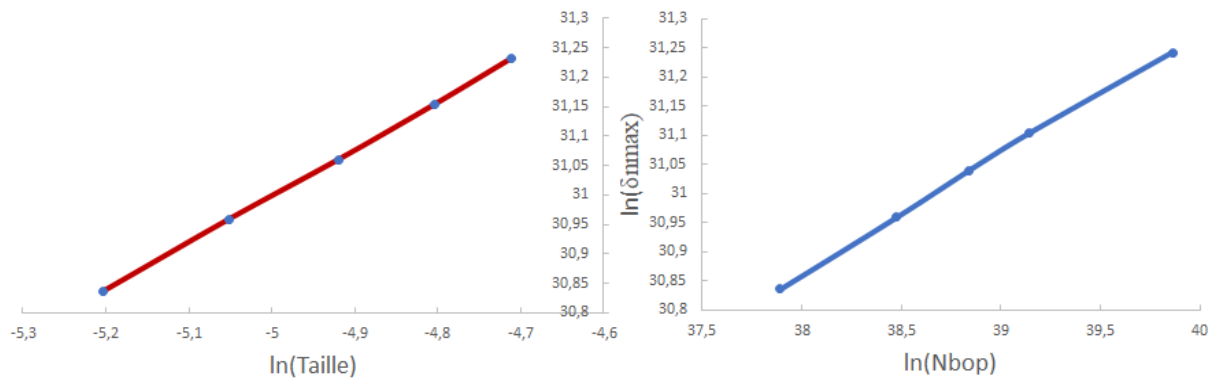


**Figure II.15:** Profil de la densité de porteurs minoritaires dans la base en fonction du taux de dopage de la base pour différentes tailles de grain :  $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $S_f = 3.10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $S_b = F(N_b) \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $g_x = g_y = g = 64 \text{ } \mu\text{m}$ ,  $H = 120 \text{ } \mu\text{m}$ ,  $z = 0 \text{ } \mu\text{m}$ .

**Tableau II.6 :** maximum de la densité de porteurs minoritaires en excès améliorés ( $\delta n_{\text{max}}$ ) en circuit-ouvert lors du dopage de la base modéré ( $10^{15} \text{ cm}^{-3} \leq N_b \leq 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ) et du taux de dopage optimal pour différentes tailles de grains obtenus par la méthode graphique

Taille de grain en (cm)	0,0055	0,0064	0,0073	0,0082	0,0091
Taux de dopage de la base $N_{\text{bopt}}$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$2,86.10^{16}$	$5,12.10^{16}$	$7,38.10^{16}$	$10^{17}$	$1,124.10^{17}$
$\delta n_{\text{max}}$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$2,467.10^{13}$	$2,7889.10^{13}$	$3,0853.10^{13}$	$3,3898.10^{13}$	$3,667.10^{13}$
Ln (Taille)	-5,2030072	-5,0514573	-4,9198809	-4,8036211	-4,7105307
Ln ( $N_{\text{bopt}}$ )	37,8921831	38,4745159	38,8401351	39,1439466	39,8608403
Ln ( $\delta n_{\text{max}}$ )	30,836609	30,9592535	31,0602551	31,1543771	31,2329801

A partir des résultats obtenus dans le tableau (II.5), nous avons représenté sur la figure II.16 le logarithme du maximum de la densité des porteurs minoritaires améliorés en fonction respectivement du logarithme de la taille des grains et du taux de dopage de la base optimal.



**Figure II.16** : logarithme des maxima de la densité de porteurs minoritaires améliorés

a) En fonction de logarithme de la taille de grain

b) En fonction de logarithme du taux de dopage optimal

Ces courbes nous permettent d'écrire les relations suivantes :

$$\ln \delta n_{\max} = a_1 \cdot \ln \text{Taille} + \ln b_1 \quad \text{II.26}$$

$$\ln \delta n_{\max} = a_2 \cdot \ln \text{Nbop} + \ln b_2 \quad \text{II.27}$$

Où  $a_1$ ,  $b_1$ ,  $a_2$  et  $b_2$  sont des coefficients réels obtenus des courbes de la figure (II.16).

$$\begin{cases} 30.836609 = -5.2030072a_1 + \ln b_1 \\ 31.232901 = -4.7105307a_1 + \ln b_1 \end{cases} \quad \text{II.28}$$

$$\text{Ce qui donne : } \delta n_{\max}(\text{Taille}) = 3.745 \cdot 10^{11} \text{Taille}^{0.8085282} \quad \text{II.29}$$

$$\begin{cases} 30.836609 = 37.8921831a_2 + \ln b_2 \\ 31.232901 = 39.8608403a_2 + \ln b_2 \end{cases} \quad \text{II.30}$$

$$\text{Ce qui donne : } \delta n_{\max}(\text{Nbop}) = 1.1 \cdot 10^7 \text{Nbop}^{0.37679502} \quad \text{II.31}$$

D'après (29) et (31) nous avons la relation suivante :

$$1 \cdot 1 \cdot 10^7 \cdot \text{Nbop}^{0.37679502} = 3.745 \cdot 10^{11} \cdot \text{Taille}^{0.8085282} \quad \text{II.32}$$

$$\left(1.1 \cdot 10^7 \cdot \text{Nbop}^{0.37679502}\right)^{2.48492637} = \left(3.745 \cdot 10^{11} \cdot \text{Taille}^{0.8085282}\right)^{2.48492502} \quad \text{II.33}$$

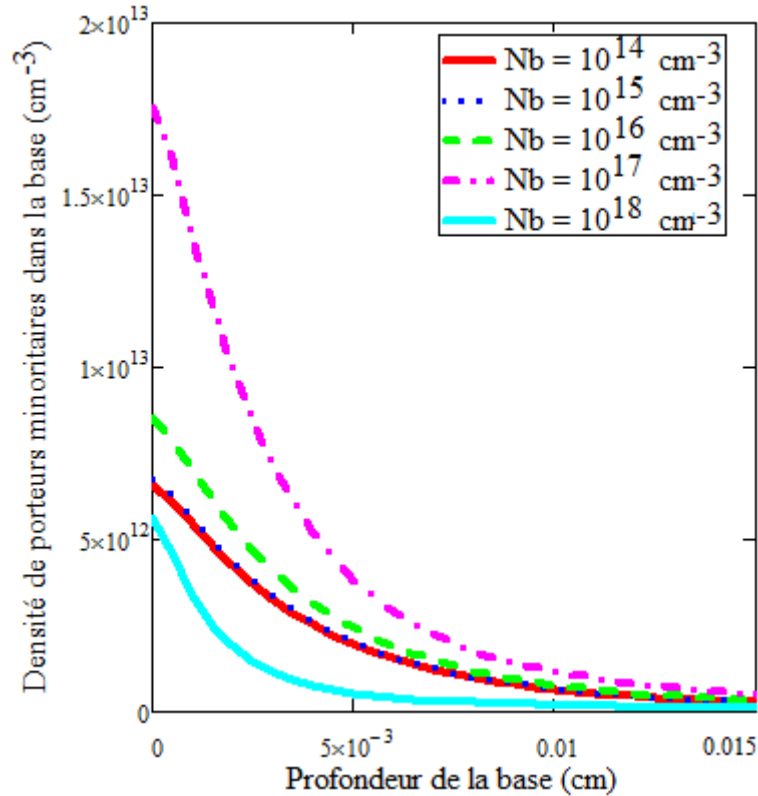
$$1.2672368 \cdot 10^{17} \cdot \text{Nbop}^{0.93630788} = 2.66063182 \cdot 10^{28} \cdot \text{Taille}^2 \quad \text{II.34}$$

L'équation (II.34) nous permet d'obtenir le taux de dopage de la base optimal en fonction de la taille des grains.

$$\text{Nbop}(\text{Taille}) = \sqrt[0.93630788]{2.09955379 \cdot 10^{11} \cdot \text{Taille}^2} \quad \text{II.35}$$

## II.11 : Influence de la profondeur de la base sur la densité de porteurs minoritaires

La figure II.17 met en évidence l'influence de la profondeur ( $z$ ) et du taux de dopage de la base sur la densité des porteurs minoritaires dans la base.



**Figure II.17 :** Profil de la densité de porteurs minoritaires dans la base en fonction de la profondeur pour différents taux de dopage de la base :  $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $S_f = 3.10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $S_b = F(N_b) \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $g_x = g_y = g = 40 \text{ } \mu\text{m}$ ,  $H = 120 \text{ } \mu\text{m}$ .

Nous observons sur la Figure II. 17 que la répartition de la densité des porteurs photogénérés diminue de la zone proche de la jonction vers la profondeur de la photopile. Comme la montre [21], la densité de porteurs minoritaires dans la base diminue lorsque nous nous déplaçons en profondeur dans la base. Cela s'explique par une augmentation du nombre de porteurs photogénérés près de la jonction mais aussi par une croissance du nombre de porteurs qui arrivent au niveau de la jonction afin de la traverser pour participer à la production de photocourant.

Nous remarquons également sur la figure II.17 une diminution de la densité de porteurs minoritaires lorsque le taux de dopage de la base est égal à  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ .

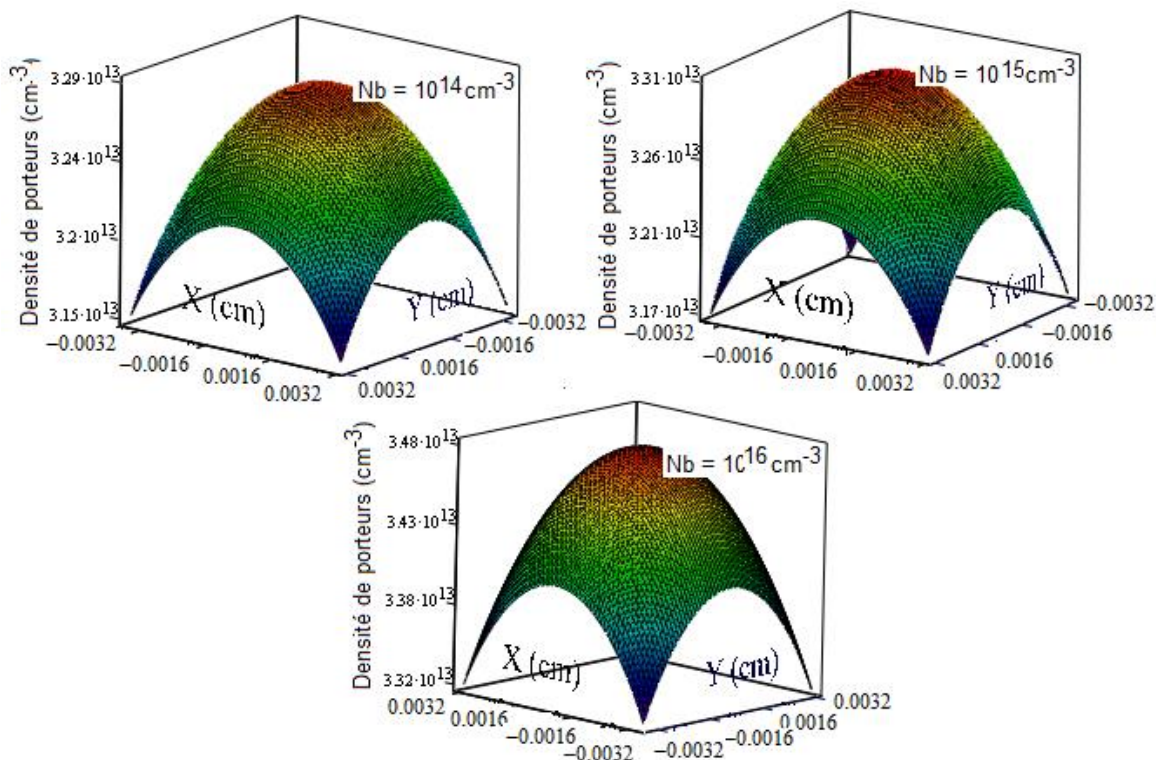
L'augmentation du taux de dopage de la base au-delà  $10^{17} \text{ cm.s}^{-1}$  est à l'origine d'une diminution de la longueur de diffusion des porteurs. La longueur de diffusion étant la distance parcourue par les porteurs avant de se recombiner, toute diminution de cette longueur induit une réduction du nombre de porteurs collectés.



Ainsi, la variation de la densité de porteurs minoritaires en fonction de la profondeur de la base pour différentes valeurs du taux de dopage de la base nous permet de conclure que le taux de dopage de la base est optimisé entre  $1.10^{15} \text{ cm}^{-3}$  et  $1.10^{17} \text{ cm}^{-3}$ .

## II.12 : Influences des épaisseurs suivant x et y sur la répartition de la densité de porteurs minoritaires

Pour étudier l'effet simultané de la profondeur x et y sur la densité de porteurs minoritaires, nous présentons sur les figures II.18 et II.19 les profils de la densité de porteurs minoritaires en fonction de la profondeur x et y pour différentes valeurs du taux de dopage de la base.



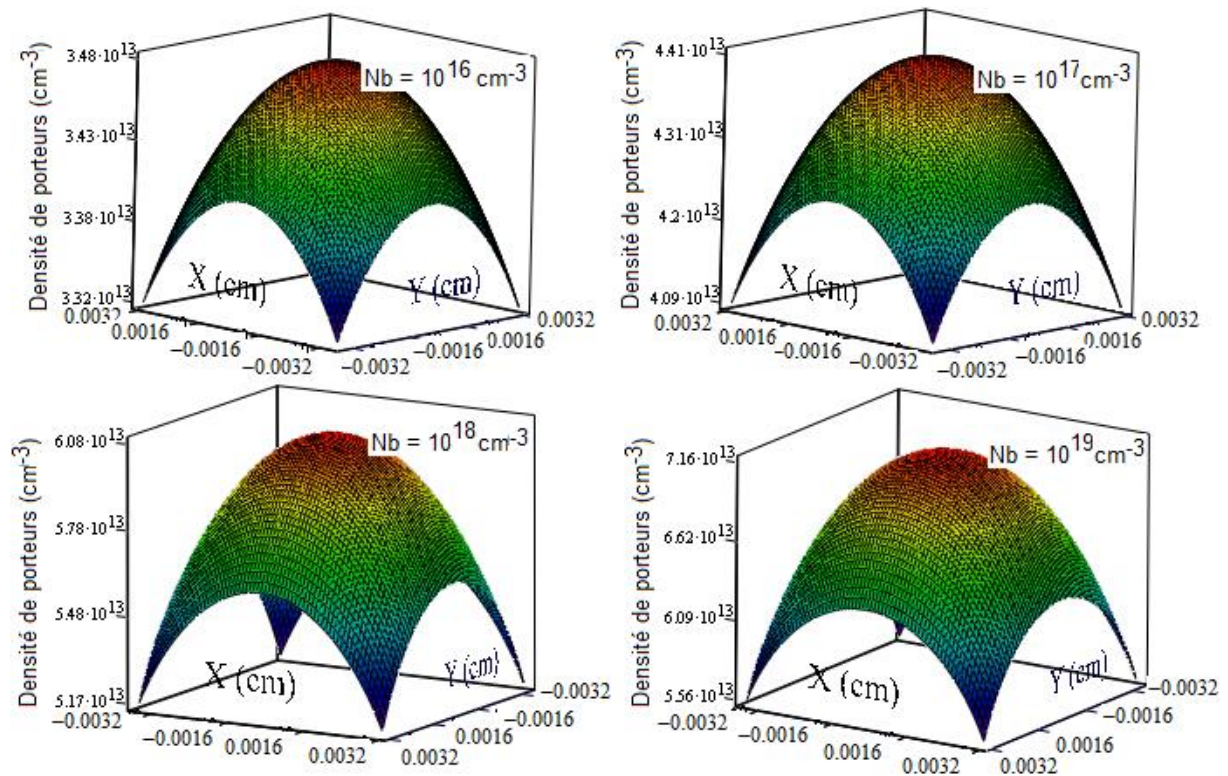
**Figure II. 18:** Profil de la densité de porteurs minoritaires dans la base en fonction de la profondeur x et y pour différents taux de dopage de la base:  $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $S_f = 3.10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $H = 120 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $g = 64 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $z = 0 \text{ }\mu\text{m}$ .

Les figures II.18 et II.19 montrent que la densité des porteurs minoritaires est maximale au centre du plan (x, y).

Aux joints des grains, la densité des porteurs minoritaires est plus petite [57]. Ce phénomène est lié à l'action conjuguée des vitesses de recombinaison aux joints de grain sur la face des x et sur la face des y du grain. Nous pouvons donc conclure que les recombinaisons aux interfaces n'affectent pas la région centrale du grain [38].

Nous notons aussi que lorsque la profondeur suivant x et y varie, la densité des porteurs minoritaires au centre du plan (x, y) augmente avec l'augmentation du taux de dopage de la

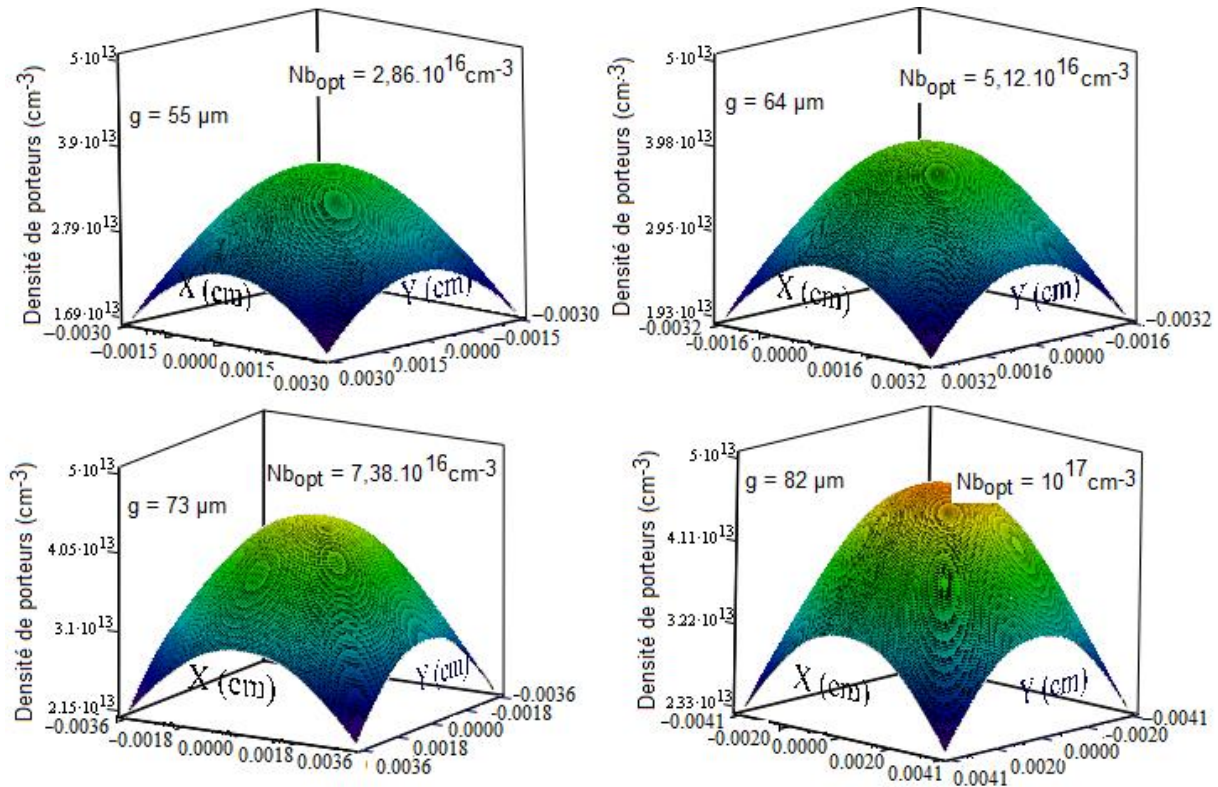
base. Comme selon [30] la densité des porteurs minoritaires au centre du plan (x, y) croit avec le taux de dopage de la base.



**Figure II. 19:** Profil de la densité de porteurs minoritaires dans la base en fonction de la profondeur x et y pour différents taux de dopage de la base:  $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $S_f = 3.10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $H = 120 \text{ }\mu\text{m}$  et  $g = 64 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $z = 0 \text{ }\mu\text{m}$ .

La figure II.20 présente la variation de la densité des porteurs minoritaires en fonction de la profondeur x et y différentes valeurs optimales du taux de dopage de la base et de la taille de grain.

Nous observons sur la figure II.20 que lorsque la profondeur suivant x et y varie, la densité des porteurs minoritaires au centre du plan (x, y) augmente avec la taille des grains. Ce phénomène s'explique par le fait que lorsque la taille des grains est grande la surface qui reçoit le flux lumineux est importante d'où l'augmentation du taux de génération des porteurs.



**Figure II. 20:** Profil de la densité de porteurs minoritaires dans la base en fonction de la profondeur  $x$  et  $y$  pour différents taux de dopage optimal de la base et de taille de grain :  $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $S_f = 3 \cdot 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $H = 120 \text{ } \mu\text{m}$ ,  $z = 0 \text{ cm}$ .

### II.13 : Influence de l'épaisseur de la base sur la densité de porteurs minoritaires

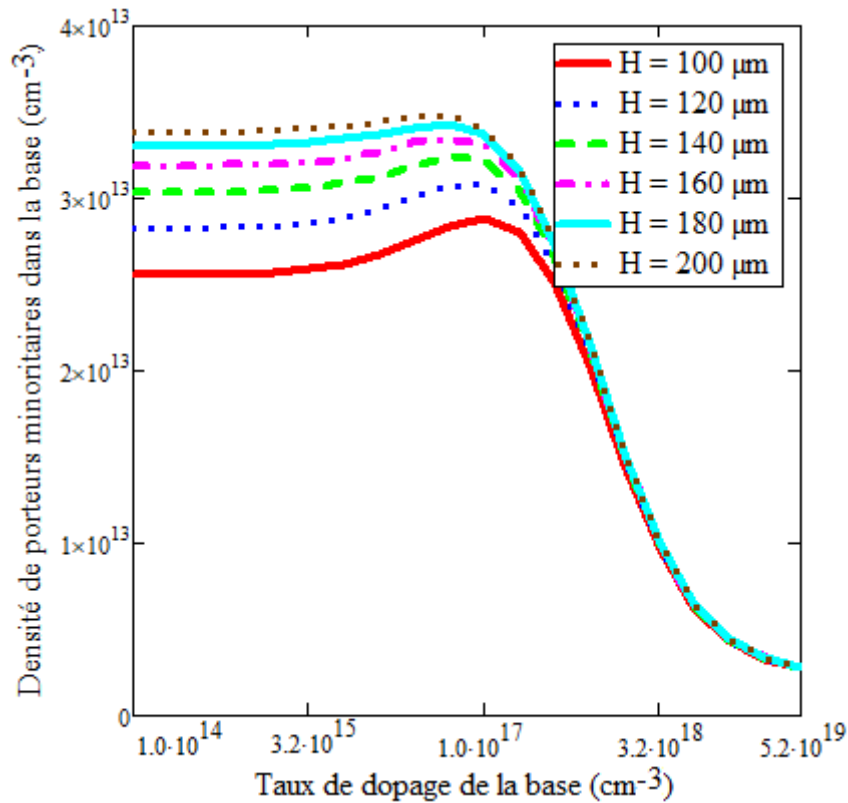
La majorité des porteurs minoritaires responsables du courant photovoltaïque dans la cellule se crée dans la base. Donc il est important de pouvoir prévoir l'épaisseur qui donnera le meilleur rendement. C'est dans ce cadre que nous jugeons nécessaire d'étudier l'influence de l'épaisseur de la base sur la densité des porteurs minoritaires dans la base. La figure II.21 présente la variation de la densité de porteurs minoritaires en fonction du taux de dopage de la base pour différentes valeurs de l'épaisseur de la base.

Chacune des courbes de la figure II.21 prises individuellement comprend trois zones :

Une première zone qui correspond aux faibles taux de dopage dans la base ( $N_b < 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ) où la densité de porteurs minoritaires reste indépendante du taux de dopage de la base.

Une deuxième zone qui correspond aux taux de dopage de la base comprise entre  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$  et  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . Dans cette zone, la densité de porteurs minoritaires dans la base augmente légèrement avec le taux de dopage.

Une troisième zone ( $N_b > 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ) où la densité des porteurs minoritaires diminue considérablement lorsque le taux de dopage augmente jusqu'à atteindre son minimum.

