

**Sujet : Etude en modélisation à trois dimensions d'une photopile au silicium en régime statique placée dans un champ magnétique et sous éclairage multispectral : détermination des résistances shunt Rsh et série Rs**

Mémoire de Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle Présenté par

**M Mamadou Lamine SAMB**

Maitre ès sciences

Pour obtenir le **Diplôme de docteur de 3<sup>ème</sup> cycle** en physique

**Option : Energie Solaire**

Soutenue publiquement Le 12 Juin 2009 devant le jury composé par :

Président : M Grégoire SISSOKO

Professeur Titulaire FST / UCAD

Membres : M Mamadou SARR

Maître de conférences, Directeur de l'UFRSET / UT

M Amadou Seidou MAÏGA

Chargé d'Enseignement UFRSAT / UGB

M Moustapha DIENG

Maitre Assistant FST / UCAD

M Senghane MBODJI

Maître Assistant associé (Docteur d'Etat) CUR de Bambey

M Idrissa Fabé BARRO Assistant FST / UCAD

### **Résumé**

Le présent travail porte sur l'étude théorique à trois dimensions d'une photopile au silicium polycristallin, sous éclairage multispectral constant et sous l'effet d'un champ magnétique constant pour la détermination des paramètres électriques de la photopile.

Une étude bibliographique sur l'impact du champ magnétique dans le système solaire et sur différentes méthodes de caractérisation d'une photopile au silicium polycristallin dans un modèle à trois dimensions en régime statique a été présentée.

L'étude du coefficient, de la longueur de diffusion et une étude de la densité des porteurs minoritaires de charge en excès par la résolution de l'équation de continuité dans le modèle trois dimensions relative aux porteurs minoritaires de charge en excès dans la base de la photopile est proposée.

La densité des porteurs minoritaires en excès en fonction de la profondeur de la base et répartition de la densité des porteurs minoritaires en excès à la jonction est étudiée pour différentes tailles de grain, pour différentes vitesses de recombinaison aux joints de grain et pour différentes valeurs champ magnétique sur la photopile.

La densité photocourant et la phototension étudiées en fonction de la taille des grains, des vitesses de recombinaison et du champ magnétique. Des expressions de la vitesse de recombinaison à la jonction et la vitesse de recombinaison à la face arrière ont été déduites.

De la caractéristique  $J_{ph}$ - $V_{ph}$  de la photopile sous champ magnétique ont été déterminé la résistance série, la résistance shunt à travers des modèles électriques équivalents où dans un premier cas, la photopile est une source de courant égale à celle du photocourant de court circuit en parallèle avec la résistance shunt.

Dans le second cas, la photopile est modélisée par une source de tension en série avec la résistance série.

**Mots clés :** Photopile au silicium – Magnétorésistance – Vitesses de recombinaison.



# Université Cheikh Anta DIOP de DAKAR

\*\*\*\*\*

## Faculté des Sciences et Techniques

\*\*\*\*\*

### Département de Physique

\*\*\*\*\*



## Mémoire

Présenté par

**M Mamadou Lamine SAMB**

Maitre ès sciences

Pour obtenir le **Diplôme de docteur de 3<sup>ème</sup> cycle** en Physique

**Option : Energie Solaire**

**Sujet : Etude en modélisation à trois dimensions d'une photopile au silicium en régime statique placée dans un champ magnétique et sous éclairage multispectral : détermination des résistances shunt  $R_{sh}$  et série  $R_s$**

Soutenue publiquement Le 12 Juin 2009 devant le jury composé par :

Président : M Grégoire SISSOKO Professeur Titulaire FST / UCAD

Membres : M Mamadou SARR Maître de conférences, Directeur de l'UFRSET / UT

M Amadou Seidou MAÏGA Chargé d'Enseignement UFRSAT / UGB

M Moustapha DIENG Maitre Assistant FST / UCAD

M Senghane MBODJ Maître Assistant associé CUR de Bambey

M Idrissa Fabé BARRO Assistant FST / UCAD

# Dédicaces

*Ce travail est dédié à :*

*Mon arrière Grand-mère maternelle Awa DIOP SOW*

*Mon Père*

*Ma Mère*

*Mes Tantes*

*Mes Oncles*

*Mes Frères et Sœurs*

*Mes Cousins et Cousines*

*Mes Neveux et Nièces*

*Mes Ami(e)s*

*Monsieur Mbor TOURE*

*Madame DIOP née Ndeye Fatou NDAO*

*Monsieur Mouhamed CAMARA*

*Monsieur et madame TOURE*

*Monsieur Abdoulaye BAO*

*Monsieur Moustapha NIANG*

*Monsieur Ibrahima DIOP*

*Mademoiselle Fanta BARRY*

*Tous (tes) ceux (celles) qui, de près ou de loin, m'ont soutenu tout au long de mon cursus élémentaire jusqu'au cursus universitaire.*

Ce travail a été effectué :

au Laboratoire des Semi-conducteurs et d'Énergie Solaire  
(LASES) de la Faculté des Sciences et Techniques (FST),  
de L'Université Cheikh Anta DIOP de Dakar (Sénégal)

Sous la direction de Monsieur Grégoire SISSOKO Professeur  
Titulaire au Département de Physique à la FST.

# Remerciements

*Mes remerciements à :*

*Monsieur **Mansour KANE**, Professeur titulaire à la faculté des Sciences et Techniques de l'UCAD. Responsable du DEA d'énergie Solaire et du Laboratoire des Semi-conducteur et d'Energie Solaire (L.A.S.E.S), pour m'avoir fait l'honneur d'accepter mon insertion dans son laboratoire.*

*Monsieur **Aboubaker Chédikh BEYE**, Professeur titulaire à la faculté des Sciences et Techniques de l'UCAD, Chef de département de Physique de ladite Faculté. En plus d'être mon professeur, vous avez joué spontanément le rôle de père et de conseiller.*

*Monsieur **Grégoire SISSOKO**, Professeur Titulaire à la Faculté des Sciences et Techniques de L'U.C.A.D, pour avoir encadré ce Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle et d'avoir accepté de présider ce jury. Je vous témoigne ma profonde gratitude.*

*Messieurs **Mamadou SARR**, Maître de conférences, Directeur de l'Unité de Formation et de Recherche en Sciences et Technologie de l'Université de Thiès, **Fabé Idrissa BARRO**, Assistant à la Faculté des Sciences et Techniques de l'UCAD, **Senghane MBODJ**, Maître assistant associé au centre universitaire régionale de Bambey, **Moustapha dieng** Maître Assistant à la Faculté des Sciences et Techniques de l'UCAD, **Amadou Seidou MAÏGA**, chargé des cours à l'UFRSAT de l'UGB de Saint Louis d'avoir accepté de juger ce travail.*

*Monsieur **Fabé Idrissa BARRO**, a été un tuteur pour moi pour suivre au quotidien ce travail, je lui en suis reconnaissant.*

*Messieurs **Amadou DIAO**, Docteur de L'Université Cheikh Anta Diop de Dakar, **Alfred DIENG**, doctorant de l'université Cheikh Anta Diop de Dakar, **Mor NDIAYE** Docteur de L'Université Cheikh Anta Diop de Dakar, et tous les autres membres de l'équipe, pour leur disponibilité à mes innombrables sollicitations. De par leur abnégation dans le travail, leur patience, leur*

*courage, leur persévérance, j'ai pu bénéficier de leur apport efficace dans la confection de ce travail. Je ne cesserai jamais vous remercier pour tout ce qu'ils ont fait pour former une équipe qui gagne. Que Dieu le Tout Puissant les récompense et les soutienne dans toutes leurs entreprises.*

*Je remercie également mes amis et collègues du Laboratoire des Semi-conducteurs et d'Energie Solaire de L'Université Cheikh Anta Diop de Dakar (L.A.S.E.S): Almoustapha SAMOURA, Coura GUEYE, Baba FLEUR, Mouhamadou Moustapha DEME, Zeïnabou Nouhou BAKO, Aminata GUEYE, Amary THIAM, Séga GUEYE, Moussa DIENG, et tous mes amis d'enfance.*

## Sommaire

LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX	4
LISTE DES FIGURES	4
LISTE DES TABLEAUX	7
NOMENCLATURE	8
INTRODUCTION GENERALE	9
CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	11
INTRODUCTION	12
I-1. CHAMP MAGNETIQUE DANS LE SYSTEME SOLAIRE	12
I-1-1. DEFINITION	12
I-1-2. CHAMP MAGNETIQUE A LA SURFACE TERRESTRE	13
I-1-3. CHAMP MAGNETIQUE SUR LES AUTRES PLANETES	14
I-2. MODELISATION A 3-D D'UNE CELLULE SOLAIRE AU SILICIUM MULTICRISTALLIN SOUS ECLAIREMENT MONOCHROMATIQUE	16
I-3. METHODES DE MESURE DES PARAMETRES PHENOMENOLOGIQUES DES PHOTOPILES AU SILICIUM POLYCRISTALLIN	20
I.4 MEASUREMENT OF AC PARAMETERS OF GALLIUM ARSENIDE (GaAs/Ge) SOLAR BY IMPEDANCE SPECTROSCOPY	21
I-5. METHOD FOR MEASUREMENT OF ALL RECOMBINATION PARAMETERS IN THE BASE REGION OF SOLAR CELLS	22
I-6. VITESSES DE RECOMBINAISON INTRINSEQUES D'UNE PHOTOPILE BIFACIALE A JONCTION HORIZONTALE ET A TROIS DIMENSIONS	27
I-6-1. DEFINITION	27
I-6-2. CARACTERISATION DES JOINTS DE GRAIN	27
I-6-3. EFFET DES JOINTS DE GRAIN SUR LA VITESSE DE RECOMBINAISON INTRINSEQUE	28
I-6-4. EFFET DES JOINTS DE GRAIN SUR LA VITESSE DE RECOMBINAISON A LA FACE ARRIERE	30
I-7. VITESSES DE RECOMBINAISON INTRINSEQUES D'UNE PHOTOPILE BIFACIALE A JONCTION HORIZONTALE ET A UNE DIMENSION	31
CONCLUSION	35
CHAPITRE II : ETUDE DE LA DENSITE DE PORTEURS DE CHARGES MINORITAIRES $\delta(x,y,z)$ DE LA PHOTOPILE SOUS CHAMP MAGNETIQUE	36
INTRODUCTION	37
II-1. RESOLUTION DE L'EQUATION DE DIFFUSION	37
II-1-1 PRESENTATION DE LA PHOTOPILE BIFACIALE	37
II-1-2. EQUATION DE CONTINUITÉ	39
II-1-2-1. COEFFICIENT DE DIFFUSION ET LONGUEUR DE DIFFUSION	39
II-1-2-2. TAUX DE GENERATION	40
II-1-2-3. CONDITIONS AUX LIMITES	40
II-2. DENSITE DES PORTEURS DE CHARGE MINORITAIRE EN EXCES DANS LA BASE DE LA PHOTOPILE	43
II-2-1. PROFIL DE LA DENSITE DES PORTEURS DE CHARGE MINORITAIRES EN EXCES DANS LA BASE DE LA PHOTOPILE A UNE DIMENSION ET A TROIS DIMENSIONS	43
II-2-1-1. INFLUENCE DE LA TAILLE DES GRAINS	43
II-2-1-2. INFLUENCE DE LA VITESSE DE RECOMBINAISON AUX JOINTS DE GRAIN	45
II-2-1-3. INFLUENCE DU CHAMP MAGNETIQUE	47
II-2-1-4. INFLUENCE DE LA VITESSE DE RECOMBINAISON A LA JONCTION	49
II-2-1-5. INFLUENCE DE LA VITESSE DE RECOMBINAISON A LA FACE ARRIERE	51
CONCLUSION	53
CHAPITRE III : ETUDE DE LA REponse DE LA PHOTOPILE SOUS CHAMP	54
INTRODUCTION	55
III-1. ETUDE DU PHOTOCOURANT	55
III-1-1. EXPRESSION DE LA DENSITE DE PHOTOCOURANT : $J_{ph}$ (EN A.cm <sup>-2</sup> )	55
III-1-2. DENSITE DE PHOTOCOURANT EN FONCTION DU CHAMP MAGNETIQUE	55
III-1-3. INFLUENCE DE LA VITESSE DE RECOMBINAISON AUX JOINTS DE GRAIN SUR LA DENSITE DE	56

PHOTOCOURANT	
III-1-4. INFLUENCE DE LA TAILLE DES GRAINS SUR LA DENSITE DE PHOTOCOURANT	57
III-1-5. DENSITE DE PHOTOCOURANT EN FONCTION DES PARAMETRES DE RECOMBINAISON	58
III-1-5-1. DENSITE DE PHOTOCOURANT EN FONCTION DE LA VITESSE DE RECOMBINAISON A LA JONCTION	58
III-1-5-2. INFLUENCE DU CHAMP MAGNETIQUE SUR LA DENSITE DE PHOTOCOURANT	59
III-1-5-3. INFLUENCE DE LA VITESSE DE RECOMBINAISON AUX JOINTS DE GRAIN	60
III-1-5-4. INFLUENCE DE LA TAILLE DES GRAINS	61
III-1-6. DENSITE DE PHOTOCOURANT EN FONCTION DE LA VITESSE DE RECOMBINAISON A LA FACE ARRIERE	62
III-1-6-1. INFLUENCE DU CHAMP MAGNETIQUE SUR LA DENSITE DE PHOTOCOURANT	63
III-1-6-2. INFLUENCE DE LA VITESSE DE RECOMBINAISON AUX JOINTS DE GRAIN SUR LA DENSITE DE PHOTOTENSION	64
III-1-6-3. INFLUENCE DE LA TAILLE DES GRAINS SUR LA DENSITE DE PHOTOCOURANT	65
III-2. ETUDE DE LA PHOTOTENSION	67
III-2-1. EXPRESSION DE LA PHOTOTENSION VPH (en V)	67
III-2-2. PHOTOTENSION EN FONCTION DU CHAMP MAGNETIQUE	67
III-2-3. INFLUENCE DE LA VITESSE DE RECOMBINAISON AUX JOINTS DE GRAIN SUR LA PHOTOTENSION	68
III-2-4. INFLUENCE DE LA TAILLE DES GRAINS SUR LA PHOTOTENSION	69
III-2-5. PHOTOTENSION EN FONCTION DES PARAMETRES DE RECOMBINAISON	71
III-2-5-1. PHOTOTENSION EN FONCTION DE LA VITESSE DE RECOMBINAISON A LA JONCTION	71
III-2-5-2. INFLUENCE DE LA VITESSE DU CHAMP MAGNETIQUE SUR LA PHOTOTENSION	72
III-2-5-3. INFLUENCE DE LA VITESSE DE RECOMBINAISON AUX JOINTS DE GRAIN SUR LA PHOTOTENSION	73
III-2-5-4. INFLUENCE DE LA TAILLE DES GRAINS SUR LA PHOTOTENSION	74
III-2-6. PHOTOTENSION EN FONCTION DE LA VITESSE DE RECOMBINAISON A LA FACE ARRIERE	75
III-2-6-1. INFLUENCE DU CHAMP MAGNETIQUE SUR LA PHOTOTENSION	76
III-2-6-2. INFLUENCE DE LA VITESSE DE RECOMBINAISON AUX JOINTS DE GRAIN SUR LA PHOTOTENSION	76
III-2-6-3. INFLUENCE DE LA TAILLE DES GRAINS SUR LA PHOTOTENSION	77
III-3 ETUDE DES PARAMETRES DE RECOMBINAISON $S_f$ ET $S_b$	79
III-3-1. EXPRESSIONS DE LA VITESSE DE RECOMBINAISON A LA FACE ARRIERE	79
III-3-2. PROFIL DES VITESSES DE RECOMBINAISON A LA FACE ARRIERE	80
III-3-2-1. INFLUENCE DU CHAMP MAGNETIQUE	80
III-3-2-2. INFLUENCE DE LA TAILLE DES GRAINS	81
III-3-2-3. INFLUENCE DE LA VITESSE DE RECOMBINAISON AUX JOINTS DE GRAIN	82
CONCLUSION	83
CHAPITRE IV : ETUDE DE LA CARACTERISTIQUE STATIQUE I-V ET DES PARAMETRES ELECTRIQUES CORRESPONDANT AUX RESISTANCES SHUNT $R_{sh}$ ET SERIE $R_s$ DE LA PHOTOPILE SOUS ECLAIREMENT MULTISPECTRAL ET SOUS CHAMP MAGNETIQUE B	84
INTRODUCTION	85
IV-1 CARACTERISTIQUE JPH-VPH DE LA PHOTOPILE	85
IV-1-1 INFLUENCE DU CHAMP MAGNETIQUE SUR LA CARACTERISTIQUE $J_{ph}$ - $V_{ph}$	86
IV-1-2 INFLUENCE DE LA VITESSE DE RECOMBINAISON AUX JOINTS DE GRAIN SUR LA CARACTERISTIQUE $J_{ph}$ - $V_{ph}$	86
IV-1-3 INFLUENCE DE LA TAILLE DES GRAINS SUR LA CARACTERISTIQUE $J_{ph}$ - $V_{ph}$	87
IV-1-4 INFLUENCE DE LA VITESSE DE RECOMBINAISON A LA FACE ARRIERE SUR LA CARACTERISTIQUE $J_{ph}$ - $V_{ph}$	88
IV-2 ETUDE DES PARAMETRES ELECTRIQUES $R_{sh}$ ET $R_s$ D'UNE PHOTOPILE	89
IV-2-1 RESISTANCE SHUNT $R_{sh}$	89
IV-2-1-1 INFLUENCE DU CHAMP MAGNETIQUE SUR LA RESISTANCE SHUNT	92
IV-2-1-2 INFLUENCE DE LA VITESSE DE RECOMBINAISON AUX JOINTS DE GRAIN SUR LA RESISTANCE SHUNT	93
IV-2-1-3 INFLUENCE DE LA TAILLE DES GRAINS SUR LA RESISTANCE SHUNT	94
IV-2-1-4 INFLUENCE DE LA VITESSE DE RECOMBINAISON A LA FACE ARRIERE SUR LA RESISTANCE SHUNT	95
IV-2-2 RESISTANCE SERIE $R_s$	96

IV-2-2-1 INFLUENCE DU CHAMP MAGNETIQUE SUR LA RESISTANCE SERIE	99
IV-2-2-2 INFLUENCE DE LA VITESSE DE RECOMBINAISON AUX JOINTS DE GRAIN SUR LA RESISTANCE SERIE	100
IV-2-2-3 INFLUENCE DE LA TAILLE DES GRAINS SUR LA RESISTANCE SERIE	101
IV-2-2-4 INFLUENCE DE LA VITESSE DE RECOMBINAISON A LA FACE ARRIERE SUR LA RESISTANCE SERIE	102
CONCLUSION	103
CONCLUSION GENERALE	104
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	105
ANNEXES MATHEMATIQUES	107

# LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

## LISTE DES FIGURES

Figure I-1	Grain ou cristallite de la photopile	17
Figure I-2	Effets capacitifs de la zone de charge d'espace	20
Figure I-3	Effets du courant de recombinaison dans la zone de charge d'espace	20
Figure I-4	Photopile sous l'influence du champ magnétique	23
Figure I-5	Variation de photocourant des électrons en fonction de l'intensité du champ magnétique ( $S_n = 10^3$ cm/S, $\mu_n = 10^3$ cm <sup>2</sup> /s, $L_n = 10^2$ μm, $H = 200$ μm, $\alpha_1 = 0,5$ μm <sup>-1</sup> , $\alpha_2 = 0,05$ μm <sup>-1</sup> , $\alpha_3 = 0,10$ μm <sup>-1</sup> ).	24
Figure I-6	Schéma descriptif des joints de grain de torsion et de flexion	28
Figure I-7	profil de la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction en fonction de celle aux joints de grain pour différentes tailles de grain, $D = 26$ cm <sup>2</sup> /s, $H = 0.03$ cm et $AM = 1,5$	29
Figure I-8	Profil de la vitesse de recombinaison en fonction de la vitesse de recombinaison aux joints de grain pour différentes tailles de grain ( $D = 26$ cm <sup>2</sup> /s, $H = 0.03$ cm et $AM = 1,5$ ).	30
Figure II-1	Modèle illustratif et modèle colonnaire d'une photopile bifaciale au silicium polycristallin	37
Figure II-2	Grain ou cristallite de la photopile	38
Figure II-3	Coefficient de diffusion $D^*$ en fonction du champ magnétique B	40
Figure II-4	Longueur de diffusion $L^*$ en fonction du champ magnétique B et pour différentes valeur de la durée de vie $\tau$ des porteurs photocréés	40
Figure II-5	$f(C_j)$ et $h(C_j)$ en fonction de $C_j$	42
Figure II-6	Densité des porteurs de charge minoritaires en excès en fonction de la profondeur dans la base pour différentes valeurs de la taille des grains avec $B = 1,122.10^{-6}$ T ; $S_g = 56,234$ cm/s ; $x = 0$ cm ; $y = 0$ cm	44
Figure II-7	Densité des porteurs de charge minoritaires en excès en fonction de la profondeur dans la base et en fonction de la taille des grains avec $B = 1,778.10^{-6}$ T ; $S_g = 56,234$ cm/s ; $x = 0$ cm ; $y = 0$ cm	45
Figure II-8	Densité des porteurs de charge minoritaires en excès en fonction de la profondeur dans la base pour différentes valeurs de la vitesse de recombinaison aux joints de grain avec $B = 1,122.10^{-6}$ T ; $g = 0,02$ cm ; $x = -9.10^{-3}$ cm ; $y = -9.10^{-3}$ cm	46
Figure II-9	Densité des porteurs de charge minoritaires en excès en fonction de la profondeur dans la base et en fonction de la vitesse de recombinaison aux joints de grain avec $B = 1,778.10^{-6}$ T ; $g = 0,02$ cm ; $x = -9.10^{-3}$ cm ; $y = -9.10^{-3}$ cm	47
Figure II-10	Densité des porteurs de charge minoritaires en excès en fonction de la profondeur dans la base pour différentes valeurs du champ magnétique avec $S_g = 316,228$ cm/s ; $g = 0,02$ cm ; $x = 0$ cm ; $y = 0$ cm	48
Figure II-11	Densité des porteurs de charge minoritaires en excès en fonction de la profondeur dans la base pour différentes valeurs du champ magnétique avec $S_g = 56,234$ cm/s ; $g = 0,02$ cm ; $x = 0$ cm ; $y = 0$ cm	49
Figure II-12	Densité des porteurs de charge minoritaires en excès en fonction de la profondeur dans la base pour différentes valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction avec $B = 1,585.10^{-6}$ T ; $S_g = 14,125$ cm/s ; $g = 0,02$ cm ; $S_b = 10000$ cm/s ; $x = 0$ cm ; $y = 0$ cm	50
Figure II-13	Densité des porteurs de charge minoritaires en excès en fonction de la profondeur dans la base et en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction avec $B = 6,31.10^{-6}$ T ; $S_g = 56,234$ cm/s ; $g = 0,02$ cm ; $S_b = 10000$ cm/s ; $x = 0$ cm ; $y = 0$ cm	51
Figure II-14	Densité des porteurs de charge minoritaires en excès en fonction de la profondeur dans la base pour différentes valeurs de la vitesse de recombinaison à la face arrière avec $B = 1,585.10^{-6}$ T ; $S_g = 14,125$ cm/s ; $g = 0,02$ cm ; $S_f = 10^5$ cm/s ; $x = 0$ cm ; $y = 0$ cm	52
Figure II-15	Densité des porteurs de charge minoritaires en excès en fonction de la profondeur dans la base et en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière avec $B = 6,31.10^{-6}$ T ; $S_g = 56,234$ cm/s ; $g = 0,02$ cm ; $S_f = 10^5$ cm/s ; $x = 0$ cm ; $y = 0$ cm	53
Figure III-1	Densité de photocourant en fonction du champ magnétique avec $S_g = 56,234$ cm/s et $g = 0,02$ cm	56
Figure III-2	densité de photocourant en fonction du champ magnétique et en fonction de la vitesse de recombinaison aux joints de grains avec $g = 0,02$ cm	57

Figure III-3	Densité de photocourant en fonction du champ magnétique et en fonction de la taille des grains avec $S_g = 56,234$ cm/s	58
Figure III-4	Densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction avec $B = 10^{-5}$ T ; $S_g = 1778$ cm/s ; $g = 0,02$ cm ; $S_b = 10^4$ cm/s	59
Figure III-5	Densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs du champ magnétique avec $S_g = 56,34$ cm/s ; $g = 0,02$ cm ; $S_b = 10^4$ cm/s	60
Figure III-6	Densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la vitesse de recombinaison aux joints de grain avec $B = 10^{-5}$ T ; $g = 0,02$ cm ; $S_b = 10^4$ cm/s	61
Figure III-7	Densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la taille des grains avec $B = 10^{-5}$ T ; $S_g = 1778$ cm/s ; $S_b = 10^4$	62
Figure III-8	Densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière avec $B = 10^{-5}$ T ; $S_g = 1778$ cm/s ; $g = 0,02$ cm ; $S_b = 10^4$ cm/s	63
Figure III-9	Densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière pour différentes valeurs du champ magnétique et avec $S_g = 56,34$ cm/s ; $g = 0,02$ cm ; $S_f = 10^5$ cm/s	64
Figure III-10	Densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière pour différentes valeurs de la vitesse de recombinaison aux joints de grain avec $B = 10^{-5}$ T ; $g = 0,02$ cm ; $S_b = 10^5$ cm/s	65
Figure III-11	Densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière pour différentes valeurs de la taille des grains avec $B = 10^{-5}$ T ; $S_g = 56,234$ cm/s ; $S_f = 10^5$ cm/s	66
Figure III-12	Phototension en fonction du champ magnétique avec $S_g = 56,234$ cm/s et $g = 0,02$ cm	68
Figure III-13	Phototension en fonction du champ magnétique pour différentes valeurs de la vitesse de recombinaison aux joints de grains avec $g = 0,02$ cm	69
Figure III-14	Phototension en fonction du champ magnétique pour différentes valeurs de la taille des grains avec $S_g = 56,234$ cm/s	70
Figure III-15	Phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction avec $B = 10^{-5}$ T ; $S_g = 56,234$ cm/s ; $g = 0,02$ cm ; $S_b = 10^4$ cm/s	71
Figure III-16	Phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs du champ magnétique avec $S_g = 56,234$ cm/s ; $g = 0,02$ cm ; $S_b = 10^4$ cm/s	72
Figure III-17	Phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la vitesse de recombinaison aux joints de grain avec $B = 10^{-5}$ T ; $g = 0,02$ cm ; $S_b = 10^4$ cm/s	73
Figure III-18	Phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la taille des grains avec $B = 10^{-5}$ T ; $S_g = 56,234$ cm/s ; $S_b = 10^5$	74
Figure III-19	Phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière pour les trois modes d'éclairage ( $B = 10^{-5}$ T ; $S_g = 56,234$ cm/s ; $g = 0,02$ cm ; $S_b = 10^5$ cm/s).	75
Figure III-20	Phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière pour différentes valeurs du champ magnétique avec $S_g = 56,234$ cm/s ; $g = 0,02$ cm ; $S_f = 10^5$ cm/s	76
Figure III-21	Phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière pour différentes valeurs de la vitesse de recombinaison aux joints de grain avec $B = 10^{-5}$ T ; $g = 0,02$ cm ; $S_b = 10^5$ cm/s	77
Figure III-22	Phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière pour différentes valeurs de la taille des grains avec $B = 10^{-5}$ T ; $S_g = 56,234$ cm/s ; $S_f = 10^5$ cm/s	78
Figure III-23	Vitesse de recombinaison à la face arrière en fonction du champ magnétique, avec $S_g = 56,234$ cm/s ; $g = 0,012$ cm	81
Figure III-24	Vitesse de recombinaison à la jonction en fonction du champ magnétique, avec $S_g = 56,234$ cm/s ; $g = 0,012$ cm	81
Figure III-25	Vitesse de recombinaison à la face arrière en fonction de la taille des grains, avec $S_g = 56,234$ cm/s ; $B = 0$ T	82
Figure III-26	Vitesse de recombinaison à la jonction en fonction de la taille des grains, avec $S_g = 56,234$ cm/s ; $B = 0$ T	82
Figure III-27	Vitesse de recombinaison à la face arrière en fonction de la vitesse de recombinaison aux joints de grain, avec $g = 0,012$ cm ; $B = 3,162 \cdot 10^{-5}$ T	83
Figure III-28	Vitesse de recombinaison à la jonction en fonction de la vitesse de recombinaison aux joints de grain, avec $g = 0,012$ cm ; $B = 3,162 \cdot 10^{-5}$ T	83
Figure IV-1	Densité de photocourant $J_{ph}$ en fonction de la phototension $V_{ph}$ , avec $B = 10^{-5}$ T ; $S_g = 56,234$ cm/s ; $g = 0,02$ cm ; $S_b = 10^4$ cm/s.	85
Figure IV-2	Densité de photocourant $J_{ph}$ en fonction de la phototension $V_{ph}$ pour différentes valeurs du champ magnétique, avec $S_g = 56,234$ cm/s ; $g = 0,02$ cm ; $S_b = 10^4$ cm/s.	86
Figure IV-3	Densité de photocourant $J_{ph}$ en fonction de la phototension $V_{ph}$ pour différentes valeurs de la vitesse de recombinaison aux joints de grain, avec $B = 10^{-5}$ T ; $g = 0,02$ cm ; $S_b = 10^4$ cm/s.	87