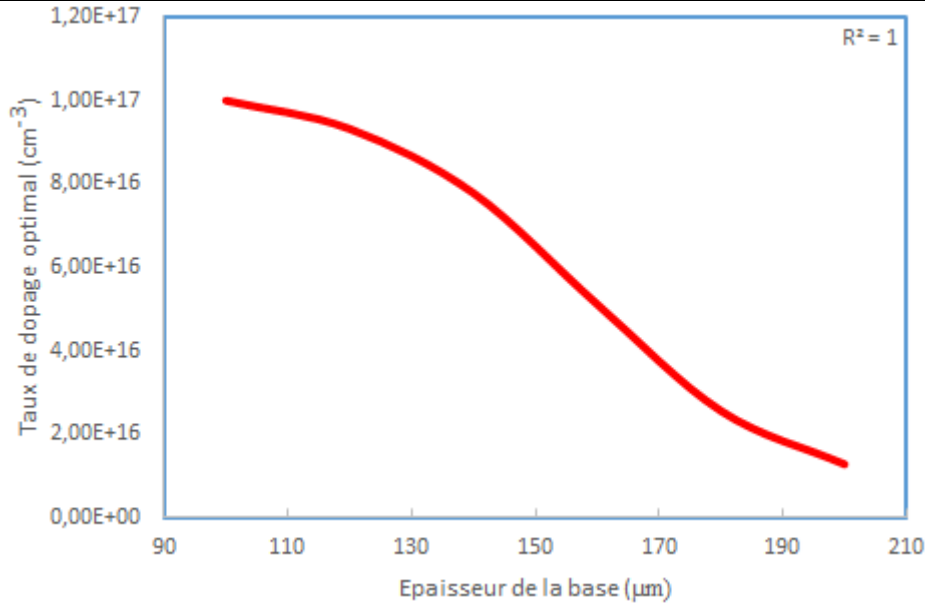


**Figure II.21** : Densité de porteurs minoritaires dans la base en fonction du taux de dopage dans la base pour différentes valeurs de l'épaisseur de la base :  $S_f = 3.10^3 \text{ cm. s}^{-1}$ ,  $S_b = F(H) \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $g_x = g_y = g = 64 \text{ cm}$ ,  $z = 0 \text{ μm}$ .

Cette diminution dans la troisième zone est due au fait que les processus de recombinaison deviennent de plus en plus prédominants dans la base, conduisant à une diminution de la densité de porteurs minoritaires. Cependant, le maximum de la densité de porteurs minoritaires améliorés dans la deuxième zone augmente lorsque l'épaisseur de la base croît. Cette augmentation s'explique par une croissance de porteurs minoritaires lorsque le volume de la base s'élève. Par conséquent, l'influence des porteurs minoritaires semble être accentuée dans des cellules de plus en plus épaisses du fait du volume plus important de la base conduisant à un plus grand nombre de porteurs minoritaires dans cette partie de la cellule. Nous notons une diminution du taux de dopage optimal lorsque l'épaisseur de la base croît. Le tableau II.6 résume les valeurs du taux de dopage optimal et le maximum de la densité des porteurs minoritaires améliorés en circuit-ouvert lors du dopage modéré ( $10^{15} \text{ cm}^{-3} \leq N_b \leq 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ) pour chaque épaisseur de la base de la photopile donnée.

**Tableau II.7 :** maximum de la densité de porteurs minoritaires améliorés et taux de dopage optimal pour différentes épaisseurs de la base obtenus par la méthode graphique

H (μm)	100	120	140	160	180	200
Nbop (cm <sup>-3</sup> )	10 <sup>17</sup>	8.92.10 <sup>16</sup>	7.68.10 <sup>16</sup>	5.12.10 <sup>16</sup>	4.56.10 <sup>16</sup>	2.28.10 <sup>16</sup>
δnmax (cm <sup>-3</sup> )	2.883.10 <sup>13</sup>	3.085.10 <sup>13</sup>	3.238.10 <sup>13</sup>	3.351.10 <sup>13</sup>	3.429.10 <sup>13</sup>	3.481.10 <sup>13</sup>



**Figure II.22 :** Profil du taux de dopage optimal en fonction de l'épaisseur de la base

Nous notons sur cette figure une diminution du taux de dopage optimal lorsque l'épaisseur de la base croît. Ceci s'explique par le fait que lorsque l'épaisseur de la base croît, les porteurs photogénérés en zone arrière peuvent se mouvoir plus facilement vers l'intérieur.

La figure II.22 nous a permis d'établir une corrélation entre l'épaisseur et le taux de dopage optimal de la base.

$$N_{bopt}(H) = -3 \cdot 10^{12} \cdot H^2 - 2 \cdot 10^{12} \cdot H + 1 \cdot 10^{17} \quad (\text{II.36})$$

## Conclusion

A partir de la modélisation et d'une théorie mathématique, nous avons obtenu l'expression de la densité des porteurs minoritaires en excès dans la base de la photopile.

L'étude à trois dimensions du profil des porteurs minoritaires de charge en excès dans la base de la photopile bifaciale soumise à un éclairage polychromatique a été faite en plusieurs étapes compte tenu de sa structure.

Nous pouvons donc retenir que la taille de grain, l'épaisseur et le taux de dopage de la base influencent fortement la qualité de la photopile polycristalline éclairée par la face avant.

Cette étude nous a permis d'apprécier l'effet de ces paramètres sur le coefficient de diffusion effective, la longueur de diffusion effective et la densité des porteurs de charges. En effet :

- ✓ plus la taille de grain et l'épaisseur de la base augmentent plus la densité des porteurs minoritaires dans la base de la photopile est importante ;
- ✓ plus les activités recombinantes des porteurs minoritaires aux joints des grains sont grandes plus la photopile polycristalline perd ces performances ;
- ✓ l'augmentation du taux de dopage de la base au-delà de  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$  diminue la qualité de la photopile en dégradant la densité des porteurs minoritaires capables de traverser la jonction.

Ces résultats nous ont permis d'établir des corrélations entre le taux de dopage optimal de la base et la taille des grains d'une part et d'autre part avec l'épaisseur de la base.

Nous allons, dans le chapitre suivant, faire une étude de la densité de photocourant, du courant de court-circuit, de la phototension, de la tension en circuit-ouvert, du courant de diode, de la puissance, du facteur de forme et du rendement.

# **CHAPITRE III : ETUDE DE QUELQUES PARAMETRES ELECTRIQUES**

## Introduction

Dans ce chapitre nous allons faire une étude à trois dimensions de la densité de photocourant, du courant de court-circuit, de la phototension, de la tension en circuit-ouvert, du courant de diode, de la puissance, du facteur de forme et du rendement de conversion d'une photopile au silicium polycristallin sous éclairage polychromatique.

Pour se faire, nous utiliserons l'expression de la densité des porteurs minoritaires en excès dans la base donnée au chapitre II pour en déduire celle de la densité de photocourant et de la phototension. Ensuite, le courant de court-circuit et la tension en circuit-ouvert seront déterminés respectivement à partir des profils de la densité de photocourant et de la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction. Enfin, en partant toujours de l'expression de la densité de porteurs de charge, nous donnerons celui du courant de diode suivi de la puissance, du facteur de forme, et du rendement de conversion. Ces grandeurs dépendent du taux de dopage, de la taille de grain et de l'épaisseur de la base.

Ainsi nous les étudierons en fonction de ces derniers.

### III.1 : Etude 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 de la densité de photocourant.

L'équation général de cette densité de photocourant est donnée par [21, 40, 57, 58, 73].

$$J_{ph}(Nb) = \frac{q \cdot D(Nb)}{g_x \cdot g_y} \int_{-\frac{g_x}{2}}^{+\frac{g_x}{2}} \int_{-\frac{g_y}{2}}^{+\frac{g_y}{2}} \left[ \frac{\partial \delta n(x, y, z)}{\partial z} \right]_{z=0} dx dy \quad \text{III.1}$$

$S_g$  est la vitesse de recombinaison aux joints de grain.

$g_x = g_y = g$  la taille de grain (cm)

$S_f$  la vitesse de recombinaison à la jonction.

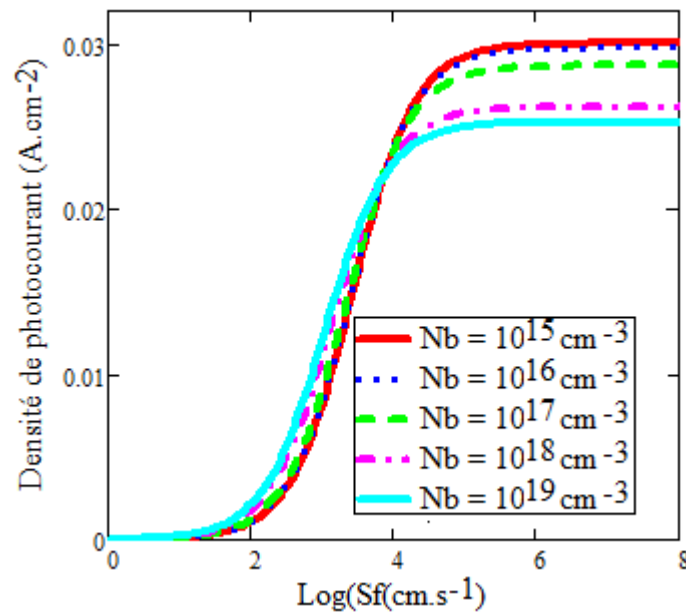
$S_b$  la vitesse de recombinaison à la face arrière de la photopile.



Nous allons dans les paragraphes qui suivent faire une étude de la densité de photocourant en fonction des paramètres de recombinaisons surfaciques, de la taille des grains et de l'épaisseur de la base.

### III.1.1 : Influence de la vitesse de recombinaison à la jonction et du taux de dopage de la base sur la densité de photocourant.

Sur la figure III.1, nous présentons le profil de la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différents taux de dopage de la base.



**Figure III.1** : Profil de la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différents taux de dopage de la base :  $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $S_b = F(N_b) \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $g = 64 \text{ } \mu\text{m}$ ,  $H = 120 \text{ } \mu\text{m}$ .

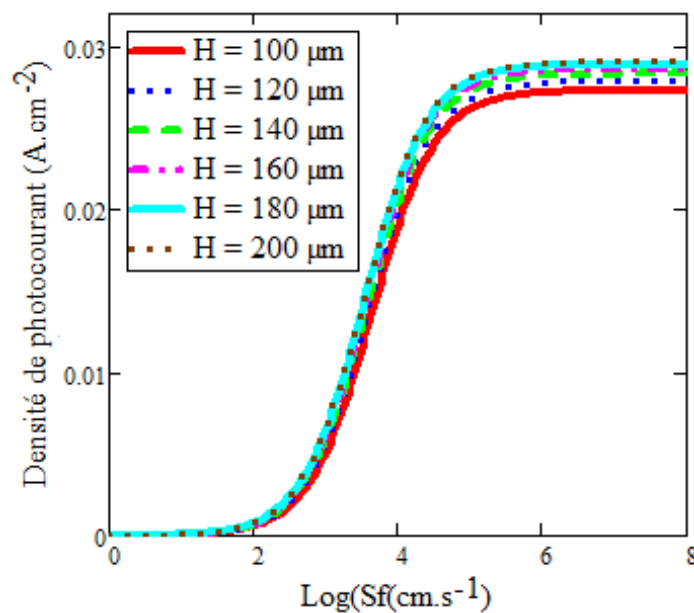
Nous constatons sur cette figure, que la densité de photocourant est presque nulle pour les faibles valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction ( $S_f \leq 2.10^2 \text{ cm. s}^{-1}$ ). Cela traduit le fonctionnement en circuit-ouvert : très peu de porteurs traversent la jonction pour rejoindre le circuit extérieur. Nous notons également une augmentation progressive de photocourant jusqu'à une valeur maximale correspondant au photocourant de court-circuit, ceci pour les grandes valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction ( $S_f \geq 6.10^6 \text{ cm. s}^{-1}$ ). L'état de court-circuit est une situation de transfert quasi-total vers l'émetteur de tous les électrons photogénérés dans la base et parvenant à la jonction [57]. Le maximum de la densité de photocourant diminue lorsque le taux de dopage de la base croît.

Cela est dû à la durée de vie des porteurs minoritaires en excès, qui diminue avec l'augmentation du taux de dopage de la base.

### III.1.2 : Influence de la vitesse de recombinaison à la jonction et de l'épaisseur de la base sur la densité de photocourant.

La majorité des porteurs minoritaires responsables du courant photovoltaïque dans la cellule se crée dans la base. Donc, il est important de pouvoir prévoir l'épaisseur qui donnera le meilleur rendement. C'est dans ce cadre que nous jugeons nécessaire d'étudier l'influence de l'épaisseur de la base sur la densité de photocourant.

La figure (III.2) illustre la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de l'épaisseur de la base pour un éclairement de la face avant de la photopile.

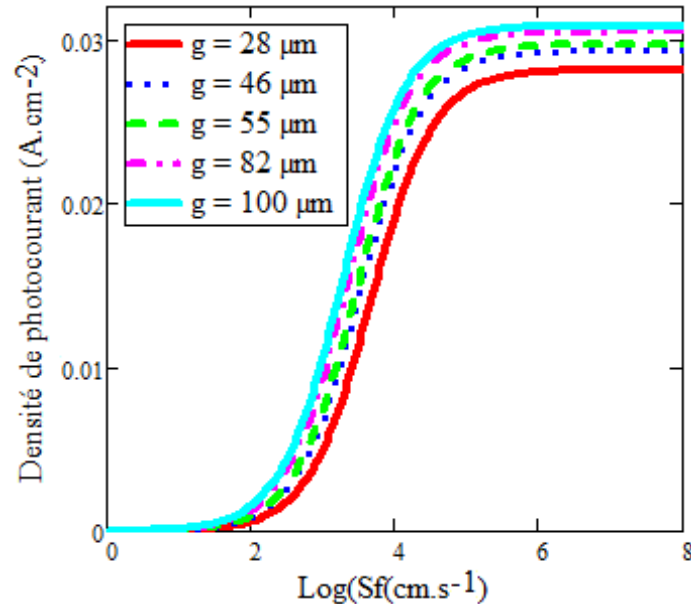


**Figure III.2 :** Profil de la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes épaisseurs de la base :  $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $S_b = F(H) \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $g = 64 \text{ } \mu\text{m}$

En analysant la figure III.2 nous constatons que pour les faibles valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction  $S_f$  ( $S_f < 2.10^2 \text{ cm. s}^{-1}$ ) 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, nous observons pour les grandes vitesses de recombinaison à la jonction c'est-à-dire lorsque la photopile est en court-circuit, la densité de photocourant augmente avec l'épaisseur de la base [38]. Cela s'explique par l'augmentation du volume de la base lorsque l'épaisseur de la base croit.

### III.1.3 : Influence de la vitesse de recombinaison à la jonction et de la taille de grain sur la densité de photocourant

Sur la figure III.3, nous présentons le profil de la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes tailles de grain.



**Figure III.3 :** Profil de la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la taille de grain :  $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $S_b = F(g) \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $H = 120 \text{ }\mu\text{m}$ . Les courbes de la densité de photocourant présentent deux paliers. L'un pour les faibles valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction où la densité de courant est pratiquement nulle, c'est le fonctionnement de la photopile en circuit ouvert. L'autre pour les grandes valeurs de cette même vitesse de recombinaison où la densité de courant atteint son maximum correspondant au fonctionnement en court-circuit. Ces résultats sont en accord avec les résultats de [21, 57]. Cette valeur maximale de la densité de photocourant augmente lorsque la taille de grain croît

Cette augmentation de la densité de photocourant s'explique par une réduction des centres de recombinaison au niveau de la photopile [21, 22, 23, 40, 57]. Les porteurs photogénérés en zone arrière peuvent se déplacer plus facilement vers la jonction. Ce qui augmente la densité de photocourant.

### III.2 : Etude du courant de court-circuit

Sur la figure III.3, nous notons, pour de grandes valeurs de Sf, que les allures de la densité de photocourant tracées en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction, prennent des valeurs asymptotiques correspondant au courant de court-circuit.

Le courant de court-circuit est obtenu en cherchant la limite de  $J_{ph}$  lorsque  $S_f > 10^4 \text{ cm.s}^{-1}$  [21, 40, 57]

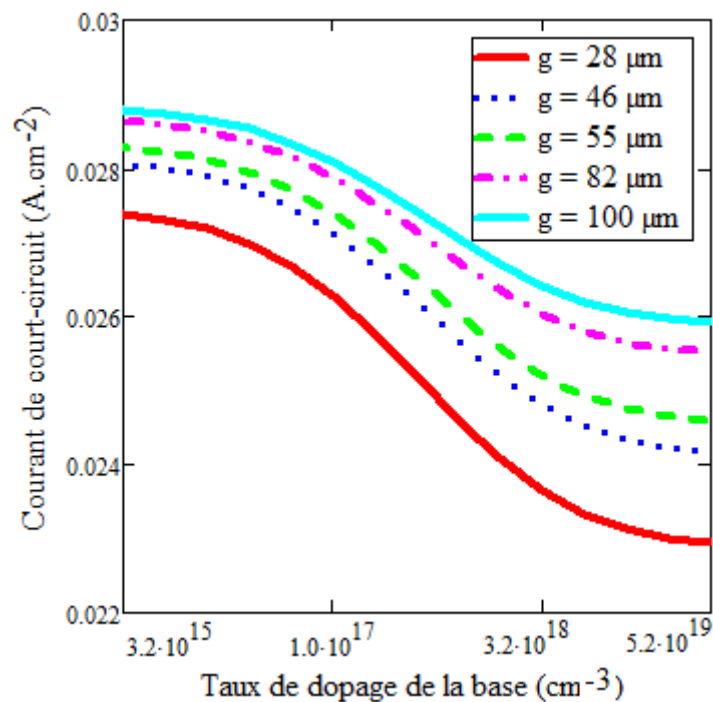
$$J_{cc}(S_{gb}, g, S_b, H, N_b) = [J_{ph}(S_{gb}, g, S_f, S_b, H, N_b)]_{S_f \geq 10^4 \text{ cm.s}^{-1}} \quad \text{III.2}$$

Ce courant de court-circuit dépend de la vitesse de recombinaison aux joints de grain et à la face arrière mais aussi du taux de dopage de la base, de l'épaisseur de la base et de la taille des gains.

Nous allons dans les paragraphes suivants étudier l'effet de ces paramètres sur le courant de court-circuit.

### III.2.1 : Influence du taux de dopage de la base et de la taille de grain sur le courant de court-circuit.

Le courant de court-circuit est un paramètre électrique influencé par le taux de dopage de la base et la taille de grain. La figure III. 4 présente la variation du courant de court-circuit en fonction du taux de dopage de la base pour différentes valeurs de taille de grain.



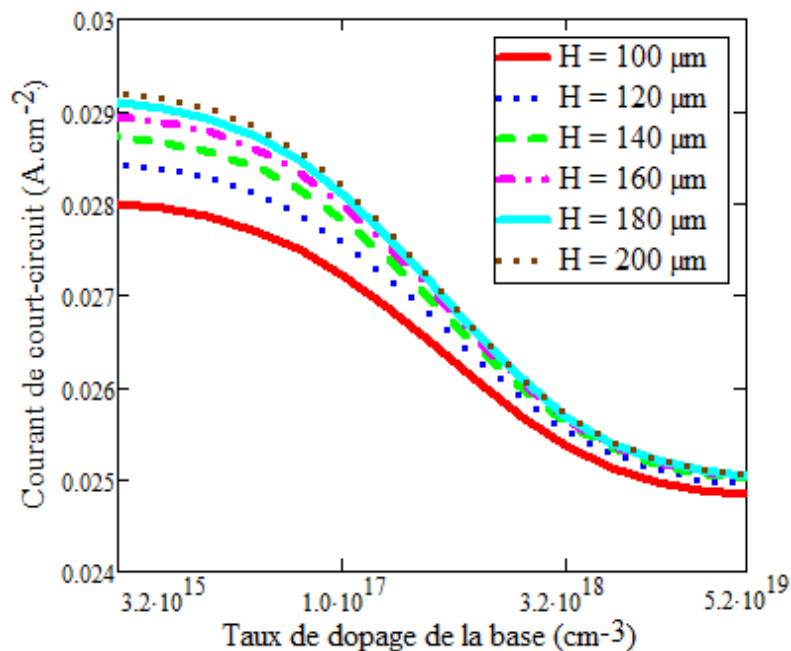
**Figure III.4 :** Profil du courant de court-circuit en fonction du taux de dopage de la base pour différentes tailles de grain :  $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $S_b = F(g, N_b) \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $H = 120 \text{ µm}$ .

Pour les faibles valeurs du taux de dopage de la base ( $N_b \leq 3.2.10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ) le photocourant de court-circuit d'une photopile éclairée par la face avant est pratiquement constant. Mais lorsque  $N_b > 3.2.10^{15} \text{ cm}^{-3}$  le photocourant de court-circuit décroît et cette décroissance est d'autant plus rapide que la taille de grain est petite. Des niveaux profonds d'énergie dans la bande interdite sont responsables de la chute de la durée de vie des porteurs, en créant des centres de

recombinaison selon [21, 57]. Ce qui entraîne une diminution de la durée de vie des porteurs minoritaires et donc une réduction du courant de court-circuit.

### III.2.2 : Influence de l'épaisseur de la base sur le courant de court-circuit

La base de notre cellule est la partie du silicium dopé en atome de bore ou couche P qui est la partie la plus active de la cellule. Comme nous avons eu à le préciser, c'est dans cette partie de la cellule que se crée la majorité des porteurs minoritaires responsables du courant photovoltaïque. Il est donc important de prévoir l'épaisseur du silicium qui donnerait le meilleur courant de court-circuit lors de la fabrication. C'est dans cette logique, que nous jugeons utile d'étudier l'influence de l'épaisseur de la base sur le courant de court-circuit. La figure III.5 illustre les profils de variation du courant de court-circuit en fonction du taux de dopage pour différentes valeurs d'épaisseur de la base.



**Figure III.5 :** Profil du courant de court-circuit en fonction du taux de dopage de la base pour différentes valeurs de l'épaisseur de la base :  $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $S_b = F(H, N_b) \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $g = 64 \mu\text{m}$ .

Nous notons sur la figure III.5 que le courant de court-circuit augmente au fur et à mesure que l'épaisseur de la base croît. Cette croissance est importante pour des photopiles à base faiblement dopée ( $10^{15} \text{ cm}^{-3} \leq N_b \leq 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ). Cela s'explique par une génération élevée du nombre de porteurs minoritaires dans le volume de la base lorsque l'épaisseur de la base croît. En résumé, la génération des porteurs minoritaires semble être plus importante dans les photopiles de plus en plus épaisses du fait du volume plus important de la base et d'un dopage modéré de la base ( $10^{15} \text{ cm}^{-3} \leq N_b \leq 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ). Cela se traduit par un plus grand nombre de

porteurs dans cette région de la photopile et par conséquent une augmentation du courant de court-circuit lorsque.

### III.3 : Etude de la phototension

La phototension caractérise la barrière de potentiel présente au niveau de la jonction émetteur-base. Son expression générale est donnée dans l'hypothèse de l'approximation de BOLTZMANN [21, 40, 57]

$$V_{ph}(Nb) = V_T \cdot \log \left[ 1 + \frac{Nb}{n_i^2} \int_{-\frac{g_x}{2}}^{+\frac{g_x}{2}} \int_{-\frac{g_y}{2}}^{+\frac{g_y}{2}} \delta n(x, y, 0) dx dy \right] \quad \text{III. 3}$$

$N_B$  est le taux de dopage de la base.

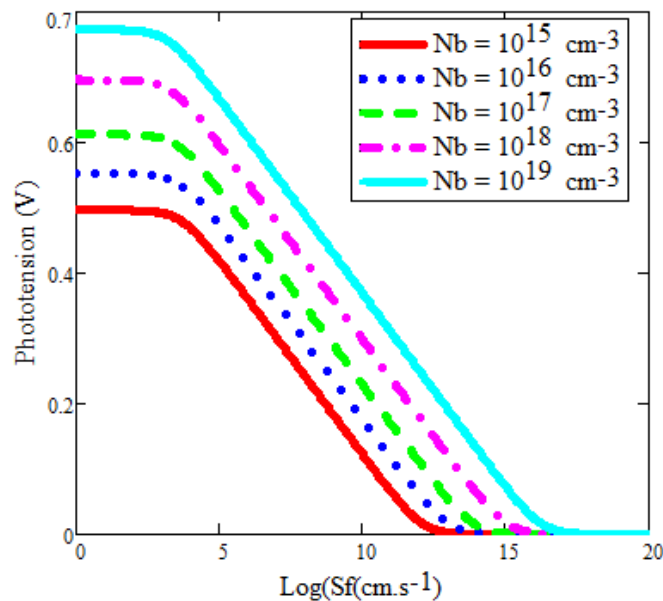
$n_i$  concentration intrinsèque des porteurs minoritaires dans la base

$V_T$  tension thermique.

Cette phototension dépend des paramètres de recombinaisons, du taux de dopage de la base, de la taille des grains et de l'épaisseur de la base. Nous allons donc étudier l'effet de ces paramètres sur la phototension.

#### III.3.1 : Influence de la vitesse de recombinaison à la jonction et du taux de dopage de la base sur la phototension.

Sur la figure III.6, nous présentons les profils de la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de taux de dopage de la base.

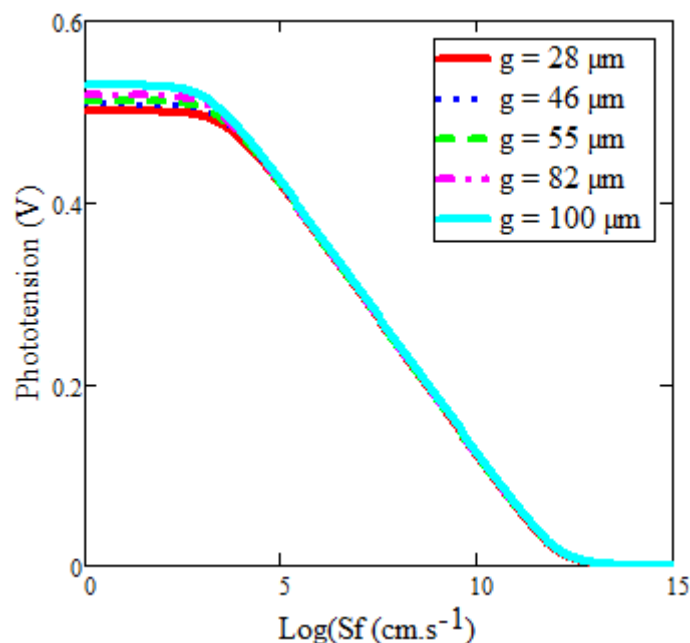


**Figure III.6 :** Profil de la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différents taux de dopage de la base :  $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $S_b = F(N_b) \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $g = 64 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $H = 120 \text{ }\mu\text{m}$ .

Nous observons sur la figure III.6 que la phototension présente deux paliers. L'un pour les faibles vitesses de recombinaisons à la jonction, où la phototension est maximale. C'est le fonctionnement en circuit-ouvert de la photopile. Il y'a stockage des porteurs de part et d'autre de la jonction. L'autre pour les grandes vitesses de recombinaisons à la jonction où la phototension est nulle. Correspondant au fonctionnement de la photopile en court-circuit qui traduit la production d'un courant maximal et d'une tension nulle comme montré par [26]. Nous observons également que pour un éclairage par la face avant, la phototension augmente avec le taux de dopage de la base. Cette augmentation de la phototension s'explique par la diminution du coefficient de diffusion lorsque le taux de dopage croit. Aussi la largeur de la zone de charge d'espace est inversement proportionnelle au taux de dopage de la base. Quand le taux de dopage de la base augmente, la largeur de la zone de charge d'espace diminue par conséquent moins de porteurs traversent la jonction de la photopile.

### III.3.2 : Influence de la vitesse de recombinaison à la jonction et de la taille des grains sur la phototension.

Pour étudier l'influence de la taille de grain sur la densité de photocourant, nous présentons sur la figure III.7 les profils de la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour quelques valeurs de taille de grain.



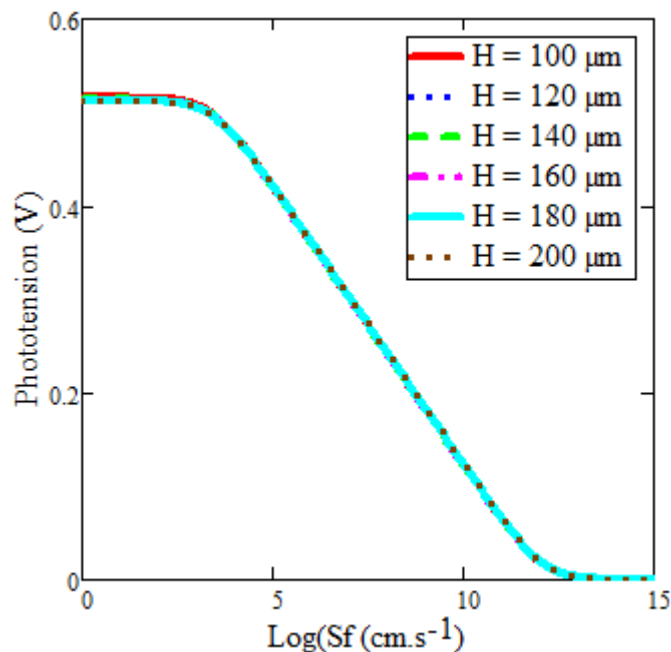
**Figure III.7 :** Profil de la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour quelques tailles de grain:  $S_b = F(g) \text{ cm. s}^{-1}$ ,  $S_g = 3.10^3 \text{ cm. s}^{-1}$ ,  $H = 0,012 \text{ cm}$ ,  $N_b = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ .

Les courbes de la phototension présentent deux paliers. L'un pour les faibles valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction où la phototension est maximale correspondant au

fonctionnement en circuit ouvert, l'autre pour les grandes valeurs de cette même vitesse de recombinaison où la phototension est nulle. L'effet de la taille de grain sur la phototension se manifeste plus pour les faibles valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction. Ainsi, nous notons que la phototension aux bornes de la photopile augmente lorsque la taille des grains croît [26].

### III.3.3 : Influence de la vitesse de recombinaison à la jonction et de l'épaisseur de la base sur la phototension

Comme nous l'avons fait pour la densité de photocourant, nous présentons sur la figure III.8 les variations de la phototension de la photopile en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs d'épaisseur de la base. Cette évolution de la phototension est obtenue pour une taille de grain, une vitesse de recombinaison aux joints de grain et pour un taux de dopage à la base donnés.



**Figure III.8:** Phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes épaisseurs : pour  $S_b = F(H) \text{ cm. s}^{-1}$ ,  $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $g = 64 \text{ } \mu\text{m}^3$  et  $N_b = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ .

Nous observons sur cette figure que l'épaisseur de la base influence peu sur la phototension de la photopile.

### III.4 : Etude de la tension en circuit-ouvert

Le profil de la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction est caractérisé, comme nous pouvons l'observer sur la figure III.8, un palier remarquable pour des valeurs de Sf faibles. Ce palier définit la phototension en circuit-ouvert ( $V_{co}$ ).

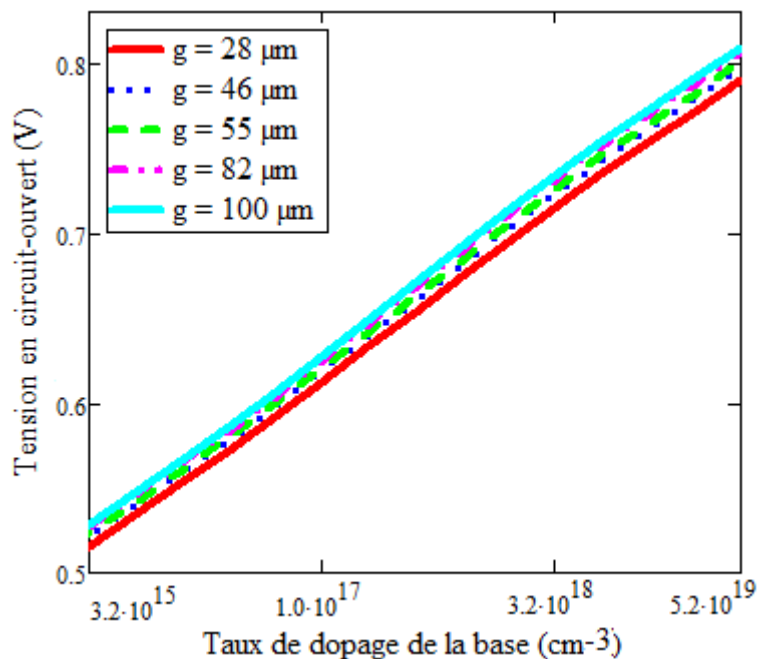


Nous avons déduit l'expression de la tension en circuit-ouvert en cherchant la limite de la phototension lorsque  $S_f < 10^2 \text{ cm.s}^{-1}$  [21, 40, 57].

$$V_{co}(S_g, g, S_b, Nb) = [V_{ph}(S_g, g, S_f, S_b, Nb)]_{S_f \rightarrow 0} \quad \text{III. 4}$$

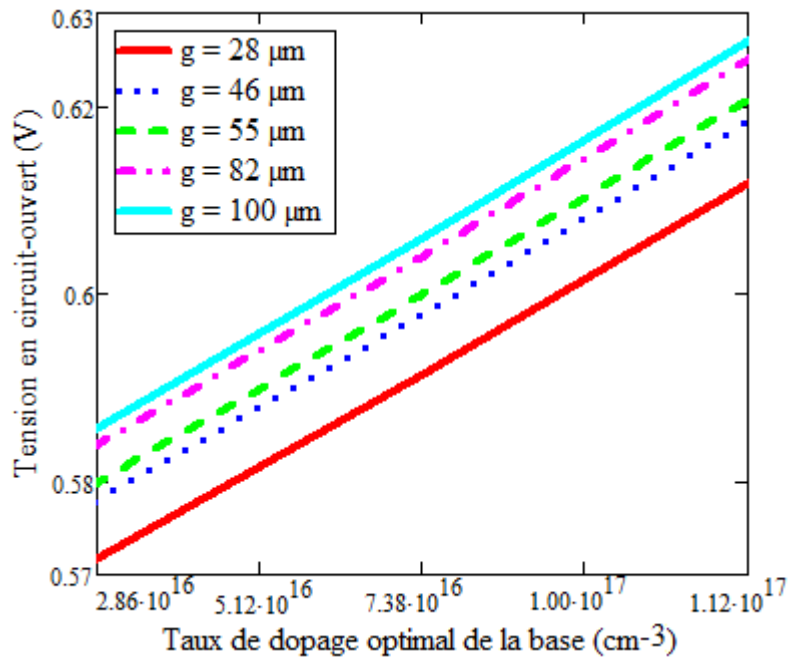
### III.4.1 : Influence du taux de dopage de la base et de la taille des grains sur la phototension en circuit-ouvert.

Dans cette partie l'effet du taux de dopage de la base et de la taille de grain sur la tension en circuit-ouvert a été étudié. La figure III.9 montre la variation de la tension en circuit-ouvert en fonction du taux de dopage de la base pour différentes valeurs de la taille de grain. Quant à la figure III. 10, elle met en évidence l'effet du taux de dopage optimal pour différentes tailles de grain sur la tension en circuit-ouvert de la photopile.



**Figure III.9 :** Profil de la tension en circuit-ouvert en fonction du taux de dopage de la base pour différents tailles de grains :  $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $S_b = F(g, Nb) \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $H = 120 \mu\text{m}$ ,  $Nb = 10^{16} \text{ cm.s}^{-1}$ .

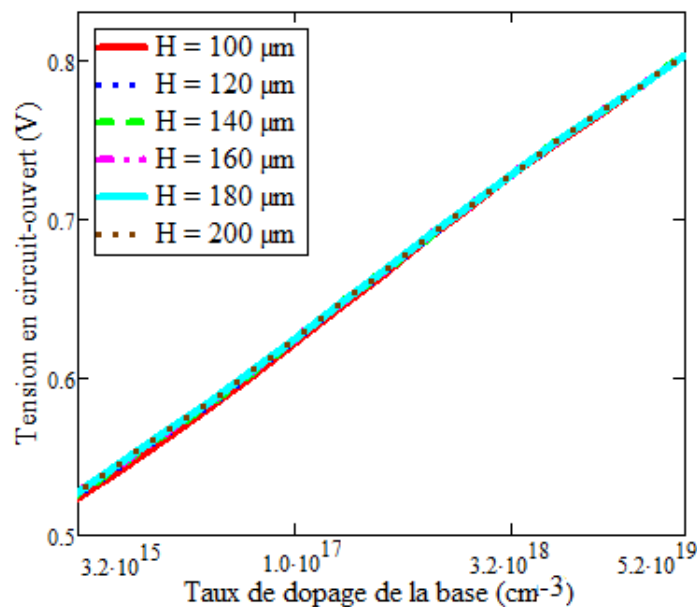
Nous constatons sur ces figures que la tension en circuit-ouvert augmente avec le taux de dopage de la base mais aussi avec la taille de grain. Cette augmentation est plus visible que lors que la tension en circuit-ouvert croit avec les taux d'impureté optimal de la base. Cela s'explique par le fait que lorsque ces deux paramètres augmentent, nous avons une diminution du coefficient de diffusion et de la durée de vie des porteurs minoritaires avec l'augmentation du taux de dopage aux seins de la photopile.



**Figure III.10 :** Profil de la tension en circuit-ouvert en fonction du taux de dopage optimal de la base pour différents tailles de grains :  $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $S_b = F(g, Nb) \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $H = 120 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $Nb = 10^{16} \text{ cm.s}^{-1}$ .

### III.4.2 : Influence de l'épaisseur de la base sur la phototension en circuit-ouvert

Nous présentons sur la figure III.11 la variation de la tension en circuit-ouvert en fonction du taux de dopage de la base pour différentes valeurs de l'épaisseur de la base.



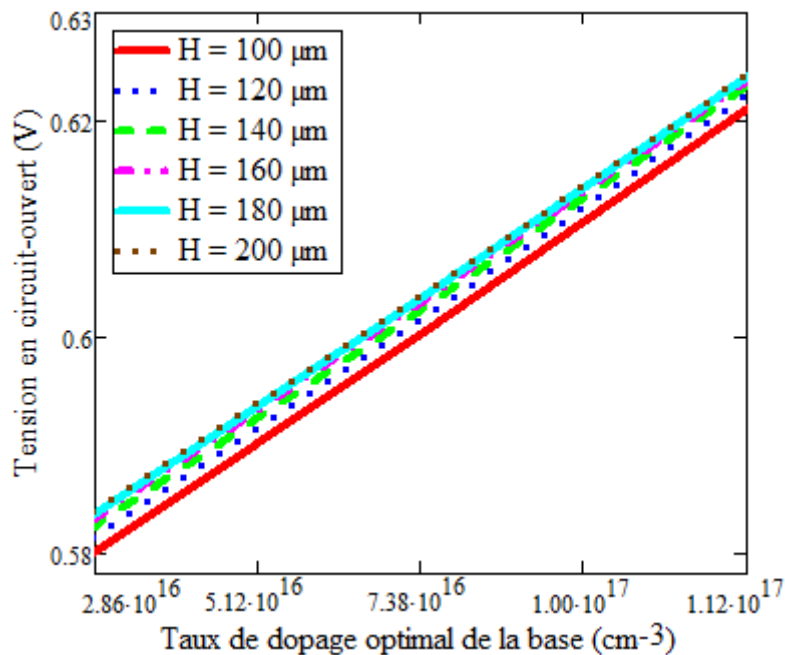
**Figure III.11 :** Profil de la tension en circuit-ouvert en fonction du taux de dopage de la base pour différentes épaisseurs de la base :  $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $S_b = F(H, Nb) \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $g = 64 \text{ }\mu\text{m}$ .

Nous observons sur la figure III.11 que la tension en circuit-ouvert augmente linéairement avec le taux de dopage de la base.

Quant à l'épaisseur de la base, nous notons une très légère croissance de la tension en circuit-ouvert lorsqu'elle augmente.

Nous pouvons donc conclure que l'augmentation du volume de la base n'a presque pas d'influence sur la tension en circuit-ouvert.

Ainsi, nous présentons sur la figure III.12 la variation de la tension en circuit-ouvert en fonction du taux de dopage optimal de la base pour différentes valeurs de l'épaisseur de la base.



**Figure III.12 :** Profil de la tension en circuit-ouvert en fonction du taux de dopage optimal de la base pour différentes épaisseurs de la base :  $S_g = 10^3 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $S_b = F(H, N_b) \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $g = 64 \text{ }\mu\text{m}$ .

La croissance des taux d'impureté optimal lorsque le volume de la base augmente entraîne une légère augmentation de la tension en circuit-ouvert avec l'épaisseur de la base.

### III.5 : Etude du courant de diode

Le courant de diode est un courant de fuite qui caractérise les pertes de porteurs de charge photogénérés. En effet, la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction traduit un flux de porteurs indésirables au niveau de la jonction. Il s'établit lorsque les porteurs de charge sont injectés dans la photopile [74, 75, 76].

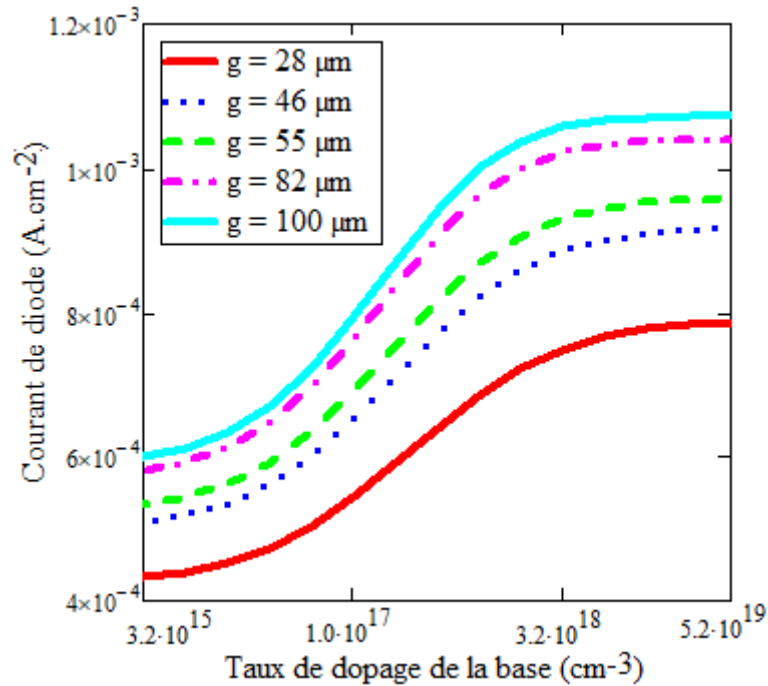
Son expression est donnée par la relation :

$$J_d(N_b) = q \cdot S_{f_0} \cdot \left[ 1 + \frac{N_b}{n_i^2} \cdot \int_{-\frac{g_x}{2}}^{+\frac{g_x}{2}} \int_{-\frac{g_y}{2}}^{+\frac{g_y}{2}} \left[ \frac{\partial \delta n(x, y, z)}{\partial z} \right]_{z=0} dx dy \right] \quad \text{III.5}$$

Ce courant de diode est fonction des vitesses de recombinaisons à la jonction et à la face arrière, du taux de dopage, de l'épaisseur de la base et de la taille des grains.

### III.5.1 : Influence du taux de dopage de la base et de la taille des grains sur le courant de diode

Pour étudier l'effet du taux de dopage de la base et de la taille des grains sur le courant de diode, nous avons tracé sur la figure III.13 le courant de diode en fonction du taux de dopage de la base pour différentes tailles de grain.



**Figure III.13** : Profil du courant de diode en fonction du taux de dopage de la base pour différentes tailles de grains :  $S_f = 10^3 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $S_g = 10^3 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $S_b = F(\text{Nb}, g)$ ,  $H = 120 \mu\text{m}$ .

Nous notons sur la figure III.13 que le courant de diode augmente respectivement avec le taux de dopage de la base et de la taille de grain. L'augmentation de la phototension avec le taux de dopage entraîne l'élévation du courant de diode lorsque le taux de la base croît.

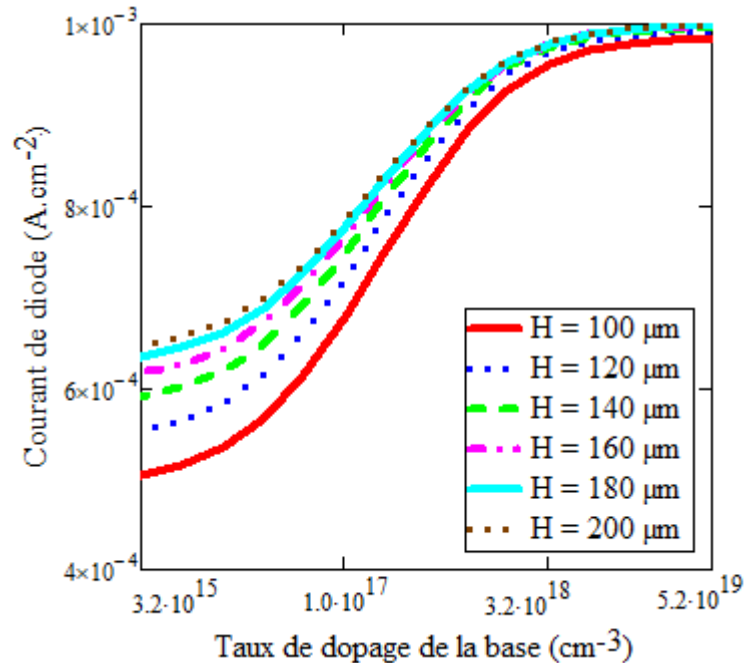
La croissance du courant de diode lorsque la taille de grain est grande s'explique par l'augmentation des surfaces constituant les frontières délimitant la base de la photopile. Ces surfaces sont les sièges des défauts de toutes sortes qui provoquent des irrégularités dans la périodicité du réseau cristallin. Ces imperfections proviennent principalement de différents traitements tels que : rectification, polissage, attaque chimique, revêtement par une couche d'une autre substance. Comme exemple de défauts surfacique, nous pouvons citer les liaisons pendantes, les micros cavité.... [77].

### III.5.2 : Influence de l'épaisseur de la base sur le courant de diode.

Sur la figure III.14, nous avons mis en évidence l'influence de l'épaisseur de la base sur le courant de diode de la photopile éclairée par sa face avant. Pour cela, nous avons tracé le courant

de diode en fonction du taux de dopage de base pour différentes valeurs de l'épaisseur de la base.

Cette évolution du courant de diode est obtenue pour une taille de grain, une vitesse de recombinaison à la jonction et pour une vitesse de recombinaison aux joints de grain donnés.



**Figure III.14 :** Profil du courant de diode en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différents taux de dopage de la base :  $S_f = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $S_b = F(N_b, H)$ ,  $g = 64 \text{ } \mu\text{m}$ .

Comme avec la taille des grains, le courant de diode augmente avec l'épaisseur de la base. Ceci peut s'expliquer par le fait que l'épaisseur de la base est elle-même formée de nombreux défauts et en particulier des dislocations. Ces dislocations sont des défauts linéaires en volume pouvant atteindre la surface de la photopile. Elles sont créées par des distorsions du réseau cristallin produites par le glissement de certaines parties du cristal par rapport à d'autres selon [78].

### III.6 : Etude de la caractéristique courant-tension

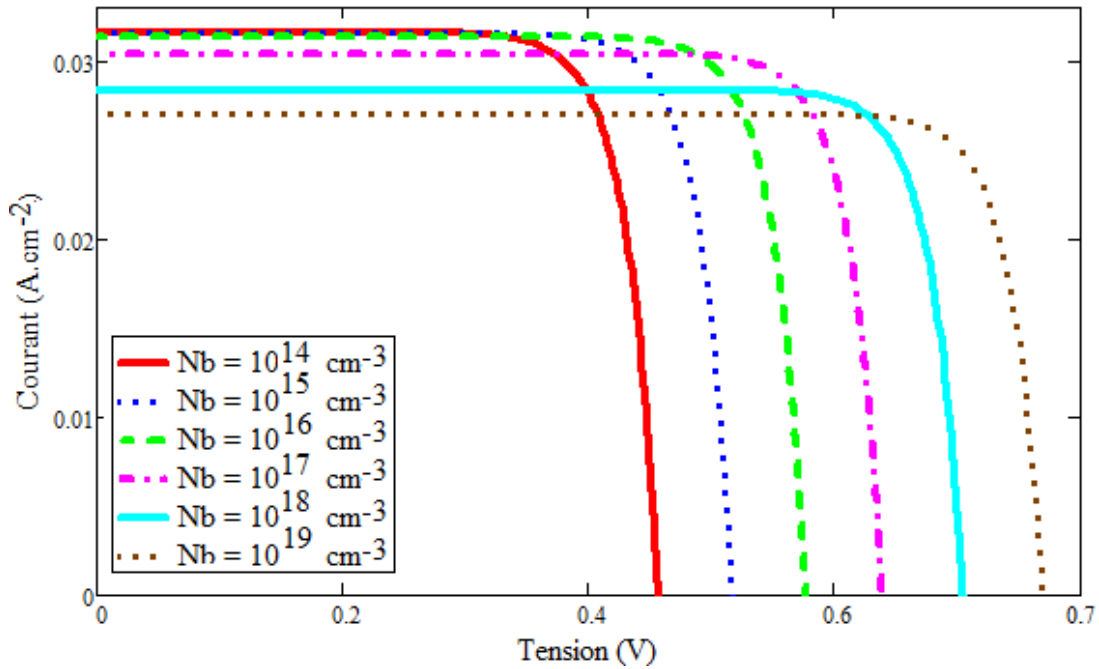
Le courant de sortie de la cellule est donné par la différence entre la densité de photocourant et le courant de diode (courant de fuite) [74, 75, 76] :

$$I(N_b) = J_{ph}(N_b) - J_d(N_b) \tag{III.6}$$

$N_b$  est le taux de dopage de la base.