Figure IV-4	Photocourant $J_{ph}$ en fonction de la phototension $V_{ph}$ pour différents valeurs de la taille des grains, avec $B = 10^{-5}$ T ; $S_g = 56,234$ cm/s ; $S_b = 10^4$ cm/s.	88
Figure IV-5	Photocourant $J_{ph}$ en fonction de la phototension $V_{ph}$ pour différentes valeurs de la vitesse de recombinaison à la face arrière, avec $B = 10^{-5}$ T ; $S_g = 56,234$ cm/s ; $g = 0,02$ cm.	89
Figure IV-6	Densité de photocourant $J_{ph}$ en fonction de la phototension $V_{ph}$ , avec $B = 10^{-5}$ T ; $S_g = 56,234$ cm/s ; $g = 0,02$ cm ; $S_b = 10^4$ cm/s.	90
Figure IV-7	Circuit équivalent électrique d'une photopile lorsqu'elle fonctionne en court circuit	90
Figure IV-8	Résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour, avec $B = 10^{-5}$ T ; $S_g = 158,489$ cm/s ; $g = 0,007$ cm ; $S_b = 10^4$ cm/s.	92
Figure IV-9	Résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs du champ magnétique, avec $S_g = 158,489$ cm/s ; $g = 0,007$ cm ; $S_b = 10^4$ cm/s.	93
Figure IV-10	Résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la vitesse de recombinaison aux joints de grain, avec $B = 10^{-5}$ T ; $g = 0,007$ cm ; $S_b = 10^4$ cm/s.	94
Figure IV-11	Résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la taille des grains, avec $B = 10^{-5}$ T ; $S_g = 158,489$ cm/s ; $S_b = 10^4$ cm/s.	95
Figure IV-12	Résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la vitesse de recombinaison à la face arrière, avec $B = 10^{-5}$ T ; $S_g = 158,489$ cm/s ; $g = 0,007$ cm.	96
Figure IV-13	Photocourant $J_{ph}$ en fonction de la phototension $V_{ph}$ , avec $B = 10^{-5}$ T ; $S_g = 56,234$ cm/s ; $g = 0,02$ cm ; $S_b = 10^5$ cm/s.	97
Figure IV-14	Circuit équivalent électrique de la photopile lorsqu'elle fonctionne en circuit ouvert	97
Figure IV-15	Résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction, avec $B = 10^{-5}$ T ; $S_g = 158,489$ cm/s ; $g = 0,007$ cm ; $S_b = 10^4$ cm/s.	99
Figure IV-16	Résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs du champ magnétique, avec $S_g = 158,489$ cm/s ; $g = 0,007$ cm ; $S_b = 10^4$ cm/s.	100
Figure IV-17	Résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la vitesse de recombinaison aux joints de grain, avec $B = 10^{-5}$ T ; $g = 0,007$ cm ; $S_b = 10^4$ cm/s.	101
Figure IV-18	Résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la taille des grains, avec $B = 10^{-5}$ T ; $S_g = 158,489$ cm/s ; $S_b = 10^4$ cm/s.	102
Figure IV-19	Résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la vitesse de recombinaison à la face arrière, avec $B = 10^{-5}$ T ; $S_g = 1778$ cm/s ; $g = 0,007$ cm.	103

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau I-1	valeurs de l'intensité du champ magnétique à la surface de certaines planètes et étoiles	16
Tableau I-2	valeurs tabulés du rayonnement solaire sous AM=1,5	32
Tableau I-3	valeurs des paramètres $\alpha$ , $\varepsilon$ et $\gamma$ pour les différents modes d'éclairages de la photopile	32

## Nomenclature

SYMBOLE	SIGNIFICATION
$z$ (cm)	Profondeur dans la base, comptée à partir de la jonction ( $z = 0$ )
$\delta$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	Densité des porteurs minoritaires en excès dans la base de la photopile
$D^*$ ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )	Coefficient de diffusion des porteurs de charge dans la base de la photopile sous champ magnétique
$H$ (cm)	Epaisseur de la base de la photopile
$g_x$ (cm)	Largeur du grain
$g_y$ (cm)	Longueur du grain
$w$ (cm)	Epaisseur de l'émetteur
$\mu$	Perméabilité magnétique du matériau silicium
$L^*$ (cm)	Longueur de diffusion des porteurs minoritaires de charge dans la base de la photopile sous champ magnétique
$G$ ( $\text{N}/\text{cm}^3\text{s}$ )	Taux de génération des porteurs de charge
$a_i$ ( $\text{cm}^{-3}$ ), $b_i$ ( $\text{cm}^{-1}$ )	coefficients dans l'expression du taux de génération
$n$	Nombre de soleil
$k_i$	Constante dans l'expression de la densité des porteurs de charge
$S_g$ (cm/s)	Vitesse de recombinaison aux joints de grain
$S_f$ (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
$C_j, C_k$	Valeurs propres d'espace
$V_T$ (V)	Tension thermique
$q$ (C)	Charge électrique élémentaire
$J_{ph}$ ( $\text{A}/\text{cm}^2$ )	Densité de photocourant
$N_B$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	Taux de dopage de la base en atomes d'impureté
$n_i$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	Concentration intrinsèque des porteurs dans la base
$k$ (J/K)	Constante de Boltzmann
$T$ (K)	Température
$V_{ph}$ (V)	Phototension
$V_{phco}$ (V)	Phototension de circuit ouvert
$J_{cc}$ ( $\text{A}/\text{cm}^2$ )	Densité de courant de court circuit
$S_{f0}$ (cm/s)	Vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction
$R_s$ ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	Resistance série par unité de surface éclairée
$R_{sh}$ ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	Resistance shunt par unité de surface éclairée

## Introduction générale

Le monde a évolué d'un passé récent, les lourdes tâches et les longs trajets étaient confiés aux animaux, les sources lumineuses étaient obtenues en brûlant des arbres et du charbon. Le contexte a changé, dans la situation présente, les hommes utilisent le pétrole comme source d'énergie primaire. L'exploitation de cette source d'énergie fossile est l'un des piliers de l'économie industrielle, car, en le brûlant en petite quantité, on obtient suffisamment d'énergie pour faire tourner les moteurs qui entraînent toute sorte de véhicules et permet de faire fonctionner toute sorte de machines. De plus, on peut le transformer en grande quantité en des produits dérivés utilisables comme matières premières dans notre quotidien. La situation actuelle nous plonge dans un monde où l'énergie est disponible, abondante et très rapidement accessible.

Cette chance du pétrole est devenue l'un des grands défis d'aujourd'hui, car, on enregistre une hausse de la demande alors qu'au même moment, les réserves mondiales se vident de plus en plus. Pour les pays africains caractérisés par une pauvreté en sources d'énergie non renouvelables, le problème de l'accès des populations aux services énergétiques constitue un enjeu majeur pour asseoir les bases du développement. De plus, cet épuisement progressif de cette source classique d'énergie et les impératifs écologiques nous amèneront dans un futur proche à une diversification des sources d'énergie notamment à l'utilisation des énergies renouvelables pour lesquelles le monde dispose d'un potentiel non négligeable. Le soleil est une source d'énergie inépuisable non polluant et suffisamment exploitable.

La constante solaire exprimant la quantité d'énergie solaire que reçoit une surface de  $1 \text{ m}^2$  située à une distance d'une unité astronomique (ua) exposée perpendiculairement au rayon du soleil en l'absence d'atmosphère est de  $1367 \text{ W/m}^2$ . Au niveau du sol, l'intensité du rayonnement solaire est d'environ  $950 \text{ W/m}^2$  sous  $AM=1,5$ . Cependant, en plus de son utilisation comme source d'énergie lumineuse, celle-ci peut être transformée en énergie électrique par conversion photovoltaïque. L'effet photovoltaïque est découvert en 1839 par Henry Becquerel, mais les premières cellules solaires ont été créées plus d'un siècle après. Depuis lors, les scientifiques ne cessent d'approfondir leurs recherches dans ce domaine. Malgré les progrès réalisés, le rendement des cellules solaires demeure encore faible. Cette insuffisance en rendement dépend de plusieurs facteurs tels que la qualité des cellules, la nature du milieu environnant. Ainsi pour contrôler les paramètres électronique et électrique, et améliorer le rendement des cellules solaires photovoltaïques, plusieurs techniques de caractérisation de ces cellules en régime statique et dynamique ont été élaborées.

Dans ce mémoire, il s'est agi de faire une étude en modélisation à 3 dimensions d'une photopile bifaciale en régime statique placée dans un champ magnétique et sous éclairage multispectral : détermination des résistances shunt  $R_{sh}$  et série  $R_s$ .

Le présent travail est subdivisé en quatre chapitres.

Après l'étude bibliographique, le second chapitre est consacré à l'étude de la densité des porteurs de charge minoritaire en excès. Ensuite, l'étude de la réponse de la photopile et des paramètres de recombinaison sous champ magnétique  $B$  fait l'objet du troisième chapitre et le quatrième chapitre relate l'étude de la caractéristique statique  $I-V$  et des paramètres électriques  $R_s$  et  $R_{sh}$  sous champ magnétique.

La présente étude nous a permis d'aborder certains aspects théoriques de la photopile sous champ afin de pouvoir en tirer une conclusion et en dégager des perspectives.

# Chapitre I :

## Etude bibliographique

## **Introduction**

L'énergie photovoltaïque se base sur l'effet photoélectrique pour créer un courant électrique à partir d'une source lumineuse. Plusieurs sources concordantes révèlent que les premières cellules solaires auraient vu le jour vers 1954.

Par leurs capacités de transformer l'énergie lumineuse en énergie électrique, les photopiles solaires appartiennent à la famille des énergies renouvelables. Ces derniers comme leurs noms l'indiquent sont des énergies renouvelées ou régénérées naturellement à long terme. La recherche de cette famille d'énergie au détriment de celle des énergies non renouvelables devient de plus en plus utile et pourra dans un futur proche nous permettre une utilisation à très grande échelle.

Nous proposons dans ce chapitre, de façon extrêmement sommaire, d'examiner :

D'abord des études concernant le champ magnétique ;

Ensuite des études sur les paramètres phénoménologiques ;

Enfin des études sur les paramètres électriques et les paramètres de recombinaison.

### **I-1. Champ magnétique dans le système solaire**

#### **I.1.1 Définition**

En physique, le champ magnétique (ou induction magnétique, ou densité de flux magnétique) est une grandeur caractérisée par la donnée d'une intensité et d'une direction, définie en tout point de l'espace, et déterminée par la position et l'orientation d'aimants, d'électroaimants et le déplacement de charges électriques. La présence de ce champ se traduit par l'existence d'une force agissant sur les charges électriques en mouvement (dite force de Lorentz), et divers effets affectant certains matériaux (paramagnétisme, diamagnétisme ou ferromagnétisme selon les cas). La grandeur qui détermine l'interaction entre un matériau et un champ magnétique est la susceptibilité magnétique.

Pour comprendre la notion de champ, prenons l'exemple d'un feu de camp. A proximité du feu, chacun peut ressentir la chaleur dégagée mais ne la voit pas. Il s'agit ici d'un champ thermique. C'est

exactement la même chose pour le champ magnétique : l'intensité du champ est grande à proximité de la source et diminue rapidement lorsqu'on s'en écarte.

Un champ magnétique dipolaire peut être assimilé au champ créé par un aimant. Son intensité varie en fonction de la distance  $r$  à son centre, suivant la loi [1] :

$$\vec{B}(r) = B_0 \times \left( \frac{\vec{r}}{R_p} \right) \quad (\text{I-1})$$

Où  $B_0$  est l'intensité du champ magnétique à la surface de la planète c'est-à-dire au point où  $r = R_p$  (Rayon de la planète).

L'unité du champ d'induction est le Tesla (T). Une autre unité du champ magnétique parfois utilisée est le Gauss (G). Un Gauss est égal à 100 micro Tesla [1-2].

On peut montrer qu'un champ magnétique affecte le déplacement de particules chargées (négativement et positivement), en infléchissant leur trajectoire, mais sans modifier la valeur de leur vitesse. Il est ainsi utilisé pour courber leur trajectoire dans les accélérateurs de particules.

En effet, d'après la **loi de Lorentz**, la force qu'exerce un champ magnétique  $\mathbf{B}$  sur une particule de charge  $q$  se déplaçant à la **vitesse**  $\mathbf{v}$  est :

$$\vec{F} = q \times (\vec{v} \wedge \vec{B}) \quad (\text{I-2})$$

Ainsi, cette force est toujours orthogonale à la vitesse, donc son **travail** est nul :

$$W = \vec{F} \cdot \vec{dr} = 0 \quad (\text{I-3})$$

Par conséquent, la norme de la vitesse n'est pas influencée par le champ magnétique. En revanche, cette force peut modifier la direction de celle-ci.

Avec  $q$  la charge électrique élémentaire.

### I.1.2 Champ magnétique à la surface Terrestre

La terre comme élément du système solaire, possède un champ magnétique global, généré grâce à la rotation d'un noyau métallique (effet dynamo) [1]. A la surface de la terre, ce champ est de l'ordre du micro tesla ( $\mu\text{T}$ ) mais varie selon le lieu et le moment [2]. En plus, lorsqu'un courant passe dans un

conducteur, il existe à la fois un champ électrique et magnétique. Le magnétique est aussi lié au passage d'un courant (c'est-à-dire le mouvement de particules chargées) à travers un fil électrique. Et contrairement au champ électrique, le champ magnétique traverse facilement la végétation, les matériaux, ainsi que les habitations, il varie donc en fonction de l'heure de la journée, de l'équipement du lieu en appareils électriques et de l'activité des occupants du milieu,

Ainsi, le champ magnétique ambiant d'un milieu est la somme du champ magnétique produit par l'ensemble des courants circulant à l'intérieur et à l'extérieur du milieu et celui de la Terre comme élément du système solaire.

### **I.1.3. Champ magnétique sur les autres planètes**

Tout comme la Terre, les autres planètes : Jupiter, Mars, Mercure, Neptune, Saturne, et Uranus, possèdent des champs magnétiques [1].

Le 15 septembre 1998, les données scientifiques retournées par le magnétomètre de la sonde Global Surveyor, indiquent clairement que Mars possède un champ magnétique. Jusque là, les scientifiques n'étaient pas certains de la présence d'un champ magnétique autour de la planète rouge Mars (malgré l'étude de certaines sondes, comme Mars2, Mars 3, la série Mars 4, Mars 5, et Mars 6, Phobos 1 et Phobos 2). Mais ce champ magnétique n'excède pas le  $1/800^{\text{ème}}$  de la force du champ magnétique terrestre [3]

Mercure possède également un faible champ magnétique, révélé par la sonde Mariner 10, dont l'intensité représente environ 1% de l'intensité du champ magnétique de la Terre.

Le tableau I.1 suivant donne l'intensité du champ magnétique à la surface de certaines planètes de notre système solaire et de certaines étoiles [4].

**Tableau I.1** : valeurs de l'intensité du champ magnétique à la surface de certaines planètes et étoiles [4].

<b>Astre</b>	<b>densité</b>	<b>rayon (Km)</b>	<b>Champ prévu (gauss)</b>	<b>champ observé (gauss)</b>	<b>origine du champ</b>
<b>Soleil</b>		695000	1	1	dynamo active
<b>Mercure</b>	5.3	2425	0.0035	0.0020	dynamo active
<b>Vénus</b>	4.95	6070	0.001	nul ?	?
<b>Terre</b>	5.52	6400		0.3	dynamo active
<b>Lune</b>	3.6	1740	0.0004	0.00001	dynamo ancienne ?
<b>Mars</b>	3.95	3395	0.06	0.0006	dynamo ancienne
<b>Jupiter</b>	1.33	71300	14	4	dynamo active
<b>Saturne</b>	0.69	60100	5	?	dynamo active?
<b>Uranus</b>	1.56	24500	1.8	?	?
<b>Neptune</b>	2.27	25100	1.6	?	?
<b>étoile magnétique</b>		2000000	103	500-1000	dynamo active
<b>pulsar</b>		quelques km	1013	?	dynamo active
<b>quasar</b>			0.001	0.0001-0.001	?
<b>voie lactée</b>		50000 a.u.	0.00001	<0.00001	?

$$1 \text{ gauss} = 10^{-4} \text{ Tesla}$$

Ce tableau montre une disparité de l'intensité du champ magnétique entre les planètes. Mais sa valeur à la surface de la terre et de Jupiter n'est pas négligeable.

Le champ magnétique peut également varier rapidement lorsque la magnétosphère est perturbée par les changements dans l'activité solaire (orage magnétique). Ces perturbation peuvent être à l'origine de :

- coupures dans les grands réseaux de distribution électriques ;
- corrosions dans les pipe-lines ;
- pannes dans les satellites de télécommunication.

On se souvient que dans la mission de Mars Global Surveyor 1998, l'aérofreinage avait vu sa durée rallongée d'un an suite à un problème avec l'un de ses panneaux solaires [1].

Cela présume que le champ magnétique pourrait avoir un effet sur les performances des photopiles qui sont des matériaux semi conducteur générant des porteurs de charges qui sont donc exposés à l'effet du champ magnétique présent dans le milieu.

## **I-2. Modélisation à 3-D d'une cellule solaire au silicium multicristallin sous éclairage monochromatique [5]**

Dans cet article, l'auteur modélise un grain (fig I-1) ayant les hypothèses suivantes :

i°) Le grain provenant d'une plaquette de silicium est rectangulaire (fig I-1) et possède des propriétés électriques homogènes (taux de dopage, mobilité des porteurs minoritaires, durée de vie et longueur de diffusion).

ii°) Les limites du grain sont perpendiculaires à la jonction (fig I-1) et la vitesse de recombinaison aux joints de grain est constant le long des joints et est indépendant de l'éclairage sous AM1 (les conditions aux limites de l'équation de continuité sont linéaires).

iii°) les recombinaisons aux joints de grain sont négligeables dans l'émetteur fortement dopée et dans la zone de charge d'espace de la jonction, et les contributions des deux régions peuvent être calculées par des méthodes similaires à celles classique d'un model à une dimension.

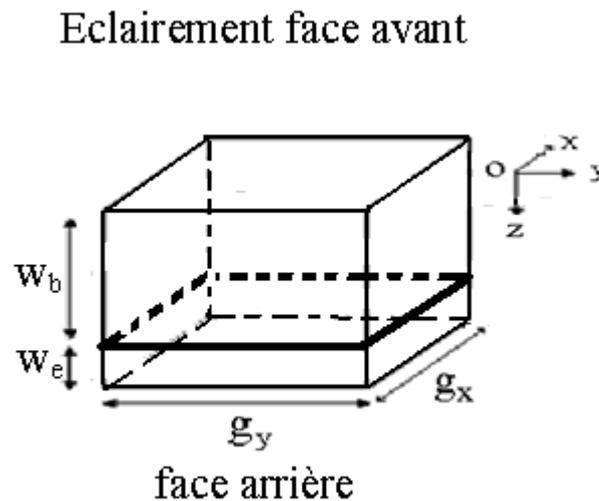
iv°) la résistance série en raison de la matière de base est prise en compte pendant que la résistance de contact est négligée.

v°) l'amélioration des plaquettes est considérée.

vi°) la surface avant est dotée d'une couche antireflet parfaite et les réflexions internes à la surface avant et arrière ne sont pas considérées.

vii°) la largeur et le taux de dopage de l'émetteur sont de  $0,2 \mu\text{m}$  respectivement  $5.10^{19} \text{ cm}^{-3}$  et le taux de dopage de la base est de  $5.10^{15} \text{ cm}^{-3}$ .

La figure I-1 suivante représente le grain susmentionné.



**Figure I.1 :** Grain ou cristallite de la photopile

### Distribution des porteurs de charge minoritaires

La distribution des porteurs de charge minoritaires en excès dans la base du grain éclairé est donnée par la solution, de l'équation de continuité à trois dimensions, suivante :

$$D_n \times \left[ \frac{\partial^2}{\partial x^2} \delta_n + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \delta_n + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \delta_n \right] = \alpha(\lambda) F_{ph}(\lambda) e^{-\alpha z} + \frac{\delta_n}{\tau} \quad (\text{I-4})$$

Dont la solution générale peut être écrite comme suit :

$$\delta_n(x, y, z) = \sum_k \sum_j Z_{k,j} \cos c_k x \cos c_j y \quad (\text{I-5})$$

Les coefficients  $c_k$  et  $c_j$  sont déterminés à partir des conditions aux limites aux joints de grain suivantes :

$$2D_n \left[ \frac{\partial}{\partial x} \delta_n \right]_{x=\pm \frac{g_x}{2}} = \mp S_g \delta_n \left( \pm \frac{g_x}{2}, y, z \right) \quad (I-6)$$

$$2D_n \left[ \frac{\partial}{\partial y} \delta_n \right]_{y=\pm \frac{g_y}{2}} = \mp S_g \delta_n \left( x, \pm \frac{g_y}{2}, z \right) \quad (I-7)$$

Et donc les  $c_k$  et  $c_j$  sont données par les équations transcendantes suivantes :

$$c_k \tan c_k \frac{g_x}{2} = \frac{S_g}{2D_n} \quad (I-8)$$

Et

$$c_j \tan c_j \frac{g_y}{2} = \frac{S_g}{2D_n} \quad (I-9)$$

Pour des conditions de court circuit et en supposant que la vitesse de recombinaison à la jonction, les conditions aux limites à la surface avant ( $z = 0$ ) et aux bords de la zone de charge d'espace sont respectivement :

$$\left[ \frac{\partial}{\partial x} \delta_n \right]_{z=0} = \frac{S_f}{2D_n} \quad (I-10)$$

Et

$$\delta_n(x, y, w_b) = 0 \quad (I-11)$$

Et puisque  $\cos c_k x$  (et  $\cos c_j y$ ) sont des fonction orthogonales, la dépendance de  $\delta_n$  par rapport à  $z$  peut s'écrire :

$$Z_{k,j}(z) = A_{k,j} \left[ a_{k,j} \cosh \frac{z}{L_{k,j}} + b_{k,j} \sinh \frac{z}{L_{k,j}} - e^{-\alpha z} \right] \quad (I-12)$$

Où

$$A_{k,j} = \frac{L_{k,j}^2}{\alpha^2 L_{k,j}^2 - 1} \times \frac{16\alpha(\lambda)F_{ph}(\lambda)}{D_n} \times \frac{\sin(c_k \frac{g_x}{2}) \sin(c_j \frac{g_y}{2})}{D^* [c_k g_x + \sin(c_k g_x)] [c_j g_y + \sin(c_j g_y)]} \quad (I-13)$$

$$a_{k,j} = \frac{\left( \alpha L_{k,j} + \frac{S_f L_{k,j}}{D_n} \right) \sinh \frac{w_b}{L_{k,j}} + e^{-\alpha w_b}}{\cosh \frac{w_b}{L_{k,j}} + \frac{S_f L_{k,j}}{D_n} \sinh \frac{w_b}{L_{k,j}}} \quad (I-14)$$

Et

$$b_{k,j} = \frac{S_f L_{k,j}}{D_n} (a_{k,j} - 1) - \alpha L_{k,j} \quad (I-15)$$

Avec

$$L_{k,j} = (L_n^{-2} + c_k^2 + c_j^2)^{-1/2} \quad (I-16)$$

### Densité de photocourant de court circuit

La densité de photocourant de court circuit générée dans la base pour un éclairement monochromatique est déduite de la distribution des porteurs minoritaires en excès par :

$$J_b(\lambda) = \frac{qD_n}{g_x g_y} \int_{-\frac{g_x}{2}}^{\frac{g_x}{2}} \int_{-\frac{g_y}{2}}^{\frac{g_y}{2}} \left[ \frac{\partial}{\partial z} \delta_n(x, y, z) \right]_{z=w_b} dx dy \quad (I-17)$$

Ce qui donne :

$$J_b(\lambda) = 4qD_n \sum_k \sum_j \frac{A_{j,k}}{L_{k,j}} \times \frac{\sin(c_k \frac{g_x}{2}) \sin(c_j \frac{g_y}{2})}{c_k g_x c_j g_y} \times \left\{ \alpha L_{k,j} e^{-\alpha w_b} + \frac{\left[ \sinh \frac{w_b}{L_{k,j}} + \frac{S_f L_{k,j}}{D_n} \cosh \frac{w_b}{L_{k,j}} \right] e^{-\alpha w_b - \alpha L_{k,j} + \frac{S_f L_{k,j}}{D_n}}}{\cosh \frac{w_b}{L_{k,j}} + \frac{S_f L_{k,j}}{D_n} \sinh \frac{w_b}{L_{k,j}}} \right\} \quad (I-18)$$

La contribution de l'émetteur, en supposant que la vitesse de recombinaison à la jonction Sb est calculée selon le model classique comme suit :

$$J_e = q \frac{\alpha L_p}{\alpha^2 L_p^2 - 1} F_{ph} e^{-\alpha w_b} \times \frac{\left[ \sinh \frac{w_e}{L_p} + \frac{S_b L_p}{D_p} \cosh \frac{w_e}{L_p} \right] + \left( \alpha L_p + \frac{S_b L_p}{D_p} \right) e^{-\alpha w_e}}{\frac{S_b L_p}{D_p} \sinh \frac{w_e}{L_p} - \cosh \frac{w_e}{L_p}} \quad (I-19)$$

Où  $L_p$  et  $D_p$  sont la longueur de diffusion respectivement le coefficient de diffusion des trous minoritaires dans l'émetteur et  $w_e$  est l'épaisseur de l'émetteur.

Par la même méthode, la contribution de la zone de charge d'espace est donnée par :

$$J_s = q F_{ph} e^{-\alpha w_e} (1 - e^{-\alpha w_j}) \quad (I-20)$$

Où  $w_j$  est la largeur de la zone de charge d'espace

L'intégrale sur le spectre solaire est réalisée numériquement pour obtenir le photocourant total.

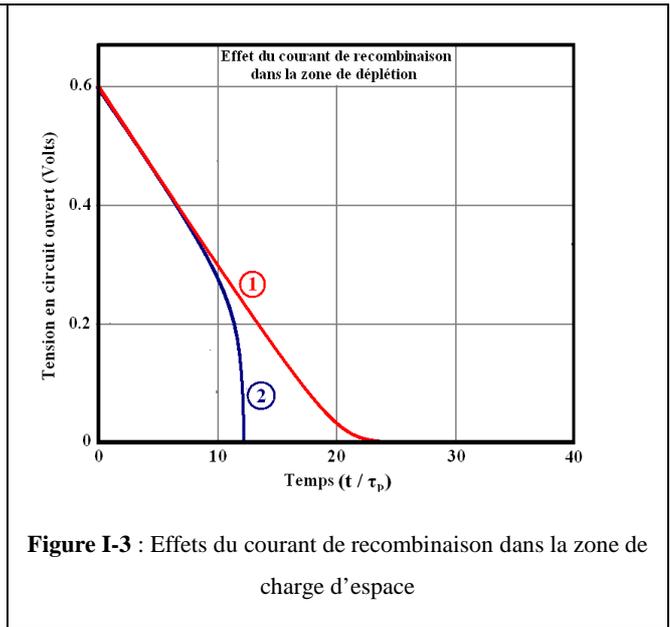
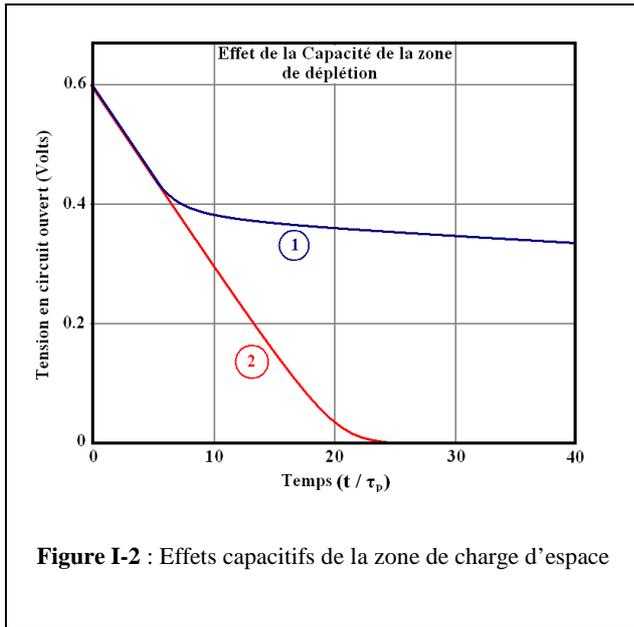
### **I-3. Méthodes de mesure des paramètres phénoménologiques des photopiles au silicium polycristallin**

**Depletion layer effects in the open-circuit-voltage-decay lifetime measurement** (Effets de la zone de déplétion sur la tension en circuit ouvert: mesure de la durée de vie) [6]

Dans cet article, l'auteur propose une nouvelle méthode de détermination de la durée de vie des porteurs minoritaires de charge par la mesure de la tension en circuit ouvert aux bornes d'une diode de semi-conducteurs. L'objectif de son étude est de montrer les effets des différents paramètres phénoménologiques de stockage des porteurs dans la base qu'il considère quasi neutre et les phénomènes recombinants des porteurs.

Après avoir fait ses calculs, l'auteur trace les profils de phototension en circuit ouvert en fonction du temps, d'une part en considérant le cas idéal c'est-à-dire sans phénomènes de recombinaison (courant de génération  $J_{gen} = 0$ ) et d'autre part en tenant en compte des effets capacitifs de la zone de charge d'espace et des effets du courant de recombinaison des porteurs comme nous l'indique les figures (I-2) et (I-3). Ainsi en faisant une étude comparative des deux courbes de la figure (I-3), il constate que la phototension décroît jusqu'à ce que le courant de recombinaison  $J_{rec}$  devienne sensiblement égale au courant de diffusion à partir duquel on note une chute pour couper l'axe des temps.

Ainsi la durée de vie des porteurs minoritaires de charge peut être obtenue grâce à la partie linéaire de la courbe à partir de la valeur de phototension égale environ à  $V(t) = 0.5V$ .



Selon l'auteur, une augmentation de la chute de phototension serait due à une simple résistance shunt ou de fuite grâce au courant de recombinaison dans la zone de charge d'espace. Pour une telle diode la résistance de fuite est souvent due aux effets des extrémités et peut être éliminé en les gravant ou en les passivant. Autrement dit, le courant de recombinaison a une propriété intrinsèque ce qui fait qu'il est souvent difficile à éliminer une fois que la jonction est formée.

Au terme de cette étude, nous pouvons retenir que la description théorique complète de la détermination de la durée de vie des porteurs dans la base par la mesure de la phototension en circuit ouvert est complexe.

Un modèle précis du processus de décroissance doit tenir en compte de la diffusion des porteurs minoritaires de charge qui dépend du mode d'éclairage et d'autres phénomènes physiques tels que la capacité de la zone de déplétion, du courant de recombinaison et des processus de dopage au niveau de la jonction.

Lorsque la méthode de mesure de la tension en circuit ouvert est utilisée pour déterminer la durée de vie des porteurs minoritaires de charge, la décroissance doit être contrôlée par les phénomènes recombinants. Il est opportun, si une décroissance linéaire est observée, que la durée de vie des porteurs minoritaires de charge soit déterminée facilement à partir de la constante de temps.

#### I.4 Measurement of AC parameters of Gallium Arsenide (GaAs/Ge) solar by Impedance Spectroscopy [7]

### (Mesure des paramètres électriques d'une cellule en Arséniure de Gallium « GaAs/Ge », par spectroscopie d'impédance)

Dans cet article, il est proposé une méthode expérimentale de détermination des paramètres électrique. L'étude est faite sur une cellule solaire en Arséniure de Gallium par la méthode d'Impédance spectroscopique.

Les mesures sont réalisées sur une cellule GaAs/Ge de taille (20 x 40 mm), la température de la salle est de  $22^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ . La cellule est polarisée à l'obscurité, la tension de polarisation est comprise entre 0,3V et 0,9V et l'amplitude du signal alternatif est de 10 mV avec une fréquence variant de 1HZ à 60 KHZ.

Le spectre d'impédance obtenue est un demi-cercle (diamètre  $R_p$ ), elle permet de déterminer les paramètres électriques de la cellule ( $R_s, R_p, C$ )

Des observations faites sur cette méthode nous, permettent de dire que lorsque la cellule est en situation de circuit ouvert les demi-cercles ne sont plus parfaits.

Les résistances parallèles  $R_p$  qui est un paramètre important de la cellule est la combinaison de deux résistances : la résistance dynamique et la résistance shunt  $R_{sh}$ . En Générale  $R_{sh} \gg R_D$  lorsque ces cellules sont en situation de circuit ouvert, ce qui entraîne que  $R_p = R_D$ .

L'expression de la résistance dynamique est donnée par la relation suivante :

$$R_D = \frac{V_T \cdot \eta}{I} \quad (\text{I-21})$$

$V_T$  la tension thermique

$\eta$  diode factor (facteur d'idéalité)

$I$  le photocourant de la cellule solaire

### I-5. Method for measurement of all recombination parameters in the base region of solar cells (Méthode de mesure des paramètres de recombinaison dans la base d'une photopile solaire) [8]

Dans cet article l'auteur étudie de l'influence du champ magnétique sur le photocourant d'une photopile bifaciale éclairée par sa face arrière. Il montre que le champ magnétique appliqué parallèlement à la

surface de la jonction p-n provoque une diminution du photocourant produit par la photopile. Ainsi une méthode simple et concise permettra de mesurer la mobilité des porteurs minoritaires de charge, la vitesse de recombinaison sur la face arrière, la longueur de diffusion et la durée de vie des porteurs photocréés. Pour les déterminer par cette méthode, il suffit de mesurer le photocourant de court-circuit de la photopile éclairée en utilisant deux longueurs d'onde différentes en présence et absence de champ magnétique.

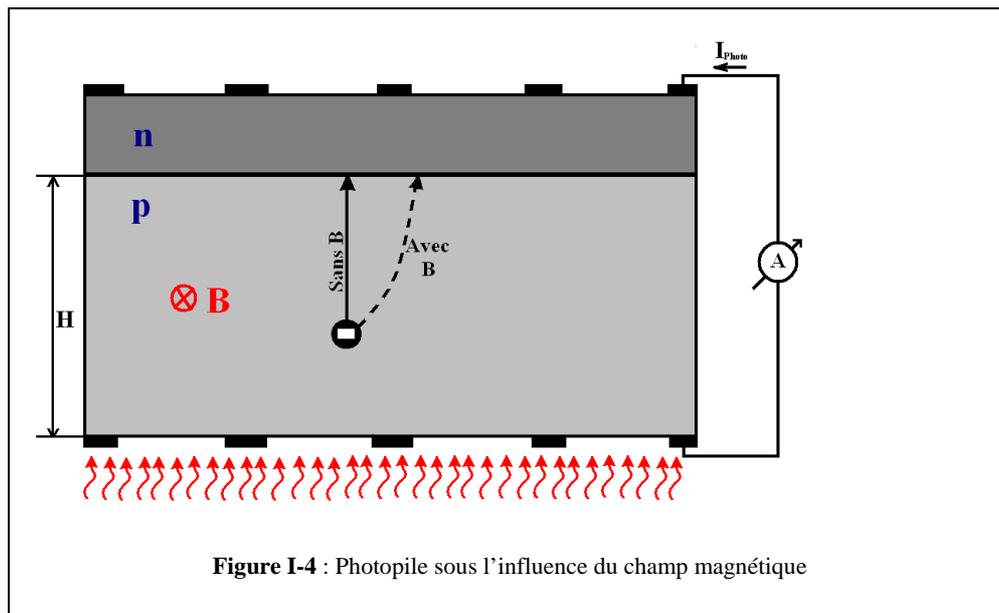


Figure I-4 : Photopile sous l'influence du champ magnétique

Le principal facteur limitant du rendement de la photopile est la recombinaison des porteurs minoritaires de charge qui contribuent à la production de courant. Pour améliorer ce rendement de production des photopiles, il est nécessaire de contrôler les paramètres de recombinaison durant leur recherche et leur développement. Des méthodes existantes sont essentiellement consacrées à la détermination d'un seul paramètre de recombinaison. C'est dans ce sens que cette méthode très concise a été proposée dans cet article pour mesurer à la fois un ensemble de paramètres de recombinaison (la longueur de diffusion et la vitesse de recombinaison sur la face arrière de la photopile) en tenant compte des paramètres de transport (le coefficient de diffusion et la mobilité des porteurs) dans la base de la photopile. Cette méthode est basée sur la mesure du photocourant de court-circuit de la photopile bifaciale sous l'influence du champ magnétique. Dans son étude l'auteur considère une photopile bifaciale dont la base de type-p est illuminée par une lumière monochromatique afin que le photocourant  $I_{photo}$  soit prédominant sur le courant produit par les électrons  $I_b$ . En plus les porteurs minoritaires de charge photogénérés par exemple

les électrons seront collectés au niveau de la jonction p-n sous l'influence d'un champ magnétique d'induction  $B$  parallèle à la surface de la jonction p-n.

L'auteur suppose dans son étude que les dimensions des surfaces illuminées sont beaucoup plus grandes que la longueur de diffusion des porteurs minoritaires de charge et que ces porteurs n'atteignent pas les limites de la photopile.

La résolution de l'équation de continuité donne en considérant le champ électrique inhérent nul, la composante du photocourant comme suit :

$$I_n = \frac{2 A q F (1 - R) \cdot \eta}{N_B} \times \left( 1 + \frac{S_n \theta_n}{D_n \alpha} \right) \quad (\text{I-22})$$

avec :

$$N_B = \left( 1 + \frac{S_n L_n \sqrt{\theta_n}}{D_n} \right) \times \exp\left(\frac{H \sqrt{\theta_n}}{L_n}\right) - \left( \frac{S_n L_n \sqrt{\theta_n}}{D_n} - 1 \right) \times \exp\left(-\frac{H \sqrt{\theta_n}}{L_n}\right) \quad (\text{I-23})$$

où

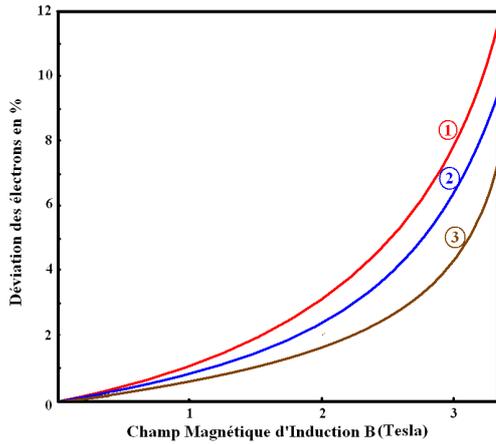
$$\theta_n = 1 + (\mu_n B)^2 \quad (\text{I-24})$$

$A$  est la surface illuminée,  $q$  la charge de l'électron,  $F$  l'intensité du rayonnement lumineux,  $R$  le coefficient de réflexion de la lumière,  $\eta$  le rendement quantique,  $\alpha$  le coefficient d'absorption,  $S_n$  la vitesse de recombinaison sur la face arrière de la photopile,  $L_n$  la longueur de diffusion des électrons,  $D_n$  le coefficient de diffusion des électrons,  $\mu_n$  la mobilité des électrons et  $B$  l'induction du champ magnétique.

La variation de photocourant des porteurs minoritaires de charge est sous cette forme :

$$\Delta I_n = \frac{(I_n|_{B=0} - I_n|_{B \neq 0})}{I_n|_{B=0}} \quad (\text{I-25})$$

Cette variation dépend de l'induction du champ magnétique comme indiqué sur la figure (I-5) suivante :



**Figure I-5 :** Variation de photocourant des électrons en fonction de l'intensité du champ magnétique avec  $S_n = 10^3$  cm/S,  $\mu_n = 10^3$  cm<sup>2</sup>/s,  $L_n = 10^2$   $\mu$ m,  $H = 200$   $\mu$ m,  $\alpha_1 = 0,5$   $\mu$ m<sup>-1</sup>,  $\alpha_2 = 0,05$   $\mu$ m<sup>-1</sup>,  $\alpha_3 = 0,10$   $\mu$ m<sup>-1</sup>.

L'auteur remarque que la variation de photocourant  $\Delta I_a$  croît, ce qui signifie que le photocourant décroît avec une augmentation de l'intensité du champ magnétique. Sous l'influence du champ magnétique le photocourant diminue avec les grandes valeurs de coefficient d'absorption c'est-à-dire loin de la jonction p-n où les porteurs minoritaires de charge sont photogénérés.

Pour obtenir tous les paramètres de recombinaison de la photopile, il suffit de changer certains paramètres extérieurs de la photopile tels que l'induction du champ magnétique B et la longueur de d'onde de la lumière par mesure du courant de court-circuit.

Lorsque le champ magnétique est nul  $B = 0T$  et pour deux valeurs de longueur d'onde, le photocourant peut s'écrire sous la forme suivante :

$$I_1 = \frac{2AqF\eta}{N} \times \left( 1 + \frac{S_n}{D_n \alpha_1} \right) \quad (I-26)$$

et

$$I_2 = \frac{2AqF\eta}{N} \times \left( 1 + \frac{S_n}{D_n \alpha_2} \right) \quad (I-27)$$

$\alpha_1$  et  $\alpha_2$  sont les coefficients d'absorption pour chaque la longueur d'onde considérée et N la valeur de  $N_B$  pour  $B = 0T$ .

Lorsque le champ magnétique est non nul ( $B \neq 0T$ ), le photocourant  $I_n$  est donné pour chaque longueur d'onde par :

$$I_{1B} = \frac{2AqF\eta}{N_B} \times \left( 1 + \frac{S_n \theta_n}{D_n \alpha_1} \right) \quad (\text{I-28})$$

et

$$I_{2B} = \frac{2AqF\eta}{N_B} \times \left( 1 + \frac{S_n \theta_n}{D_n \alpha_2} \right) \quad (\text{I-29})$$

A partir des deux équations (I-17) et (I-18) nous obtenons l'équation (I-19) suivante :

$$\frac{S_n}{D_n} = \frac{1 - \left( \frac{I_1}{I_2} \right)}{\left[ \left( \frac{I_1}{I_2} \right) / \alpha_2 \right] - \left( \frac{1}{\alpha_1} \right)} \quad (\text{I-30})$$

Ainsi l'expression de la mobilité suivante (I-20) des porteurs minoritaires de charge est obtenue en introduisant les équations (I-17) et (I-18) dans celle (I-19).

$$\mu_n = \frac{1}{rB} \times (\theta_n - 1)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{I-31})$$

où r est le facteur Hall

Ceci permet ainsi de trouver l'expression de  $\theta_n$  :

$$\theta_n = \frac{1 - \left( \frac{I_{1B}}{I_{2B}} \right)}{1 - \left( \frac{I_1}{I_2} \right)} \times \frac{\alpha_1 \cdot \left( \left( \frac{I_1}{I_2} \right) - \alpha_2 \right)}{\alpha_1 \cdot \left( \left( \frac{I_{1B}}{I_{2B}} \right) - \alpha_2 \right)} \quad (\text{I-32})$$

Nous pouvons aboutir à l'expression du coefficient de diffusion des porteurs minoritaires de charge par déduction à partir de la relation d'Einstein suivante :

$$D_n = \frac{kT}{q} \mu_n \quad (\text{I-33})$$

avec k la constante de Boltzmann et T la température absolue.

La vitesse de recombinaison à la face arrière de la photopile est donnée à partir de l'expression (I-19) par la relation ci-dessous :

$$S_n = D_n \cdot \frac{1 - \left(\frac{I_1}{I_2}\right)}{\left[\left(\frac{I_1}{I_2}\right) / \alpha_2\right] - \left(\frac{1}{\alpha_1}\right)} \quad (\text{I-34})$$

Le rapport des équations (I-15) et (I-17) donne l'équation transcendante suivante (I-24) :

$$\frac{I_B}{I_1} = \frac{1 + S_n \left(\frac{\theta_n}{D_n}\right) \cdot \alpha_1}{1 + \left(\frac{S_n}{D_n}\right) \cdot \alpha_1} \times \frac{N}{N_B} \quad (\text{I-35})$$

La solution d'une telle équation transcendante (I-24), permet de déterminer la longueur de diffusion  $L_n$  des porteurs minoritaires de charge pour chaque valeur de l'épaisseur  $H$  de la base fixée.

Ainsi la durée de vie porteurs minoritaires de charge est donnée par :

$$\tau_n = \frac{L_n^2}{D_n} \quad (\text{I-36})$$

En réalité tous les paramètres de recombinaison, impliquant les phénomènes de transport  $D_n$  et  $\mu_n$  dans la base de la photopile peuvent être déterminés par mesure de photocourant de court-circuit pour deux longueurs d'onde différentes d'une part en l'absence de champ magnétique et d'autre part sous l'influence de ce dernier. Notons que, ces deux longueurs d'onde sont choisies de telle sorte que  $\alpha H \gg 1$  et  $\alpha^2 L_n^2 \gg 1$ . L'intensité de la lumière doit être maintenue constante.

Aussi les paramètres des porteurs minoritaires de charge sont déterminés expérimentalement. Une grille métallique similaire à celle utilisée sur la face avant et servant de contact ohmique, est placée à la face arrière. Pour voir l'influence du champ magnétique sur la photopile, il suffit de placer cette dernière entre les deux pôles d'un électroaimant créant ainsi un champ parallèle à la surface de la jonction p-n.

Nous remarquons que, les résultats expérimentaux obtenus sont en bon accord avec ceux trouvés lorsqu'on utilise la méthode de la réponse spectrale.

## **I-6. Vitesses de recombinaison intrinsèques d'une photopile bifaciale à jonction horizontale et à trois dimensions [9]**

### I-6-1. Définition

Par définition un joint de grain est le lieu de contact de deux cristaux de même nature mais désorientés l'un par rapport à l'autre.

### I-6-2. Caractérisation des joints de grain

La structure du joint de grain dépend de son axe de rotation et de la translation entre les origines des deux réseaux en jonction ainsi que de la géométrie de leur interface.

On distingue :

- Le joint de torsion si la rotation s'effectue autour d'un axe perpendiculaire au plan de l'interface ;
- Le joint de flexion si l'axe de rotation est contenu dans le plan du joint ;
- Le joint quelconque qui est la résultante des deux précédentes.

Toutefois, ces joints de grain deviennent des sous joints de grain si la désorientation est faible (angle de rotation  $< 10^0$ ).

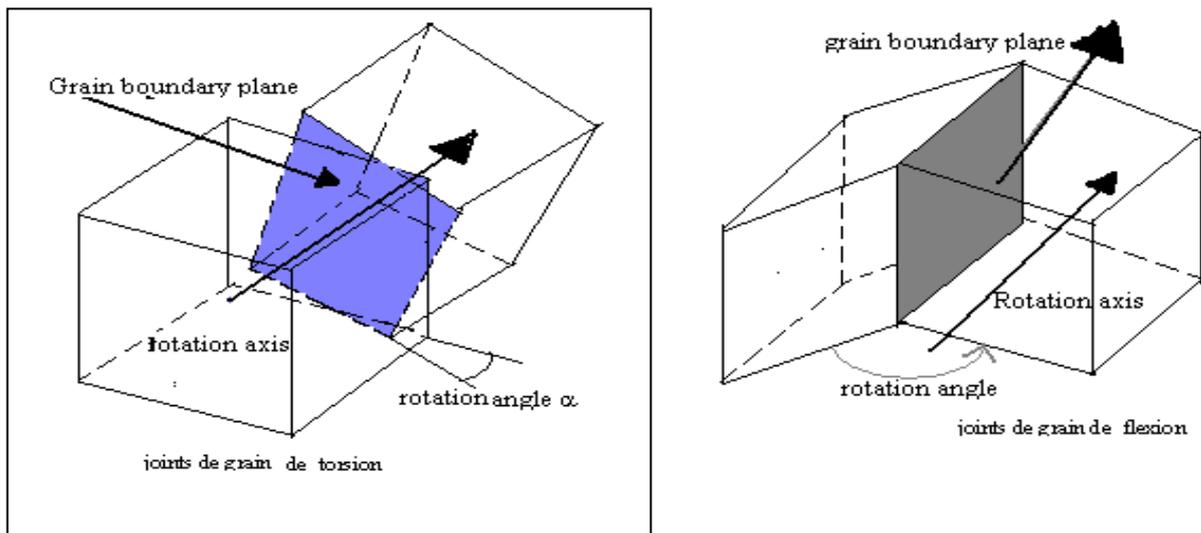


Figure I-6 : Schéma descriptif des joints de grain de torsion et de flexion

Au niveau de ces joints de grain existent des vitesses de recombinaison des porteurs de charges minoritaires en excès dans la base. Ce qui diminue considérablement le rendement de la photopile.

Aussi, le nombre de joints de grain est proportionnel à la taille des grains. Par suite, nous pouvons élucider l'effet de cette dernière sur les vitesses de recombinaison à la jonction et à la face arrière.

### I-6-3. Effet des joints de grain sur la vitesse de recombinaison intrinsèque Sf

Les courbes de variation de la densité de photocourant en fonction des vitesses de recombinaison Sb et Sf montrent que pour les grandes valeurs de Sb et de Sf la densité de photocourant présente un gradient nul. Nous pouvons donc déterminer l'expression de Sf à partir de l'équation (I-1) suivante :

$$\left[ \frac{\partial J}{\partial Sb} \right]_{Sb > 10^4} = 0 \quad (I-37)$$

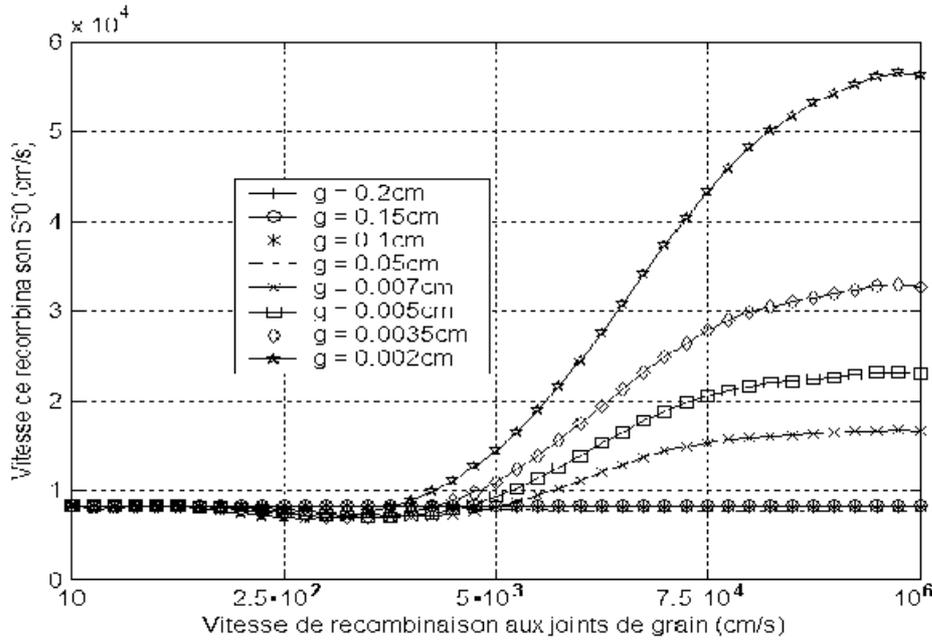
D'où, sous éclairage polychromatique, Sf<sub>0</sub> s'écrit :

$$Sf_0 = D \cdot \frac{\sum_k \sum_j \left[ \frac{R_{k,j}}{\cosh\left(\frac{H}{L_{k,j}}\right)^2} \cdot \sum_{i=1}^3 \beta_i \cdot \left[ b_i - \left( \frac{1}{L_{k,j}} \cdot \sinh\left(\frac{H}{L_{k,j}}\right) + b_i \cdot \cosh\left(\frac{H}{L_{k,j}}\right) \right) \cdot \exp(-b_i \cdot H) \right] \right]}{\sum_k \sum_j \left[ \frac{R_{k,j}}{\cosh\left(\frac{H}{L_{k,j}}\right)^2} \cdot \sum_{i=1}^3 \beta_i \cdot \left[ \left( \cosh\left(\frac{H}{L_{k,j}}\right) + b_i \cdot L_{k,j} \cdot \sinh\left(\frac{H}{L_{k,j}}\right) \right) \cdot \exp(-b_i \cdot H) - 1 \right] \right]} \quad (I-38)$$

L<sub>kj</sub> est la longueur de diffusion effective

Sf<sub>0</sub> ne dépend que des paramètres intrinsèques de la photopile.

La figure (I-2) suivante montre la variation de la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction en fonction de la vitesse de recombinaison aux joints de grain sous éclairage polychromatique pour différentes tailles de grain.



**Figure I-7 :** profil de la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction en fonction de celle aux joints de grain pour différentes tailles de grain,  $D = 26 \text{ cm}^2/\text{s}$ ,  $H = 0.03 \text{ cm}$  et  $AM = 1,5$

La figure (I-2) ci-dessus montre que la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction diminue avec la taille de grain et augmente avec la vitesse de recombinaison aux joints de grain.

#### I-6-4. Effet des joints de grain sur la vitesse de recombinaison à la face arrière

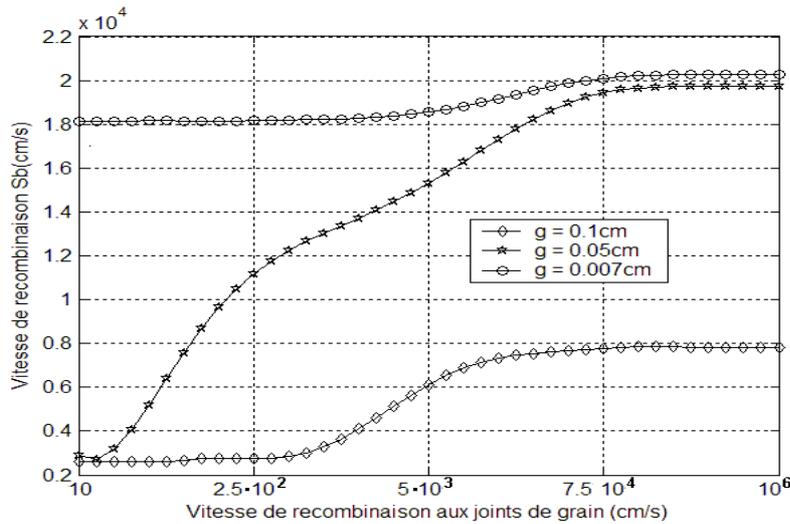
De même, compte tenu du gradient nul présenté par la courbe de variation de la densité de courant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction, nous posons :

$$\left[ \frac{\partial J}{\partial S_f} \right]_{S_f > 10^4} = 0 \quad (\text{I-39})$$

En résolvant cette équation (I-30), nous déduisons l'expression de  $S_b$ . Lorsque la photopile est éclairée par une lumière polychromatique, elle s'écrit :

$$S_b = D \cdot \frac{\sum_k \sum_j \left( R_{k,j} \cdot \left( \frac{D}{L_{k,j}} \right)^2 \cdot \sum_{i=1}^3 \beta_i \cdot \left[ b_i \cdot \exp(-b_i \cdot H) - b_i \cdot \cosh\left(\frac{H}{L_{k,j}}\right) + \frac{1}{L_{k,j}} \cdot \sinh\left(\frac{H}{L_{k,j}}\right) \right] \right)}{\sum_k \sum_j \left( R_{k,j} \cdot \left( \frac{D}{L_{k,j}} \right)^2 \cdot \sum_{i=1}^3 \beta_i \cdot \left[ \exp(-b_i \cdot H) - \cosh\left(\frac{H}{L_{k,j}}\right) + b_i \cdot L_{k,j} \cdot \sinh\left(\frac{H}{L_{k,j}}\right) \right] \right)} \quad (\text{I-40})$$

La figure (I-3) suivante montre la variation de la vitesse de recombinaison à la face arrière  $S_b$  en fonction de la vitesse de recombinaison aux joints de grain pour différentes tailles de grain.



**Figure I-8** : Profil de la vitesse de recombinaison en fonction de la vitesse de recombinaison aux joints de grain pour différentes tailles de grain ( $D = 26\text{ cm}^2/\text{s}$ ,  $H = 0.03\text{ cm}$  et  $AM = 1,5$ ).

Les courbes de la figure (I-3) ci-dessus, montrent que la vitesse de recombinaison à la face arrière croît lorsque la vitesse de recombinaison aux joints de grain augmente. Cette hausse est beaucoup plus significative lorsque la taille de grain diminue.

Les études relatives aux grains du substrat polycristallin sont réalisées dans les modèles à trois dimensions d'une photopile.

### **I-7. Vitesses de recombinaison intrinsèques d'une photopile bifaciale à jonction horizontale et à une dimension [10-11]**

Les vitesses de recombinaison intrinsèques caractérisant certains phénomènes recombinatoires des porteurs minoritaires en excès au niveau des interfaces et des surfaces des photopiles (mono- ou bifaciales), font l'objet d'études pertinentes afin de contrôler leurs qualités. C'est ainsi, des études ont été menées sur la détermination des expressions des vitesses de recombinaisons en régimes statique, dynamique transitoire et dynamique fréquentiel en éclairage monochromatique ou polychromatique.

## Régime statique

### - Photopile sans champ magnétique

L'équation de continuité des porteurs minoritaires de charges est de la forme:

$$D \cdot \frac{\partial^2 \delta_{\alpha}(x)}{\partial x^2} - \frac{\delta_{\alpha}(x)}{\tau} = -G_{\alpha}(x) \quad (\text{I-41})$$

Où

- $\delta_{\alpha}(x)$  est la densité des électrons générés dans la base
- $G_{\alpha}(x)$  est le taux de génération en lumière blanche des porteurs de charge en excès en fonction de la profondeur de la base
- $D$  est le coefficient de diffusion
- $\tau$  est la durée de vie moyenne des porteurs minoritaires de charge

L'expression du taux de génération en lumière blanche des porteurs minoritaires de charge s'écrit :

$$G_{\alpha}(x) = n \sum_{i=1}^3 a_i \cdot \left[ \varepsilon \cdot e^{-b_i \cdot x} + \gamma \cdot e^{b_i \cdot (H - x)} \right] \quad (\text{I-42})$$

Les termes  $a_i$  et  $b_i$  sont des coefficients tabulés à l'éclairage solaire sous AM=1,5.

$n$  étant le nombre de soleil, il traduit le niveau d'éclairage de la photopile.

Le tableau ci-dessous nous donne les valeurs de  $a_i$  et  $b_i$  sous AM=1,5.