Pour illustrer l'influence du taux de dopage de la base sur la caractéristique I-V, nous traçons la caractéristique I-V pour différentes valeurs du taux de dopage de la base.

La figure III.15 traduit la caractéristique I-V pour un éclairage par la face avant où le taux de dopage de la base prend des valeurs croissantes.



**Figure III.15 :** Profil de la densité de photocourant en fonction de la tension pour quelques valeurs du taux de dopage :  $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $S_b = F(Nb) \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $g_x = g_y = g = 64 \text{ } \mu\text{m}$ ,  $H = 120 \text{ } \mu\text{m}$ .

La photopile passe du mode de fonctionnement en circuit-ouvert au mode de court-circuit.

Ainsi, nous notons sur la figure III.15 que le courant est maximal pour les valeurs de phototension inférieures 0,4V lorsque la photopile est éclairée par la face avant. C'est le fonctionnement de la photopile en court-circuit. Puis il décroît de façon très rapide lorsque la photopile passe au mode de fonctionnement en circuit-ouvert comme montré par [63].

Nous avons ici la confirmation des résultats obtenus précédemment. La densité de photocourant de court-circuit diminue avec le taux de dopage alors que la phototension en circuit-ouvert augmente avec le taux de dopage de la base.

### III.7 : Etude de la puissance

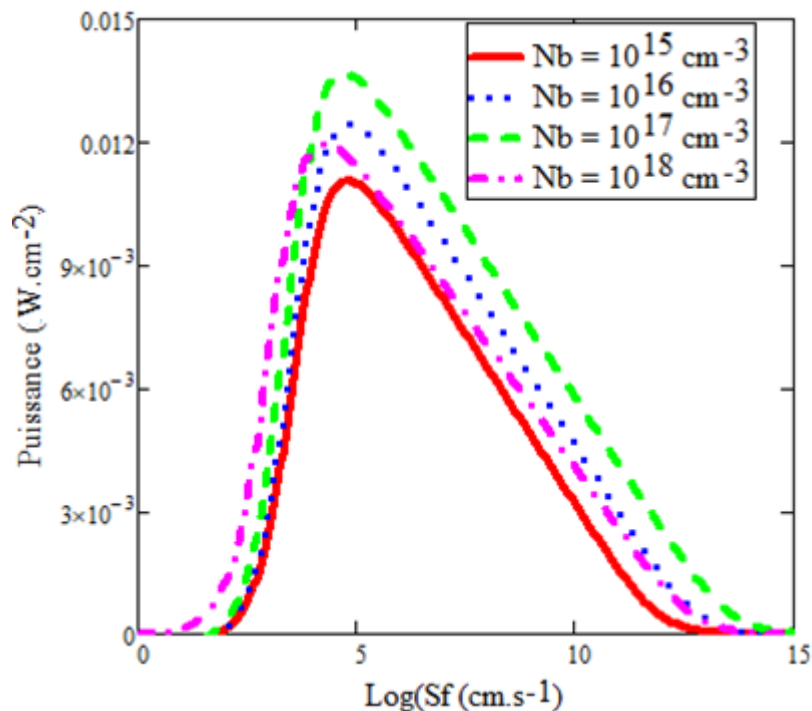
La puissance fournie par la photopile sous éclairage polychromatique pour un point de fonctionnement donné est déterminée par le produit du courant fourni par la phototension. Son expression est la suivante [18, 71, 75, 76] :

$$P(Nb) = V_{ph}(Nb) \cdot I(Nb) \quad \text{III.7}$$

Cette puissance est en fonction de la vitesse de recombinaison aux joints de grain, à la jonction et à la face arrière. Elle dépend aussi du taux de dopage de la base, de l'épaisseur de la base et de la taille de grain. Nous allons, sur les paragraphes qui suivent étudier l'effet du taux de dopage de la base, de la taille des grains et de l'épaisseur de la base sur la puissance fournie par la photopile.

### III.7.1 : Influence du taux de dopage sur la puissance de la photopile

Pour voir l'effet du taux de dopage de la base sur la puissance maximale de la photopile, nous avons présenté sur la figure III.16 les profils de la puissance en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différents taux de dopage de la base.



**Figure III.16 :** Profil de la puissance en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différents taux de dopage de la base :  $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $S_b = F(N_b) \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $g_x = g_y = g = 64 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $H = 120 \text{ }\mu\text{m}$ .

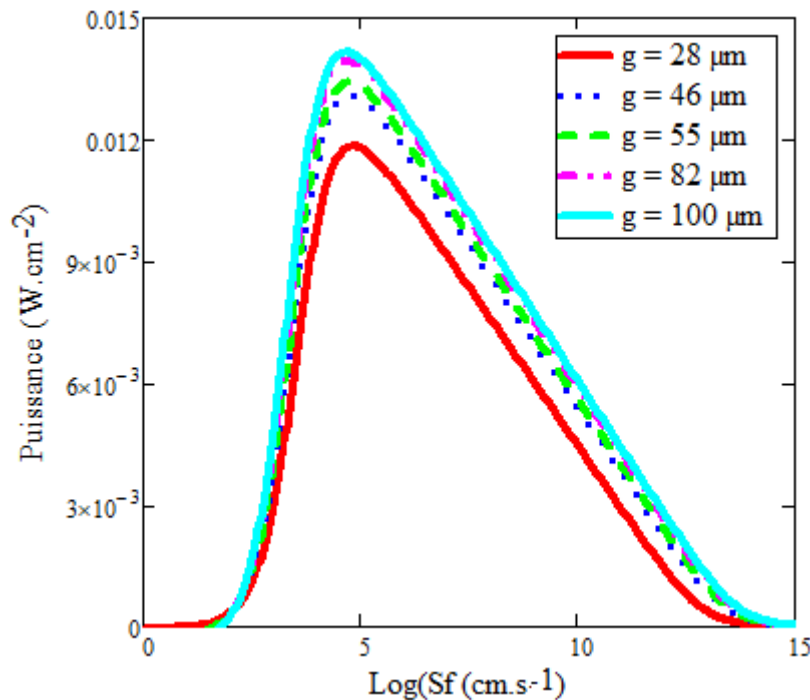
Sur la figure III.16 nous notons pour un éclairage de la face avant d'une photopile polycristalline, la puissance fournie par la photopile augmente lorsque la vitesse de recombinaison à la jonction croît. Cette puissance passe par un maximum nommé point de puissance maximale  $P_m$ . Chaque point de puissance maximale correspond à un point de fonctionnement réel de la photopile. Nous remarquons aussi que chaque point de puissance maximale correspond à une vitesse de recombinaison maximale environ égale à  $S_{f_m} = 10^5 \text{ cm.s}^{-1}$ . Au-delà de cette valeur de  $S_{f_m}$ , la puissance décroît lorsque le point de fonctionnement se rapproche des modes de fonctionnement de court-circuit. La puissance électrique maximale de la photopile  $P_m$  augmente lorsque le taux de dopage de la base croît. La plus grande valeur de la puissance maximale est obtenue pour un dopage de la base égale à  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ .

L'analyse de la figure III.16, montre que la puissance fournie par la photopile diminue avec les forts taux de dopage de la base. Cela est dû à la réduction de la durée de vie des porteurs minoritaires en excès dans la base. Du coup on a une diminution de la longueur de diffusion

des porteurs minoritaires en excès (augmentation des recombinaisons dans le volume de la base) et par conséquent la diminution de la puissance fournie par la photopile.

### III.7.2 : Influence de la taille des grains sur la puissance de la photopile

Nous présentons sur la figure III.17 l'évolution de la puissance électrique solaire en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction lorsque la photopile monofaciale est éclairée par sa face avant pour différentes tailles de grain.



**Figure III.17 :** Profil de la puissance en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes tailles de grains :  $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $S_b = F(g) \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $N_b = 1.10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ,  $H = 120 \text{ } \mu\text{m}$ .

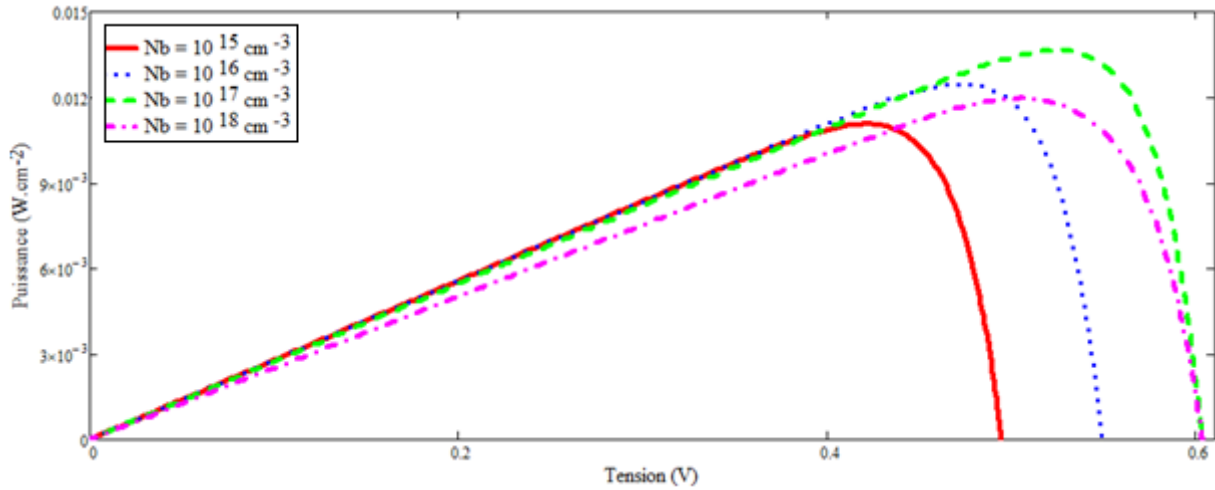
Cette évolution de la puissance électrique est obtenue pour une vitesse de recombinaison à la jonction et de la taille de grain.

La puissance électrique maximale de la cellule solaire  $P_m$  augmente lorsque la taille des grains croît. Cela s'explique par le fait que l'augmentation de la taille des grains entraîne moins de perte des porteurs susceptible de traverser la jonction pour participer à la production du photocourant [69].

### III.7.3 : Influence du taux de dopage de la base sur la caractéristique puissance-tension.

Sur la figure III.18, nous présentons l'allure de la puissance fournie par la photopile éclairée par la face avant en fonction de la tension pour différents taux de dopage de la base.





**Figure III.18 :** Profil de la puissance en fonction de la tension pour quelques valeurs du taux de dopage :  $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $S_b = F(Nb) \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $g_x = g_y = g = 64 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $H = 120 \text{ }\mu\text{m}$ .

Nous constatons que la puissance fournie par la photopile croît avec la phototension jusqu'à atteindre un maximum qui correspond à la puissance maximale avant de diminuer de façon exponentielle quand la photopile tend vers le mode de fonctionnement en circuit-ouvert comme les résultats obtenus par [63]. La puissance électrique maximale augmente lorsque le taux de dopage de la base croît. La plus grande valeur de la puissance maximale est obtenue pour un taux de dopage de la base égal à  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . Ce qui confirme notre conclusion précédente. Nous nous attendons donc à l'augmentation du rendement de la photopile.

### III.8 : Etude du facteur de forme

Le facteur de forme est le rapport entre la puissance maximale fournie par la photopile et le produit du courant en court-circuit par la tension en circuit ouvert [18]. Son expression est :

$$FF(Nb) = \frac{P_{\max}(Sf_{\max}, Nb)}{J_{cc}(Nb) \cdot V_{co}(Nb)} \quad \text{III.8}$$

$P_{\max}(Sf_m, S_g, g, S_b, H)$  représente la puissance maximale.

$J_{cc}(S_g, g, S_b)$  représente le courant en court-circuit, obtenu à partir de l'expression du photocourant pour des valeurs de vitesse de recombinaison à la jonction très grandes.

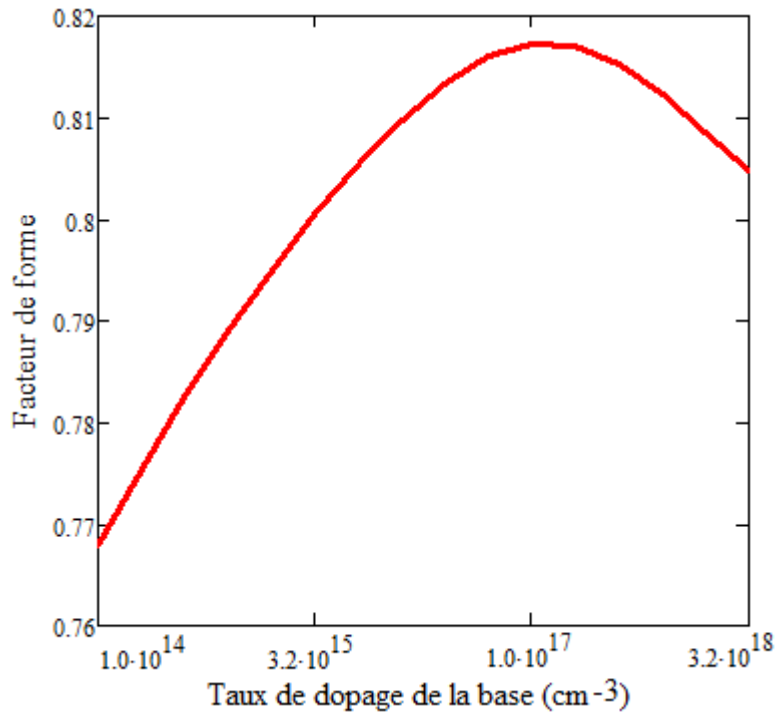
$V_{co}(S_g, g, S_b)$  représente la tension en circuit ouvert, obtenue à partir de l'expression de la phototension pour des valeurs de vitesse de recombinaison à la jonction très faibles.

Les courbes de variation de la puissance (figure III.16 et III.17) en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction montrent qu'elle atteint un maximum pour une vitesse de recombinaison  $Sf_m$  donné.

Pour des taux de dopages variant entre  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$  à  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , nous constatons que la vitesse de

recombinaison maximale est environ égale à  $Sf_m = 10^5 \text{ cm. s}^{-1}$  correspondante à la puissance maximale reste sensiblement la même d'après la figure III.16.

Pour mieux apprécier l'influence du taux de dopage de la base sur le facteur de forme, nous présentons sur la figure III.19 sa variation en fonction du taux de dopage de la base.



**Figure III.19** : Profil du facteur de forme en fonction du taux de dopage de la base :  $Sf_m = 5 \cdot 10^5 \text{ cm. s}^{-1}$ ,  $S_b = F(N_b) \text{ cm. s}^{-1}$ ,  $g_x = g_y = g = 40 \mu\text{m}$ ,  $H = 120 \mu\text{m}$ .

Nous notons sur cette figure une augmentation du facteur de forme pour des taux de dopage de la base variant entre  $10^{14} \text{ cm}^{-3}$  à  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . Cette amélioration est due à la diminution de la résistivité du substrat lorsque le taux de dopage croît. Au-delà de cet intervalle, nous notons une chute du facteur de forme. Ceci peut s'expliquer par une diminution de la conductivité du silicium. Cette explication est tout à fait en accord avec les études précédentes quand on sait que, d'après [16, 17] quand le taux d'impureté est supérieur à  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , le mécanisme physique associé à la distorsion des limites des bandes d'énergies entraînent une réduction de la largeur de la bande interdite et donc une augmentation de la conductivité du silicium polycristallin.

Les meilleures performances de notre photopile sont optimisées pour des taux de dopage de la base compris entre  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$  à  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$  comparé aux résultats obtenus de la Figure III.14.

### III.9 : Etude du rendement

C'est le rendement de conversion de la lumière en énergie électrique. Il est déterminé par le rapport entre la puissance électrique maximal fournie par la photopile et la puissance du flux lumineux incident reçu par cette photopile [74, 76]. Son expression est la suivante :

$$\eta(Nb) = \frac{P \max(Sf_m, Nb)}{P_{in}}$$

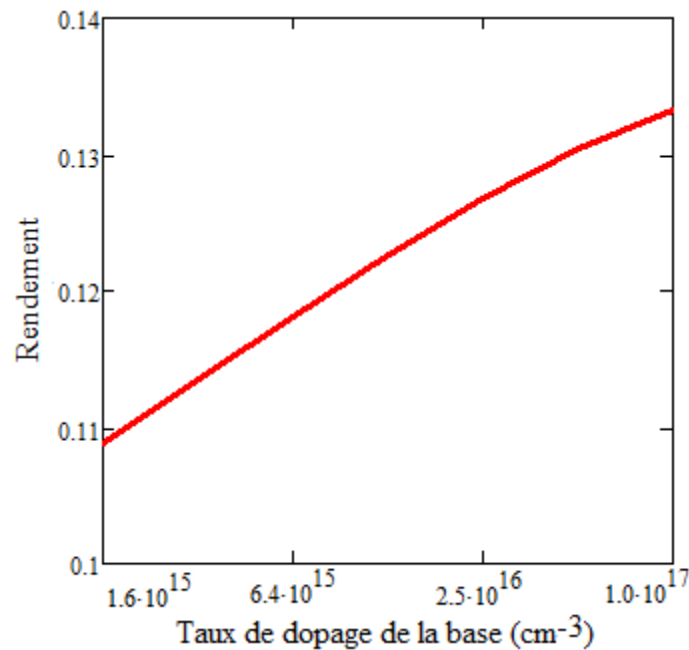
III. 9

Sous éclairage polychromatique, nous avons pris une puissance du flux incident égale à :

$$P_{in} = 100mW.cm^{-2}$$

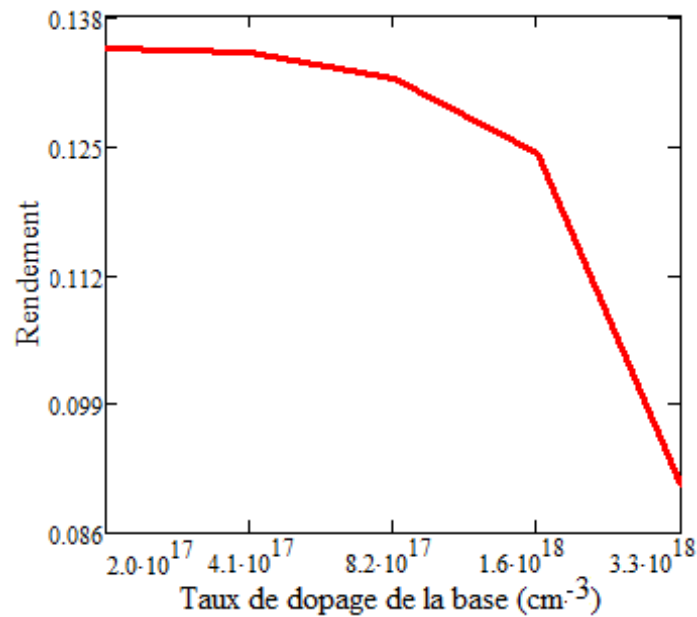
III.10

Pour mieux apprécier l'influence du taux de dopage de la base sur le rendement de la photopile éclairé par la face avant, nous présentons d'une part, sur la figure III.20 la variation du rendement en fonction des faibles valeurs du taux de dopage de la base et d'autre part, sur la figure III.21 la variation du rendement en fonction des fortes valeurs de taux de dopage de la base.



**Figure III.20** : Profil du rendement en fonction des faibles taux de dopage de la base :  $Sf_m = 10^5 \text{ cm}^{-1}$ ,  $Sb = F(Nb) \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $g = 64 \mu\text{m}$ ,  $H = 120 \mu\text{m}$ .

Nous notons sur la figure III.20 que le rendement augmente pour les faibles taux de dopages de la base. Etant donné l'absence d'électron libre, le silicium pur est un isolant qui ne peut laisser passer aucun courant. Le silicium peut devenir semi-conducteur grâce à l'addition en infimes quantités d'impuretés au silicium pur. Ce procédé appelé dopage crée des électrons libres. Ce qui explique l'augmentation du rendement de la photopile avec les faibles taux de dopage de la base. Le taux de dopage inférieur ou égal à  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$  améliorent donc la qualité de la photopile.



**Figure III.21** : Profil du rendement en fonction des forts taux de dopage de la base  $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $S_f = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $S_b = F(N_b) \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $g_x = g_y = g = 64 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $H = 120 \text{ }\mu\text{m}$ .

L'analyse de la figure III.21, montre que le rendement de conversion de la photopile diminue avec les forts taux de dopage de la base. Cela est dû à la recombinaison Auger. En effet, la recombinaison Auger prédomine au fort niveau de dopage ( $N_b > 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ) et elle réduit rapidement la durée de vie des porteurs minoritaires en excès dans la base. Du coup, on a une diminution de la longueur de diffusion des porteurs minoritaires en excès. De ce fait, la puissance maximale diminue grâce à l'augmentation des recombinaisons des porteurs dans le volume de la base. Ce qui explique la diminution du rendement de conversion avec les forts taux de dopage de la base.

Dans les tableaux ci-dessous nous avons répertorié respectivement pour différentes valeurs du taux de dopage, de la taille de grain et de l'épaisseur de la base, les paramètres électriques de la photopile. Ces résultats sont en accord avec les résultats de [57, 63].

**Tableau III.1** : des paramètres électriques obtenus en variant le taux de dopage du substrat de Silicium  $N_b$  de  $1.10^{15} \text{ cm}^{-3}$  à  $1.10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . Pour une taille de  $g_x = g_y = 64 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $H = 120 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $S_{fmax} = 10^5 \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $S_b = F(N_b) \text{ cm.s}^{-1}$ .

$N_b (\text{cm}^{-3})$	$J_{cc}(\text{A.cm}^{-2})$	$V_{co}(\text{V})$	$P_m(\text{mW.cm}^{-2})$	FF(%)	R(%)	$I_d (\text{A.cm}^{-2})$
$10^{15}$	0,0297	0,507	11,46	79,0	11,0	$5,45 \cdot 10^{-4}$
$10^{16}$	0,0296	0,562	12,41	80,0	12,3	$5,785 \cdot 10^{-4}$
$10^{17}$	0,0286	0,622	14,64	81,7	13,3	$7,119 \cdot 10^{-4}$
$10^{18}$	0,0262	0,707	11,90	80,5	12,4	$9,139 \cdot 10^{-4}$

**Tableau III.2** : des paramètres électriques obtenus en variant la taille des grains du substrat de Silicium. Pour :  $N_b = 10^{16} \text{cm}^{-3}$ ,  $H = 120 \mu\text{m}$ ,  $S_g = 10^3 \text{cm.s}^{-1}$ ,  $S_{fmax} = 10^5 \text{cm.s}^{-1}$ ,  $S_b = F(g) \text{cm.s}^{-1}$ .

g ( $\mu\text{m}$ )	Jcc ( $\text{A.cm}^{-2}$ )	Vco (V)	Pm ( $\text{mW.cm}^{-2}$ )	FF(%)	R(%)	Id ( $\text{A.cm}^{-2}$ )
28	0,0270	0,552	11,8	81,7	12,1	$4,521.10^{-4}$
46	0,0280	0,559	13,1	82,0	12,5	$5,345.10^{-4}$
55	0,0282	0,561	13,4	83,0	12,7	$5,614.10^{-4}$
82	0,0286	0,564	14,0	84,0	13,4	$6,131.10^{-4}$
100	0,0290	0,566	14,7	85,0	14,0	$6,337.10^{-4}$

**Tableau III.3** : des paramètres électriques obtenus en variant l'épaisseur de la base du substrat de Silicium. Pour  $N_b = 10^{16} \text{cm}^{-3}$ ,  $g_x = g_y = 64 \mu\text{m}$ ,  $S_g = 10^3 \text{cm.s}^{-1}$ ,  $S_{fmax} = 10^5 \text{cm.s}^{-1}$ ,  $S_b = F(H) \text{cm.s}^{-1}$ .