**Tableau I. 2 :** valeurs tabulés du rayonnement solaire sous AM=1,5 [12]

$a_i$ ( $\text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$b_i$ ( $\text{cm}^{-1}$ )
$6,13 \cdot 10^{20}$	6630
$0,54 \cdot 10^{20}$	1000
$0,0991 \cdot 10^{20}$	130

H est la profondeur de la base

$\alpha$ ,  $\varepsilon$  et  $\gamma$  paramètres définis à partir du mode d'éclairage comme indiqué au tableau ci-après :

**Tableau I.3** : valeurs des paramètres  $\alpha$ ,  $\varepsilon$  et  $\gamma$  pour les différents modes d'éclairages de la photopile

Mode d'éclairage	$\alpha$	$\varepsilon$	$\gamma$
Face avant	1	1	0
Face arrière	2	0	1
Simultané	3	1	1

L'équation de continuité peut s'écrire sous cette forme:

$$\frac{\partial^2 \delta_{\alpha}(x)}{\partial x^2} - \left(\frac{1}{L}\right)^2 \cdot \delta_{\alpha}(x) = -\frac{g_{\alpha}(x)}{D} \quad (\text{I-43})$$

La résolution de l'équation (II-3) donne la distribution de la densité de porteurs minoritaires de charge en excès en fonction de la profondeur de la base. La densité des porteurs minoritaire est par l'expression (II-7) :

$$\delta_{\alpha}(x) = \left( A_{\alpha} \cdot \cosh\left(\frac{x}{L}\right) + C_{\alpha} \cdot \sinh\left(\frac{x}{L}\right) - \sum_{i=1}^3 \beta_i \left[ \varepsilon \cdot e^{-b_i \cdot x} + \gamma \cdot e^{-b_i \cdot (H-x)} \right] \right) \quad (\text{I-44})$$

$$\text{avec } \beta_i = \frac{n \cdot (L)^2 \cdot a_i}{D \cdot \left( (L)^2 \cdot b_i^2 - 1 \right)}$$

Où les constantes  $A_{\alpha}$  et  $C_{\alpha}$  sont déterminées par les conditions aux limites suivantes :

- A la jonction ( $x = 0$ ) :

$$D \cdot \left( \frac{\partial \delta_{\alpha}(x)}{\partial x} \right)_{x=0} = S f_{\alpha} \cdot \left( \delta_{\alpha}(x) \right)_{x=0} \quad (\text{I-45})$$

- A la face arrière ( $x = H$ ) :

$$D \cdot \left( \frac{\partial \delta_{\alpha}(x)}{\partial x} \right)_{x=H} = -S b_{\alpha} \cdot \left( \delta_{\alpha}(x) \right)_{x=H} \quad (\text{I-46})$$

où

- $Sf_{\alpha}$  est la vitesse de recombinaison à la jonction de la photopile
- $Sb_{\alpha}$  est la vitesse de recombinaison en face arrière de la photopile
- H est l'épaisseur de la base de la photopile

Connaissant l'expression de la densité de porteur minoritaire, nous pouvons déterminer respectivement la densité du photocourant en utilisant la loi de **FICK**.

La densité de photocourant est obtenue en résolvant l'équation de transport des porteurs minoritaire donnée par l'expression (I-7)

$$J = q \cdot D \cdot \left( \frac{\partial \delta_{\alpha}(x)}{\partial x} \right)_{x=0} \quad (I-47)$$

Les courbes de variation de la densité de photocourant en fonction des vitesses de recombinaison  $Sb$  et  $Sf$  montrent que pour les grandes valeurs de  $Sb$  et de  $Sf$  la densité de photocourant présente un gradient nul. Nous pouvons donc déterminer l'expression de  $Sf$  à partir de l'équation (I-8) suivante :

$$\left[ \frac{\partial J}{\partial Sb} \right]_{Sb > 10^4} = 0 \quad (I-48)$$

$$\left[ \frac{\partial J}{\partial Sf} \right]_{Sf > 10^4} = 0 \quad (I-49)$$

Lorsque la photopile est sous éclairement polychromatique par sa face avant ou par sa face arrière, les expressions des vitesses de recombinaison intrinsèques à la jonction et à la face arrière, sont données par :

$$Sf_1 = \sum_{i=1}^3 \frac{D \cdot \left[ b_i \cdot L - \exp(-b_i \cdot H) \cdot \left( sh\left(\frac{H}{L}\right) + b_i \cdot L \cdot ch\left(\frac{H}{L}\right) \right) \right]}{L \cdot \left[ \exp(-b_i \cdot H) \cdot \left( ch\left(\frac{H}{L}\right) + b_i \cdot L \cdot sh\left(\frac{H}{L}\right) \right) - 1 \right]} \quad (I-50)$$

$$Sb_1 = \sum_{i=1}^3 \frac{D \cdot \left[ sh\left(\frac{H}{L}\right) + b_i \cdot L \cdot \left( \exp(-b_i \cdot H) - ch\left(\frac{H}{L}\right) \right) \right]}{L \cdot \left[ b_i \cdot L \cdot sh\left(\frac{H}{L}\right) + \exp(-b_i \cdot H) - ch\left(\frac{H}{L}\right) \right]} \quad (I-51)$$

ou

$$Sf_2 = \sum_{i=1}^3 \frac{D \cdot \left[ sh\left(\frac{H}{L}\right) + b_i \cdot L \cdot \left( \exp(-b_i \cdot H) - ch\left(\frac{H}{L}\right) \right) \right]}{L \cdot \left[ b_i \cdot L \cdot sh\left(\frac{H}{L}\right) + \exp(-b_i \cdot H) - ch\left(\frac{H}{L}\right) \right]} \quad (I-52)$$

$$Sb_2 = \sum_{i=1}^3 \frac{D \cdot \left[ b_i \cdot L - \exp(-b_i \cdot H) \cdot \left( sh\left(\frac{H}{L}\right) + b_i \cdot L \cdot ch\left(\frac{H}{L}\right) \right) \right]}{L \cdot \left[ \exp(-b_i \cdot H) \cdot \left( ch\left(\frac{H}{L}\right) + b_i \cdot L \cdot sh\left(\frac{H}{L}\right) \right) - 1 \right]} \quad (I-53)$$

En éclairant simultanément les deux faces avant et arrière de la photopile, les vitesses de recombinaison à la jonction et à la face arrière sont respectivement :

$$Sf_3 = \sum_{i=1}^3 \frac{D \cdot \left[ b_i \cdot L \cdot \left( 1 + ch\left(\frac{H}{L}\right) \right) \cdot (1 - \exp(-b_i \cdot H)) - sh\left(\frac{H}{L}\right) \cdot (1 + \exp(-b_i \cdot H)) \right]}{L \cdot \left[ b_i \cdot L \cdot sh\left(\frac{H}{L}\right) \cdot (\exp(-b_i \cdot H) - 1) + \left( ch\left(\frac{H}{L}\right) - 1 \right) \cdot (1 + \exp(-b_i \cdot H)) \right]} \quad (I-54)$$

$$Sb_3 = \sum_{i=1}^3 \frac{D \cdot \left[ b_i \cdot L \cdot \left( 1 + ch\left(\frac{H}{L}\right) \right) \cdot (\exp(-b_i \cdot H) - 1) + sh\left(\frac{H}{L}\right) \cdot (1 + \exp(-b_i \cdot H)) \right]}{L \cdot \left[ b_i \cdot L \cdot sh\left(\frac{H}{L}\right) \cdot (1 - \exp(-b_i \cdot H)) + \left( 1 - ch\left(\frac{H}{L}\right) \right) \cdot (1 + \exp(-b_i \cdot H)) \right]} \quad (I-55)$$

### - Photopile sous champ magnétique

Quand on applique un champ magnétique sur la photopile, le coefficient et la longueur de diffusion varient en fonction de l'intensité de ce champ magnétique pour une durée de vie moyenne des porteurs minoritaires supposée constante. Ainsi, des expressions (I-50) à (I-55), il suffit de remplacer le coefficient de diffusion  $D$  par  $D^*$  et la longueur de diffusion  $L$  par  $L^*$  pour obtenir de nouvelles expressions des vitesses de recombinaison intrinsèques à la jonction et à la face arrière qui varient en fonction de l'intensité du champ magnétique appliqué sur la photopile bifaciale. Ces vitesses de recombinaison diminuent toutes en fonction du champ magnétique.

## **Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons mis en évidence l'importance du champ magnétique dans le système solaire. Nous avons aussi fait des études sur les paramètres phénoménologiques, électriques et de recombinaison en régime statique.

Nous pourrions ainsi faire une étude en modélisation à 3-D d'une Photopile bifaciale en régime statique placée dans un champ magnétique et sous éclairage multispectral.

## Introduction

Les photopiles solaires sont fabriquées à base de matériaux semi conducteur. Ceux-ci occupent la quatrième colonne de tableau périodique de Mendeleïev tels que le silicium et le germanium. Ils peuvent aussi être composés d'alliage d'éléments de la troisième colonne et de la cinquième colonne tels que le nitrure de bore, l'arséniure de gallium et le phosphure de d'indium. Mais le silicium est l'un des matériaux le plus utilisé dans la fabrication des cellules photovoltaïques du fait de son abondance dans la nature.

Cependant on distingue les cellules solaires au silicium monocristallin et les cellules solaires au silicium polycristallin. Cette dernière domine le marché des photopiles du fait de son coût faible et de son rendement amélioré.

Dans ce chapitre, des approximations seront faites à partir du modèle illustratif de photopile polycristallin pour en tirer un modèle colonnaire dans lequel un seul grain sera pris en compte pour étudier la densité des porteurs de charge minoritaires en excès dans la base de la photopile en fonction des différents paramètres intervenants pour un éclairage par la face avant.

## II-1. Résolution de l'équation de diffusion

### II-1-1 Présentation de la photopile bifaciale

Nous présentons sur la figure II.1 suivante un modèle illustratif ainsi qu'un modèle colonnaire d'une cellule solaire bifaciale au silicium polycristallin.

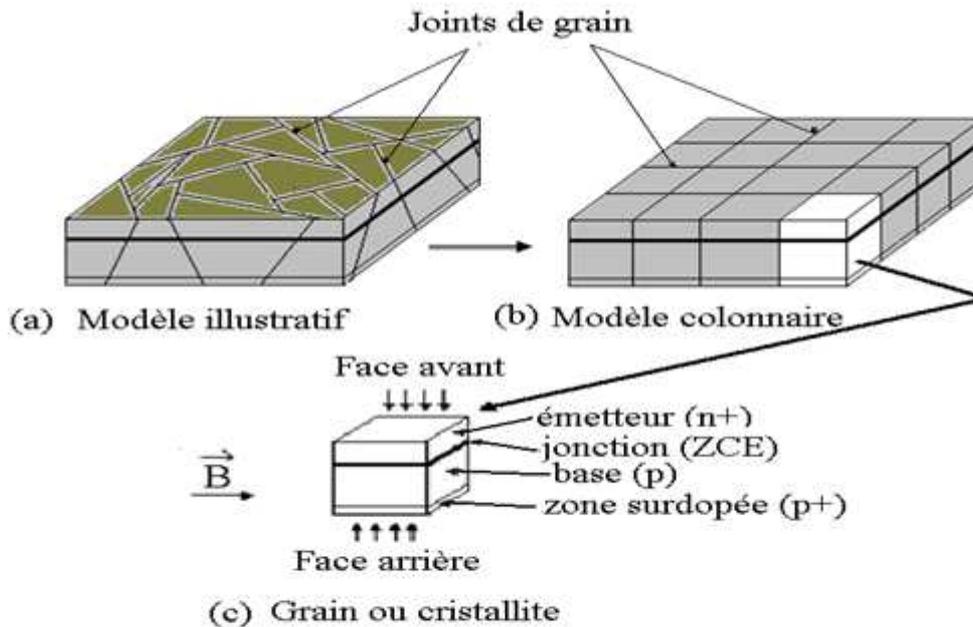


Figure II.1 : Modèle illustratif et modèle colonnaire d'une photopile bifaciale au silicium polycristallin

La représentation d'un grain est donnée à la figure II.2.

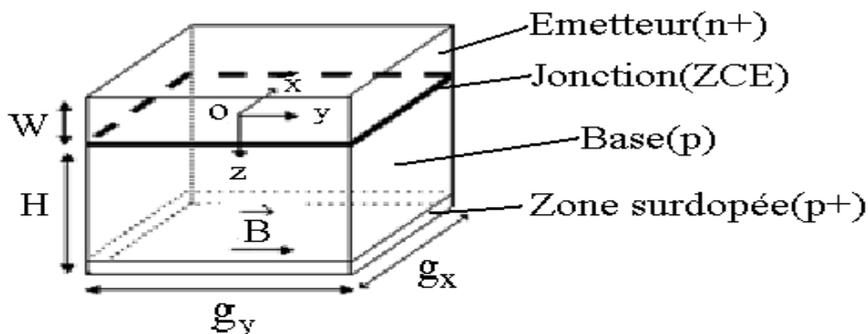


Figure II.2 : Grain ou cristallite de la photopile

Comme susmentionné dans les figures précédentes, la photopile bifaciale comprend quatre parties :

- **L'émetteur de type (n<sup>+</sup>)** dont l'épaisseur est faible (0.5 à 1µm), elle est fortement dopée en atomes donneurs (10<sup>17</sup> à 10<sup>19</sup> cm<sup>-3</sup>) et recouverte d'une grille métallique qui permet de collecter les charges électriques photocréées.
- **La zone de charge d'espace ZCE** ou encore jonction qui se situe entre l'émetteur et la base est caractérisée par un champ électrique intense qui sépare les paires électron-trou qui arrivent à la jonction.
- **La base de type (p)** : elle est de grande dimension (300 à 400 µm) et peu dopée en atomes accepteurs (10<sup>15</sup> à 10<sup>17</sup> cm<sup>-3</sup>). C'est la zone de prédominance des phénomènes de génération, diffusion et recombinaison.
- **Le BSF (back surface Field)** : c'est la zone située en face arrière de la base, surdopée en atomes accepteurs (p<sup>+</sup>) (10<sup>17</sup> à 10<sup>19</sup> cm<sup>-3</sup>) par rapport à la base et crée un champ électrique arrière qui renvoie vers la jonction les porteurs minoritaires photocréés près de la face arrière.

Dans le cadre de notre étude qui porte sur une photopile éclairée par sa face avant, nous ferons les approximations suivantes :

La contribution de l'émetteur au photocourant sera négligée par rapport à celle de la base [1].

Le champ cristallin sera négligé au niveau de la base de la photopile, seule le champ électrique à la jonction sera pris en compte [2].

On va utiliser un modèle mathématique tridimensionnel, ou la jonction de la photopile sera prise comme origine de l'axe z, le centre de ce plan contenant la jonction sera considéré comme l'origine de l'axe xoy et g<sub>x</sub>=g<sub>y</sub> ; H=300µm.

Lorsqu'on éclaire la photopile par une lumière polychromatique, il y'a création de paires électron-trou dans la base. La diffusion des porteurs minoritaires que sont les électrons, photocréés dans la base est régie par l'équation de continuité.

## II-1-2. Equation de continuité

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \delta(x, y, z) + [1 + (\mu B)^2] \frac{\partial^2}{\partial y^2} \delta(x, y, z) + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \delta(x, y, z) - \frac{\delta(x, y, z)}{L^{*2}} = - \frac{G(z)}{D^*} \quad (\text{II-1})$$

$\delta(x, y, z)$  : la densité des porteurs de charge minoritaires

$G(z)$  : le taux de génération

$L^*$  : la longueur de diffusion

$D^*$  : le coefficient de diffusion

$\mu$  : la perméabilité magnétique du matériau

On pose  $C(B)^2 = 1 + (\mu B)^2$  et donc on a :

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \delta(x, y, z) + C(B)^2 \frac{\partial^2}{\partial y^2} \delta(x, y, z) + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \delta(x, y, z) - \frac{\delta(x)}{L^{*2}} = - \frac{G(z)}{D^*} \quad (\text{II-2})$$

### II-1-2-1. Coefficient de diffusion et longueur de diffusion

Ici, le coefficient de diffusion  $D^*$  est fonction du champ magnétique et est donné par la relation suivante :

$$D^* = \frac{D}{1 + (\mu B)^2} \quad (\text{II-3})$$

La longueur de diffusion  $L^*$ , est fonction non seulement du champ magnétique  $B$  mais aussi de la durée de vie  $\tau$  des porteurs photocréés. Son expression est la suivante :

$$L^* = \sqrt{\tau \cdot D^*} \quad (\text{II-4})$$

Les figures II-2 et II-3 suivantes représentent la courbe du coefficient de diffusion en fonction du champ magnétique  $B$  respectivement la longueur de diffusion en fonction du champ magnétique pour différentes valeurs de la durée de vie  $\tau$  des porteurs de charge photocréés.

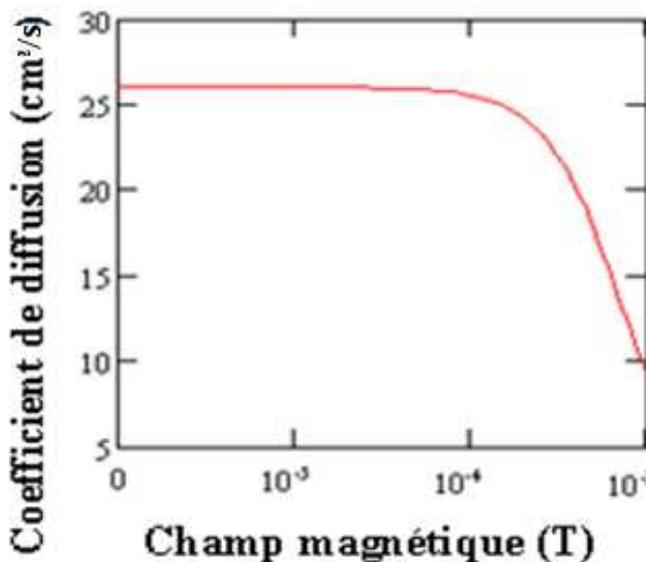


Figure II-3 : Coefficient de diffusion  $D^*$  en fonction du champ magnétique  $B$

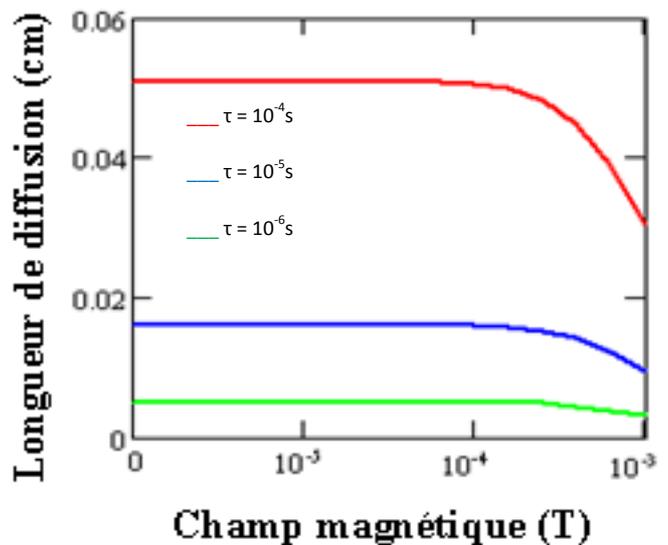


Figure II-4 : Longueur de diffusion  $L^*$  en fonction du champ magnétique  $B$  et pour différentes valeur de la durée de vie  $\tau$  des porteurs photocréés

Dans la figure II-3 où est représenté le coefficient de diffusion en fonction du champ magnétique, nous remarquons que le coefficient de diffusion diminue quand le champ magnétique augmente.

Nous remarquons aussi dans la figure II-4 où est représentée la longueur de diffusion en fonction du champ magnétique que pour  $\tau$  donnée toutes les courbes décroissent quand le champ B croît. Cependant la longueur de diffusion croit quand  $\tau$  croît ce qui explique que la courbe la plus basse correspond à la valeur de la durée de vie la plus basse.

### II-1-2-2. Taux de génération

$$G(z) = n \sum_{i=1}^3 a_i e^{-b_i z} \quad (\text{II-5})$$

Ou n est le nombre de soleil

### II-1-2-3. Conditions aux limites

$$D^* \frac{\partial}{\partial z} \delta(x, y, z) = S_f \delta(x, y, z) \quad \text{pour } z = 0 \quad (\text{II-6})$$

$$D^* \frac{\partial}{\partial z} \delta(x, y, z) = -S_b \delta(x, y, z) \quad \text{pour } z = H \quad (\text{II-7})$$

La solution générale de cette équation est :

$$\delta(x, y, z) = \sum_j \sum_k Z_{j,k}(z) \cos C_j x \cos C_k(B) y \quad (\text{II-8})$$

$$\text{ou} \quad C_k(B) = \frac{C_k}{C(B)} \quad (\text{II-9})$$

Les conditions aux limites aux joints de grain sont :

$$\left. \frac{\partial}{\partial x} \delta(x, y, z) \right]_{x=\pm \frac{g_x}{2}} = \mp \frac{S_g}{2D^*} \delta \left( \pm \frac{g_x}{2}, y, z \right) \quad (\text{II-10})$$

$$\left. \frac{\partial}{\partial y} \delta(x, y, z) \right]_{y=\pm \frac{g_y}{2}} = \mp \frac{S_g}{2D^*} \delta \left( x, \pm \frac{g_y}{2}, z \right) \quad (\text{II-11})$$

Où  $S_g$  représente la vitesse de recombinaison aux joints de grain

En résolvant ces conditions aux limites, on abouti à deux équations transcendantes à partir desquelles on détermine les  $c_k$  et les  $c_j$  soit graphiquement soit par un programme.

Ces équations sont les suivantes :

$$\tan C_j \frac{g_x}{2} = \frac{1}{C_j} \times \frac{S_g}{2D^*} \quad (\text{II-12})$$

$$\tan C_k(B) \frac{g_y}{2} = \frac{1}{C_k(B)} \times \frac{S_g}{2D^*} \quad (\text{II-13})$$

Graphiquement, on résous ces équations en posant :

pour l'équation (II-11)

$$f(C_j) = \tan C_j \frac{g_x}{2} \quad \text{et} \quad h(C_j) = \frac{1}{C_j} \times \frac{S_g}{2D^*} \quad (\text{II-14})$$

Et on trace sur la figure II-5 suivante  $f(C_j)$  et  $h(C_j)$  en fonction de  $C_j$

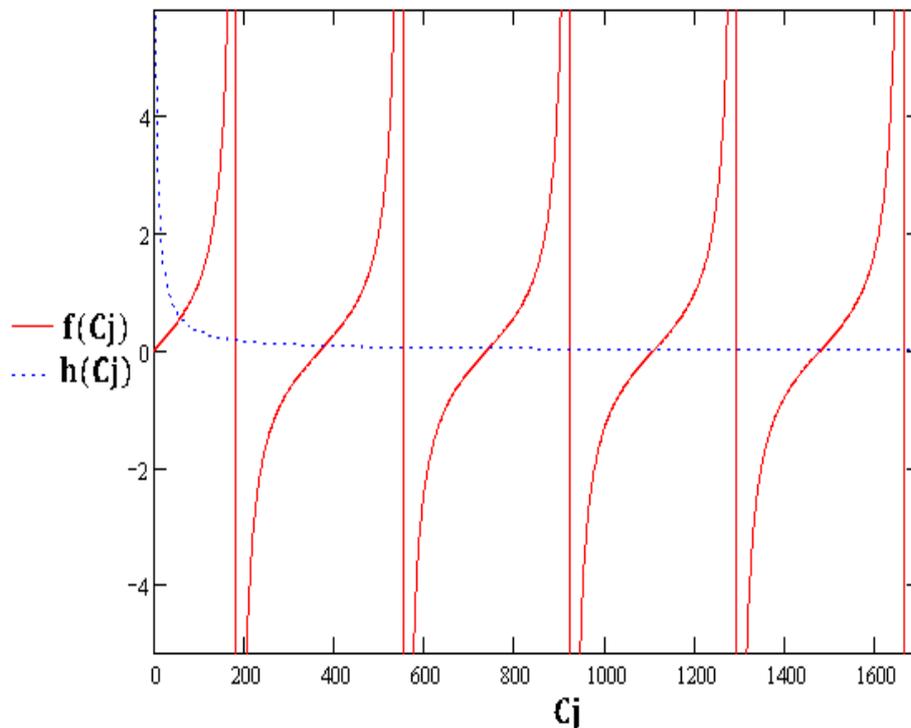


Figure II-5 :  $f(C_j)$  et  $h(C_j)$  en fonction de  $C_j$

Les points d'intersection des deux courbes déterminent les  $C_j$  et les  $C_k$  sont obtenus de la même manière que précédemment en décomposant l'équation (II-12) en  $f(C_k)$  et  $h(C_k)$ .

En intégrant la solution générale dans l'équation de continuité, on obtient :

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} Z_{j,k}(z) - (C_j^2 + C_k^2 + \frac{1}{L_{j,k}^{*2}}) Z_{j,k}(z) = \frac{-G(z)}{D^*} \frac{16 \sin(C_j \frac{g_x}{2}) \sin(C_k(B) \frac{g_y}{2})}{[C_j g_x + \sin(C_j g_x)][C_k(B) g_y + \sin(C_k(B) g_y)]} \quad (\text{II-15})$$

Et donc en posant :

$$\frac{1}{L_{j,k}^{*2}} = C_j^2 + C_k^2 + \frac{1}{L^{*2}} \quad (\text{II-16})$$

$$\frac{1}{D_{j,k}^*} = \frac{16 \sin(C_j \frac{g_x}{2}) \sin(C_k(B) \frac{g_y}{2})}{D^* [C_j g_x + \sin(C_j g_x)][C_k(B) g_y + \sin(C_k(B) g_y)]} \quad (\text{II-17})$$

On a :

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} Z_{j,k}(z) - \frac{Z_{j,k}(z)}{L_{j,k}^{*2}} = \frac{-G(z)}{D_{j,k}^*} \quad (\text{II-18})$$

Et cette équation a pour solution

$$Z_{j,k}(z) = A_{j,k} \sinh \frac{z}{L_{j,k}^*} + B_{j,k} \cosh \frac{z}{L_{j,k}^*} + \sum_{i=1}^3 k_i e^{-b_i z} \quad (\text{II-19})$$

$$\text{Avec } k_i = -\frac{n}{D_{j,k}^*} \frac{a_i L_{j,k}^{*2}}{b_i^2 L_{j,k}^{*2} - 1} \quad (\text{II-20})$$

Et les constantes  $A_{j,k}$  et  $B_{j,k}$  sont déterminés à partir des conditions aux limites à la jonction et à la face arrière citées dans les équations (II-6) et (II-7) précédentes.

## II-2. Densité des porteurs de charge minoritaire en excès dans la base de la photopile

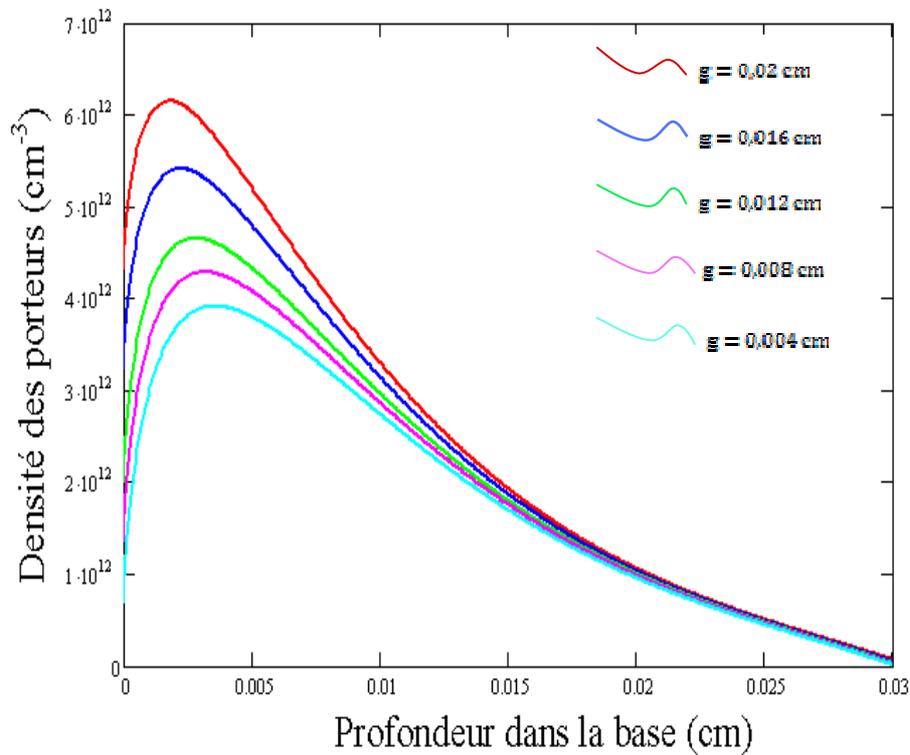
### II-2-1. Profil de la densité des porteurs de charge minoritaires en excès dans la base de la photopile à une dimension et à trois dimensions

L'expression de la densité des porteurs de charge minoritaires en excès dans la base de la photopile est donnée par la relation II-21 suivante :

$$\delta(x, y, z) = \sum_j \sum_k \left[ A_{j,k} \sinh \frac{z}{L_{j,k}^*} + B_{j,k} \cosh \frac{z}{L_{j,k}^*} + \sum_{i=1}^3 k_i e^{-b_i z} \right] \cos C_j x \cos C_k(B)y \quad (\text{II-21})$$

### II-2-1-1. Influence de la taille des grains

Nous représentons sur la figure II-6 suivante la densité des porteurs de charge minoritaires en excès en fonction de la profondeur dans la base pour différentes valeurs de la taille des grains les autres paramètres étant fixes.



**Figure II-6 :** Densité des porteurs de charge minoritaires en excès en fonction de la profondeur dans la base pour différentes valeurs de la taille des grains avec  $B = 1,122.10^{-6} \text{ T}$  ;  $S_g = 56,234 \text{ cm/s}$  ;  $x = 0 \text{ cm}$  ;  $y = 0 \text{ cm}$

Sur la figure II-6 où est représentée, la densité des porteurs de charge minoritaires en excès en fonction de la profondeur dans la base pour différentes valeurs de la taille des grains, nous constatons que les courbes ont des formes identiques et comprennent essentiellement deux zones :

Une petite zone de forte densité, situé près de la jonction où le gradient de la densité est positif. Dans cette zone, les porteurs de charges photocréés possèdent une énergie suffisante leur permettant de

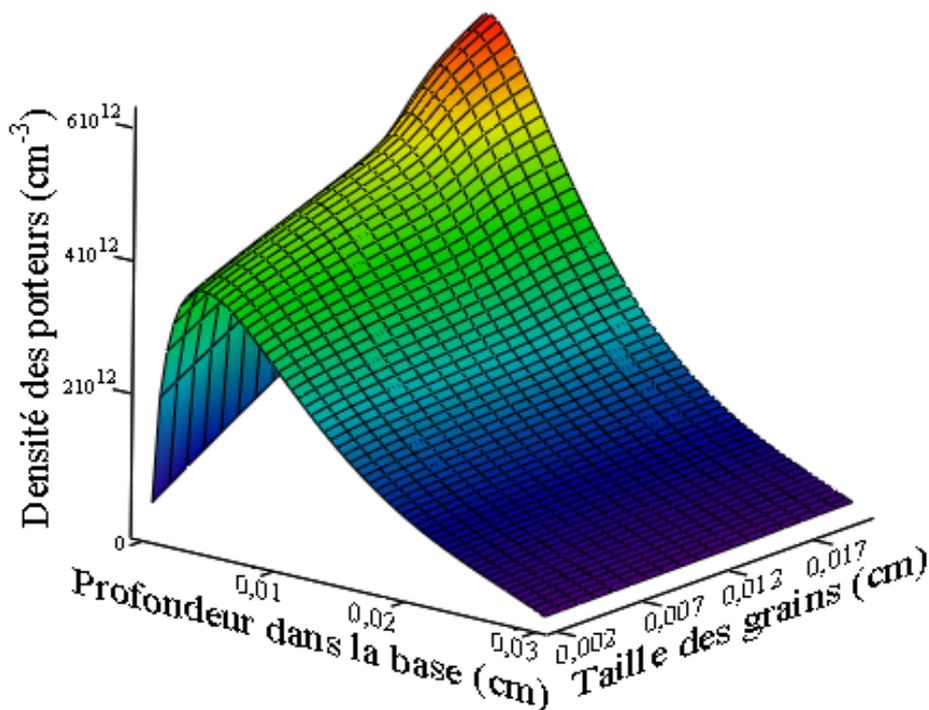
traverser la jonction et de participer à la production de courant électrique. Ici, nous enregistrons une très forte collecte des porteurs à travers la jonction du à leur abondance à proximité de la jonction.

Une deuxième zone de faible densité relativement plus étendue que la première où le gradient de la densité est négatif.

Les porteurs de charge situés dans cette zone n'ont pas assez d'énergie leur permettant de traverser la jonction et de participer à la production de courant électrique. Ces derniers disparaissent dans la base par recombinaison en volume et à la surface arrière.

Nous constatons que, lorsque la taille des grains augmente, la densité des porteurs aussi augmente. Ceci s'explique par le fait que lorsque la taille des grains augmente, la surface éclairée aussi augmente et donc la génération de porteurs de charge augmente du fait de l'augmentation des photons incident pénétrant le matériau. Cependant, la figure II-6 n'est qu'une représentation à une dimension de deux effets que sont la profondeur dans la base et la taille des grains. Une représentation à trois dimensions nous permettra de voir simultanément ces deux effets et à toutes les valeurs que nous utilisons.

Nous représentons donc sur la figure II-7 suivante la densité des porteurs de charge minoritaires en excès en fonction de la profondeur dans la base et en fonction de la taille des grains, les autres paramètres étant fixes.

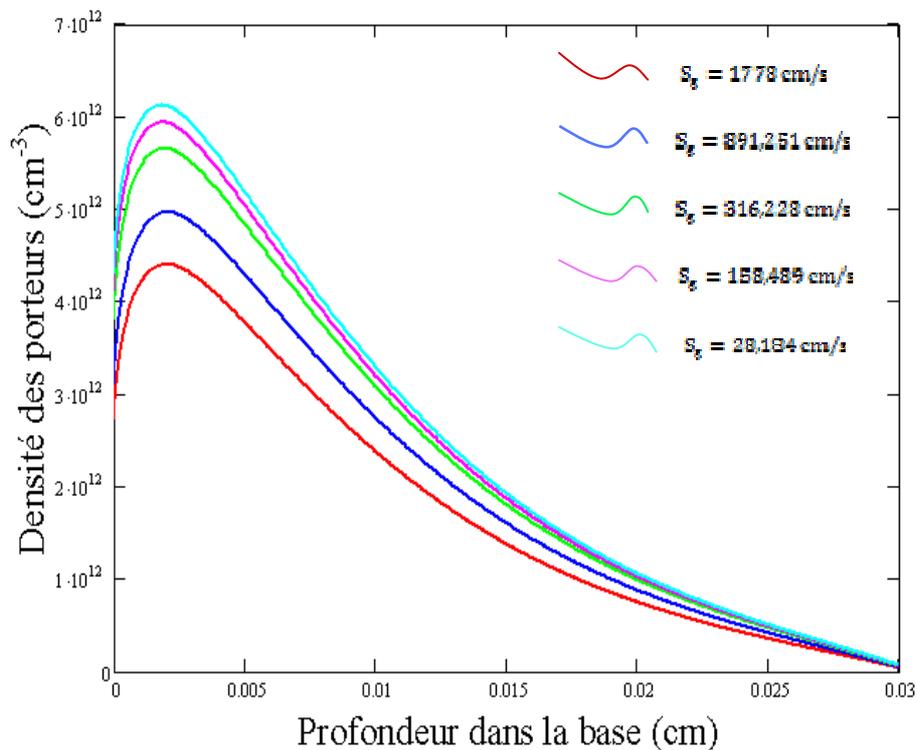


**Figure II-7 :** Densité des porteurs de charge minoritaires en excès en fonction de la profondeur dans la base et en fonction de la taille des grains avec  $B = 1,778.10^{-6}T$  ;  $S_g = 56,234 \text{ cm/s}$  ;  $x = 0 \text{ cm}$  ;  $y = 0 \text{ cm}$

Les observations de la figure II-6 restent inchangées, il s'agissait juste de présenter à trois dimensions l'effet de la taille des grains sur la densité en fonction de la profondeur dans la base.

### II-2-1-2. Influence de la vitesse de recombinaison aux joints de grain

Nous représentons sur la figure II-8 la densité des porteurs de charge minoritaires en excès en fonction de la profondeur dans la base pour différentes valeurs de la vitesse de recombinaison aux joints de grain, les autres paramètres étant fixes.

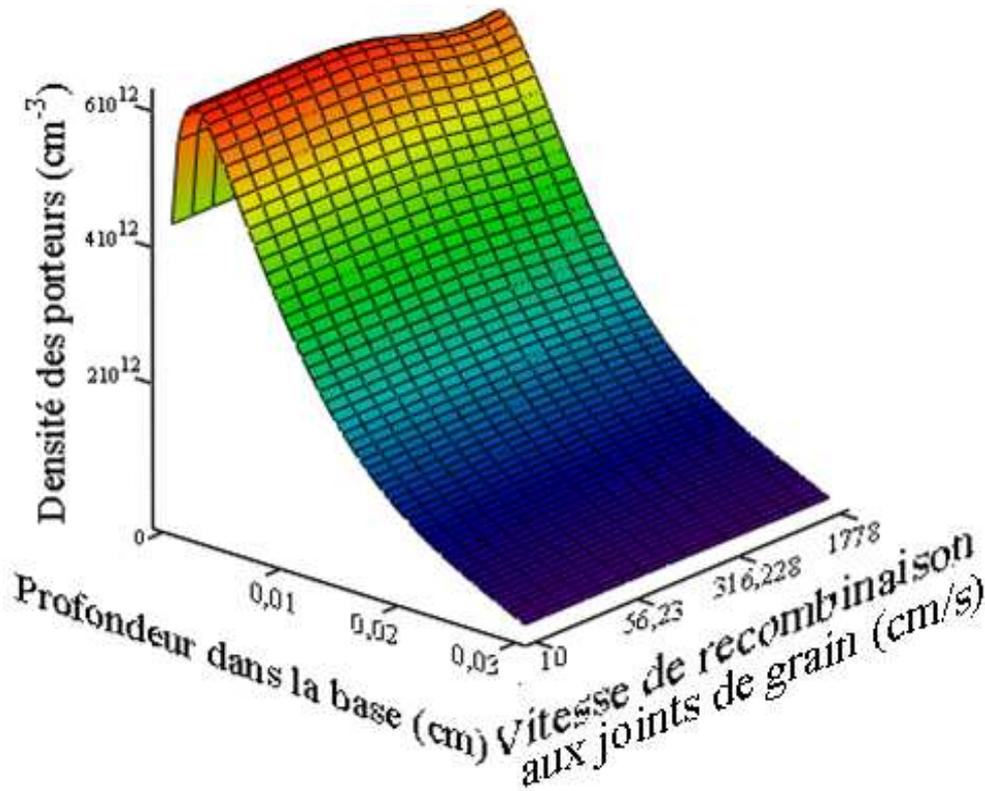


**Figure II-8 :** Densité des porteurs de charge minoritaires en excès en fonction de la profondeur dans la base pour différentes valeurs de la vitesse de recombinaison aux joints de grain avec  $B = 1,122 \cdot 10^{-6}$  T ;  $g = 0,02$  cm ;  $x = -9 \cdot 10^{-3}$  cm ;  $y = -9 \cdot 10^{-3}$  cm

Les remarques sur la forme et les parties des courbes de la figure II-6 restent les mêmes. Tandis que les effets de la vitesse de recombinaison aux joints de grains s'opposent à ceux de la taille des grains. Lorsque la vitesse de recombinaison aux joints de grains augmente, la densité des porteurs de charge dans la base de la photopile diminue. La vitesse de recombinaison aux joints de grains augmente donc les pertes en porteurs de charge diminuant ainsi la densité des porteurs de charge photocréés dans la base de la photopile. Cependant la figure II-8 nous donne des informations sur l'effet de la vitesse de recombinaison aux joints que pour quelques valeurs choisies arbitrairement.

Nous représentons donc sur la figure II-9 la densité des porteurs de charge minoritaires en excès en fonction de la profondeur dans la base et en fonction de la vitesse de recombinaison aux joints de grain,

les autres paramètres étant fixes pour visualiser l'effet de la vitesses de recombinaison aux joints de grains pout toutes les valeurs utilisées.

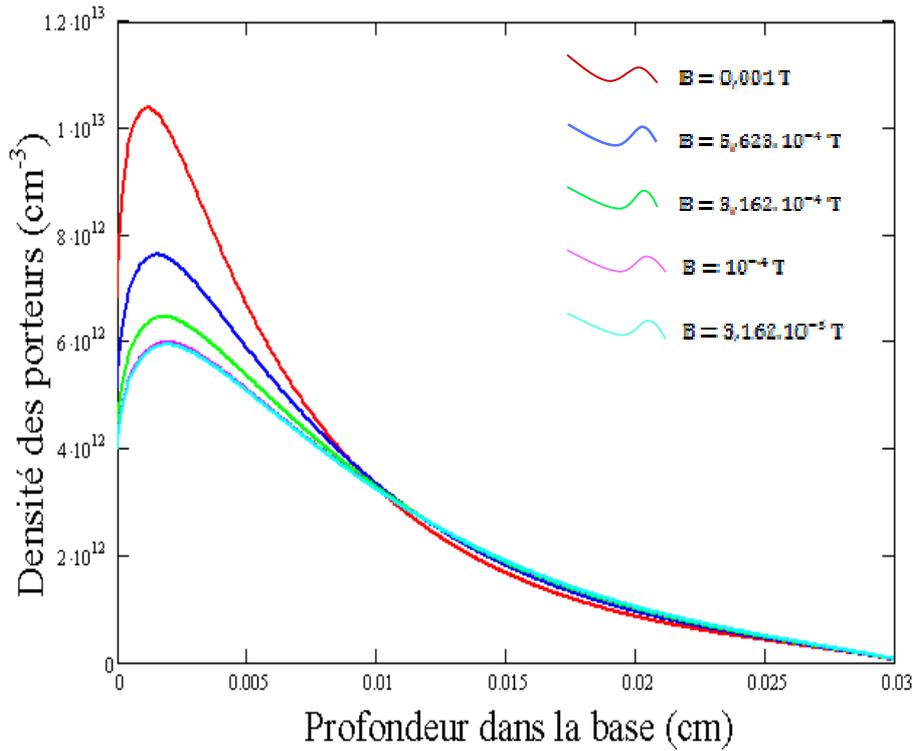


**Figure II-9 :** Densité des porteurs de charge minoritaires en excès en fonction de la profondeur dans la base et en fonction de la vitesse de recombinaison aux joints de grain avec  $B = 1,778.10^{-6} T$  ;  $g = 0,02 cm$  ;  $x = -9.10^{-3} cm$  ;  $y = -9.10^{-3} cm$

Sur la figure II-9 est représentée, à trois dimensions, l'influence de la vitesse de recombinaison aux joints de grains sur la densité des porteurs de charge minoritaires en fonction de la profondeur dans la base, et c'est à partir de cette représentation à 3-D qu'on voit que pour les faibles valeurs de la vitesse de recombinaison aux joints de grains, la densité des porteurs est invariant et ce n'est qu'à partir des valeurs de cette vitesse supérieures à 56,23 cm/s que la densité des porteurs de charge commence à diminuer.

### II-2-1-3. Influence du champ magnétique

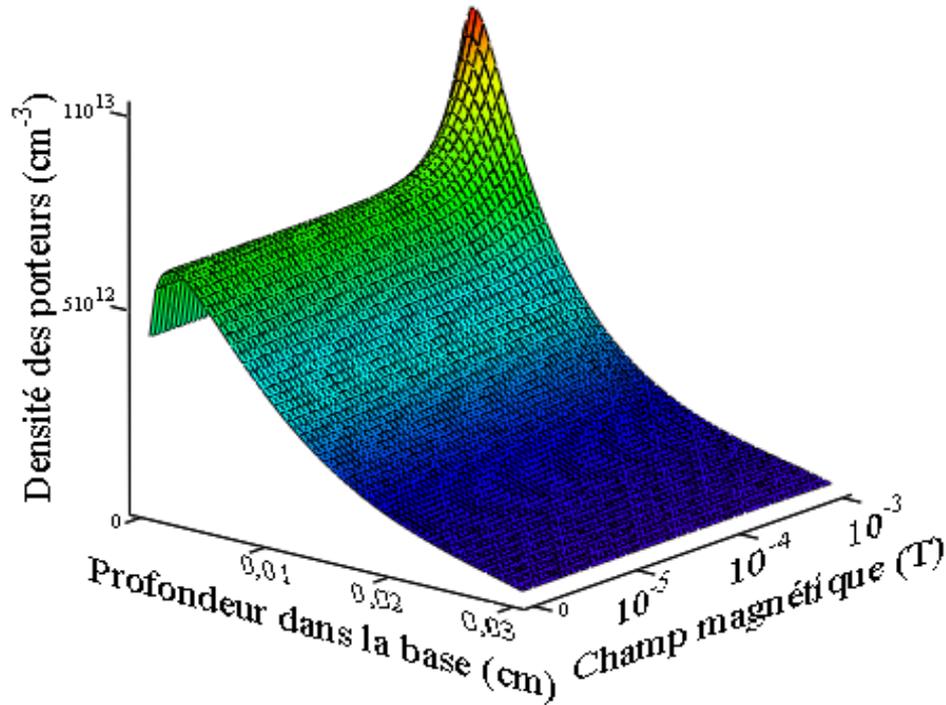
Nous représentons sur la figure II-10 la densité des porteurs de charge minoritaires en excès en fonction de la profondeur dans la base pour différentes valeurs du champ magnétique, les autres paramètres étant fixes.



**Figure II-10** : Densité des porteurs de charge minoritaires en excès en fonction de la profondeur dans la base pour différentes valeurs du champ magnétique avec  $S_g = 316,228 \text{ cm/s}$  ;  $g = 0,02 \text{ cm}$  ;  $x = 0 \text{ cm}$  ;  $y = 0 \text{ cm}$

Les formes et les parties des courbes de la figure II-10 restent les mêmes que celles observées sur les figures II-6 et II-8. Mais, l'influence du champ magnétique sur la densité des porteurs de charge diffère de celles de la taille des grains et de la vitesse de recombinaison aux joints de grains. Nous constatons que lorsque le champ magnétique augmente, la densité des porteurs de charge au voisinage de la jonction augmente de manière considérable et le maximum de cette densité se déplace vers cette jonction. Cependant lorsque nous nous éloignons de cette dernière, nous remarquons une inversion de l'effet du champ  $B$  sur la densité des porteurs qui se manifeste par une diminution de celle-ci lorsque le champ magnétique augmente. En présence du champ magnétique, les porteurs de charge en mouvement sont déviés de leur trajectoire initiale entraînant un blocage de certains d'entre eux. C'est ce qui explique la croissance de la densité au niveau de la jonction lorsque le champ magnétique augmente.

Nous représentons sur la figure II-11 suivante une vue à trois dimensions de la densité des porteurs de charge minoritaires en excès en fonction de la profondeur dans la base et en fonction du champ magnétique, les autres paramètres étant fixes.

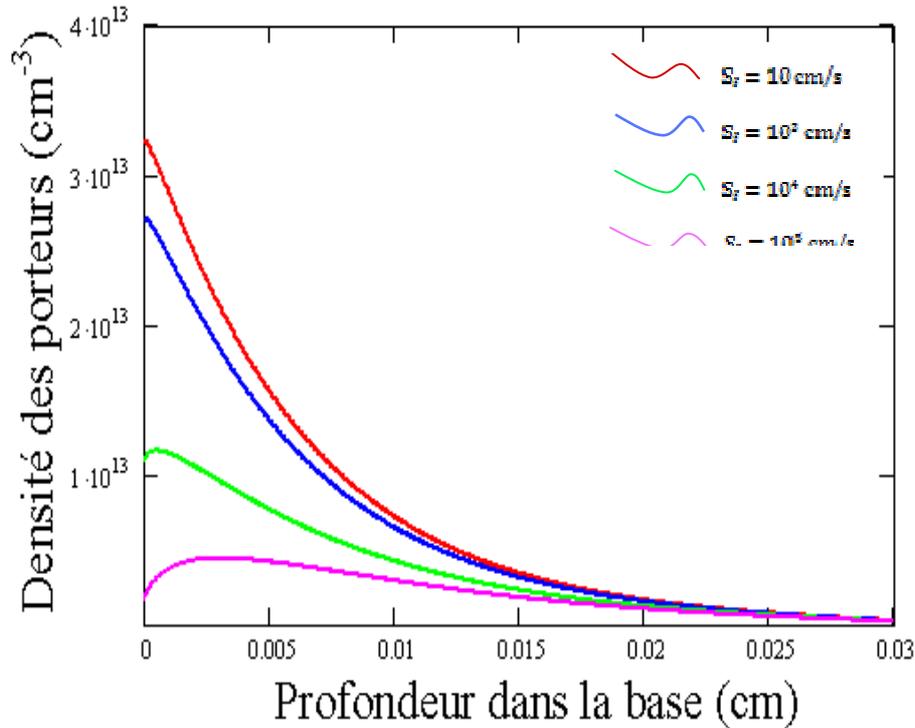


**Figure II-11** : Densité des porteurs de charge minoritaires en excès en fonction de la profondeur dans la base pour différentes valeurs du champ magnétique avec  $S_g = 56,234$  cm/s ;  $g = 0,02$  cm ;  $x = 0$  cm ;  $y = 0$  cm

Sur la figure II-11 où est représentée, à trois dimensions, l'influence du champ magnétique sur la densité des porteurs de charge minoritaires en fonction de la profondeur dans la base, et c'est à partir de cette représentation à 3-D qu'on voit que pour les faibles valeurs du champ  $B$ , la densité des porteurs est invariante et ce n'est qu'à partir des valeurs de ce champ avoisinant  $10^{-4}$  T que la densité des porteurs de charge commence à augmenter à proximité de la jonction et à diminuer en profondeur.

#### II-2-1-4. Influence de la vitesse de recombinaison à la jonction

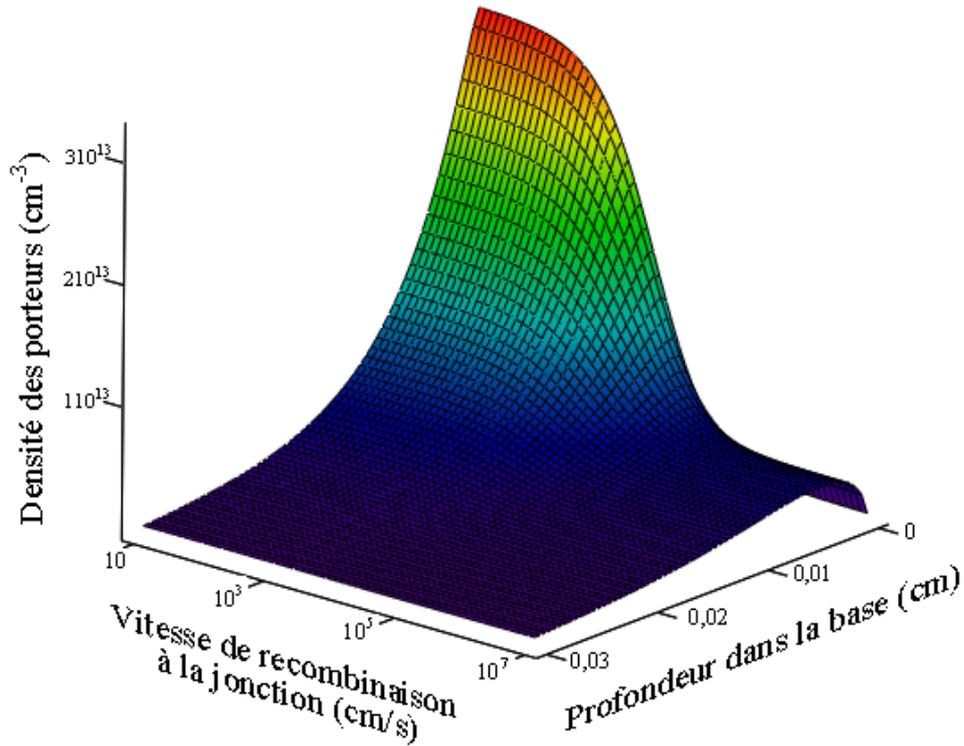
Nous représentons sur la figure II-12 suivante la densité des porteurs de charge minoritaires en excès en fonction de la profondeur dans la base pour différentes valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction, les autres paramètres étant fixes.



**Figure II-12** : Densité des porteurs de charge minoritaires en excès en fonction de la profondeur dans la base pour différentes valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction avec  $B = 1,585.10^{-6} \text{ T}$  ;  $S_g = 14,125 \text{ cm/s}$  ;  $g = 0,02 \text{ cm}$  ;  $S_b = 10000 \text{ cm/s}$  ;  $x = 0 \text{ cm}$  ;  $y = 0 \text{ cm}$

Sur la figure II-12 où est représentée la densité des porteurs de charge minoritaire en excès en fonction de la profondeur dans la base pour différentes valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction, nous constatons une forte concentration de la densité des porteurs de charge au niveau de la jonction qui diminue en profondeur et devient faible au niveau de la face arrière. Nous constatons aussi que près de la jonction lorsque la vitesse de recombinaison à la jonction augmente, la densité des porteurs de charge minoritaires diminue considérablement et cet effet diminue en profondeur. Cependant, la densité est maximale au niveau de la jonction pour les faibles valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction, puis décroît en profondeur pour atteindre des valeurs relativement faibles au voisinage de la face arrière. Mais, lorsque la vitesse de recombinaison à la jonction augmente et atteint une certaine valeur, nous constatons une zone située près de la jonction où le gradient de la densité est positif et où les porteurs situés dans cette zone sont collectés à travers la jonction pour participer à la production de courant électrique qui est suivie par une zone où le gradient de la densité est négatif et où les porteurs situés dans cette zone disparaissent dans la base par recombinaison en volume et en surface arrière.

Nous représentons sur la figure II-13 suivante une vue à trois dimensions de la densité des porteurs de charge minoritaires en excès en fonction de la profondeur dans la base et en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction et pour les différents modes d'éclairage les autres paramètres étant fixes.

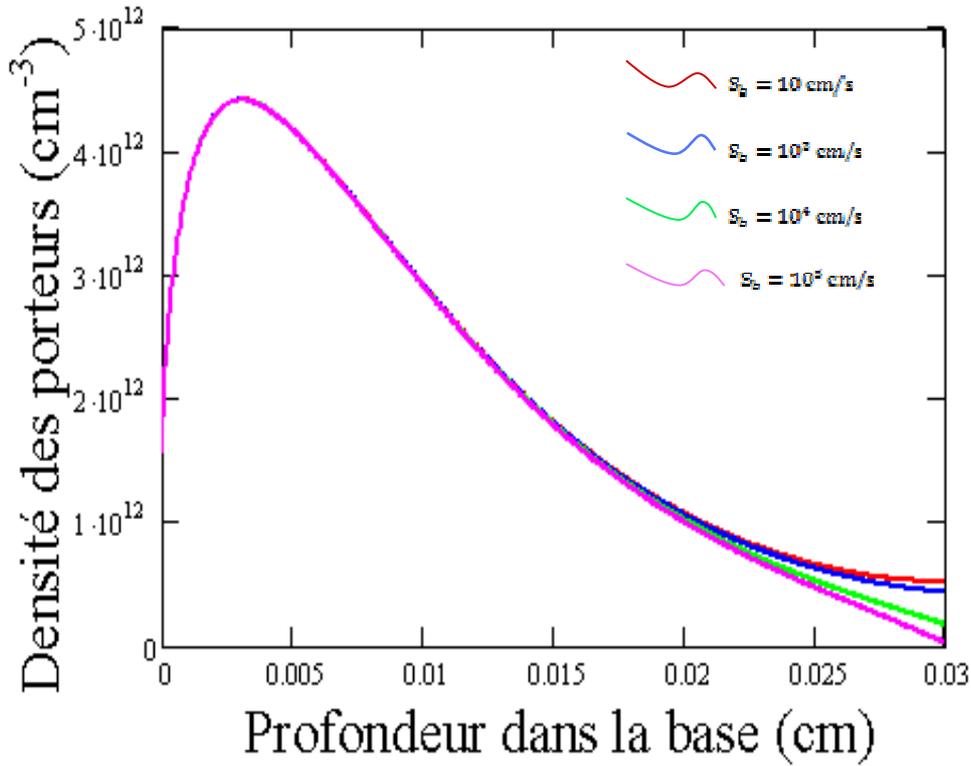


**Figure II-13** : Densité des porteurs de charge minoritaires en excès en fonction de la profondeur dans la base et en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction et pour les différents modes d'éclairage avec  $B = 6,31 \cdot 10^{-6} \text{ T}$  ;  $S_g = 56,234 \text{ cm/s}$  ;  $g = 0,02 \text{ cm}$  ;  $S_b = 10000 \text{ cm/s}$  ;  $x = 0 \text{ cm}$  ;  $y = 0 \text{ cm}$

Sur la figure II-13 où est représentée à 3-D de la densité des porteurs de charge minoritaires en excès en fonction de la profondeur dans la base et en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction et c'est à partir de cette représentation qu'on voit que c'est à partir des valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction supérieures  $10^{-4} \text{ cm/s}$  que nous commençons à constater les deux zones de gradient opposé à proximité de la jonction.

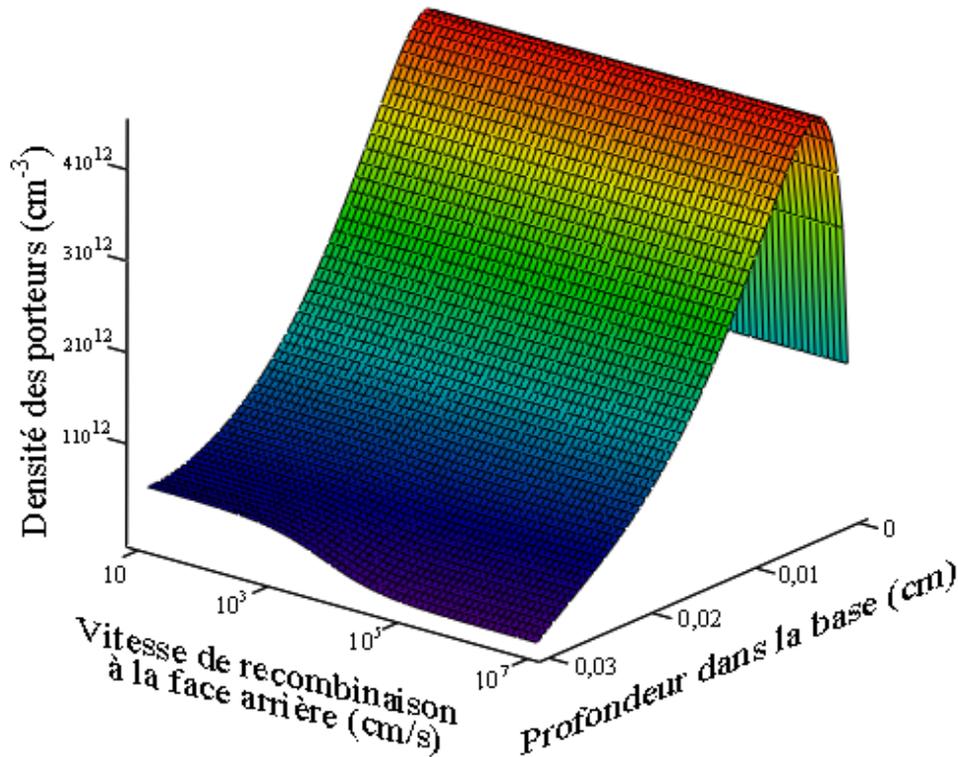
#### II-2-1-5. Influence de la vitesse de recombinaison à la face arrière

Nous représentons sur la figure II-14 suivante la densité des porteurs de charge minoritaires en excès en fonction de la profondeur dans la base pour différentes valeurs de la vitesse de recombinaison à la face arrière, les autres paramètres étant fixes.