H ( $\mu\text{m}$ )	Jcc ( $\text{A.cm}^{-2}$ )	Vco (V)	Pm ( $\text{mW.cm}^{-2}$ )	FF(%)	R(%)	Id ( $\text{A.cm}^{-2}$ )
100	0,0267	0,561	12,0	72,5	12,3	$5,091.10^{-4}$
120	0,0273	0,562	13,0	73,5	12,6	$5,591.10^{-4}$
140	0,0278	0,562	13,2	73,8	12,9	$5,961.10^{-4}$
160	0,0283	0,562	13,3	74,1	13,0	$6,230.10^{-4}$
180	0,0290	0,562	13,4	74,3	13,2	$6,423.10^{-4}$
200	0,0292	0,562	13,5	74,4	13,3	$6,561.10^{-4}$

## Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fait une étude à trois dimensions de la densité de photocourant, du courant de court-circuit, de la phototension, de la tension en circuit-ouvert, du courant de diode, de la puissance, du facteur de forme et du rendement d'une photopile à base de silicium polycristallin en régime statique sous éclairage polychromatique. Ils sont déterminés à partir de l'expression de la densité de porteurs minoritaires donnés dans le chapitre précédent. Leurs profils sont étudiés en fonction du taux de dopage de la base, et de la taille des grains.

Les résultats obtenus nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

- ✓ La densité de photocourant, le courant de court-circuit diminuent avec le taux de dopage de la base tandis qu'ils augmentent avec la taille de grain et l'épaisseur de la base ;
- ✓ la phototension, la tension en circuit-ouvert, et le courant de diode augmentent avec le taux de dopage de la base ;
- ✓ La puissance, le facteur de forme et le rendement augmentent avec les taux de dopage inférieur ou égal à  $10^{17} \text{cm}^{-3}$  au-delà de cette valeur ces paramètres décroissent quand le taux de dopage augmente.

Cette étude nous a permis de voir que les meilleurs paramètres électriques de la photopile sont obtenus pour des taux du dopage de la base comprises entre  $10^{15} \text{cm}^{-3}$  et  $10^{17} \text{cm}^{-3}$  suivant la valeur de la taille de grain.

**CHAPITRE IV : ETUDE DES VITESSES  
DE RECOMBINAISONS SURFACIQUES,  
DES RESISTANCES SERIE ET SHUNT  
ET DE LA CAPACITE DE LA  
PHOTOPILE**

## Introduction

Ce présent chapitre porte d'une part, sur l'étude de l'effet du taux de dopage de la base et de l'épaisseur de la base sur la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction et sur la vitesse de recombinaison à la face arrière et d'autre part, sur l'étude de l'effet du taux de dopage de la base, de la taille de grain et de l'épaisseur de la base sur les paramètres électriques de la photopile à savoir, la résistance série et shunt. Ces deux paramètres électriques représentent des pertes résistives au sein de la photopile liée à la structure du matériau et celles liées à la métallisation. Un accent particulier est mis sur l'aspect source idéale de tension et de courant. L'étude de la capacité de la photopile en fonction du taux de dopage de la base, de la taille de grain et de l'épaisseur de la base mettra fin à ce chapitre.

### IV.1 : Etude de la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction

Pour les grandes valeurs de  $S_b$ , la densité de courant présente un gradient nul, ce qui nous permet d'écrire [68, 79, 80] :

$$\left[ \frac{\partial J_{ph}}{\partial S_b} \right]_{S_{bgrand}} = 0 \quad \text{IV.1}$$

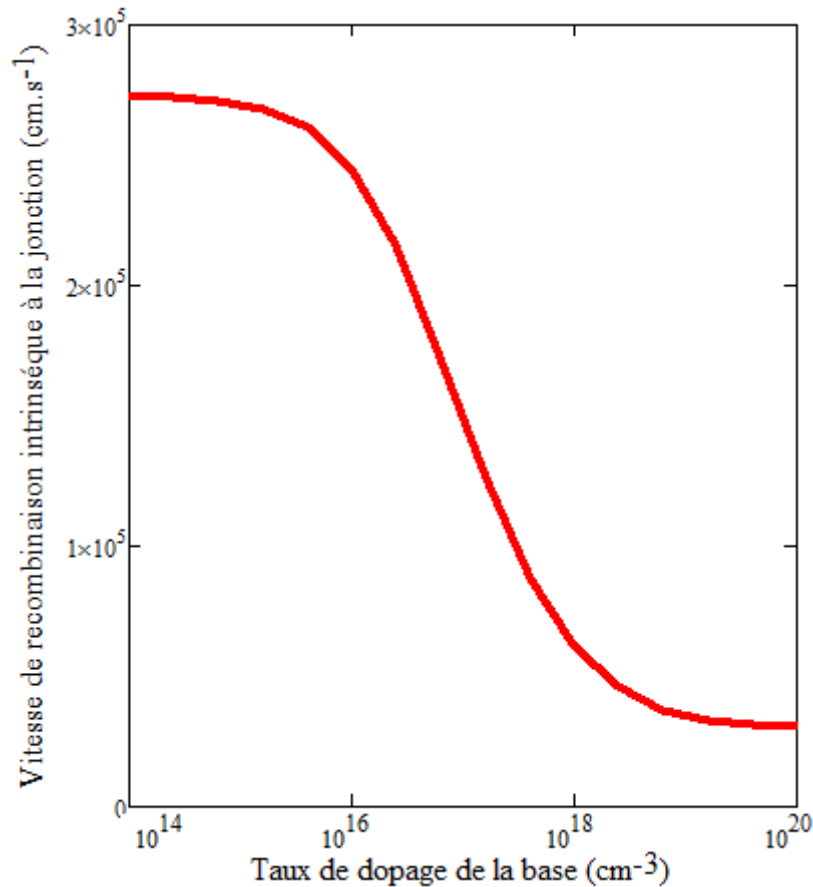
La résolution de l'équation (IV.1) nous permet d'obtenir l'expression de la vitesse de recombinaison intrinsèque  $S_{f0}$  en fonction du taux de dopage de la base et de l'épaisseur de la base.

$$S_{f0}(H, g, Nb) = D(Nb) \cdot \frac{\sum_{k=0}^5 \sum_{j=0}^5 \left( \frac{R_{kj}}{\cos\left(\frac{H}{L_{kj}}\right)^2} \cdot \sum_{i=1}^3 K_i \left[ b_i - \left( \frac{1}{L_{kj}} \sinh\left(\frac{H}{L_{kj}}\right) + b_i \cdot \cosh\left(\frac{H}{L_{kj}}\right) \right) \cdot \exp(-b_i H) \right] \right)}{\sum_{k=0}^5 \sum_{j=0}^5 \left( \frac{R_{kj}}{\cos\left(\frac{H}{L_{kj}}\right)^2} \cdot \sum_{i=1}^3 K_i \left[ \cosh\left(\frac{H}{L_{kj}}\right) + b_i \cdot L_{kj} \cdot \sinh\left(\frac{H}{L_{kj}}\right) \right] \exp(-b_i H) - 1 \right)} \quad \text{IV.2}$$

Dans le paragraphe qui suit, nous allons faire une étude de  $S_{f0}$  en fonction du taux de dopage de la base et de l'épaisseur de la base.

#### IV.1.1 : Influence du taux de dopage de la base sur la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction.

La courbe de la figure IV.1 montre l'évolution de  $S_{f0}$  en fonction du taux de dopage de la base. Nous notons sur la figure IV.1 que la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction diminue lorsque le taux de dopage de la base augmente.



**Figure IV.1:** Profil de la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction en fonction du taux de dopage de la base :  $S_g = 10^3 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $g_x = g_y = g = 64 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $H = 120 \text{ }\mu\text{m}$ .

Cette diminution est plus visible pour des taux de dopage compris entre  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$  et  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . En dessous et au-delà de cet intervalle, la vitesse de recombinaison intrinsèque est presque indépendante du taux de dopage de la base.

Sur la figure IV.1, nous remarquons aussi qu'un taux de dopage de la base faible s'avère bénéfique lorsque la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction est élevée. Cependant, pour réaliser les gains de performances cellulaires potentiellement disponibles en réduisant la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction, il est nécessaire de modérer la concentration du taux de dopage de la base ( $10^{15} \text{ cm}^{-3} \leq N_b \leq 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ).

Nous pouvons donc conclure que pour obtenir une efficacité supérieure, il faudra éliminer presque les effets de dopage importants en réduisant la concentration en impuretés dans la base. Pour ce qui suit, nous allons étudier la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction en fonction de l'épaisseur de la base.

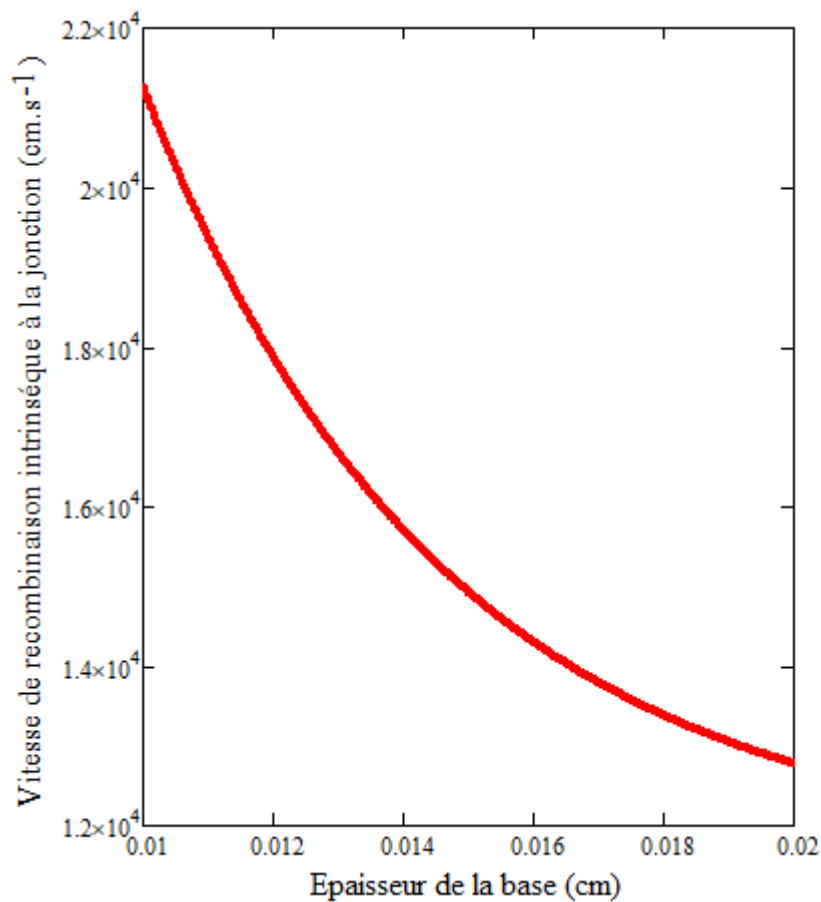


#### IV.1.2 : Influence de l'épaisseur de la base sur la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction.

La figure IV.2 illustre la vitesse de recombinaison  $Sf_0$  en fonction de l'épaisseur de la base pour un éclairage par la face avant de la photopile.

Dans cette étude, nous avons fixé la taille de grain, la vitesse de recombinaison aux joints de grain et le taux de dopage de la base.

Cette courbe décrit l'évolution de la vitesse de recombinaison  $Sf_0$  en fonction de l'épaisseur de la base.



**Figure IV.2:** Profil de la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction en fonction du taux de dopage de la base :  $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $g_x = g_y = g = 64 \text{ } \mu\text{m}$ ,  $1.10^{17} \text{ cm}^{-3}$ .

Nous observons sur la figure IV.2, une diminution de la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction avec l'augmentation de l'épaisseur de la base de la photopile. En effet, l'augmentation de l'épaisseur de la base entraîne une plus grande réduction des défauts aux niveaux des interfaces.

Dans le paragraphe qui suit, nous allons étudier la vitesse de recombinaison à la face arrière en fonction du taux de dopage et de l'épaisseur de la base.

## IV.2 : Etude de la vitesse de recombinaison à la face arrière

Sur la figure III.1, pour des grandes valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction, la densité de photocourant présente un gradient nul. Cela nous a permis d'écrire l'équation ci-dessous [21, 22, 40, 79, 80] :

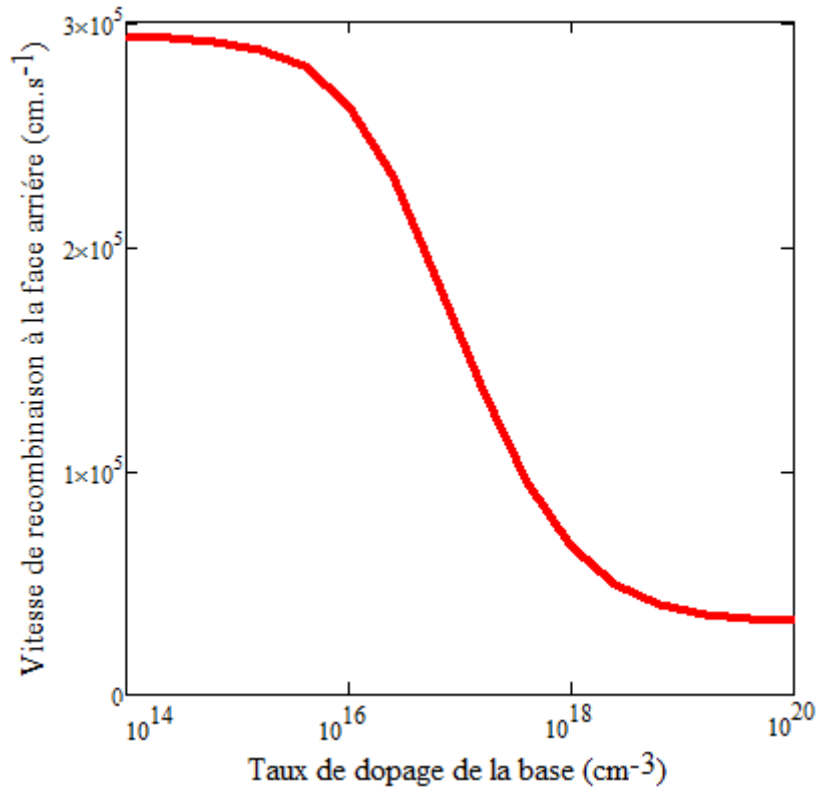
$$\left[ \frac{\partial J_{ph}}{\partial S_f} \right]_{S_{fgrand}} = 0 \quad \text{VI.3}$$

La résolution de cette équation nous permet d'obtenir l'expression de la vitesse de recombinaison à la face arrière en fonction du taux de dopage de la base.

$$S_b(S_g, H, g, Nb) = D(Nb) \cdot \frac{\sum_{k=0}^5 \sum_{j=0}^5 \left( R_{kj} \left( \frac{D(Nb)}{L_{kj}} \right)^2 \sum_{i=1}^3 K_i \left[ b_i \exp(-b_i H) - b_i \cosh\left(\frac{H}{L_{kj}}\right) + \frac{1}{L_{kj}} \sinh\left(\frac{H}{L_{kj}}\right) \right] \right)}{\sum_{k=0}^5 \sum_{j=0}^5 \left( R_{kj} \left( \frac{D(Nb)}{L_{kj}} \right)^2 \sum_{i=1}^3 K_i \left[ \exp(-b_i H) - \cosh\left(\frac{H}{L_{kj}}\right) + b_i \cdot L_{kj} \cdot \sinh\left(\frac{H}{L_{kj}}\right) \right] \right)} \quad \text{IV.4}$$

### IV.2.1 : Influence du taux de dopage sur la vitesse de recombinaison à la face arrière.

La courbe de la figure IV.3 montre l'évolution de la vitesse de recombinaison à la face arrière en fonction du taux de dopage de la base.



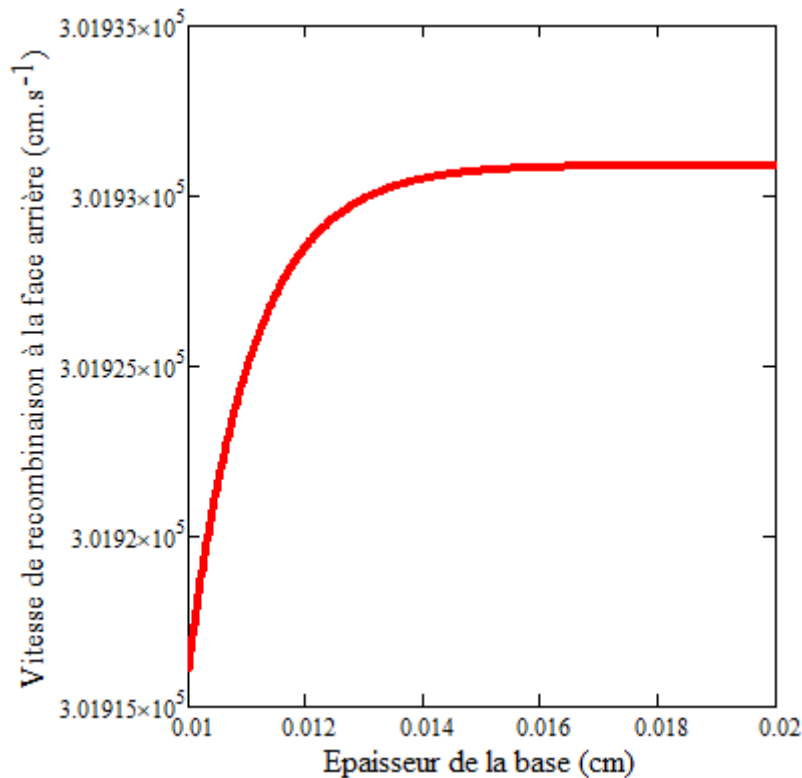
**Figure IV.3 :** Profil de la vitesse de recombinaison à la face arrière en fonction du taux de dopage de la base :  $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $g_x = g_y = g = 64 \text{ } \mu\text{m}$ ,  $H = 120 \text{ } \mu\text{m}$ .

Sur la figure IV.3, nous remarquons aussi qu'un taux de dopage de la base faible s'avère bénéfique lorsque la vitesse de recombinaison à la face arrière est élevée. Ainsi, pour réaliser

les photopiles de bonnes performances en réduisant la vitesse de recombinaison à la face arrière, il est nécessaire de modérer la concentration du taux de dopant de la base ( $10^{15} \text{ cm}^{-3} \leq N_b \leq 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ). Comme la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction, la vitesse de recombinaison à la face arrière diminue considérablement lorsque le taux de dopage de la base est compris entre  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$  et  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ .

#### IV.2.2 : Influence de l'épaisseur de la base sur la vitesse de recombinaison à la face arrière

Nous présentons sur la figure IV.4 l'évolution de la vitesse de recombinaison  $S_b$  à la face arrière en fonction de l'épaisseur de la base lorsque la photopile bifaciale est éclairée par sa face avant. Cette évolution de la vitesse de recombinaison  $S_b$  à la face arrière est obtenue pour une taille de grain, une vitesse de recombinaison aux joints de grain et un taux de dopage de la base donnés.



**Figure IV.4 :** Profil de la vitesse de recombinaison à la face arrière en fonction de l'épaisseur de la base :  $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $g = 64 \text{ } \mu\text{m}$ ,  $N_b = 1.10^{16} \text{ cm}^{-3}$ .

Nous notons sur la figure IV.4 que la vitesse de recombinaison à la face arrière augmente avec l'augmentation de l'épaisseur de la base. Donc, l'augmentation de l'épaisseur de la base ne favorise pas la réduction des recombinaisons à la surface arrière. L'épaisseur intrinsèque de la base de la photopile éclairée par la face avant ne doit pas être trop épaisse.

### IV.3 : Etude de la résistance série

La résistance série est un paramètre électrique qui joue un rôle déterminant sur la qualité d'une photopile. En effet, elle représente l'ensemble de la résistivité des matériaux et des contacts métal-grille. Elle dépend de la nature du substrat, de la température et de la technologie utilisée. Nous notons qu'au voisinage du circuit-ouvert la tension aux bornes de la photopile est pratiquement indépendante du courant débité. La photopile se comporte alors comme un générateur de tension réel puisque sa caractéristique courant - tension n'est pas identique à une droite verticale. Ce qui explique la présence d'une résistance interne due à la résistivité du matériau polycristallin qui n'est rien d'autre que la résistance série de la photopile. Nous proposons alors à la figure IV.6 un circuit électrique équivalent de la photopile lorsque celle-ci fonctionne pratiquement en circuit-ouvert, correspondant à la caractéristique courant-tension représentée sur la figure IV.5.

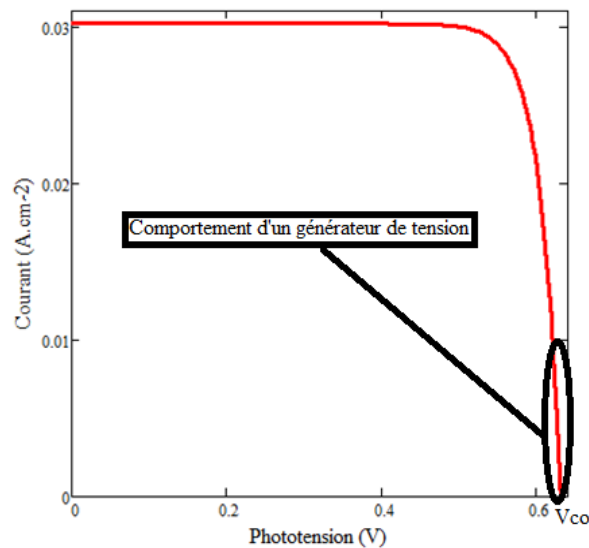


Figure IV.5 : Profil de la densité de photocourant en fonction de la phototension.

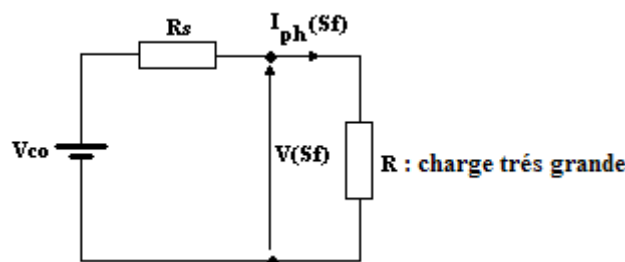


Figure IV.6: Circuit électrique équivalent de la photopile lorsqu'elle fonctionne pratiquement en circuit ouvert.

En utilisant la loi des mailles nous obtenons l'équation suivante :

$$V_{ph}(Nb) = V_{co}(Nb) - R_s(Nb) \cdot J_{ph}(Nb) \quad \text{IV.5}$$

Ce qui conduit à l'expression de la résistance série [63, 79, 81] :

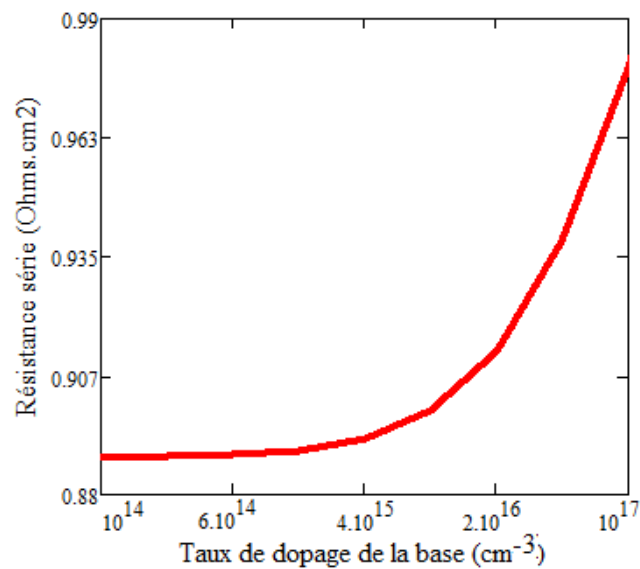
$$R_s(Nb) = \frac{V_{co}(Nb) - V_{ph}(Nb)}{J_{ph}(Nb)}$$

IV.6

Ici nous avons une résistance de charge très grande qui impose alors une vitesse de recombinaison à la jonction très petite. Nous prendrons  $S_f = 100 \text{ cm/s}$  valeur pour laquelle la photopile fonctionne pratiquement en circuit-ouvert.

### IV.3.1 : Influence du taux de dopage de la base sur la résistance série

Nous étudions ici l'effet du taux de dopage de la base sur la résistance série. Ainsi, nous présentons sur la figure IV.7 la variation de la résistance série en fonction du taux de dopage de la base.