**Figure II-14 :** Densité des porteurs de charge minoritaires en excès en fonction de la profondeur dans la base pour différentes valeurs de la vitesse de recombinaison à la face arrière et pour les différents modes d'éclairage avec  $B = 1,585 \cdot 10^{-6} \text{ T}$  ;  $S_g = 14,125 \text{ cm/s}$  ;  $g = 0,02 \text{ cm}$  ;  $S_r = 10^5 \text{ cm/s}$  ;  $x = 0 \text{ cm}$  ;  $y = 0 \text{ cm}$

Nous représentons sur la figure II-15 suivante une vue à trois dimensions de la densité des porteurs de charge minoritaires en excès en fonction de la profondeur dans la base et en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière, les autres paramètres étant fixes.



**Figure II-15** : Densité des porteurs de charge minoritaires en excès en fonction de la profondeur dans la base et en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière avec  $B = 6,31 \cdot 10^{-6} \text{ T}$  ;  $S_g = 56,234 \text{ cm/s}$  ;  $g = 0,02 \text{ cm}$  ;  $S_r = 10^5 \text{ cm/s}$  ;  $x = 0 \text{ cm}$  ;  $y = 0 \text{ cm}$

Sur la figure II-14 et la figure II-15 où sont représentées à deux dimensions respectivement à trois dimensions la densité des porteurs de charge minoritaires en excès en fonction de la profondeur dans la base et en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière, nous constatons que la vitesse de recombinaison à la face arrière a les mêmes effets au voisinage de la face arrière que la vitesse de recombinaison à la jonction a au voisinage de la jonction.

## Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la photopile à trois dimensions dans lequel, nous avons isolé un grain pour faire notre étude. Ensuite, nous avons résolu l'équation de continuité pour en tirer la densité des porteurs de charge minoritaires en excès dans la base de la photopile. Nous avons terminé par l'étude du profil de cette densité des porteurs en fonction de la profondeur dans la base en mettant en évidence l'effet de la taille des grains, puis celui de la vitesse de recombinaison au joints de grains et celui du champ magnétique et enfin l'effet de la vitesse de recombinaison à la jonction et celui de la vitesse de recombinaison à la face arrière sur cette dernière. Cette partie constitue une étape importante dans notre travail nous permettant de passer à l'étude de la réponse de la photopile qui sera traitée dans le chapitre suivant.

## Chapitre III :

# Etude de la réponse de la photopile sous champ magnétique

## Introduction

Une photopile solaire ou cellule photovoltaïque est un matériau semi conducteur de conductivité à mis chemin d'un conducteur parfait et un isolant parfait. Celui-ci est capable de transformer de l'énergie lumineuse en énergie électrique. Lorsque sa surface est éclairée, les photons pénètrent dans le matériau et excitent les porteurs de charge. Parmi ces porteurs, ceux ayant une énergie inférieure à celle des photons incidents sont arrachés et accélérés par l'énergie cinétique qu'ils acquièrent vers la jonction où ils sont collectés du côté n et créent un champ électrique.

Il s'agit dans ce chapitre d'étudier la réponse de la photopile éclairée par sa face avant.

Nous allons aborder ce chapitre par l'étude du photocourant, puis par l'étude de la phototension pour terminer par l'étude des paramètres de recombinaison  $S_f$  et  $S_b$

### III-1. Etude du photocourant

#### III-1-1. Expression de la densité de photocourant : $J_{ph}$ (en $A.cm^{-2}$ )

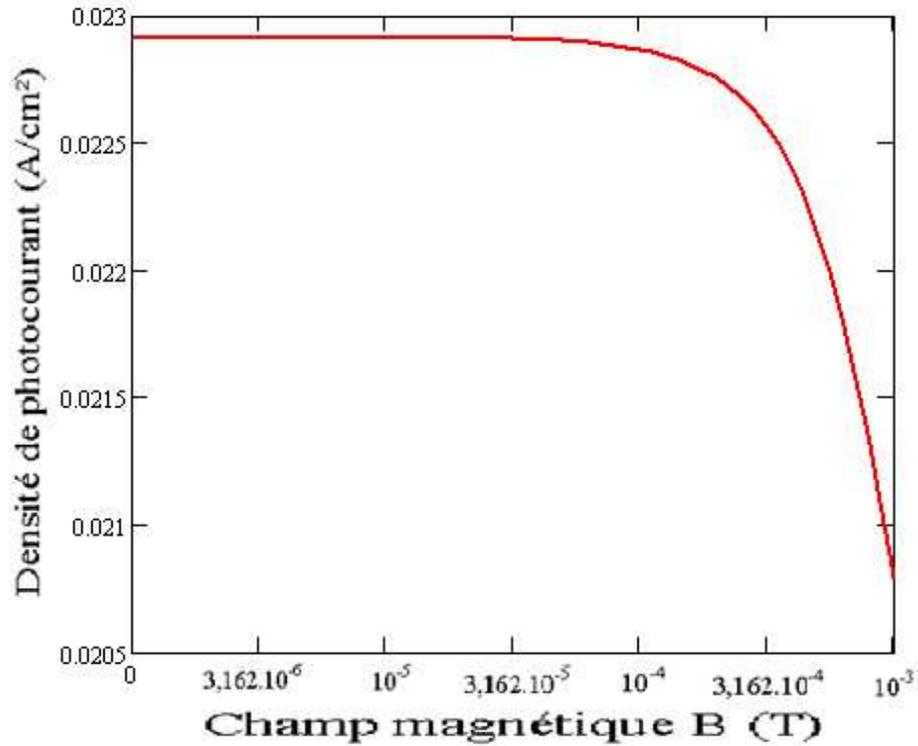
$$J_{ph} = \frac{qD^*}{g_x g_y} \int_{-\frac{g_x}{2}}^{\frac{g_x}{2}} \int_{-\frac{g_y}{2}}^{\frac{g_y}{2}} \left[ \frac{\partial}{\partial z} \delta(x, y, z) \right]_{z=0} dx dy \quad (III-1)$$

Et après les calculs on trouve :

$$J_{ph} = qD^* \sum_j \sum_k \frac{4 \sin(C_j \frac{g_x}{2}) \sin(C_k(B) \frac{g_y}{2})}{g_x g_y C_j C_k(B)} \left[ \frac{A_{j,k}}{L_{j,k}^*} - \sum_{i=1}^3 k_i b_i \right] \quad (III-2)$$

#### III-1-2. Densité de photocourant en fonction du champ magnétique

Nous représentons sur la figure III-1 suivante la densité de photocourant en fonction du champ magnétique, les autres paramètres étant fixes.

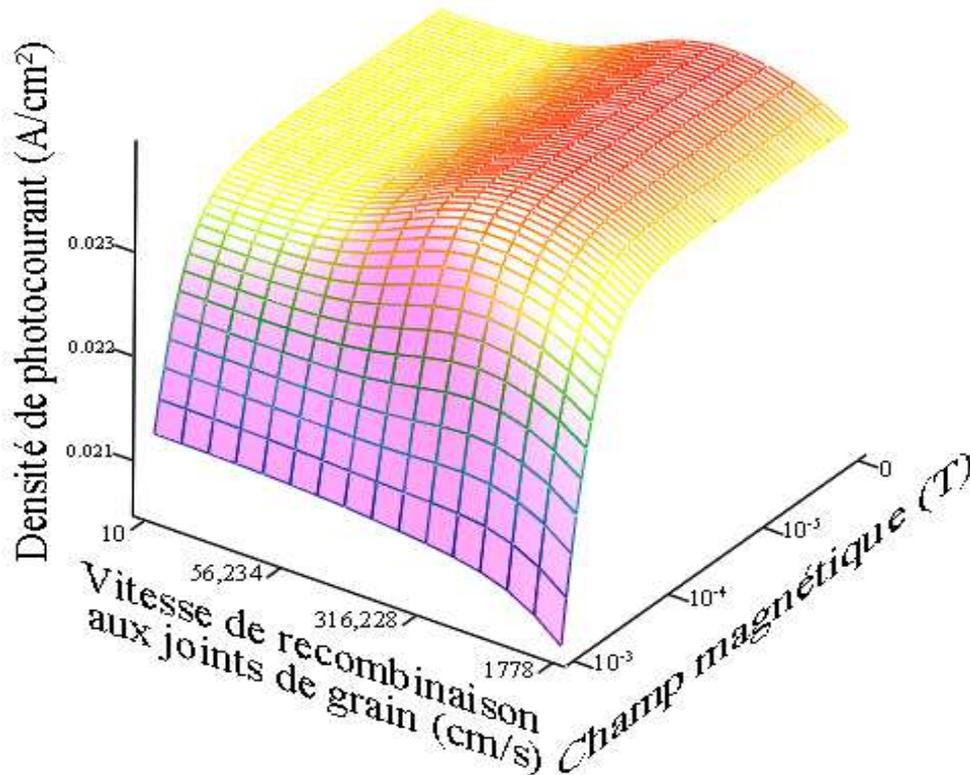


**Figure III-1 :** Densité de photocourant en fonction du champ magnétique avec  $S_g = 56,234$  cm/s et  $g = 0,02$  cm

Sur la figure III-1, nous remarquons que pour les faibles valeurs du champ magnétique c'est-à-dire inférieures à  $3,162 \cdot 10^{-5}$  T, la densité de photocourant est maximale et constante. Mais lorsque le champ magnétique dépasse cette valeur, la densité de photocourant décroît. Cette décroissance de la densité des porteurs de charge lorsque le champ magnétique augmente est due au fait que les porteurs de charges animés d'une vitesse sont défectés par l'action du champ magnétique et certains d'entre eux restent bloqués dans la base. Cette action qui augmente avec le champ magnétique réduit considérablement le flux de porteurs qui traversent la jonction et donc diminue la densité de photocourant.

### III-1-3. Influence de la vitesse de recombinaison aux joints de grain sur la densité de photocourant

Nous représentons sur la figure III-2 suivante la densité de photocourant en fonction du champ magnétique pour différentes valeurs de la vitesse de recombinaison aux joints de grains, la taille des grains étant fixe.

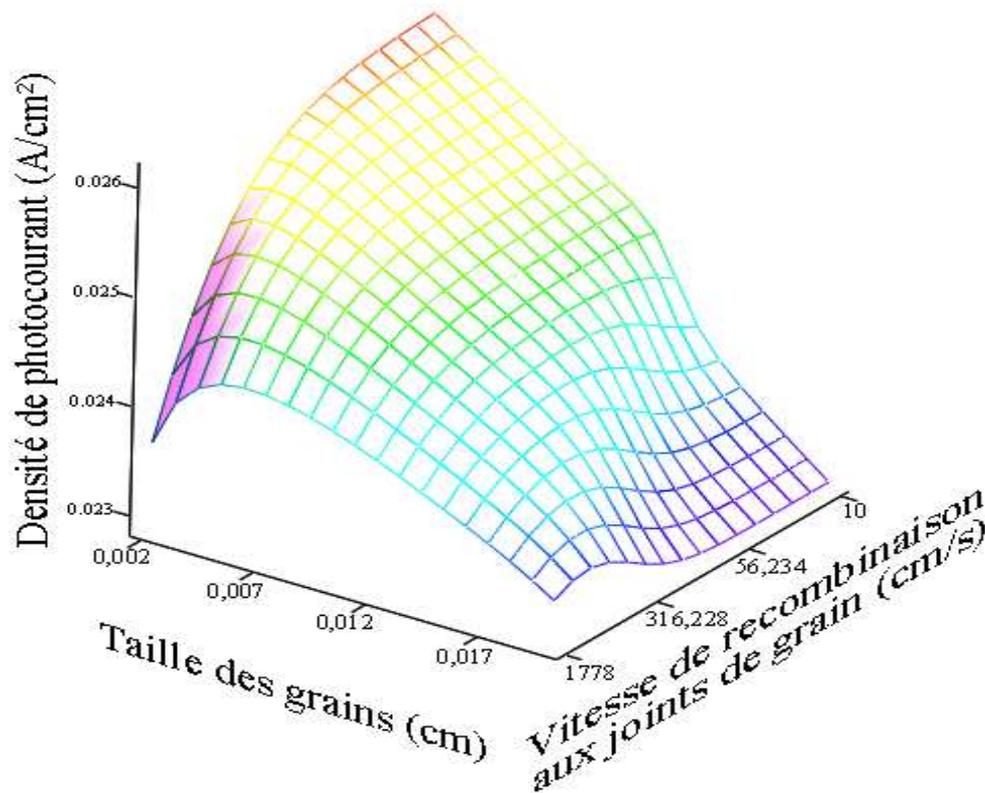


**Figure III-2 :** Densité de photocourant en fonction du champ magnétique et en fonction de la vitesse de recombinaison aux joints de grains avec  $g = 0,02 \text{ cm}$

Il apparait clairement sur la figure III-2 que pour une valeur fixe de la vitesse de recombinaison aux joints de grains, la densité de photocourant est invariante aux valeurs du champ magnétique inférieures à  $10^{-4} \text{ T}$  alors qu'à partir de cette valeur, lorsqu'il augmente, la densité de photocourant décroît. Mais aussi, nous remarquons qu'aux valeurs du champ avoisinant  $10^{-3} \text{ T}$ , la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison aux joints de grain est monotone décroissante, alors que pour les autres valeurs du champ magnétique, lorsque la vitesse de recombinaison aux joints de grain est inférieure à  $56,234 \text{ cm/s}$ , cette densité est constante, puis elle croît jusqu'aux valeurs de la vitesse de recombinaison aux joints de grains sensiblement supérieures à  $316,228 \text{ cm/s}$  et décroît enfin aux valeurs élevées de la vitesse de recombinaison aux joints de grain.

#### III-1-4. Influence de la taille des grains sur la densité de photocourant

Nous représentons sur la figure III-3 suivante la densité de photocourant en fonction du champ magnétique pour différentes valeurs de la taille des grains, la vitesse de recombinaison aux joints de grains étant fixe.



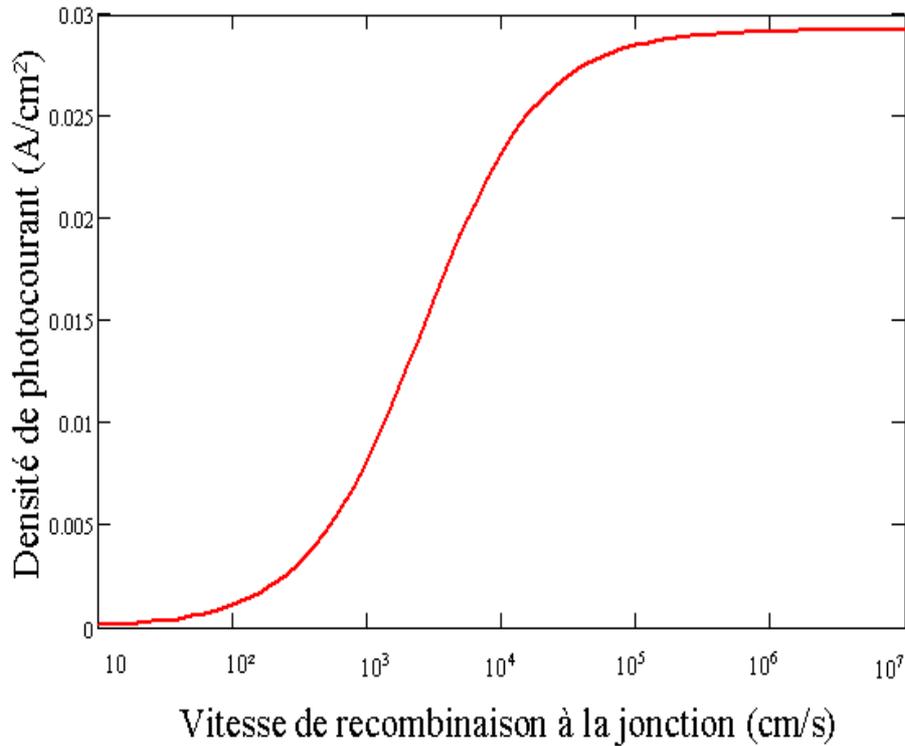
**Figure III-3** : Densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison aux joints de grains et en fonction de la taille des grains avec  $B = 2,512 \cdot 10^{-6}$  T

Il apparait clairement, sur la figure III-3 que pour les faibles valeurs de la vitesse de recombinaison aux joints de grains, la densité de photocourant en fonction de la taille des grains est monotone décroissante, alors que pour les valeurs élevées de cette vitesse, la densité de photocourant croit avec la taille des grains jusqu'aux valeurs de la taille des grains peu différentes de 0,005cm puis décroît lorsque la taille des grains dépasse cette valeur.

### III-1-5. Densité de photocourant en fonction des paramètres de recombinaison

#### III-1-5-1. Densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction

Nous représentons sur la figure III-4 suivante la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction, les autres paramètres étant fixes.

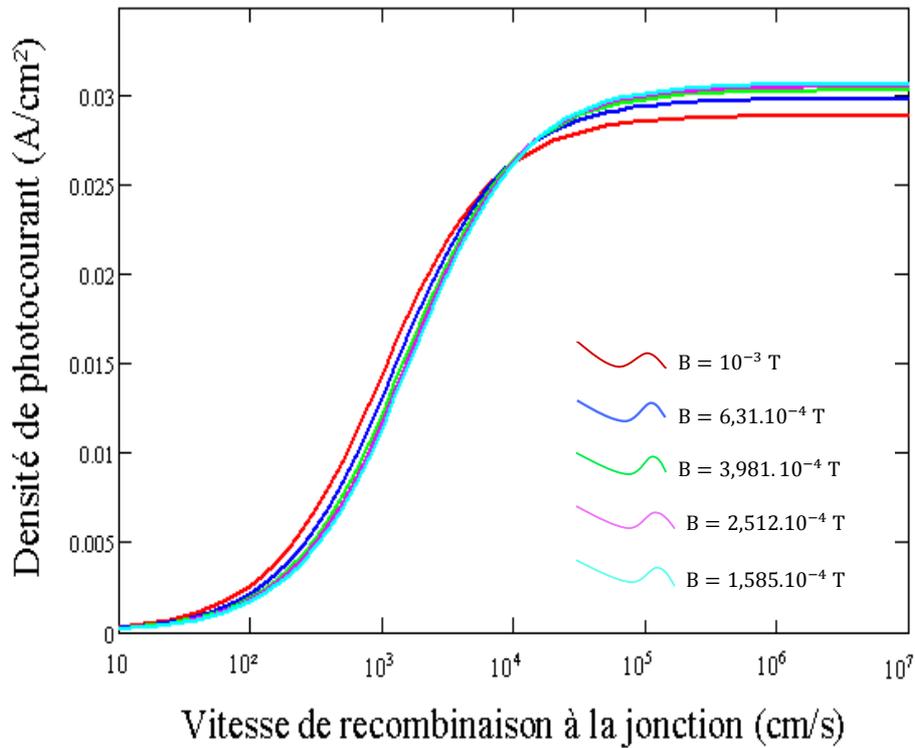


**Figure III-4** : Densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction  
avec  $B = 10^{-5}$  T ;  $S_g = 1778$  cm/s ;  $g = 0,02$  cm ;  $S_b = 10^4$  cm/s

Nous remarquons sur la figure III-4 qui représente la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction, que pour les faibles valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction, la densité de photocourant est nulle. Lorsque cette vitesse augmente, la densité de photocourant croît et atteint une valeur maximale constante aux valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction supérieures à 10<sup>5</sup> cm/s. Ici, la vitesse de recombinaison à la jonction traduit le flux de porteurs de charge photocréés qui traverse la jonction pour participer à la production de courant électrique. Ce qui explique que lorsqu'elle est faible, la densité de photocourant est nulle. Dans ces situations, on dit que la photopile est en situation de circuit ouvert. Et que lorsque la vitesse de recombinaison à la jonction devient élevée, la densité de photocourant produite devient maximale et constante et on l'appelle photocourant de court circuit. Dans ces conditions, on dit que la photopile est en situation de court circuit.

### III-1-5-2. Influence du champ magnétique sur la densité de photocourant

Nous représentons sur la figure III-5 suivante la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs du champ magnétique, les autres paramètres étant fixes.

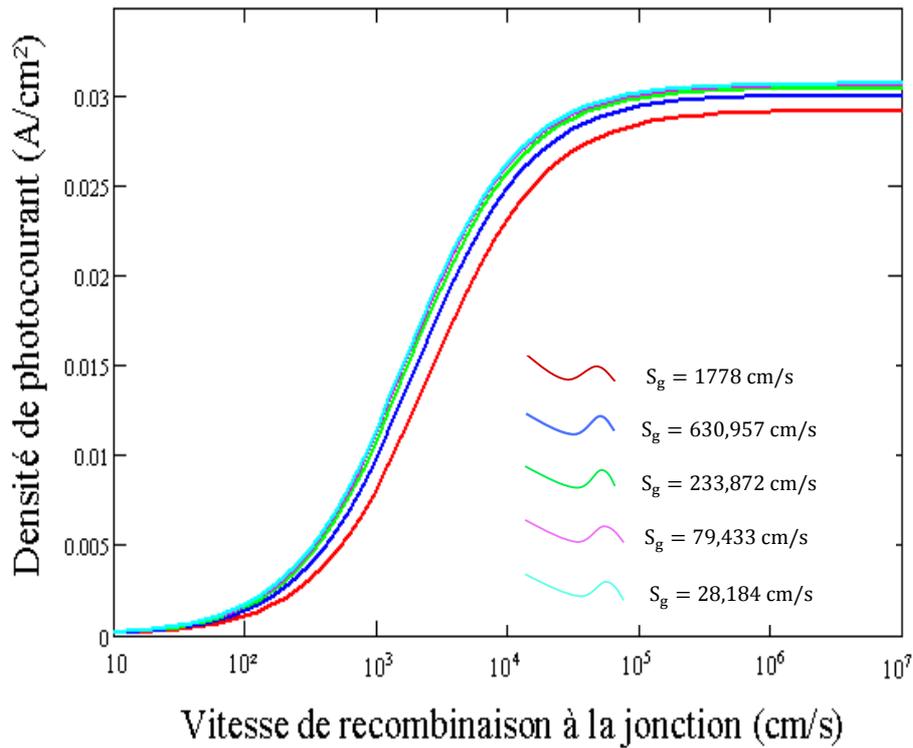


**Figure III-5** : Densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs du champ magnétique avec  $S_g = 56,34 \text{ cm/s}$  ;  $g = 0,02 \text{ cm}$  ;  $S_b = 10^4 \text{ cm/s}$

Sur la figure III-5, est représentée la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs du champ magnétique, nous remarquons que l'effet du champ magnétique sur la densité de photocourant que produit la photopile reste le même que celui vu précédemment sur la figure III-1, c'est à dire la densité de photocourant décroît lorsque le champ magnétique augmente. Cependant, nous constatons que, sur une partie de la courbe où la valeur de la vitesse de recombinaison à la jonction est inférieure à  $10^4 \text{ cm/s}$ , la densité de photocourant augmente lorsque le champ magnétique augmente. Sur la seconde partie de la courbe où la valeur de la vitesse de recombinaison à la jonction est supérieure à  $10^4 \text{ cm/s}$ , la densité de photocourant diminue lorsque le champ magnétique augmente.

### III-1-5-3. Influence de la vitesse de recombinaison aux joints de grain

Nous représentons sur la figure III-6 suivante la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la vitesse de recombinaison aux joints de grain, les autres paramètres étant fixes.

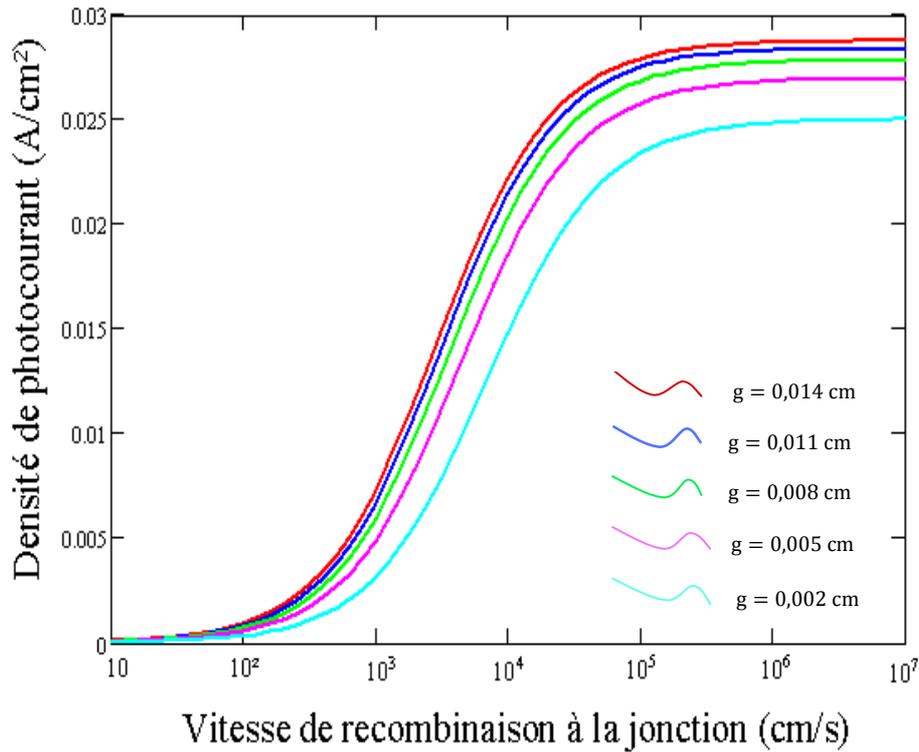


**Figure III-6** : Densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la vitesse de recombinaison aux joints de grain avec  $B = 10^{-5} \text{ T}$  ;  $g = 0,02 \text{ cm}$  ;  $S_b = 10^4 \text{ cm/s}$

Nous remarquons sur la figure III-6 qui représente la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction, pour différentes valeurs de la vitesse de recombinaison aux joints de grain que quelle que soit la valeur de la vitesse de recombinaison à la jonction, lorsque la vitesse de recombinaison aux joints de grain augmente, la densité de photocourant produite diminue. Ceci s'explique par le fait parmi les porteurs de charges possédant une énergie suffisante leurs permettant d'être collectés à travers la jonction, certains se recombinent au niveau des joints de grain et donc diminue la production de photocourant.

#### III-1-5-4. Influence de la taille des grains

Nous représentons sur la figure III-7 suivante la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la taille des grains, les autres paramètres étant fixes.

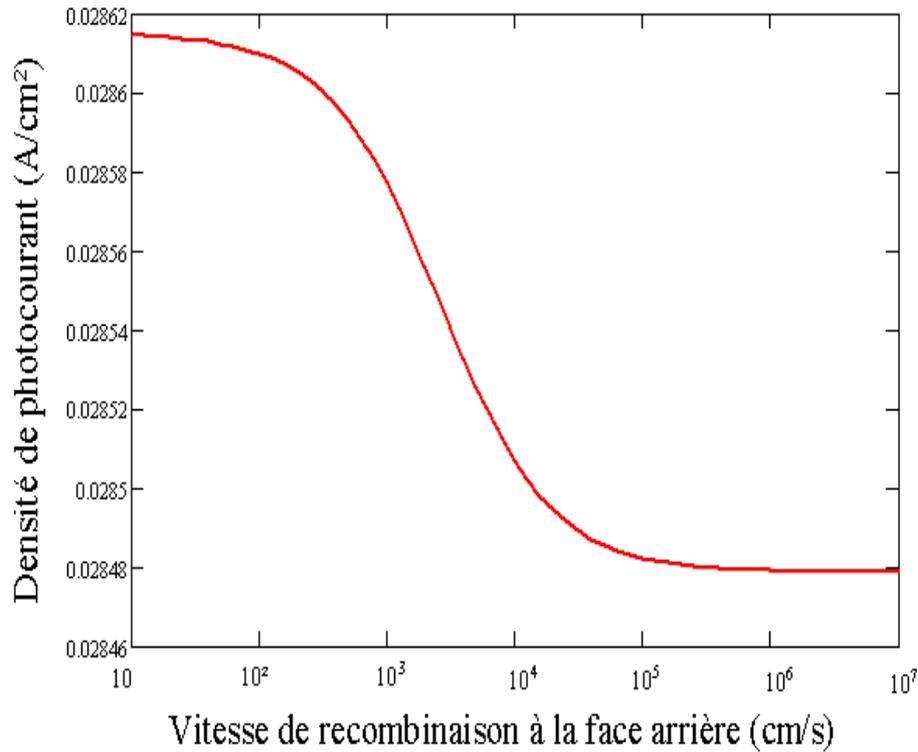


**Figure III-7** : Densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la taille des grains avec  $B = 10^{-5}$  T ;  $S_g = 1778$  cm/s ;  $S_b = 10^4$  cm/s

La figure III-7 représente la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la taille des grains. Nous remarquons que quelle que soit la valeur de la vitesse de recombinaison à la jonction, lorsque la taille des grains augmente la densité de photocourant augmente. L'explication réside sur le fait que lorsque la taille des grains augmente, la surface éclairée aussi augmente et donc la génération de porteurs de charge augmente du fait de l'augmentation des photons incident pénétrant le matériau. Nous enregistrons ainsi un plus grand nombre de porteurs collectés à travers la jonction et donc une plus grande production de photocourant.

### III-1-6. Densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière

Nous représentons sur la figure III-8 suivante la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière, les autres paramètres étant fixes.