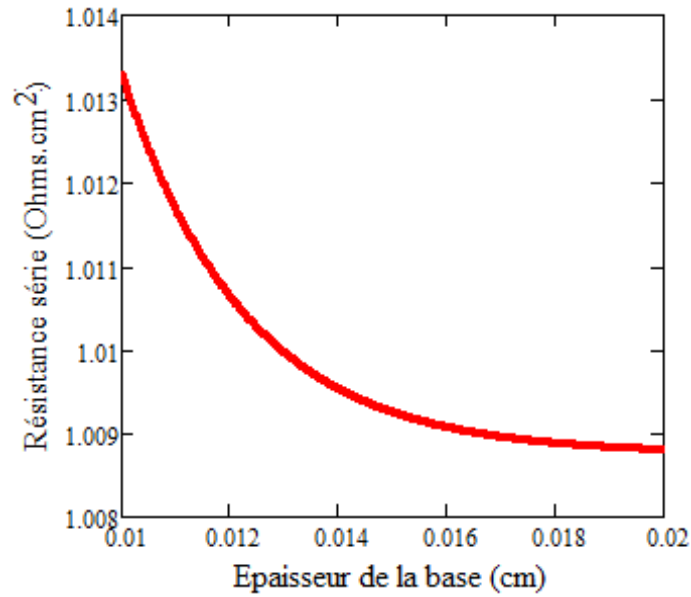
**Figure IV.7 :** Profil de la résistance série en fonction du taux de dopage de la base :  $S_f = 2.10^2 \text{ cm. s}^{-1}$ ,  $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $S_b(Nb) \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $g_x = g_y = g = 64 \text{ } \mu\text{m}$ ,  $H = 120 \text{ } \mu\text{m}$ .

Nous observons sur la figure IV.7, que la résistance série augmente lorsque le taux de dopage de la base est supérieur à  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$ . En effet, la diffusion des porteurs diminue lorsque le taux de dopage augmente. Nous pouvons donc conclure que la résistivité du matériau augmente avec le dopage.

Dans le paragraphe qui suit nous allons étudier l'évolution de la résistance shunt en fonction de l'épaisseur de la base.

### IV. 3.2 : Influence de l'épaisseur de la base sur la résistance série.

Le profil de la résistance série est donné en fonction de l'épaisseur de la base. Pour se faire, nous allons fixer la taille de grain, la vitesse de recombinaison aux joints et le taux de dopage de la base.



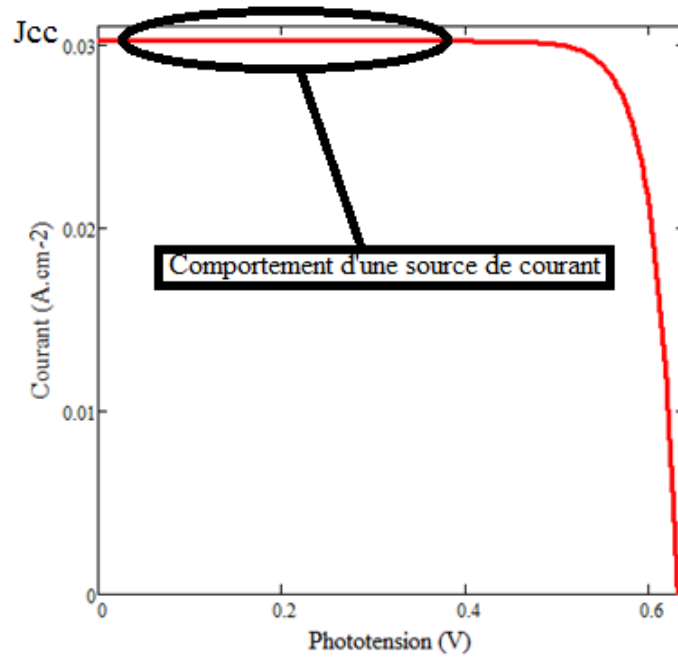
**Figure IV.8** : Profil de la résistance série en fonction de l'épaisseur de la base :  $S_f = 10^2 \text{ cm. s}^{-1}$ ,  $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $S_b = F(H) \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $g_x = g_y = g = 64 \text{ } \mu\text{m}$ ,  $1.10^{17} \text{ cm}^{-3}$ .

Nous notons sur la figure IV.8 une diminution de la résistance série lorsque l'épaisseur de la base croît. Quand l'épaisseur de la base augmente, il y'a un nombre élevé de porteurs qui arrive à la jonction dû à l'augmentation du volume de la base. Par suite, les porteurs photogénérés près de la surface arrière peuvent se mouvoir plus facilement vers l'intérieur. Par conséquent, la résistance série diminue avec l'élévation de l'épaisseur de la base.

#### IV.4 : Etude de la résistance shunt

La résistance shunt résulte des recombinaisons des porteurs de charges en volume, en surface (liaisons pendantes et technologie de fabrication) et aux interfaces (émetteur-base, contact-émetteur, contact-base) d'une photopile.

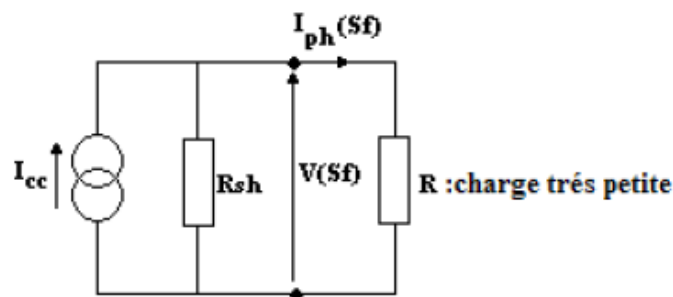
Comme pour la résistance série nous partons de la caractéristique courant - tension de la photopile (figure IV.9).



**Figure IV.9 :** Profil de la densité de photocourant en fonction de la phototension.

A partir de la caractéristique courant-tension, nous remarquons qu’au voisinage du courant de court-circuit, la photopile se comporte comme un générateur de courant. Du fait que le courant débité est indépendant de la tension aux bornes du générateur de la photopile.

Pour une photopile idéale cette branche de la caractéristique est parfaitement horizontale car le courant débité est constant quel que soit la tension aux bornes de la photopile. En réalité, pour une photopile non idéale il existe un courant de fuite généralement faible qui cause une très petite variation du courant débité par la photopile lorsque sa tension varie ; ce qui traduit la présence d’une charge interne à la photopile, qu’on appelle résistance shunt [38, 82]. Nous proposons à la figure IV.10 un circuit électrique équivalent de la photopile lorsque celle-ci fonctionne en court-circuit.



**Figure IV.10 :** Circuit électrique équivalent de la photopile lorsqu’elle fonctionne pratiquement en court-circuit

A partir de la loi des mailles, nous obtenons l’équation suivante :

$$V_{ph}(Nb) = R_{sh}(Nb) \cdot (J_{cc}(Nb) - J_{ph}(Nb)) \quad \text{IV.7}$$

Ce qui conduit à l'expression de la résistance shunt [63] :

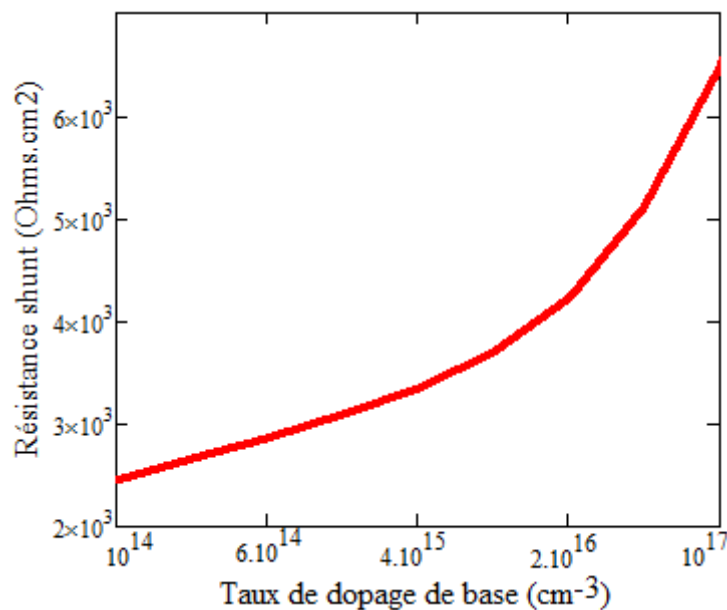
$$R_{sh}(Nb) = \frac{V_{ph}(Nb)}{J_{cc}(Nb) - J_{ph}(Nb)} \quad \text{IV.8}$$

Avec  $S_f$  la vitesse de recombinaison à la jonction qui est rattachée à la résistance de charge extérieure [83]. La faible résistance de charge correspond à une grande valeur de  $S_f$ . Nous prendrons alors  $S_f = 10^6 \text{ cm.s}^{-1}$  valeur qui est inférieure à la vitesse de l'électron dans le cristal et pour laquelle la densité de photocourant est maximale.

Dans le paragraphe qui suit nous allons étudier l'évolution de la résistance shunt en fonction du taux de dopage de la base.

#### IV.4.1 : Influence du taux de dopage de la base sur la résistance shunt.

L'évolution de la résistance shunt en fonction du taux de dopage de la base est montrée à la figure IV.11.



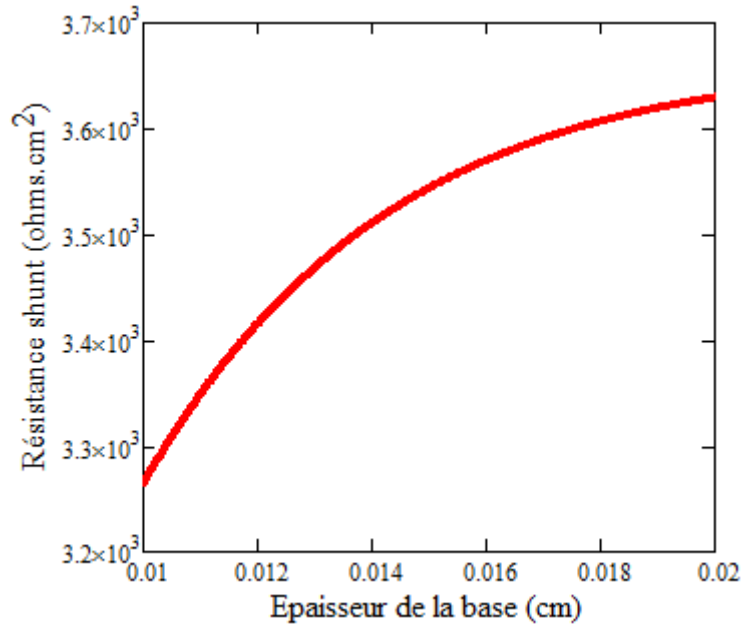
**Figure IV.11** : Profil de la résistance shunt en fonction du taux de dopage de la base :  $S_f = 6.10^6 \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $S_b = F(Nb) \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $g_x = g_y = g = 64 \text{ } \mu\text{m}$ ,  $H = 120 \text{ } \mu\text{m}$ .

Nous notons sur la figure IV.11 que la résistance shunt croît aussi avec le taux de dopage de la base. Cela s'explique par une diminution des recombinaisons sur les surfaces qui limitent la base de la photopile lorsque le taux de dopage de la base croît.



#### IV.4.2 : Influence de l'épaisseur de la base sur la résistance shunt.

Sur la figure IV.12 nous avons tracé la résistance shunt en fonction de l'épaisseur de la base de la photopile.



**Figure IV.12** : Profil de la résistance shunt en fonction de l'épaisseur de la base :  $S_f = 6.10^6 \text{ cm. s}^{-1}$ ,  $S_b (H) \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $g_x = g_y = g = 64 \text{ } \mu\text{m}$ ,  $1.10^{17} \text{ cm}^{-3}$ .

Sur la figure IV.12, nous notons une augmentation de la résistance shunt avec l'épaisseur de la base. Cela s'explique par l'action de l'épaisseur de la base qui conduit à une diminution des vitesses de recombinaison intrinsèque à la jonction et des défauts aux interfaces de la photopile. Ainsi nous pouvons dire qu'une augmentation de l'épaisseur de la base entraîne une amélioration de la qualité de la photopile en diminuant les recombinaisons intrinsèques au niveau de la jonction.

#### IV.5: Etude de la capacité

Lorsque la photopile est éclairée, nous assistons à un stockage de charges opposées de part et d'autre de la jonction émetteur-base. Ce qui entraîne l'établissement d'un condensateur dont la capacité varie en fonction des effets de l'éclairement sur la photopile.

En considérant l'expression de la phototension donnée au chapitre III, nous obtenons l'expression de la capacité à partir de la relation suivante :

$$C(H, g, Nb, Sf) = \frac{\partial Q(H, g, Nb, Sf)}{\partial V_{ph}(H, g, Nb, Sf)} \quad \text{IV.9}$$

$$\text{Avec } \partial Q(H, g, Nb, Sf) = q \cdot \partial \delta n(z = 0, H, g, Nb, Sf) \quad \text{IV.10}$$

La charge stockée à la jonction.

$$C(H, g, Nb, Sf) = q \cdot \frac{\partial \delta n(z=0, H, g, Nb, Sf)}{\partial V_{ph}(H, g, Nb, Sf)} \quad \text{IV.11}$$

L'équation peut-être écrite de la façon suivante :

$$C(H, g, Nb, Sf) = q \cdot \frac{\partial \delta n(z=0, H, g, Nb, Sf)}{\partial Sf} \cdot \frac{1}{\frac{\partial V_{ph}(H, g, Nb, Sf)}{\partial Sf}} \quad \text{IV.12}$$

En tenant compte de l'expression de la phototension et de la densité des porteurs de charge minoritaires en excès, nous obtenons l'expression suivante :

$$C(H, g, Nb, Sf) = \frac{q \cdot n_i^2}{N_B \cdot V_T} + q \cdot \frac{\delta n(z=0, H, g, Nb, Sf)}{V_T} \quad \text{IV.13}$$

$$C(H, g, Nb, Sf) = C_0 + C_d(H, g, Nb, Sf) \quad \text{IV.14}$$

$C_0$  la capacité intrinsèque ou transitionnelle.

$C_d$  la capacité de diffusion de la photopile à la température  $T$  et d'un angle d'incidence de l'éclairement.

#### IV.5.1: Influence de la vitesse de recombinaison à la jonction et de la taille des grains sur la capacité

La figure IV.13 nous donne l'allure de la capacité en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la taille de grain  $g$ .

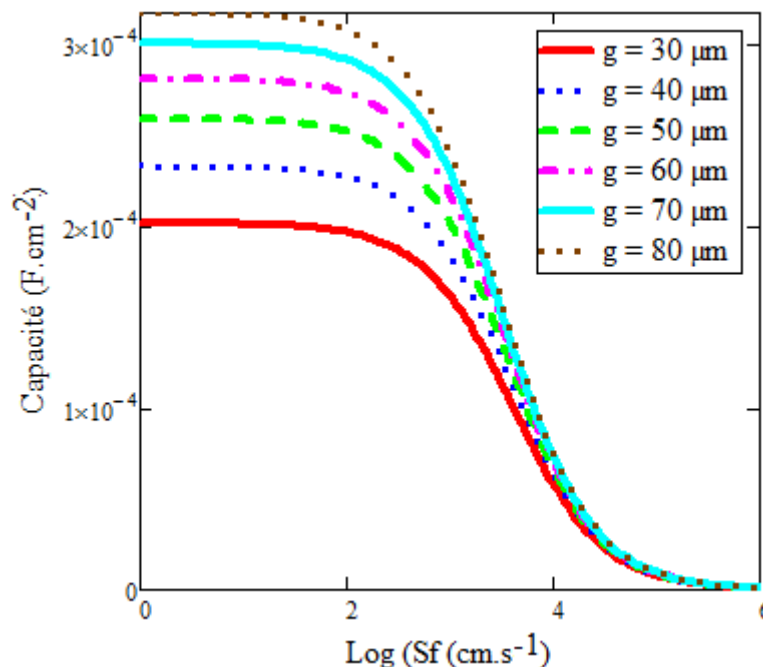


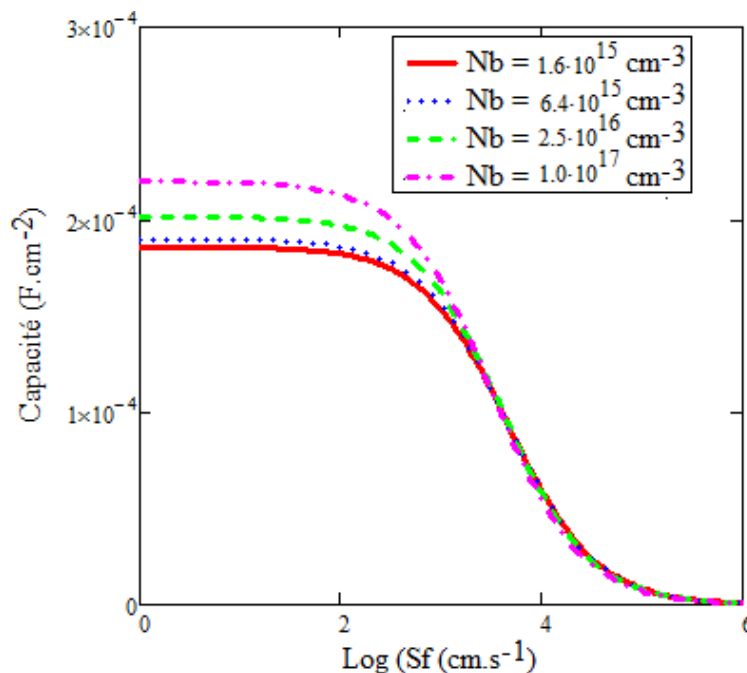
Figure IV.13 : Profil de la capacité en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes tailles de grain :  $H = 120 \mu\text{m}$ ,  $N_b = 10^{17} \text{cm}^{-3}$ ,  $S_b = F(g)$

Nous constatons sur la figure IV.13 que pour les faibles valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction (la photopile en circuit-ouvert), la capacité augmente avec la taille de grain comme l'ont montré **S. Mbodji et al en 2010**. En effet, nous avons montré au chapitre II que plus la taille de grain augmente, plus la densité des porteurs en excès dans la base croît. Le stockage des porteurs minoritaires de charge au voisinage de la jonction croît également, ce qui explique cette valeur maximale de la capacité.

La capacité de la photopile diminue lorsque la vitesse de recombinaison à la jonction augmente. Lorsque la photopile tend vers le régime de fonctionnement de court-circuit, la capacité de la photopile ne varie presque pas avec la taille de grain car pour ce régime de fonctionnement, il n'y a pas de stockage de charge à la jonction.

#### IV.5.2: Influence de la vitesse de recombinaison à la jonction et du taux de dopage sur la capacité

Sur les figures IV.14 et IV.15 nous avons tracé la capacité de la photopile en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction respectivement pour de faibles taux de dopage et des forts taux de dopage de la base.

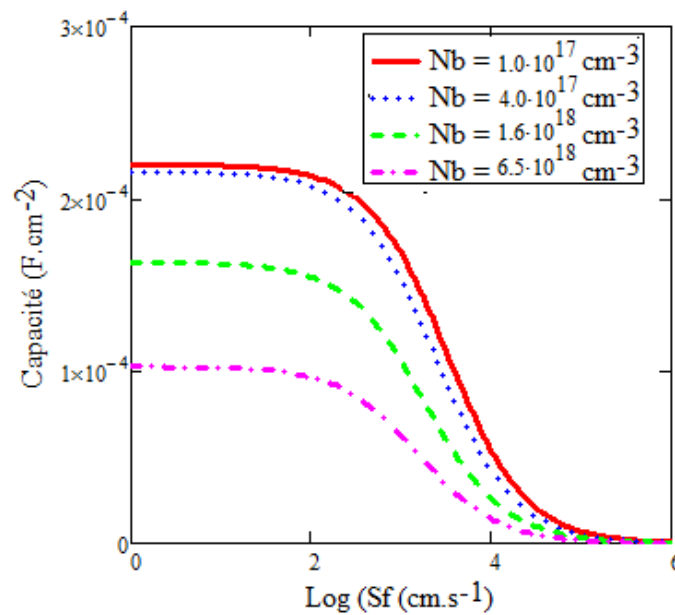


**Figure IV.14:** Profil de la capacité en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour de faibles taux de dopage de la base :  $H = 120 \mu\text{m}$ ,  $g = 64 \mu\text{m}$ ,  $S_b = F$  ( $N_b$ )

Nous constatons sur les figures IV.14 et IV.15 que pour un taux de dopage donné, aux faibles valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction, la capacité de la photopile est constante et correspond à la capacité en circuit-ouvert. En situation de circuit-ouvert, on assiste à un stockage de charge de part et d'autre de la jonction.

Pour les grandes valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction, la capacité est quasi nulle et correspond à la capacité en court-circuit.

La figure IV.14 montre également que l'amplitude de la capacité augmente avec les faibles taux de dopage de la base. Nous avons montré au chapitre II que la densité de porteurs minoritaires augmente légèrement avec les faibles taux de dopage de la base ( $N_b \leq 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ). En effet lorsqu'on introduit des impuretés dans le semi-conducteur, la conductivité du semi-conducteur augmente. Le stockage des porteurs minoritaires de charge au voisinage de la jonction croit également. C'est ce qui explique l'augmentation de la capacité dans cette zone.



**Figure IV.15:** Profil de la capacité en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différent taux de dopage de la base :  $H = 120 \mu\text{m}$ ,  $g = 64 \mu\text{m}$ ,  $S_b = F$  ( $N_b$ )

Sur la figure IV.15 nous notons une diminution de la capacité de la photopile en fonction du taux de dopage de la base. Le mécanisme physique associé à la distorsion des limites des bandes d'énergies résulte principalement des interactions atomes donneurs-porteurs libres. Ces interactions provoquent ainsi un élargissement du niveau initialement discret des impuretés. Ce qui conduit à la réunion de cette bande d'énergie des impuretés ionisées en excès avec la bande de valence.

Dans les semi-conducteurs fortement dopés (supérieur à  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ), le mécanisme associé à la distorsion des limites des bandes d'énergies se présente selon trois cas différents :

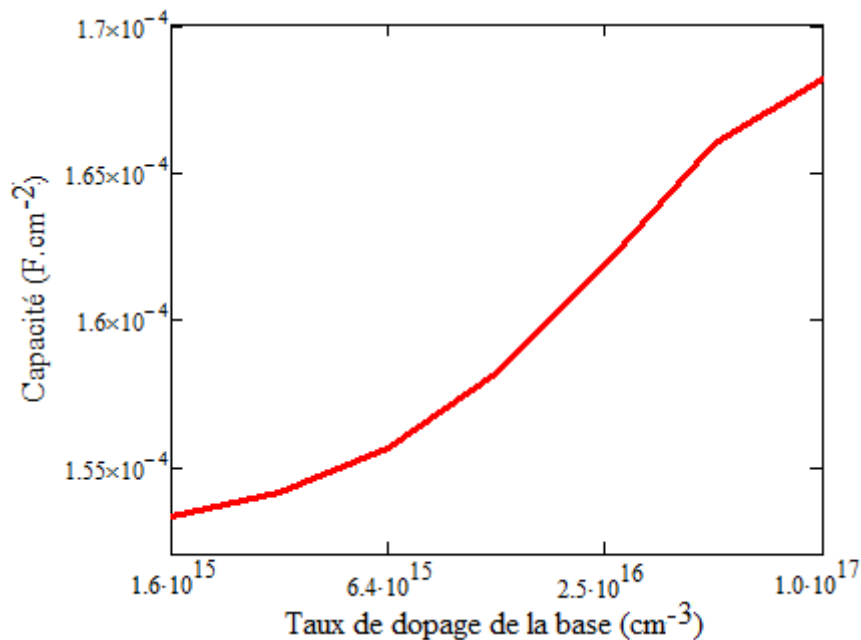
1. les limites des bandes de valence et de conduction développent des queues et pénètrent dans la bande interdite ;
2. Si la concentration des impuretés accepteuses est élevée, les niveaux énergétiques de ces impuretés s'élargissent en une bande d'impuretés qui chevauche avec la bande de valence ;

3. Une concentration d'atomes d'accepteurs très élevée provoque une variation spatiale de la largeur de la bande interdite, résultat d'une déformation du réseau cristallin.

En conséquence, toutes ces modifications entraînent une réduction apparente de la largeur de la bande interdite. Ce qui provoque la diminution de la capacité de stockage avec les forts taux de dopage.

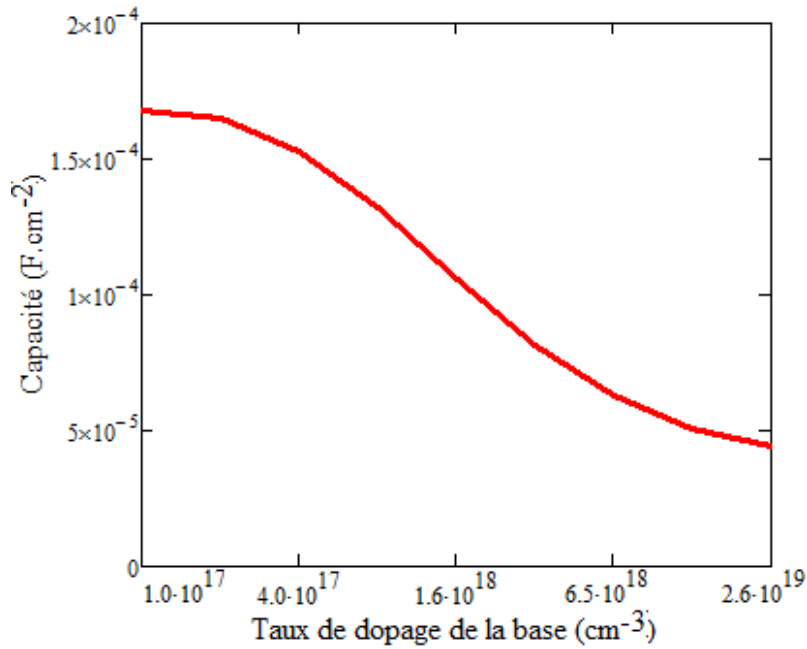
#### IV.5.3: Influence du taux de dopage sur la capacité

Sur les figures suivantes nous avons donné le profil de la capacité de la photopile en fonction du taux de dopage de la base.

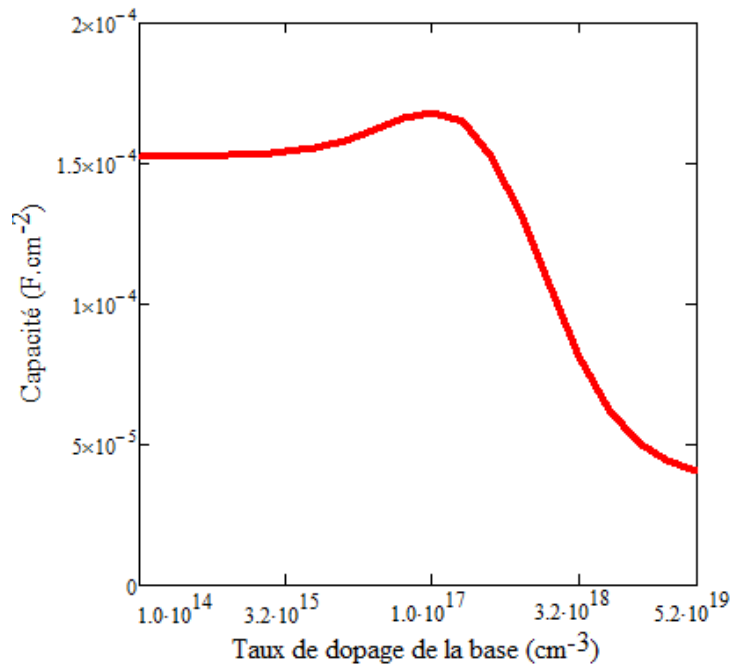


**Figure IV.16:** Profil de la capacité en fonction des faibles taux de dopage de la base :  $H = 120 \mu\text{m}$ ,  $g = 64 \mu\text{m}$ ,  $S_f = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $S_b = F \text{ (Nb)}$

Nous notons sur la figure IV.16 une augmentation de la capacité en fonction du taux de dopage de la base. Le silicium pur est presque un isolant qui ne peut laisser passer aucun courant électrique étant donné l'absence d'électrons libres. On peut améliorer fortement sa conduction grâce à l'addition en infimes quantités d'impuretés au silicium pur. Ce procédé appelé dopage crée un grand nombre de porteurs libres. Cela conduit à l'augmentation de la densité des porteurs minoritaires avec l'accroissement du taux de dopage de la base (de  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$  à  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ) d'où l'augmentation de la capacité de la photopile.



**Figure IV.17 :** Profil de la capacité en fonction des grands taux de dopage de la base :  $H = 120 \mu\text{m}$ ,  $g = 64 \mu\text{m}$ ,  $S_f = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $S_b = F$  (Nb)



**Figure IV.18:** Profil de la capacité en fonction du taux de dopage de la base :  $H = 120 \mu\text{m}$ ,  $g = 64 \mu\text{m}$ ,  $S_f = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $S_b = F$  (Nb)

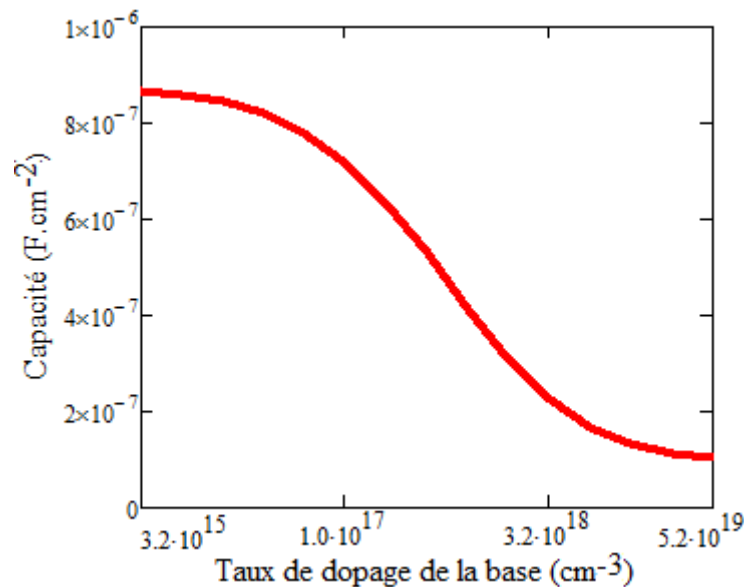
Sur la figure IV.17, nous observons une diminution de la capacité de la photopile en fonction du taux de dopage de la base pour des valeurs de Nb supérieures à  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ .

En effet, le dopage des substrats semi-conducteurs permet de moduler leur conductivité électrique sur une large gamme. Ainsi, des semi-conducteurs fortement dopés (appelés  $N+$  et  $P+$ ) ont une conductivité proche de celle des métaux. Ce qui conduit à une diminution de la capacité de la photopile.

Ces zones fortement dopées sont notamment rencontrées lorsque l'on souhaite réaliser des contacts ohmiques.

#### IV.5.4: Influence du taux de dopage sur la capacité d'une photopile en court-circuit

A la figure IV.19, nous avons présenté l'effet du taux de dopage sur la capacité de la photopile en situation de court-circuit.



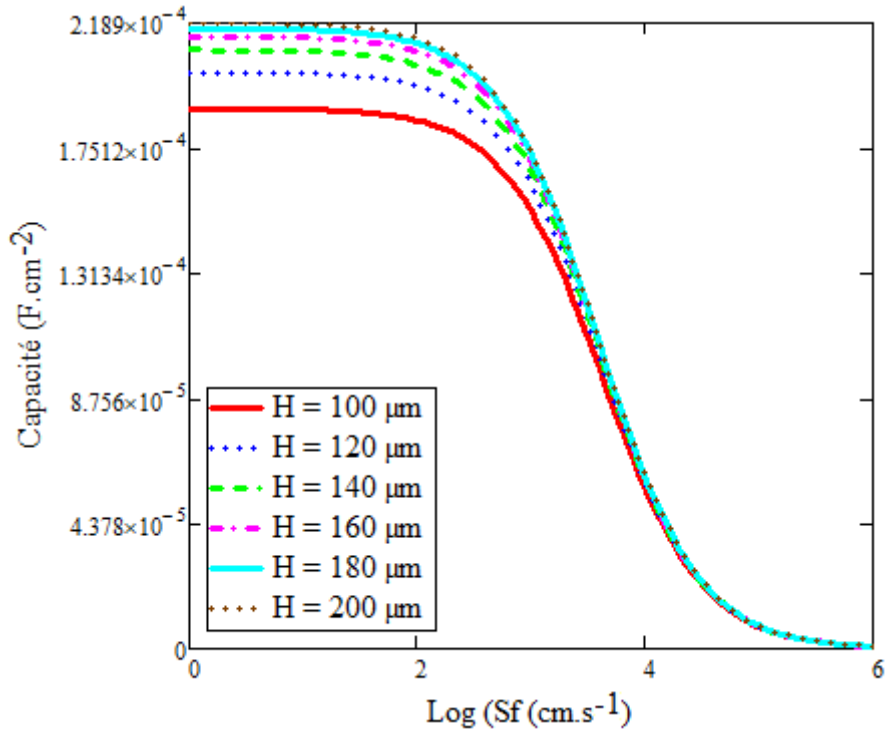
**Figure IV.19 :** Profil de la capacité en fonction du taux de dopage de la base :  $H = 120 \mu\text{m}$ ,  $g = 64 \mu\text{m}$ ,  $S_f = 10^6 \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $S_b = F(\text{Nb})$

Nous observons sur figure IV.19 une diminution de la capacité de la photopile en situa court-circuit avec le taux de dopage de la base. L'état de court-circuit est une situation de transfert quasi-total vers l'émetteur de tous les électrons photogénérés dans la base et parvenant à la jonction. Cette diminution s'explique par le modèle de recombinaison Schockley Read Hall (SRH) (qui est prédominant pour un faible taux de dopage de la base) [84,85]. Des niveaux profonds d'énergie dans la bande interdite sont responsables de la chute de la durée de vie des porteurs, en créant des centres de recombinaison.

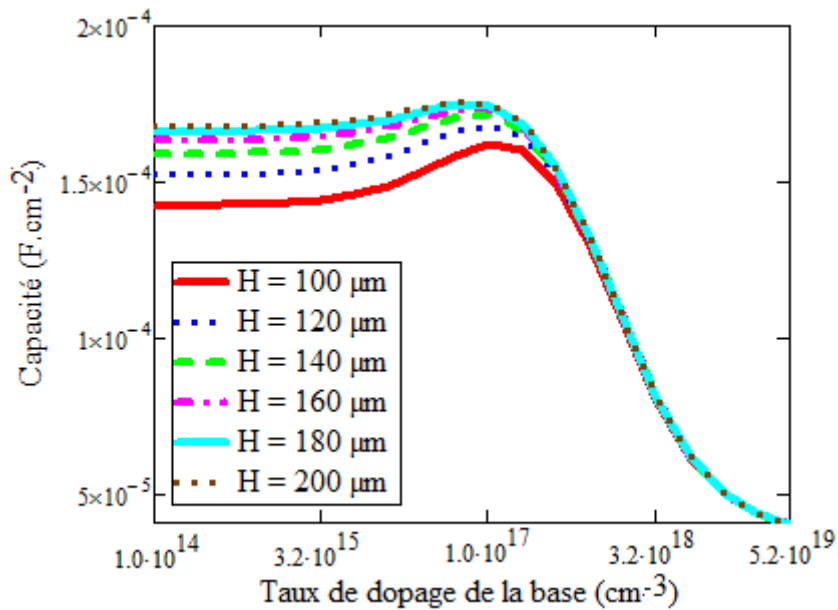
#### IV.5.5: Influence de l'épaisseur de la base sur la capacité

Les figures IV.20 et IV.21 montrent les profils de la capacité de la photopile respectivement en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction et du taux de dopage pour différentes épaisseurs de la base.

Nous remarquons sur les figures IV.20 et IV.21 que la capacité de la photopile augmente avec l'épaisseur de la base.



**Figure IV.20:** Profil de la capacité en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes épaisseurs de la base :  $g = 64 \mu\text{m}$ ,  $S_b = F(H)$ ,  $N_b = 10^{17} \text{cm}^{-3}$



**Figure IV.21:** Profil de la capacité en fonction du taux de dopage de la base pour quelques épaisseurs de la base :  $g = 64 \mu\text{m}$ ,  $S_f = 10^3 \text{cm.s}^{-1}$ ,  $S_b = F(H)$

Cette augmentation s'explique par une croissance de porteurs minoritaires lorsque l'épaisseur de la base s'élève. Le silicium cristallin se singularise par une absorption étendue sur l'ensemble du spectre solaire. Toutefois, les coefficients d'absorption correspondant à ces longueurs d'ondes sont relativement peu élevés. Il en résulte que les photopiles à base de silicium doivent avoir une épaisseur de plusieurs dizaines de microns pour absorber la lumière.



Pour des raisons technologiques, les photopiles à base de silicium disponibles sur le marché ont une épaisseur comprise en générale 200  $\mu\text{m}$  à 300  $\mu\text{m}$ .

Par conséquent, l'influence des porteurs minoritaires semble être accentuée dans des cellules 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.

Nous notons sur la figure IV.21 que l'augmentation de l'épaisseur de la base, diminue le taux de dopage optimal de la base. Autrement dit, plus l'épaisseur de la base est petite plus le taux de dopage optimal de la base est élevé.

Dans les tableaux ci-dessous, nous avons répertoriés les valeurs des vitesses de recombinaisons surfaciques des résistances série et shunt et de la capacité de la photopile respectivement pour différentes valeurs du taux de dopage, de la taille de grain et de l'épaisseur de la base. Ces résultats sont en accord avec les résultats de [57, 63].

**Tableau IV.1 :** Valeurs des résistances (série et shunt), des vitesses de recombinaisons surfaciques et de la capacité de la photopile pour différents taux de dopage de la base, pour une taille de  $g = 64 \mu\text{m}$ ,  $H = 120 \mu\text{m}$ ,  $Sg = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $Sb = F(\text{Nb}) \text{ cm.s}^{-1}$

Nb ( $\text{cm}^{-3}$ )	Sf0 ( $\text{cm.s}^{-1}$ )	Sb ( $\text{cm.s}^{-1}$ )	Rs ( $\Omega\text{cm}^2$ )	Rsh ( $\Omega\text{cm}^2$ )	C ( $\text{F.cm}^{-2}$ )
$10^{14}$	$2,679.10^5$	$2,8780.10^5$	0,883	2438	$1,8.10^{-4}$
$10^{15}$	$2,679.10^5$	$2,8780.10^5$	0,883	3807	$1,8.10^{-4}$
$10^{16}$	$2,376.10^5$	$2,5530.10^5$	0,910	4184	$2,0.10^{-4}$
$10^{17}$	$1,158.10^5$	$1,2670.10^5$	0,985	6807	$2,2.10^{-4}$
$10^{18}$	$5,1289.10^4$	$5,5137.10^4$	1,122	13980	$1,6.10^{-4}$

**Tableau IV.2 :** Valeurs des résistances (série et shunt), des vitesses de recombinaisons surfaciques et de la capacité de la photopile pour différentes tailles de grain, pour  $\text{Nb} = 1.10^{16}\text{cm}^{-3}$ ,  $H = 120 \mu\text{m}$ ,  $Sg = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $Sb = F(g) \text{ cm.s}^{-1}$ .

g ( $\mu\text{m}$ )	Sf0 ( $\text{cm.s}^{-1}$ )	Sb ( $\text{cm.s}^{-1}$ )	Rs ( $\Omega\text{cm}^2$ )	Rsh ( $\Omega\text{cm}^2$ )	C ( $\text{F.cm}^{-2}$ )
28	$4,741.10^5$	$8,128.10^5$	1,036	3237	$2,0.10^{-4}$
46	$2,856.10^5$	$3,574.10^5$	1,019	3913	$2,3.10^{-4}$
55	$2,376.10^5$	$2,553.10^5$	0,998	4166	$2,6.10^{-4}$
82	$1,568.10^5$	$1,060.10^5$	0,993	4726	$2,8.10^{-4}$
100	$1,271.10^5$	$1,140.10^4$	0,990	4992	$3,6.10^{-4}$

**Tableau IV.3 :** Valeurs des résistances (série et shunt), Valeurs des résistances (série et shunt), des vitesses de recombinaisons surfaciques et de la capacité de la photopile pour différentes épaisseurs de la base, pour  $g = 64 \mu\text{m}$ ,  $N_b = 1.10^{16}\text{cm}^{-3}$ ,  $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $S_b = F(H) \text{ cm.s}^{-1}$ .

H ( $\mu\text{m}$ )	Sf0 ( $\text{cm.s}^{-1}$ )	Sb ( $\text{cm.s}^{-1}$ )	Rs ( $\Omega\text{cm}^2$ )	Rsh ( $\Omega\text{cm}^2$ )	C ( $\text{F.cm}^{-2}$ )
100	$2,1220.10^4$	$3,0192.10^5$	1,438	3056.2	$1,90.10^{-4}$
120	$1,7918.10^4$	$3,0193.10^5$	1,379	3277.4	$2,01.10^{-4}$
140	$1,5702.10^4$	$3,0194.10^5$	1,341	3433.3	$2,09.10^{-4}$
160	$1,4286.10^4$	$3,0194.10^5$	1,315	3541.3	$2,14.10^{-4}$
180	$1,3386.10^4$	$3,0194.10^5$	1,298	3615.1	$2,17.10^{-4}$
200	$1,2780.10^4$	$3,0194.10^5$	1,286	3665.2	$2,18.10^{-4}$

### Conclusion

Nous pouvons conclure qu'un taux de dopage de la base faible s'avère bénéfique lorsque la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction et à la face arrière est élevée.

La résistance série reste presque constante pour les faibles valeurs du taux de dopage alors que la résistance shunt augmente avec les faibles taux de dopage de la base. Quant à la capacité de la photopile, elle augmente avec l'épaisseur de la base et le taux de dopage lorsque celui-ci est compris entre  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$  et  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . Aussi, le taux de dopage optimal diminue avec l'augmentation de l'épaisseur de la base.

## CONCLUSION GENERALE

Dans ce travail, une étude bibliographique est présentée. Des notions fondamentales sur les semi-conducteurs, leurs principes de préparation, le dopage des semi-conducteurs, les types de photopiles, les techniques de caractérisation selon les différents régimes et les effets respectivement de la taille des grains et de la vitesse de recombinaison aux joints de grain, sont rappelés pour la compréhension des résultats présentés dans ce travail.

La résolution de l'équation de continuité à trois dimensions d'une photopile monofaciale de type n-p-p+, sous éclairage polychromatique par la face avant a été effectuée. Pour ce faire, le model de Fossum du coefficient de diffusion dépendant du taux de dopage  $D_n(Nb)$  a été utilisé et les conditions aux limites à la jonction, à la face arrière et aux interfaces ont été appliquées.

L'expression de la densité de porteurs minoritaires en fonction du taux de dopage, de la taille de grain et de l'épaisseur de la base est établie. A partir de ses profils en fonction du taux de dopage respectivement pour différentes valeurs de la taille de grain et de l'épaisseur de la base, nous avons montré que la densité des porteurs minoritaires améliorée lors du dopage atteint un maximum qui correspond à un taux de dopage optimal de la base. Les valeurs de ce dernier sont déduites pour différentes valeurs de la taille de grain et de l'épaisseur de la base.

Nous avons pu établir une corrélation entre le taux de dopage optimal et la taille de grain d'une part et d'autre part, entre le taux de dopage optimal et l'épaisseur de la base.

L'expression de la densité des porteurs minoritaires obtenue a permis de calculer la densité de photocourant, le courant de court-circuit, la phototension, la tension en circuit ouvert, le courant de diode, la puissance, le facteur de forme et le rendement de conversion de la photopile. Ces différentes grandeurs sont fonction de la taille de grain, du taux de dopage et de l'épaisseur de la base. L'influence de ces paramètres sur les grandeurs cités a montré que la conductivité du silicium est améliorée pour les taux de dopage de la base modérés entre  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$  et  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$  tandis que les recombinaisons dans le volume de la base diminuent pour les grandes tailles de grain et pour les grandes épaisseurs de la base.

Nous nous sommes intéressés à la détermination des paramètres comme la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction, la vitesse de recombinaison à la face arrière, les résistances série et shunt et la capacité de la photopile.

Pour notre étude, nous nous sommes limités à la base de la photopile, nous pouvons l'étendre en tenant compte de la contribution de l'émetteur. Nous pouvons aussi effectuer l'étude de l'optimisation de l'épaisseur de la base pour différentes tailles de grains.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]. H. Reeves, (2003). «Mal de Terre », Science Ouverte, Editions du Seuil, ISBN : 9782020536394 ; 03-22; Broché ; pp. 260.
- [2] GIEC (Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat), 2001.
- [3] OBSERV'ER, (Avril 2004). « Baromètre du Solaire Photovoltaïque », Système Solaires, N° 160; pp.68-83.
- [4] M. A. Green, K. Emery, D. L. King, Y. Hishikawa, and W. Warta, (2006). «Solar Cell Efficiency Tables (version 28) ». Progress in Photovoltaics: Research and Applications, vol. 14; pp. 455–461.
- [5] S.R Dhariwal and D.R.Mehrotra, (1988). «Photocurrent and photovoltage from polycrystalline p-n junction solar cells», Solar Cells, 25, pp.223-233.
- [6] J-S.Park, F.A.Lindholm and A.Neugroschel, (1987). «An analytical study of the *p/n* junction space- charge region under high forward voltage », J.Appl.Phys.62 (3),pp.948-953.
- [7] D.Caputo, G.De Cerare, F.Irrera, F.Palma and M.Tucci, (1994). «Transfer Printed Semiconductor Nanomembranes for Heterogeneously Integrated Multi-Band Imager Arrays», J.Appl.Phys.76 (6), pp.3524-3541.
- [8] J.Roos Macdonald, (1994). « Been Valley University Press, Ltd., 41-45 St Stephen's Green, Dublin 2 », J.Appl.Phys.75 (2), pp 1059-1069.
- [9] G.Jäger-Waldau and H.U.Habermeier, (1994). «Temperature dependent electron- beam-induced- current investigation of electronic damages in silicon due to reactive ion etching », G.Zwicker, E.bucher J.Appl.Phys. 75 (2), pp.804-808.
- [10] C.Donolato, M.kittler, (1988). « Depth profiling of the minority- carrier diffusion length in intrinsically gettered silicon by electron- beam- induced current», J.Appl.Phys.64 (6), pp.1330.
- [11] A. Barbot, (2014). « Dopage par co-sublimation de semi-conducteurs organiques pour la conversion en énergie: Applications aux cellules photovoltaïques ». Thèse de Doctorat, Université de LIMOGES.
- [12] T. Baghdali, A. Zerga et B. Benyoucef, (1999). «Optimisation du Rendement de Conversion Photovoltaïque des Cellules Solaires à base de GaAs et de Si». Rev. Energ. Ren. : Valorisation, pp. 27-31.
- [13] OBSERV'ER (Avril 2004). «Baromètre du Solaire Photovoltaïque». Systèmes Solaires, N° 160, pp.69-83.

- [14] N. Oleksiy (2005). « Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités ». Thèse de Doctorat, Université INSA de Lyon.
- [15] Hallou Solaire,(2017). «La fabrication des cellules photovoltaïques».  
[http://sti2d.patgue.com/SitePV/Ressource\\_PV/Cellule\\_solaire\\_module\\_solaire.pdf](http://sti2d.patgue.com/SitePV/Ressource_PV/Cellule_solaire_module_solaire.pdf)
- [16] P.P. Altermatt, J. Schmidt, G. Heiser, A. G. Aberte (1997). «Assessment and parameterization of Coulomb enhanced Auger recombinaison coefficients in lowly injected silicon». J. Appl. Phys. 82 4938-4944.
- [17] M.J. Kerr. A. Guevas (2002). «General parameterisation of Auger recombinaison in crystalline silicon». J. Appl. Phys. 91-2473-2480.
- [18] M. M. Dione, A. Diao, M. Ndiaye, H. L. Diallo, N. Thiam, F. I. Barro, M. Wade, A. S.Maiga, G. Sissoko, (2010). «3D Study Of A Monofacial Silicon Solar Cell Under Constant monochromatic Light: Influence Of Grain Size, Grain Boundary Recombination Velocity, Illumination Wavelength, Back Surface And Junction Recombination Velocities». Proceeding of 25<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 5<sup>th</sup> World Conference on Photovoltaic Energy Conversion; pp 488-491.
- [19] R. Mane, I. Ly, M. Wade, I. Datta, M. S. Douf, Y. Traore, M. Ndiaye, S. Tamba, G. Sissoko, (2017). «Minority Carrier Diffusion Coefficient  $D^*(B, T)$ : Study in Temperature on a Silicon Solar Cell under Magnetic Field Energy and Power Engineering». 9, pp.1-10.
- [20] M. S. Diop, H. Y. Ba, Nd. Thiam, I. Diatta, Y. Traoré, M. L. Ba, El. Sow, O. Mballo, 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>.
- [21]. O. Mbao, M. Thiame, I. Ly, I. Datta, M. S. Douf, Y. Traoré, M. Ndiaye and G. Sissoko, (2016). «3D, Study of a Polycrystalline Bifacial Silicon Solar Cell, Illuminated Simultaneously by Both Sides: Grain Size and Recombination Velocity Influence». IJSET-International Journal of Innovative Science, Engineering and Technology, Vol. 3 Issue 12; pp. 2348-7968.
- [22] I. Ly, O.H. Lemrabott, B. Dieng, I. Gaye, S. Gueye, M.S. Diouf and G. Sissoko, (2012). «Techniques de détermination des paramètres de recombinaison et le domaine de leur validité d'une photopile bifaciale au silicium polycristallin sous éclairnement multi spectral constant en régime statique». Revue des Energies Renouvelables Vol. 15 N°2 pp 187 – 206.
- [23] M. Thiame, H. L. Diallo, M. M. Diéme, Z. Bako, M. I. Ngom, M. Sane, A. Camara, A. Wereme, G. Sissoko, (2012). «Etude en modelisation trois dimensions de l'effet des joints de grain sur une photopile à junction vertical serie au silicium polycristallin». Journal des Sciences, Engineering and Technology 4(1); pp.1-7.