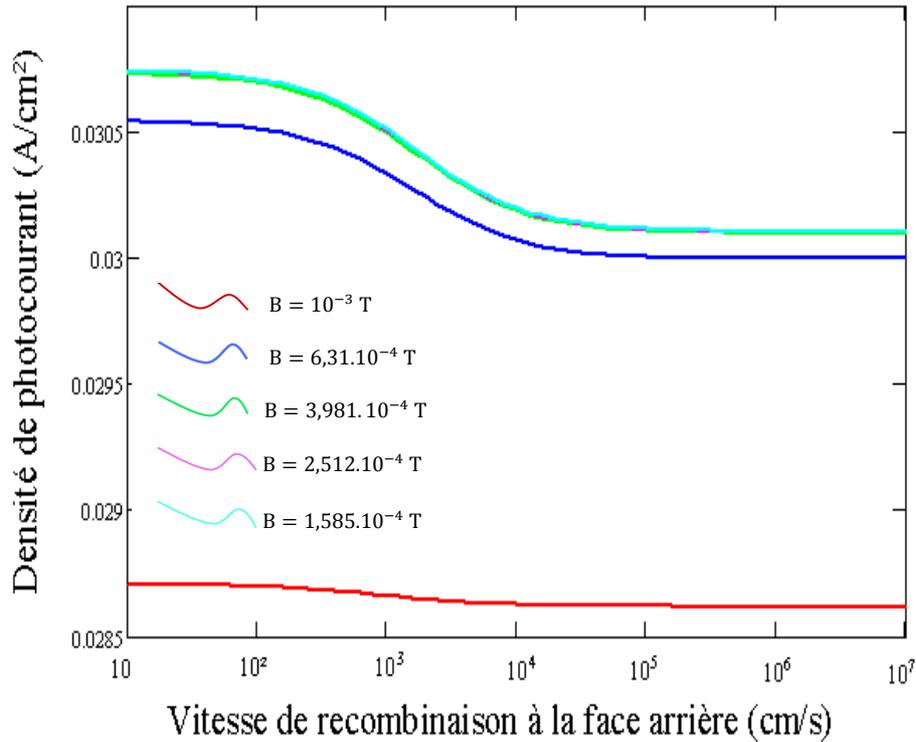


**Figure III-8** : Densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière pour les trois modes d'éclairage avec  $B = 10^{-5}$  T ;  $S_g = 1778$  cm/s ;  $g = 0,02$  cm ;  $S_b = 10^4$  cm/s

Nous remarquons sur la figure III-8 qui représente la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière que pour les faibles valeurs de la vitesse de recombinaison à la face arrière, la valeur de la densité de photocourant est maximale et constante. Lorsque cette vitesse augmente, la densité de photocourant décroît et atteint une valeur limite minimale qui est aussi constante aux valeurs de la vitesse de recombinaison à la face arrière supérieures à  $10^5$  cm/s. Ici, la recombinaison à la face arrière traduit une perte en porteurs de charge photocréés dans la base et qui pouvaient participer à la production de courant électrique. Ce qui explique que lorsqu'elle est faible, la densité de photocourant est maximale. Dans ces situations, on dit que la photopile est à champ arrière (BSF) idéale. Et que lorsque la vitesse de recombinaison à la face arrière devient élevée, la densité de photocourant produite devient minimale. Dans ces conditions, on dit que la photopile est ohmique.

### III-1-6-1. Influence du champ magnétique sur la densité de photocourant

Nous représentons sur la figure III-9 suivante la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière pour différentes valeurs du champ magnétique, les autres paramètres étant fixes.

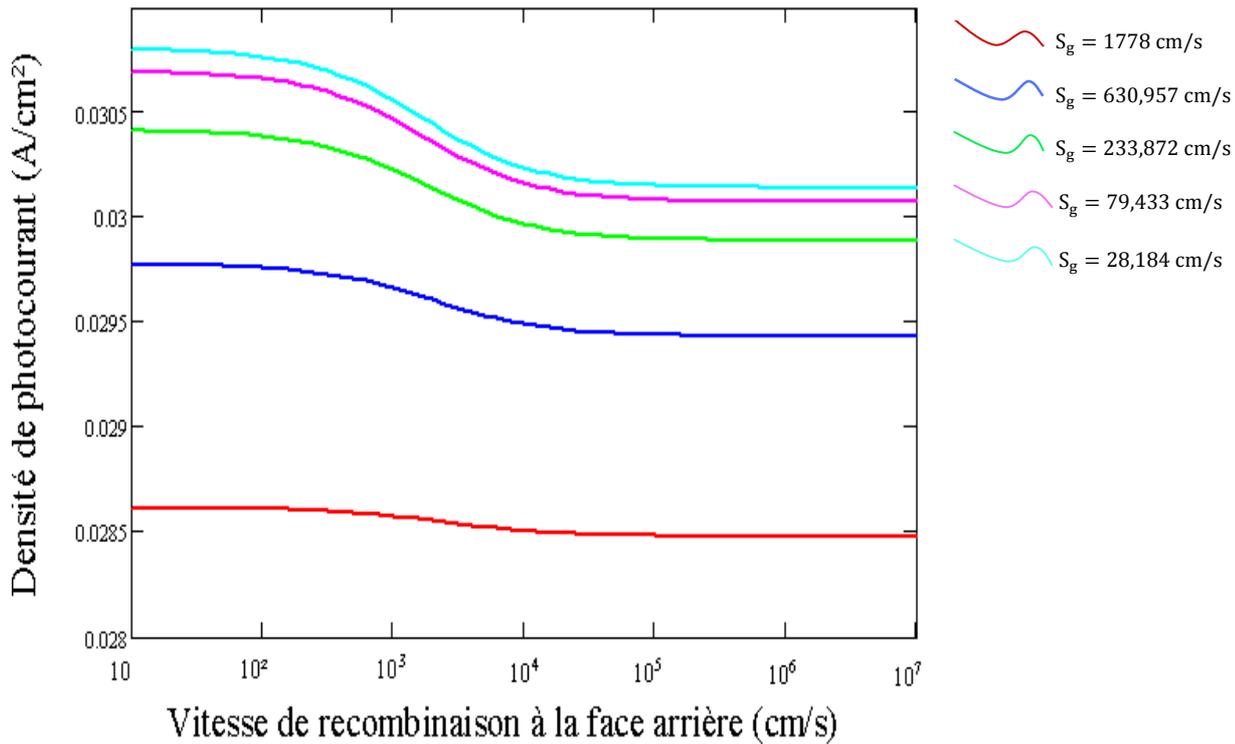


**Figure III-9 :** Densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière pour différentes valeurs du champ magnétique avec  $S_g = 56,34$  cm/s ;  $g = 0,02$  cm ;  $S_r = 10^5$  cm/s

Sur la figure III-9, lorsque le champ magnétique augmente, la densité de photocourant diminue. On constate aussi que cette diminution du photocourant est faible aux faibles valeurs du champ magnétique et devient plus accentuée lorsque la valeur du champ devient plus grande. L'explication reste la même que celle de la figure III-1 donnée précédemment.

### III-1-6-2. Influence de la vitesse de recombinaison aux joints de grain sur la densité de photocourant

Nous représentons sur la figure III-10 suivante la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière pour différentes valeurs de la vitesse de recombinaison aux joints de grain, les autres paramètres tant fixes.

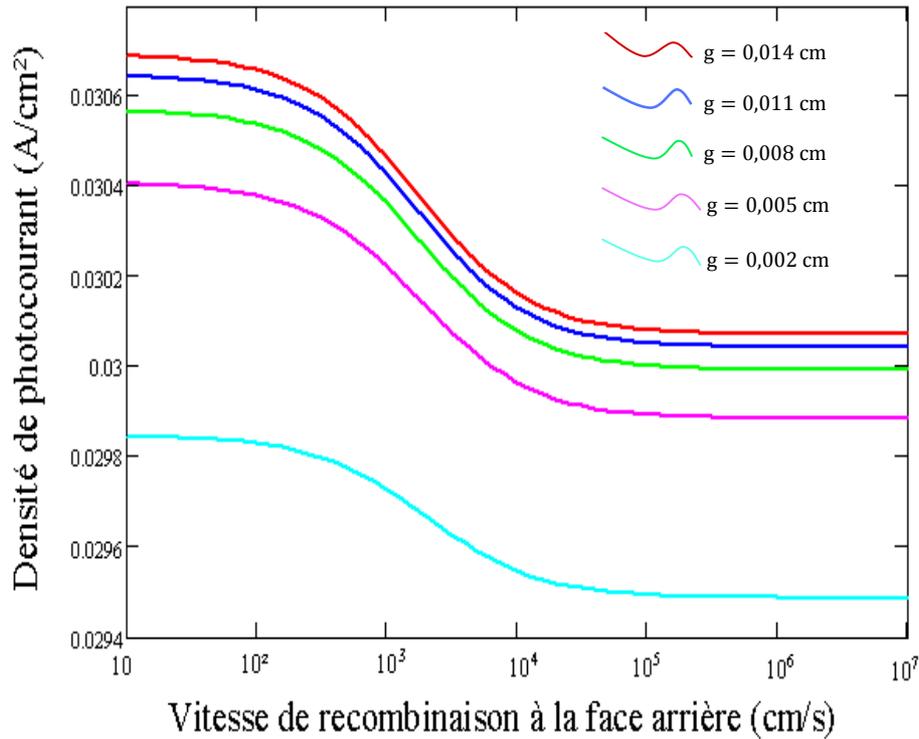


**Figure III-10** : Densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière pour différentes valeurs de la vitesse de recombinaison aux joints de grain avec  $B = 10^{-5}$  T ;  $g = 0,02$  cm ;  $S_b = 10^5$  cm/s

Sur la figure III-10 où est représentée la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière pour différentes valeurs de la vitesse de recombinaison aux joints de grain, nous constatons que quelle que soit la valeur de la vitesse de recombinaison à la face arrière, lorsque la vitesse de recombinaison aux joints de grain augmente, la densité de photocourant diminue. L'explication réside sur le fait parmi les porteurs de charges possédant une énergie suffisante leurs permettant d'être collectés à travers la jonction, certains se recombinent au niveau des joints de grain et donc diminue la production de photocourant.

### III-1-6-3. Influence de la taille des grains sur la densité de photocourant

Nous représentons sur la figure III-11 suivante la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière pour différentes valeurs de la taille des grains, les autres paramètres tant fixes.



**Figure III-11** : Densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière pour différentes valeurs de la taille des grains avec  $B = 10^{-5}$  T ;  $S_g = 56,234$  cm/s ;  $S_f = 10^5$  cm/s

Nous remarquons sur la figure III-11 qui représente la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière pour différentes valeurs de la taille des grains, que quelle que soit la valeur de la vitesse de recombinaison à la face arrière, la densité de photocourant diminue lorsque la taille des grains augmente. Ceci s'explique par le fait que lorsque la taille des grains augmente, la surface éclairée aussi augmente et donc la génération de porteurs de charge augmente du fait de l'augmentation des photons incidents pénétrant le matériau. Nous enregistrons par la suite un plus grand nombre de porteurs collectés à travers la jonction et donc une plus grande production de photocourant.

## III-2. Etude de la phototension

### III-2-1. Expression de la phototension $V_{ph}$ (en V)

D'après la relation de BOLTZMANN, la phototension est donnée par l'expression

$$V_{ph} = V_T \ln \left( 1 + \frac{1}{n_0} \int_{-\frac{g_x}{2}}^{\frac{g_x}{2}} \int_{-\frac{g_y}{2}}^{\frac{g_y}{2}} \delta(x, y, 0) dx dy \right) \quad \text{avec} \quad V_T = \frac{KT}{q} \quad \text{et} \quad n_0 = \frac{n_i^2}{N_b} \quad (\text{III-3})$$

Et donc après les calculs, on trouve :

$$\Rightarrow V_{ph} = V_T \ln \left( 1 + \frac{1}{n_0} \sum_j \sum_k (B_{j,k} + \sum_{i=1}^3 k_i) \times \frac{4 \sin(C_j \frac{g_x}{2}) \sin(C_k(B) \frac{g_y}{2})}{C_j C_k(B)} \right) \quad (\text{III-4})$$

### III-2-2. Phototension en fonction du champ magnétique

Nous représentons sur la figure III-12 suivante la phototension en fonction du champ magnétique, les autres paramètres étant fixes.

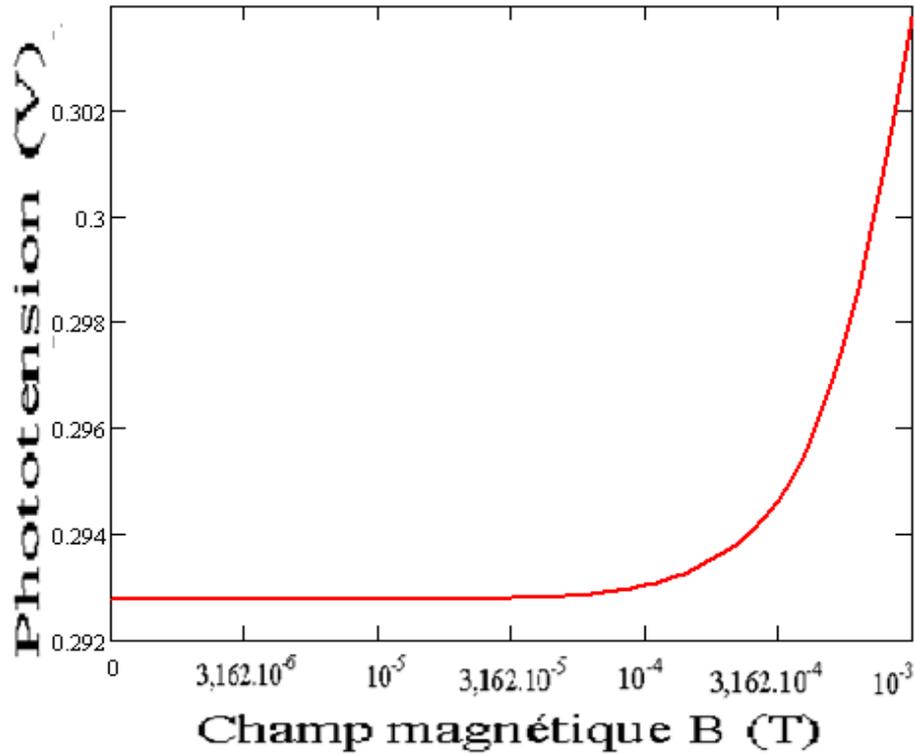
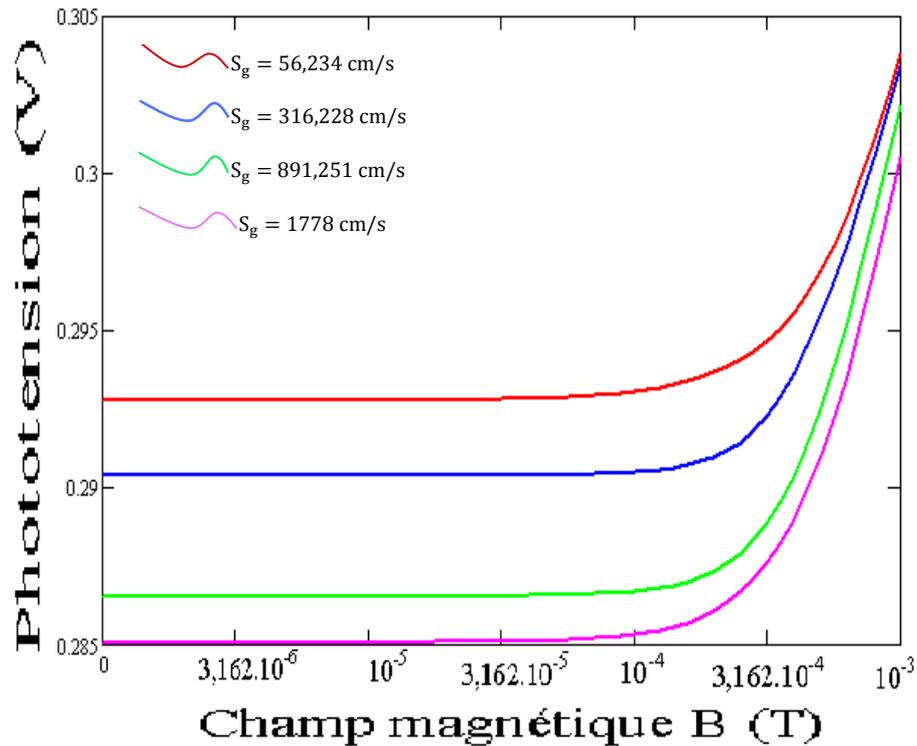


Figure III-12 : Phototension en fonction du champ magnétique avec  $S_g = 56,234$  cm/s et  $g = 0,02$  cm

Sur la figure III-12 représentant la phototension en fonction du champ magnétique, nous remarquons que la phototension reste invariante aux faibles valeurs du champ magnétique, puis croit lorsque celui-ci augmente. Nous avons vu que le champ magnétique a pour effet d'augmenter la densité des porteurs près de la jonction qui signifie qu'il y'a une accumulation de charges au niveau de la capacité de la zone de charge d'espace traduisant ainsi l'augmentation de la phototension.

### III-2-3. Influence de la vitesse de recombinaison aux joints de grain sur la phototension

Nous représentons sur la figure III-2 suivante la phototension en fonction du champ magnétique pour différentes valeurs de la vitesse de recombinaison aux joints de grains, la taille des grains étant fixe.



**Figure III-13** : Phototension en fonction du champ magnétique pour différentes valeurs de la vitesse de recombinaison aux joints de grains avec  $g = 0,02$  cm

Sur la figure III-13 représentant la phototension en fonction du champ magnétique pour différentes valeurs de la vitesse de recombinaison aux joints de grain, nous remarquons que, quelle que soit la valeur du champ magnétique que lorsque la vitesse de recombinaison augmente, la phototension diminue. La recombinaison aux joints de grain symbolise une perte en porteurs de charge dans la base de la photopile, donc une diminution de la phototension.

#### III-2-4. Influence de la taille des grains sur la phototension

Nous représentons sur la figure III-14 suivante la phototension en fonction du champ magnétique pour différentes valeurs de la taille des grains, la vitesse de recombinaison aux joints de grains étant fixe.

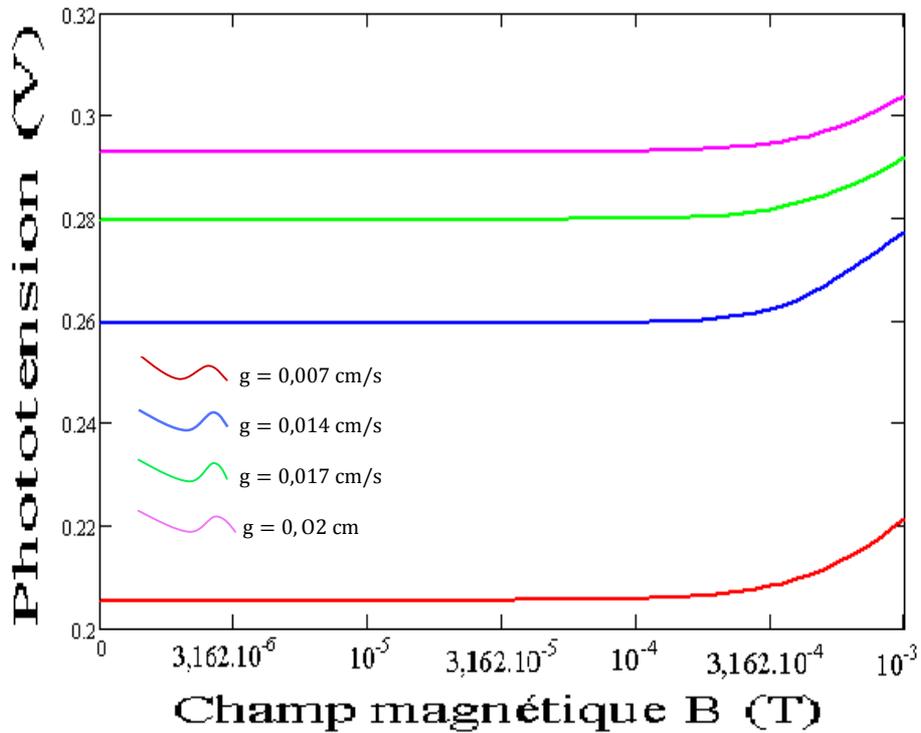


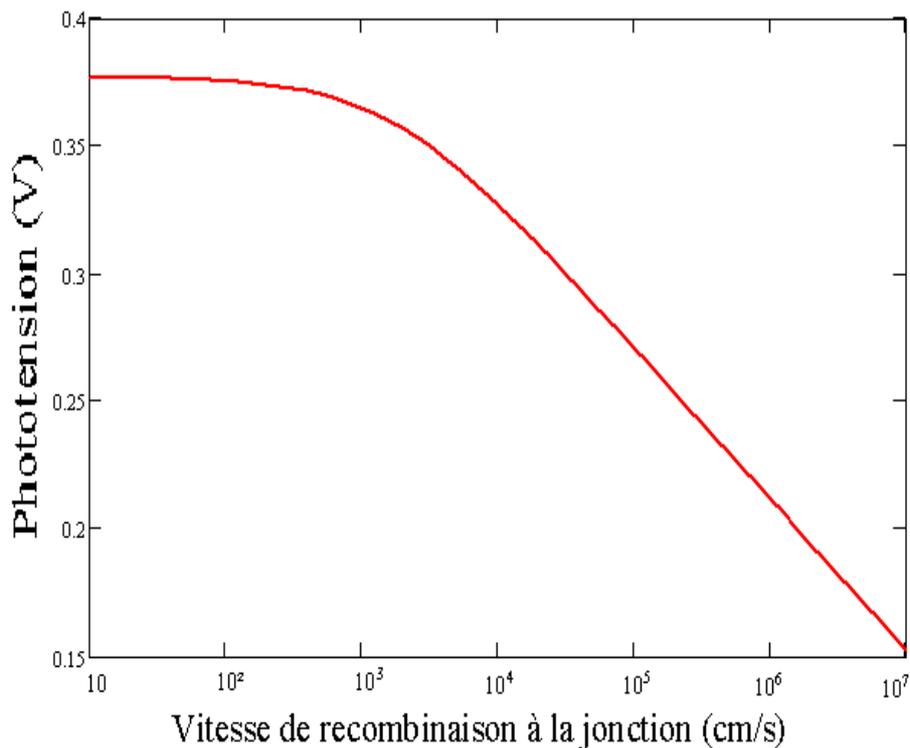
Figure III-14 : Phototension en fonction du champ magnétique pour différentes valeurs de la taille des grains avec  $S_g = 56,234$  cm/s

Sur la figure III-14 représentant la phototension en fonction du champ magnétique pour différentes valeurs de la taille des grains, nous remarquons que quelle que soit la valeur du champ magnétique, lorsque la taille des grains augmente, la phototension augmente. Ceci s'explique par le fait que lorsque la taille des grains augmente, la surface illuminée aussi augmente et donc la génération de porteurs de charge augmente du fait de l'augmentation des photons incidents pénétrant le matériau. Nous enregistrons par la suite une augmentation de la phototension.

### III-2-5. Phototension en fonction des paramètres de recombinaison

#### III-2-5-1. Phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction

Nous représentons sur la figure III-15 suivante la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction, les autres paramètres étant fixes.

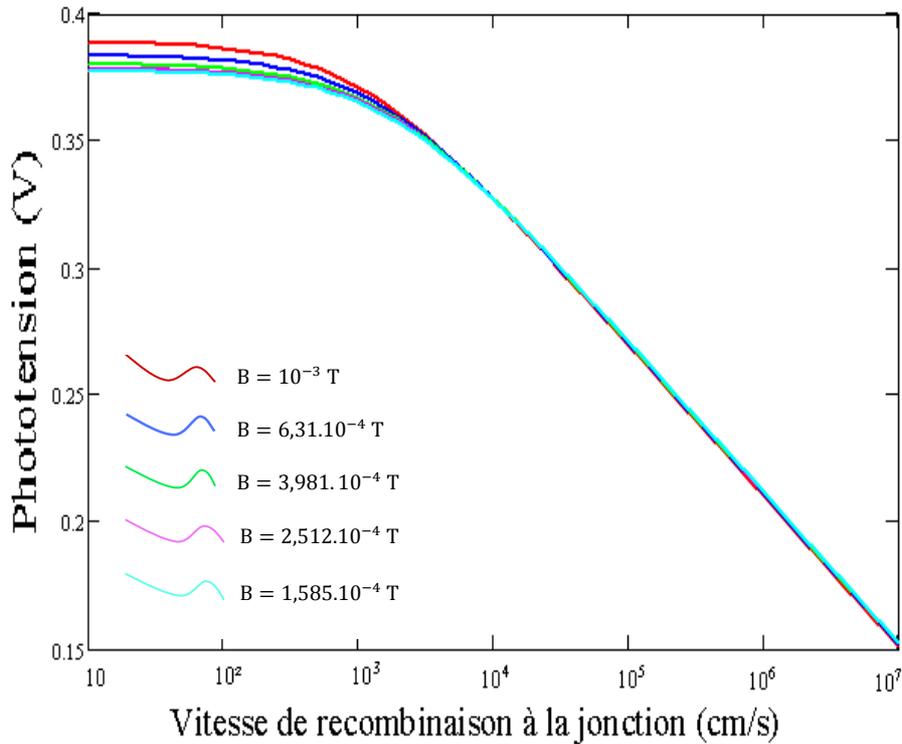


**Figure III-15** : Phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction  
avec  $B = 10^{-5}$  T ;  $S_g = 56,234$  cm/s ;  $g = 0,02$  cm ;  $S_b = 10^4$  cm/s

Sur la figure III-4 représentant la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction, nous constatons que pour les faibles valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction, la phototension est maximale. Lorsque cette vitesse augmente, la phototension décroît et tend vers de faibles valeurs lorsque celles de la vitesse de recombinaison à la jonction deviennent élevées. Ici, la vitesse de recombinaison à la jonction traduit le flux de porteurs de charge photocréés qui traverse la jonction pour participer à la production de courant électrique. Ce qui explique que lorsqu'elle est faible, les porteurs de charge s'accumulent aux armatures de la capacité de la zone de charge d'espace et donc, la phototension est maximale et correspond à la phototension de circuit ouvert. Dans ces situations, on dit que la photopile est en situation de circuit ouvert. Et que lorsque la vitesse de recombinaison à la jonction devient élevée, la phototension produite devient minimale. Dans ces conditions, on dit que la photopile est en situation de court circuit.

### III-2-5-2. Influence du champ magnétique sur la phototension

Nous représentons sur la figure III-16 suivante la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs du champ magnétique, les autres paramètres étant fixes.

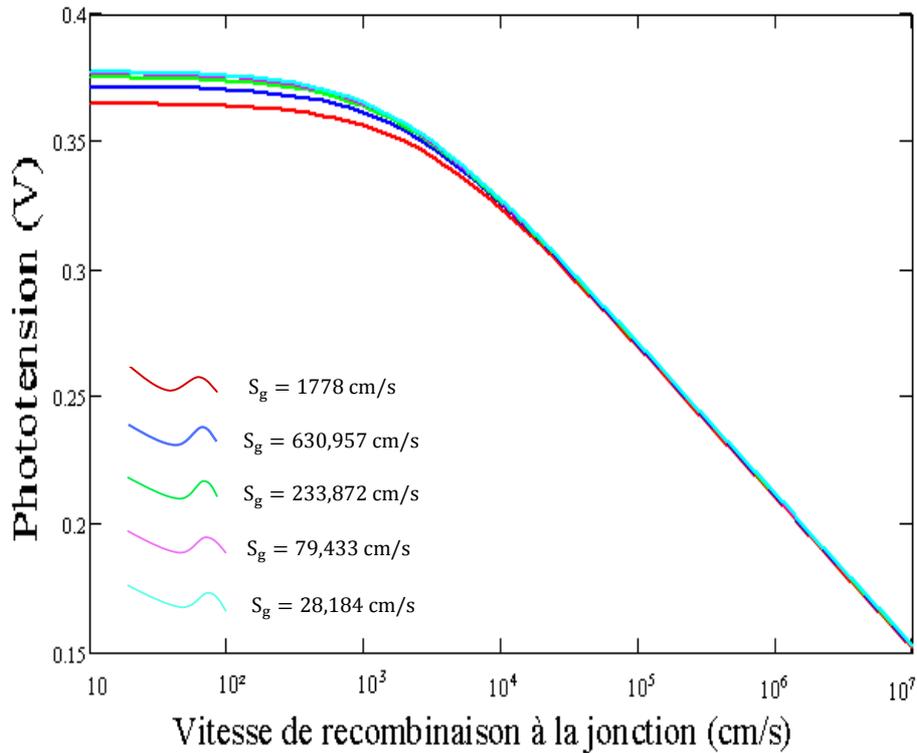


**Figure III-16** : Phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs du champ magnétique et avec  $S_g = 56,234$  cm/s ;  $g = 0,02$  cm ;  $S_b = 10^4$  cm/s

Sur la figure III-16 représentant la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs du champ magnétique, pour les valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction inférieures à  $5.10^{-3}$  cm/s, lorsque le champ magnétique augmente, la phototension augmente. Alors que sur la partie de la courbe où la vitesse de recombinaison est supérieure à  $5.10^{-3}$  cm/s, elle diminue lorsque le champ magnétique augmente. Ici le faible flux, de porteurs traversant la jonction, ajouté à la forte accumulation de porteurs près de la jonction due à l'effet du champ magnétique explique la croissance de la phototension dans la première partie susmentionnée. Pour la seconde partie de la courbe, la faible décroissance de la phototension s'explique par le flux de porteurs qui traversent la jonction plus rapidement qu'ils ne s'accumulent près de celle-ci.

### III-2-5-3. Influence de la vitesse de recombinaison aux joints de grain sur la phototension

Nous représentons sur la figure III-17 suivante la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la vitesse de recombinaison aux joints de grain, les autres paramètres étant fixes.