- [24] M. I. Ngom, M. S. Diouf, A. Thiam, M. A. O El Moujtaba and G. Sissoko, (2015). «Influence of Magnetic Field on the Capacitance of a Vertical Junction Parallel Solar Cell in Static Regime, Under Multispectral Illumination». *Int. J. Pure Appl. Sci. Technol.*, 31(2); pp.65-75.
- [25] Le Quang Nam, M. Rodot, J. Nijs, M. Ghannam and J. Coppye, (1992). «Réponse Spectrale de Photopiles de Haut Rendement au Silicium Multicristallin». *J. Phys. III France 2* ; pp. 1305-1316.
- [26] B. Mazhari and H. Morkoç, (1993). «Surface recombination in GaAs PN junction diode». *J. App. Phys.* 73(11); pp. 7509-7514.
- [27] H. EL. Ghitani and S. Martinuzzi, (1989). «Influence of dislocation on electrical properties of large grained polycrystalline silicon cells». *I. Model J. App. Phys.* 66(4); pp. 1717-1726.
- [28] B. Equer (1993). «Energie solaires photovoltaïque». volume 1, Collection Ellipses
- [29] N. Bordin, L. Kreinin, N. Eisenberg, (Munich, 2001). «Determination of Recombination Parameters of Bifacial Silicon Cells With a Two Tayer Step-Like Defect Distribution in the Base Region». *Proc. 17th European PVSEC*; pp. 1495-1498.
- [30] B. Ba, M. Kane, J. Sarr, (2003) «Modeling recombination current in polysilicon solar cell grain boundaries». *Solar Energy Materials & Solar Cells* 80; pp.143-154.
- [31] J. Dugas, (1994). «3-D modeling of a reverse cell made with improved multicrystalline silicon wafer». *Solar Energy Materials & Solar Cells* 32; pp. 71-88.
- [32] J. Farah, B. Azar, A. Khoury, P. Mialhe, P. Blaise, (1996). «Dynamic Interface Velocity for Junction Characterization». *Solar Energy Materials and Solar Cells* 44; pp.191-197.
- [33] B. Ba, M. Kane, A. Fickou, and G. Sissoko. (1995). «Open-circuit Voltage Decay in Polycrystalline Silicon Solar Cells». *Energy Materials and Solar Cells.* 31, 1, pp259-271.
- [34] R. R. Vardanyan, U. Kerst, P. Wawer, H. Wagemann, (1998). «Method for measurement of all recombination parameters in the base region of solar cells». 2nd World conference and exhibition on photovoltaic solar energy conversion 6-10 july, Vol I; pp, 191-193.
- [35] G. Sissoko, E. Nanéma, A.Corréa, P.M. Biteye, M. Adj, A.L. Ndiaye, (1998). «Silicon solar cell recombination parameters determination using the illuminated I-V characteristic». *World Renewable Energy Congress*; pp.1848-1851.
- [36] I. F. Barro, I. Zerbo, O. H. Lemrabott, F. Zougmore, G. Sissoko, (Munich, 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*; pp.368-371.

- [37] I. Gaye, A. Corr ea, A. L. Ndiaye, E. Nanema, A. B. B. Ba, M. Adj and G. Sissoko, (1996). «Impedence Parameters Determination of Silicon Solar Cell using the One Diode Model in Transient Study». World Renewable Energy Congress; pp.1598-1601.
- [38] G. Sissoko, C. Museruka, A. Corr ea, I. Gaye, A. L. Ndiaye, (1996). «Light Spectral Effect on Recombination Parameters of Silicon Solar Cell». World Renewable Energy Congress; pp.1487-1490.
- [39]. M.C. Halder and T.R. Williams, (1983). «Grain boundary effects in polycrystalline silicon solar cells I: Solution of the three dimensional diffusion equation by the green's function method Solar Cells». Vol. 8, pp. 201-223.
- [40]. M. Thiame, A. Di ne, B. Sibon, Ch.T. Sarr, M. L. O. Cheikh, I. Diatta, M. Dieye, G. Sissoko, (2017). «3D Study of a Polycrystalline Bifacial Silicon Solar Cell Illuminated Simultaneously by Both Sides: Grain size and Recombination Velocity Influence». Journal of scientific and engineering research, 4(1), (2017); pp. 135-145.
- [41] A. Luque, J. M. Ruiz, A. Cuevas, J. Eguren, M. G. Agost, (1997). «Double side solar cells to improve static concentrator». Proceedings of the 0st European Photovoltaic Solar Energy Conference, Luxembourg; pp. 269-277.
- [42]. A. Gover, P. Strella, (1974). «Vertical Multijunction Solar-Cell One-Dimensional Analysis». IEEE Transactions on Electron Devices, Vol.21, No6; pp.351-356.
- [43]. M. A. Green, (March 1995). «Silicon Solar cells advanced principles & practice Printed by Bridge printer Pty». Ltd. 29-35 Dunning Avenue, Roseberry, Centre for photovoltaic Devices and systems; pp.29-35.
- [44]. E. D. Stokes and T. L. Chu (1977). «Diffusion Lengths in Solar Cells From Short-Circuit Current Measurements». Applied Physics Letters, Vol. 30, No8; pp 425-426.
- [45]. K. Misiakos and D. Tsamakis, (1994). «Electron and Hole Mobilities in Lightly Doped Silicon». Appl. Phys. Lett. 64(15), pp: 2007-2009.
- [46]. N. Thiam, A. Diao, M. Ndiaye, A. Dieng, A. Thiam, M. Sarr, A.S. Maiga, G. Sissoko, (2012). « Electric Equivalent Models of Intrinsic Recombination Velocities of a Bifacial Silicon Solar Cell Under Frequency Modulation and Magnetic Field Effect». Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology Vol. 4, (22); pp.4646-4655.
- [47]. F.I. Barro, A. Seidou Maiga, A. Wereme and G. Sissoko, (2010). «Determination of Recombination Parameters in the Base of a Bifacial Silicon Solar Cell Under Constant Ultraspectral Light». Physical & Chemical News, 56; pp.76-84.
- [48]. J. E. Mahan and D. L. Barnes, (1981). «Depletion Layer Effects in the Open-Circuit Voltage-Decay Lifetime Measurement Solid-State Electronics». Vol. 24, No10; pp. 989-994.

- [49]. Bakary Dit D. Sylla, I. LY, O. Sow, B. Dione, Y. Traore, G. Sissoko, (2018). «Junction Surface Recombination Concept as Applied to Silicon Solar Cell Maximum Power. Point Determination Using Matlab/Simulink: Effect of Temperature». *Journal of Modern Physics*, 9; pp.172-188.
- [50]. A. Thiam, G. Sahin, M. A. O. El Moujtaba , B. Mbow, M. S. Diouf, M. I. Ngom, G. Sissoko, (2015). « Incidence Angle Effect on Electrical Parameters of a Bifacial Silicon Solar Cell Illuminated by Its Rear Side in Frequency Domain». *Int. J. Pure Appl. Sci. Technol*, Vol. 30 Issue 1, p. 29
- [51]. I. Diatta, M. S. Diouf, M. Thiame, Y. Traore, O. Diasse and G. Sissoko, (2017). «Influence of Temperature on Silicon Solar Cell Shunt Resistance Under Monochromatic Illumination». *Journal of Scientific and Engineering Research*, 4(8); pp.30-39.
- [52]. A. Diao, M. Wade, M. Thiame, G. Sissoko, (2017). « Bifacial Silicon Solar Cell Steady Photoconductivity Under Constant Magnetic Field and Junction Recombination Velocity Effects». *Journal of Modern Physics*, 8; pp.2200-2208.
- [53]. I. Tall, B. Seibou, M. A. O. El Moujtaba, A. Diao, M. Wade, G. Sissoko, (Jan 2015). «Diffusion Coefficient Modeling of a Silicon Solar Cell under Irradiation Effect in Frequency: Electric Equivalent Circuit». *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)* –Vol. 19 No. 2; pp.56-61.
- [54]. I. Diatta, I. Ly, M. Wade, M. S. Diouf, S. Mbodji, G. Sissoko, (2016). «Temperature Effect of Capacitance Silicon Solar Cell under Constant White Biased Light». *World Journal of Condensed Matter Physics*, 6; pp.261-268.
- [55] J. Furlan and S. Amon, (1985) «Approximation of the Carrier Generation Rate in Illuminated Silicon. *Solid-State Electronics*». 28; pp.1241-1243.
- [56]. S. N. Mohammad, (1987). «An Alternative Method for the Performance Analysis of Silicon Solar Cells». *J. Appl. Phys.*, LXI (2); pp.767–772.
- [57] H. L. Diallo, A. S. Maiga, A. Weiéme, and G. Sissoko, (2008) «New Approach of Both Junction and Back Surface Recombination Velocities in a 3D Modelling Study of a Polycrystalline Silicon Solar Cell». *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* 42; pp. 203-211.
- [58]. S. C. Jain, (1981). «Theory of photo induced open circuit voltage decay in a solar cell». *Solid-State Electronics*, Vol. 24, No12; pp.176-183.
- [59]. A. Dieng, I. Zerbo, M. Wade, A. S. Maiga, G. Sissoko, (2011). «Three-dimensional study of a polycrystalline silicon solar cell: the influence of the applied magnetic field on the electrical parameters». *Semicond. Sci. Technol.* 26, 095023; pp.9.



- [60]. A. M. M. Kosso, M. Thiame, Y. Traore, I. Diatta, M. Ndiaye, L. Habiboullah, I. Ly, G. Sissoko, (2018). «3D Study of a Silicon Solar Cell under Constant Monochromatic Illumination: Influence of Both, Temperature and Magnetic Field». *Journal of Scientific and Engineering Research*, 5(7), pp.259-269.
- [61]. J. Oualid, M. Bonfils, J. P. Crest, G. Mathian, H. Amzil, J. Dugas, M. Zehaf and S. Martinuzzi, (1982). «Photocurrent and Diffusion Lengths at the Vicinity of Grain Boundaries (g.b.) in N and P-type Polysilicon. Evaluation of the g.b. Recombination Velocity». *Revue Phys. Appl.* 17, pp.119-124.
- [62] Daniel L. Meier, Jeong-Mo Hwang and Robert B. Campbell, (1988). «The Effect of Doping Density and Injection Level on Minority-Carrier Lifetime as Applied to Bifacial Dendritic Web Silicon Solar Cells». *IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES*, Vol.ED-35,N°1, pp70-79.
- [63] S. Mbodji, I. Ly, H. L. Diallo, M. M. Dione, O. Diasse, and G. Sissoko, (2012). « Modeling Study of N<sup>+</sup>/P Solar Cell Resistances from Single I-V Characteristic Curve Considering the Junction Recombination Velocity (S<sub>f</sub>) ». *Research Journal of Applied Science, Engineering and Technology* 4(1): pp.1-7.
- [64]. M. M. Déme, S. Sarr, R. Sam, S. Gueye, M. L. Samb, F. I. Barro and G. Sissoko, (2009) «Influence de la Taille de Grain, de la Vitesse de Recombinaison aux Joints de Grain et de l'Angle d'Incidence de l'Eclairage sur l'Elargissement de la Zone de Charge d'Espace d'une Photopile Monofaciale». *Journal des Sciences*. Vol.9, N°2; pp.17-27.
- [65] S. R. Dhariwal, (1988). «Photocurrent and Photovoltage from Polycrystalline p-n Junction Solar Cells». Vol.25; pp. 223-233.
- [66] J. G. Fossum, (1976) «Computer aided numerical analysis of silicon solar cells solid-state electronics». 19, pp.269-277. [https://doi.org/10.1016/0038-1101\(76\)90022-8](https://doi.org/10.1016/0038-1101(76)90022-8).
- [67] J. G. Fossum and D. S. Lee (1952). «A physical model for the dependence of carrier lifetime on doping density in non-degenerate silicon solid-state electronics». 15, pp.741-747. [https://doi.org/10.1016/0038-1101\(82\)90203-9](https://doi.org/10.1016/0038-1101(82)90203-9).
- [68] E. H. Ndiaye, G. Sahin, M. Dieng, A. Thiam, H. L. Diallo, M. Ndiaye, G. Sissoko, (2015). «Study of the Intrinsic Recombination Velocity at the Junction of Silicon Solar under Frequency Modulation and Irradiation». *Journal of Applied Mathematics and Physics*, 3, pp.1522-1535.
- [69] M. Dieye, S. Mbodji, M. Zoungrana, I. Zerbo, B. Dieng, G. Sissoko (2015). «A 3D Modelling of Solar Cell Electric Power Under Real Operating Point». *World Journal Condensed Matter Physics* 5; pp.275-283.

- [70] C. Donolato. (1999). «Effective Diffusion Length of Multicrystalline Solar Cells. *Solid State Phenomena*».67-68, pp75-80.
- [71]. G. Sissoko, E. Nanema, A. Correa, M. Adj, A.L.Ndiaye, M.N. Diarra, (1998). «Recombination Parameters Measurement in Double Sided Surface Field Solar Cell» Proceedings of World Renewable Energy Conference, Florence–Italy, pp.1856-1859.
- [72] A. Rohatgi, S. Narasimha, D.S. Ruby. (1998) «Proceedings of the 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion». Stephens, Bedford pp.1566-1569.
- [73] A. B. Arab, (1995). «Photovoltaic Properties and High Efficiency of Preferentially Doped Polysilicon Solar Cells *Solid-State Electronics*». Vol. 38, N°8, (1995); pp.1441 -1447.
- [74] A. Dieng, N. Thiam, M. L. Samb, A. S. Maiga, F. I. Barro, G. Sissoko, (2009). « Etude à 3D d'une Photopile Polycristalline au Silicium: Influence de la Taille de Grain et de la Vitesse de Recombinaison aux Joints de Grain sur les Paramètres Electriques». *J. Sci.* Vol. 9 ? N°1 ; pp. 51-63.
- [75] M. Zoungrana, I. Zerbo, F. I. Barro, R. Sam, F. Touré, M. L. Samb and F. Zougmore, (2011). «Modelisation à 3D de l'Influence de la Taille des Grains et de la Vitesse de Recombinaison aux Joints de Grain sur une Photopile au Silicium Polycristallin Sous Eclairage Concentré». *Revue des Energies Renouvelables*, Vol.14, N°4 ; pp.649-664.
- [76] A. Dieng, N. Thiam, A. Thiam, A. S. Maiga and G. Sissoko, (2011). « Magnetic Field Effect on the Electrical Parameters of a Polycrystalline Silicon Solar Cell». *Research Journal of Applied, Engineering and Technology* pp.1-10.
- [77] A. Jakubowicz, (15 August 1985). «Theory of lifetime measurement with the scanning electron microscope in a semiconductor containing a localized defect: transient analysis». *J. Appl. Phys.* 58 (4) ); pp1483-1488.
- [78] W. Bollman, H. Gristal, (1970). «Defects and Crystalline Interfaces». Edited by Springer-Verlag, Berlin.
- [79] M. S. Diouf, I. Ly, M. Wade, I. Diatta, Y. Traore, M. Ndiaye, G. Sissoko, (2016). «Study of the Series Resistance of a Solar Cell Silicon under Magnetic Field from of Junction Surface Recombination Velocity of Minority Charge Carriers at the Junction limiting the Open Circuit (S<sub>foc</sub>) ». *Journal of Scientific and Engineering Research*, 3(6), pp.289-297.
- [80] M. M. Diallo, S. Tamba, B. Seibou, M. L. O. Cheikh, I. Diatta, E. H. Ndiaye, Y. Traore, C. T. Sarr, G. Sissoko, (2017). «Impact of Irradiation on the surface Recombination Velocity of a Back Side Monochromatic Illumination Bifacial Silicon Solar Cell under Frequency Modulation». *Journal of Scientific and Engineering Research*, 4(1), pp29-40.

- [81] I. Diatta, M. S. Diouf, H. Y. Ba, Y. Traore, O. Diasse, S. Faye, G. Sissoko, (2017). «Temperature dependence on Serie Resistance of a Silicon Solar Cell under Polychromatic Illumination». *Journal of Scientific and Engineering Research*, 4(8), pp.83-90.
- [82] N. Inoue, C. W. Wilmsen and K. A. Jones, (1981) «Phosphorus diffusion and gettering in silicon solar cells». *Solar Cells* 3; pp.35-36.
- [83] V. Randel, (2006). «Mechanisms of grain boundary engineering». *Acta mat.*54; pp 1777-1783.
- [84] R. N. Hall (1952). «Electron-hole recombinaison in germanuim». *Phys Rev.*87, 387.
- [85] M. Ndiaye, A. Diao, M. Thiame, M.M. Dione, H. Ly Diallo, M.L. Samb, I. Ly, C. Gassama, S. Mbodji, F.I. Barro, G. Sissoko, (2010). «3D Approach for a Modelling Study of the Diffusion Capacitance Efficiency of the Solar Cell Proceedings of the 25th European Photovoltaic Solar Energy». *Conference and Exhibition / 5th World Conference on Photovoltaic Energy*, pp. 484 – 487.

## Annexe Mathématique

Dans cette partie, nous donnons certains détails de calculs depuis la résolution de l'équation de continuité qui régit les porteurs minoritaires en excès dans la base jusqu'à la tension en circuit-ouvert.

En injectant l'expression de la densité des porteurs minoritaires en excès dans l'équation de continuité puis en multipliant chaque membre de cette équation par  $\cos(c_n \cdot x) \cdot \cos(c_m \cdot y)$  avant d'appliquer les conditions d'orthogonalité des cosinus (équation (1), (2)) et l'intégral suivant x et y (équation (3), (4)) :

$$\int_{-\frac{g_x}{2}}^{+\frac{g_x}{2}} \cos(c_k \cdot x) \cdot \cos(c_n \cdot x) dx = \begin{cases} 0 & \text{si } (k \neq n) \\ \frac{\sin(c_k \cdot g_x) + c_k \cdot g_x}{2 \cdot c_k} & \text{si } (k = n) \end{cases} \quad (1)$$

$$\int_{-\frac{g_y}{2}}^{+\frac{g_y}{2}} \cos(c_j \cdot y) \cdot \cos(c_m \cdot y) dy = \begin{cases} 0 & \text{si } (j \neq m) \\ \frac{\sin(c_j \cdot g_y) + c_j \cdot g_y}{2 \cdot c_j} & \text{si } (j = m) \end{cases} \quad (2)$$

$$\int_{-\frac{g_x}{2}}^{+\frac{g_x}{2}} \cos(c_k \cdot x) dx = \frac{2}{c_k} \cdot \sin\left(c_k \cdot \frac{g_x}{2}\right) \quad (3)$$

$$\int_{-\frac{g_y}{2}}^{+\frac{g_y}{2}} \cos(c_j \cdot y) dy = \frac{2}{c_j} \cdot \sin\left(c_j \cdot \frac{g_y}{2}\right) \quad (4)$$

L'équation de continuité devient :

$$\frac{\partial^2 Z_{kj}(z)}{\partial z^2} - \left( c_k^2 + c_j^2 + \frac{1}{Ln(Nb)^2} \right) \cdot Z_{kj} = - \frac{16 \cdot \sin\left(c_k \cdot \frac{g_x}{2}\right) \cdot \sin\left(c_j \cdot \frac{g_y}{2}\right)}{Dn(Nb) [\sin(c_k \cdot g_x) + c_k \cdot g_x] \cdot [\sin(c_j \cdot g_y) + c_j \cdot g_y]} \cdot G(z) \quad (5)$$

En posant :

$$\frac{1}{Lkj(Nb)} = \left[ c_k^2 + c_j^2 + L^{-2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

L'équation (5) devient :

$$\frac{\partial^2 Z_{kj}(z)}{\partial z^2} - \frac{1}{Lkj^2} \cdot Z_{kj} = - \frac{1}{Dkj(Nb)} \cdot G(z) \quad (8)$$

La résolution de cette équation qui est fonction du taux de génération sera effectuée pour l'éclairissement à la face avant de la photopile.

Détermination de l'équation de  $Z_{kj}(z)$ .

La solution de l'équation (5) sans second membre est de la forme :

$$Z_{kj}(z) = A_{kj} \cdot \cosh\left(\frac{z}{L_{kj}}\right) + B_{kj} \cdot \sinh\left(\frac{z}{L_{kj}}\right) \quad (9)$$

Pour un éclairage par la face avant, nous prendrons une équation particulière du type :

$$Z_{kj}(z) = \sum_{i=1}^3 K_i \cdot \exp(-b_i \cdot z) \quad (10)$$

En injectant l'équation (10) dans l'équation (5) on obtient l'expression de  $K_i$  qui est donnée par l'équation (9).

$$K_i = \frac{L_{kj}^2}{D_{kj} [b_i^2 \cdot L_{kj}^2 - 1]} \cdot a_i \quad (11)$$

On utilise par la suite les conditions à la limite (à la jonction et à la face arrière) pour déterminer respectivement l'expression de  $A_{kj}$  et  $B_{kj}$

$$A_{kj} = \sum_{i=1}^3 K_i \frac{Y_{kj} \cdot \left(\frac{Sf}{Dn} + b_i\right) + \frac{1}{L_{kj}} \cdot \left(\frac{Sb}{Dn} - b_i\right) \cdot \exp(-b_i \cdot H)}{\frac{X_{kj}}{L_{kj}} + \frac{Sf}{Dn} \cdot Y_{kj}} \quad (12)$$

$$B_{kj} = \sum_{i=1}^3 K_i \frac{\frac{Sf}{Dn} \cdot \left(\frac{Sb}{Dn} - b_i\right) \cdot \exp(-b_i \cdot H) - X_{kj} \cdot \left(\frac{Sf}{Dn} + b_i\right)}{\frac{X_{kj}}{L_{kj}} + \frac{Sf}{Dn} \cdot Y_{kj}} \quad (13)$$

Avec :

$$X_{kj} = \frac{1}{L_{kj}} \cdot \sinh\left(\frac{H}{L_{kj}}\right) + \frac{Sb}{Dn} \cdot \cosh\left(\frac{H}{L_{kj}}\right) \quad (14)$$

$$Y_{kj} = \frac{1}{L_{kj}} \cdot \cosh\left(\frac{H}{L_{kj}}\right) + \frac{Sb}{Dn} \cdot \sinh\left(\frac{H}{L_{kj}}\right) \quad (15)$$

### Densité de photocourant

$$J_{ph} = q \cdot D \cdot \sum_k \sum_j R_{kj} \cdot \left( \frac{B_{kj}}{L_{kj}} + \sum_{i=1}^3 K_{kj} \cdot b_i \right) \quad (16)$$

$$R_{kj} = \frac{4 \sin(c_k gx/2) \cdot \sin(c_j gy/2)}{gx \cdot gy \cdot c_k \cdot c_j} \quad (17)$$

### Courant en court-circuit

$$J_{cc} = q \cdot D \cdot \sum_k \sum_j \frac{R_{kj}}{L_{kj}} \cdot \sum_{i=1}^3 K_{kj} \cdot \left( \frac{Sb - D \cdot b_i}{D \cdot Y_{kj}} \cdot \exp(-b_i \cdot H) - \frac{X_{kj}}{Y_{kj}} + b_i \cdot L_{kj} \right) \quad (18)$$

### Phototension

$$V = V_T \cdot \ln \left( 1 + \frac{N}{n_i^2} \cdot \sum_k \sum_j R_{kj} \left[ A_{kj} - \sum_{i=1}^3 K_{kj} \right] \right) \quad (19)$$

### Tension de court-circuit

$$V_{co} = V_T \cdot \ln \left\{ 1 + \frac{N}{n_i^2} \cdot \sum_k \sum_j Q_{kj} \cdot \sum_{i=1}^3 K_{kj} \cdot \frac{\frac{Sb - D \cdot b_i}{D \cdot Y_{kj}} \cdot \exp(-b_i \cdot wb) - \frac{X_{kj}}{Y_{kj}} + b_i \cdot L_{kj}}{\frac{X_{kj}}{Y_{kj}} + \frac{Sf_0 \cdot L_{kj}}{D}} \right\} \quad (20)$$