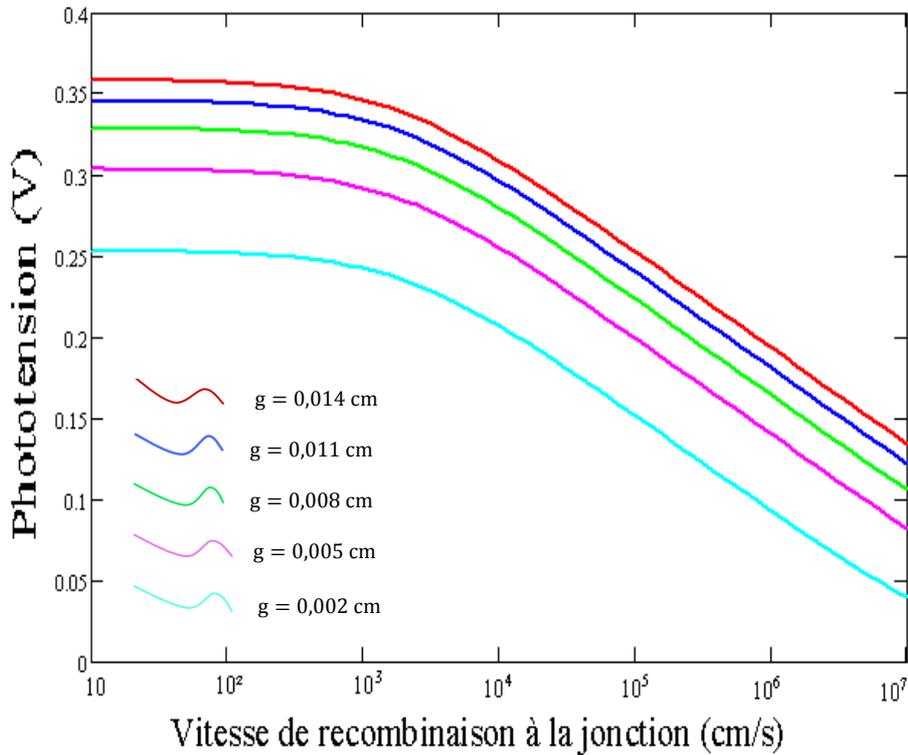


**Figure III-17 :** Phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la vitesse de recombinaison aux joints de grain avec  $B = 10^{-5}$  T ;  $g = 0,02$  cm ;  $S_b = 10^4$  cm/s

Nous remarquons sur la figure III-17 représentant la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la vitesse de recombinaison aux joints de grains, que quelle que soit la valeur de la vitesse de recombinaison à la jonction que lorsque la vitesse de recombinaison aux joints de grain augmente, la phototension diminue. La recombinaison élevée au niveau des joints de grain diminue les porteurs de charge dans la base et diminue donc la phototension. Nous remarquons aussi que l'effet de la vitesse de recombinaison aux joints de grain est réduit lorsque la vitesse de recombinaison à la jonction devient élevée.

### III-2-5-4. Influence de la taille des grains sur la phototension

Nous représentons sur la figure III-18 suivante la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la taille des grains, les autres paramètres étant fixes.

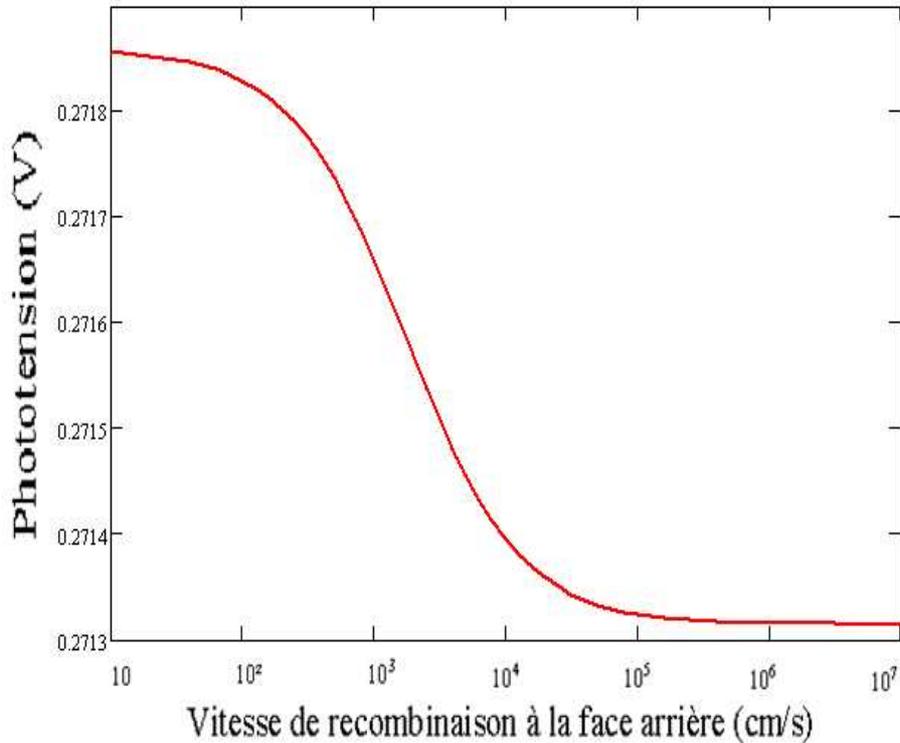


**Figure III-18** : Phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la taille des grains avec  $B = 10^{-5}$  T ;  $S_g = 56,234$  cm/s ;  $S_b = 10^5$  cm/s

Nous constatons sur la figure III-18 représentant la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la taille des grains, que la phototension augmente lorsque la taille des grains augmente. L'explication de cet effet est que lorsque la taille des grains augmente, la surface illuminée aussi augmente et donc la génération de porteurs de charge augmente du fait de l'augmentation des photons incident pénétrant le matériau. On enregistre par la suite une augmentation de la phototension.

### III-2-6. Phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière

Nous représentons sur la figure III-19 suivante la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière, les autres paramètres étant fixes.

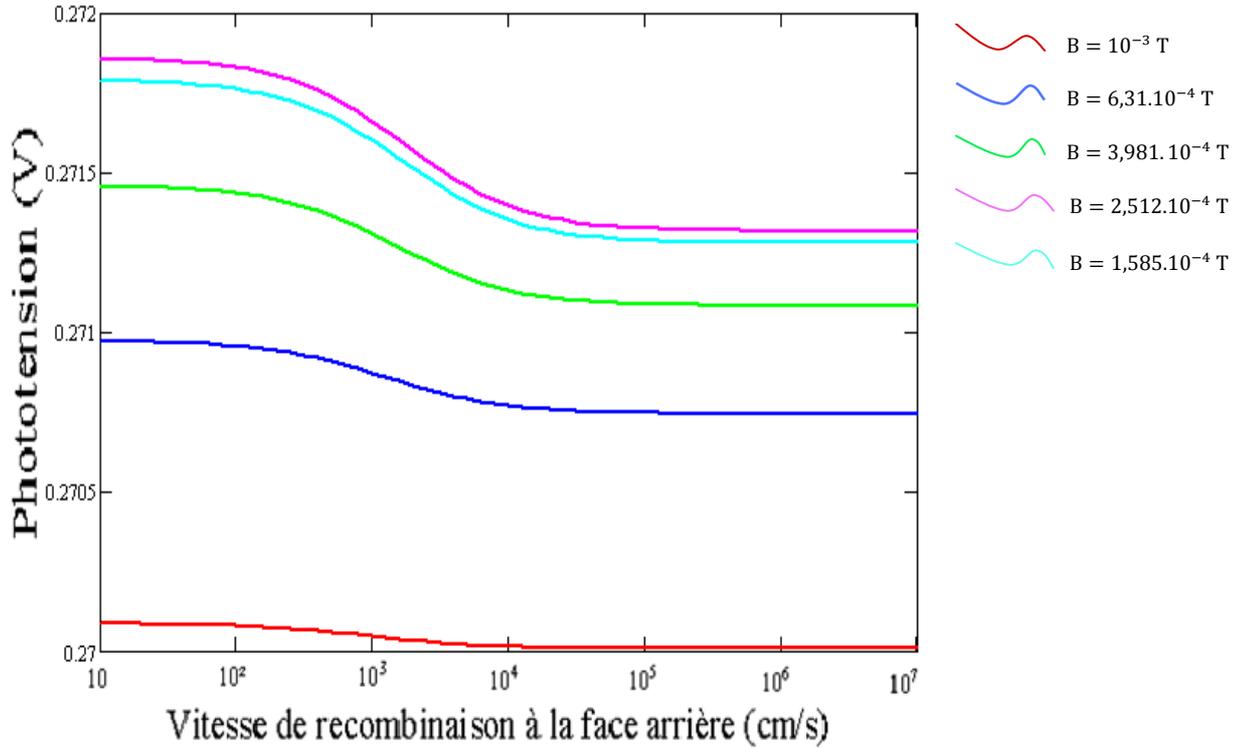


**Figure III-19** : Phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière avec  $B = 10^{-5}$  T ;  $S_g = 56,234$  cm/s ;  $g = 0,02$  cm ;  $S_b = 10^5$  cm/s

Nous remarquons sur la figure III-19 que pour les faibles valeurs de la vitesse de recombinaison à la face arrière, la phototension est maximale. Lorsque cette vitesse augmente, la phototension décroît et tend vers une valeur minimale invariante aux valeurs élevées de la vitesse de recombinaison à la face arrière. Ici, la recombinaison à la face arrière traduit une perte de porteurs de charge photocréés et qui devaient participer à la production d'électricité. Ce qui explique que lorsqu'elle est faible, c'est-à-dire que les pertes en porteurs de charges sont minimales, ce qui rend la phototension maximale. Dans ces situations, on dit que la photopile est à champ arrière (BSF) idéal. Et que lorsque la vitesse de recombinaison à la face arrière devient élevée, la phototension produite devient minimale. Dans ces conditions, on dit que la photopile est ohmique.

### III-2-6-1. Influence du champ magnétique sur la phototension

Nous représentons sur la figure III-20 suivante la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière pour différentes valeurs du champ magnétique, les autres paramètres étant fixes.

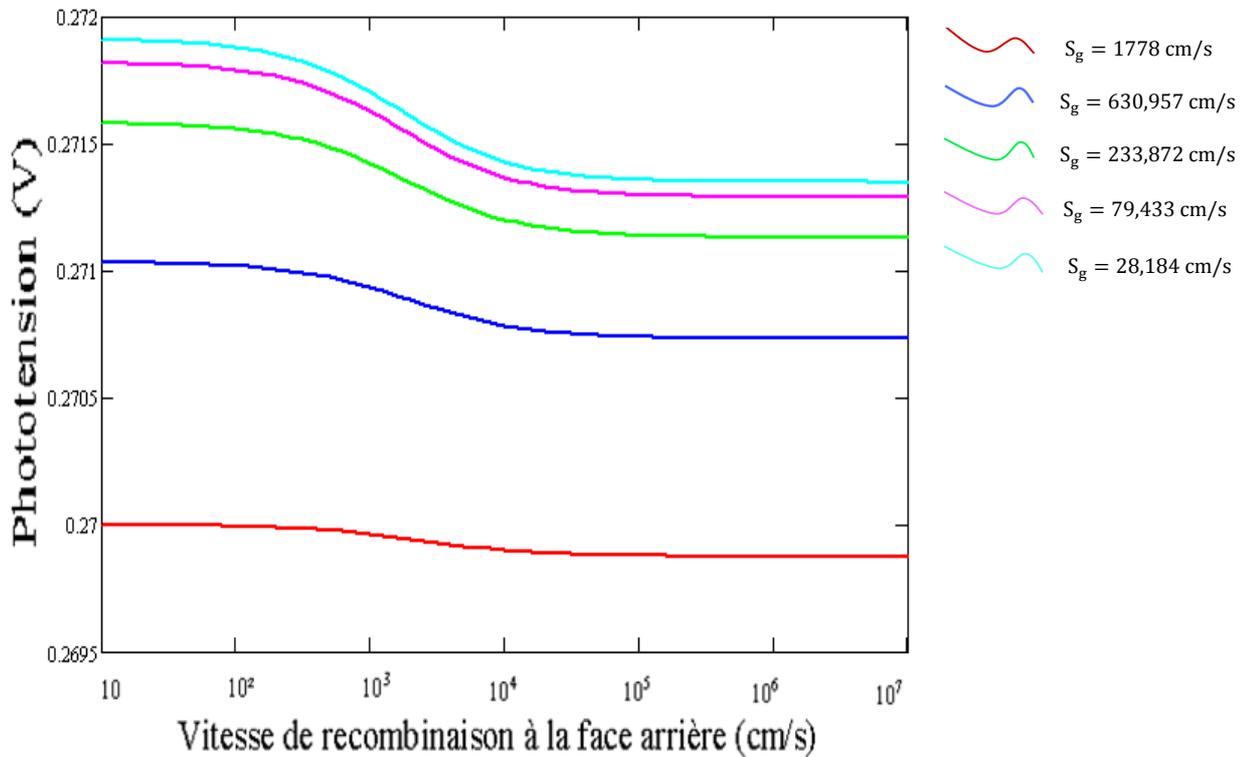


**Figure III-20 :** Phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière pour différentes valeurs du champ magnétique avec  $S_g = 56,234$  cm/s ;  $g = 0,02$  cm ;  $S_f = 10^5$  cm/s

Sur la figure III-20, pour toutes les valeurs de la vitesse de recombinaison à la face arrière, lorsque le champ magnétique augmente, la phototension diminue. Ici il la diminution de cette phototension s'explique par le choix de la valeur de la vitesse de recombinaison à la jonction qui est ici égale à 10<sup>5</sup> cm/s situé dans la partie de la figure III-16 où la phototension décroît lorsque le champ magnétique augmente.

### III-2-6-2. Influence de la vitesse de recombinaison aux joints de grain sur la phototension

Nous représentons sur la figure III-21 suivante la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière pour différentes valeurs de la vitesse de recombinaison aux joints de grain, les autres paramètres tant fixes.

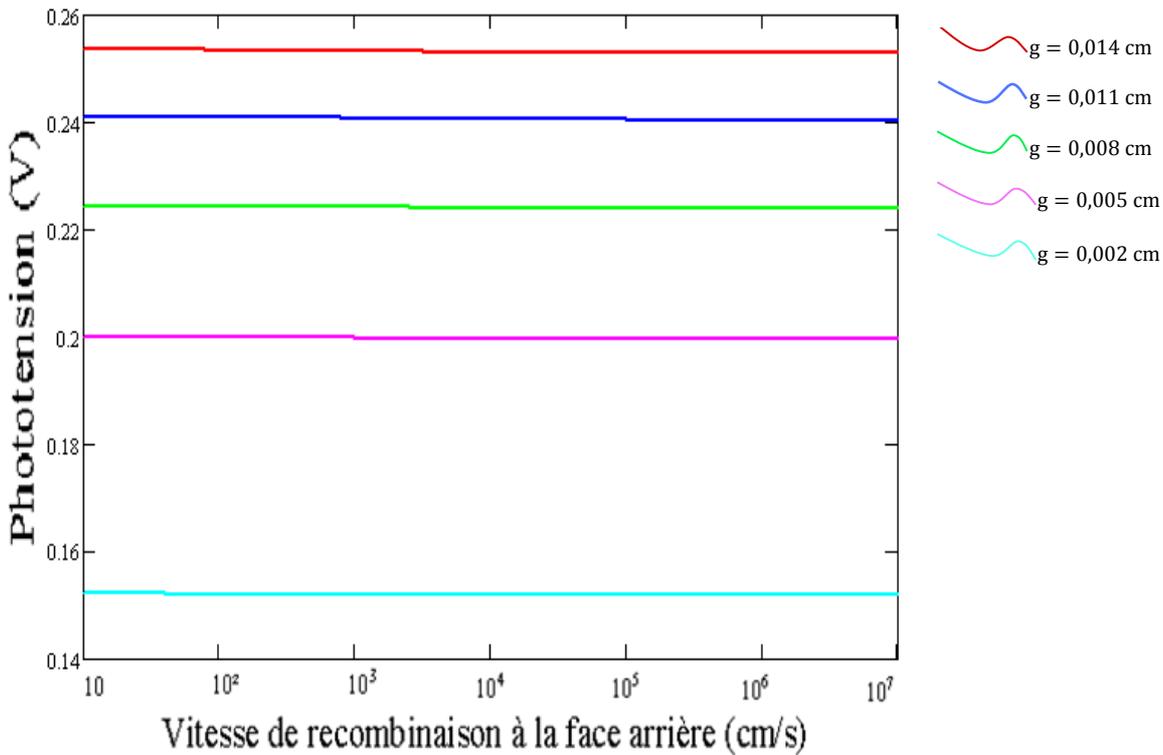


**Figure III-21** : Phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière pour différentes valeurs de la vitesse de recombinaison aux joints de grain avec  $B = 10^{-5}$  T ;  $g = 0,02$  cm ;  $S_b = 10^5$  cm/s

Nous remarquons sur la figure III-21 que quelle que soit la valeur de la vitesse de recombinaison à la jonction que lorsque la vitesse de recombinaison aux joints de grain augmente, la phototension diminue. La recombinaison élevée au niveau des joints de grain diminue les porteurs de charge dans la base et diminue donc la phototension.

### III-2-6-3. Influence de la taille des grains sur la phototension

Nous représentons sur la figure III-22 suivante la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière pour différentes valeurs de la taille des grains, les autres paramètres étant fixes.



**Figure III-22** : Phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière pour différentes valeurs de la taille des grains avec  $B = 10^{-5}$  T ;  $S_g = 56,234$  cm/s ;  $S_f = 10^5$  cm/s

Sur la figure III-22 représentant la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière pour différentes valeurs de la taille des grains, nous remarquons que la phototension augmente lorsque la taille des grains augmente. L'explication de cet effet est que lorsque la taille des grains augmente, la surface illuminée aussi augmente et donc la génération de porteurs de charge augmente du fait de l'augmentation des photons incident pénétrant le matériau. On enregistre par la suite une augmentation de la phototension.

### III-3 Etude des paramètres de recombinaison $S_f$ et $S_b$ [12,13]

#### III-3-1. Expressions de la vitesse de recombinaison à la face arrière

En regardant les figures III-4, III-5, III-6 et III-7 qui représentent toutes la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction, nous remarquons que pour les grandes valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction, le gradient de la densité de photocourant est nul. Cette remarque est valable quelle que soit la valeur des autres paramètres.

On peut donc écrire pour ces grandes valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction :

$$\frac{\partial}{\partial S_f} J_{ph} = 0 \quad (III-5)$$

La résolution de cette équation pour donne deux solutions dont la première s'écrit :

$$S_{b0} = \frac{D^*}{L_{j,k}^*} \tanh \frac{H}{L_{j,k}^*} \quad (III-6)$$

L'équation (III-16) ci-dessus n'est fonction que des paramètres de diffusion.

La deuxième solution qui est fonction non seulement des paramètres de diffusion mais aussi des paramètres de génération des porteurs de charge constitue la vitesse de recombinaison à la face arrière. Elle se présente comme suit :

#### Vitesse de recombinaison à la face arrière $S_b$

$$S_b = D^* \frac{\sum_j \sum_k \left\{ \frac{R_{j,k}}{L_{j,k}^* g v^2} \times \sum_i^3 \left[ k_{j,k}^i \times \left( L_{j,k}^* b_i \left( e^{-b_i H} - \cosh \frac{H}{L_{j,k}^*} \right) + \sinh \frac{H}{L_{j,k}^*} \right) \right] \right\}}{\sum_j \sum_k \left\{ \frac{R(p,u,v,j,k)}{L(p,u,v,j,k) g v^2} \times \sum_i^3 \left[ k_{j,k}^i \times \left( e^{-b_i H} - \cosh \frac{H}{L_{j,k}^*} + L_{j,k}^* b_i \sinh \frac{H}{L_{j,k}^*} \right) \right] \right\}} \quad (III-7)$$

### III-3-2. Expressions de la vitesse de recombinaison à la jonction

L'observation des figures III-8, III-9, III-10 et III-11, qui représentent en partie l'évolution de la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière, nous montre que le gradient de la densité de photocourant est nul aux grandes valeurs de la vitesse de recombinaison à la face arrière.

Donc pour les grandes valeurs de cette dernière, on a :

$$\frac{\partial}{\partial S_b} J_{ph_{av}} = 0 \quad (III-8)$$

En résolvant l'équation (III-19) précédente, nous obtenons l'expression de la vitesse de recombinaison intrinsèque  $S_{f0}$  suivantes :

#### Vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction $S_f$

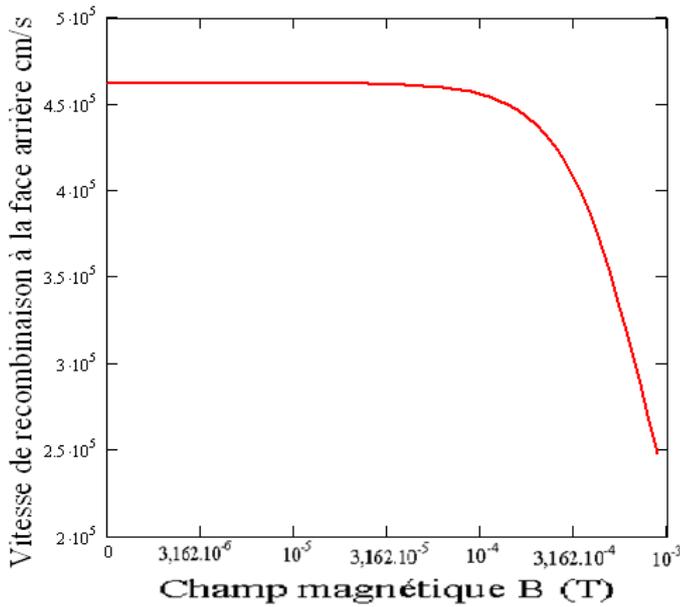
$$S_{fav} = D^* \frac{\sum_j \sum_k \left\{ \frac{R_{j,k}}{L_{j,k}^* g_{v^2}} \times \sum_i^3 \left[ k_{j,k}^i \times \left( \sinh \frac{H}{L_{j,k}^*} e^{-b_i H - b_i L_{j,k}^*} + b_i L_{j,k}^* \cosh \frac{H}{L_{j,k}^*} e^{-b_i H} \right) \right] \right\}}{\sum_j \sum_k \left\{ \frac{R(p,u,v,j,k)}{L(p,u,v,j,k) g_{v^2}} \times \sum_i^3 \left[ k_{j,k}^i \times \left( 1 - \cosh \frac{H}{L_{j,k}^*} e^{-b_i H - b_i L_{j,k}^*} \sinh \frac{H}{L_{j,k}^*} e^{-b_i H} \right) \right] \right\}} \quad (III-9)$$

### III-3-3. Profil des paramètres de recombinaison

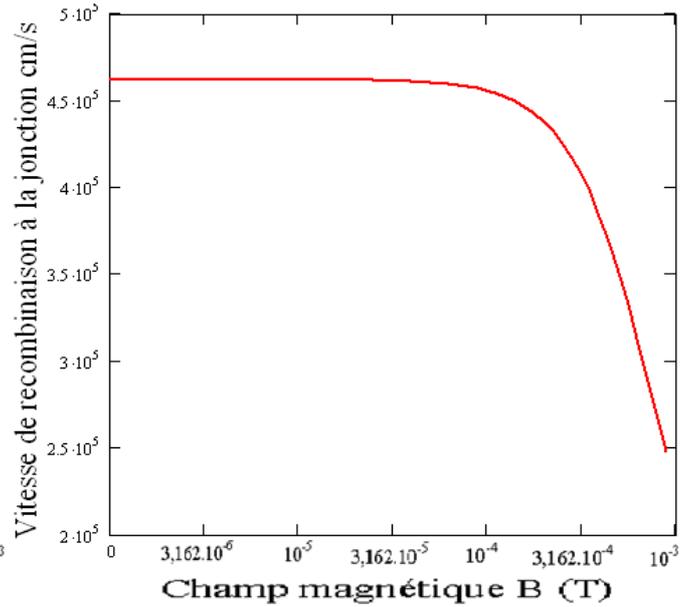
A partir de ces expressions, nous allons représenter graphiquement la vitesse de recombinaison à la face arrière et la vitesse de recombinaison à la jonction en fonction des différents paramètres.

#### III-3-1-2-1. Influence du champ magnétique

Les figures III-23 et III-24 suivantes représentent la vitesse de recombinaison à la face arrière en fonction du champ magnétique respectivement la vitesse de recombinaison à la jonction en fonction du champ magnétique, les autres paramètres étant fixes



**Figure III-23** : Vitesse de recombinaison à la face arrière en fonction du champ magnétique, avec  $S_g=891,251\text{cm/s}$  ;  $g=0,002\text{cm}$

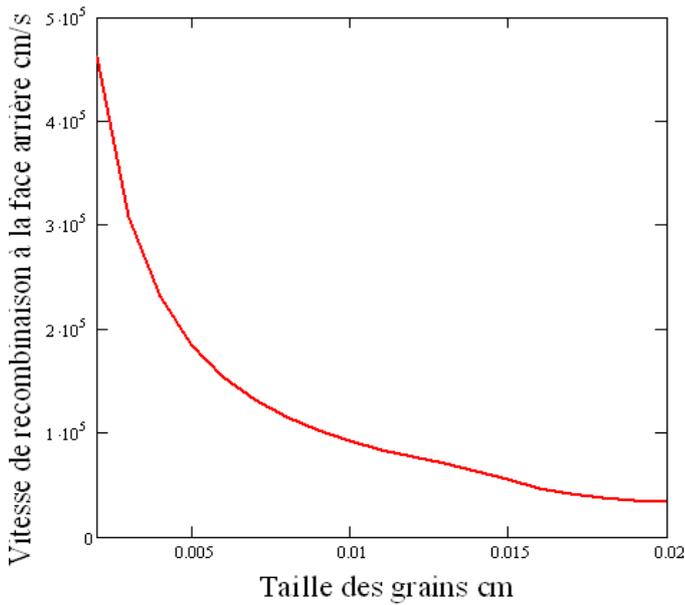


**Figure III-24** : Vitesse de recombinaison à la jonction en fonction du champ magnétique, avec  $S_g = 891,251\text{ cm/s}$  ;  $g = 0,002\text{ cm}$

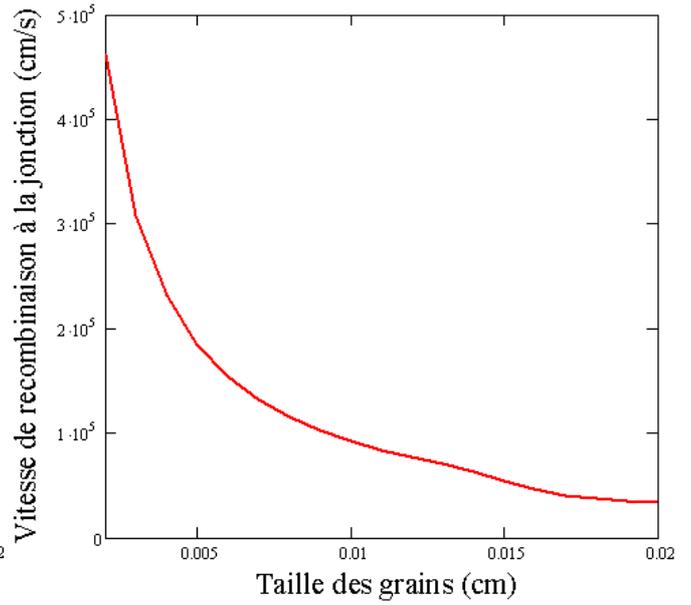
Les figures III-23 et III-24 sont pratiquement identiques. Nous constatons qu'aux faibles valeurs du champ magnétique, la vitesse de recombinaison à la face arrière et la vitesse de recombinaison à la jonction sont constantes. Mais lorsque le champ magnétique devient élevé, ces vitesses de recombinaison décroissent avec l'augmentation du champ B.

### III-3-1-2-2. Influence de la taille des grains

Les figures III-25 et III-26 suivantes représentent la vitesse de recombinaison à la face arrière en fonction de la taille des grains respectivement la vitesse de recombinaison à la jonction en fonction de la taille des grains, les autres paramètres étant fixes



**Figure III-25 :** Vitesse de recombinaison à la face arrière en fonction de la taille des grains, avec  $S_g = 56,234$  cm/s ;  $B = 0$  T

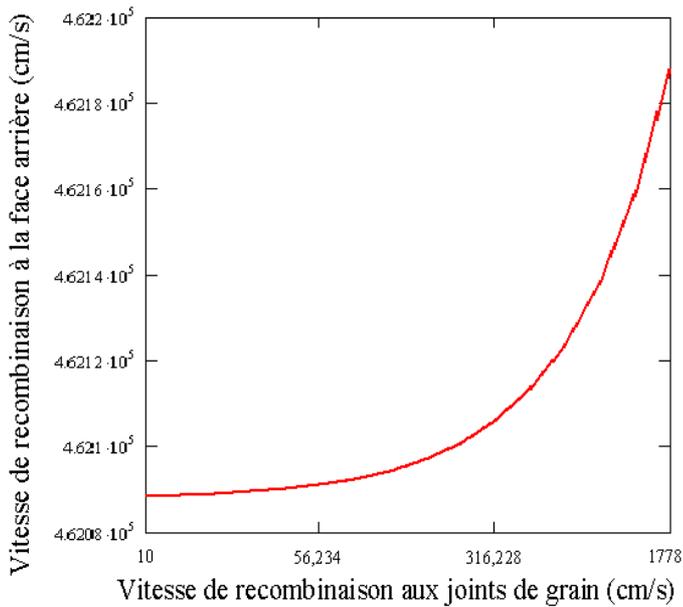


**Figure III-26 :** Vitesse de recombinaison à la jonction en fonction du champ magnétique, avec  $S_g = 56,234$  cm/s ;  $B = 0$  T

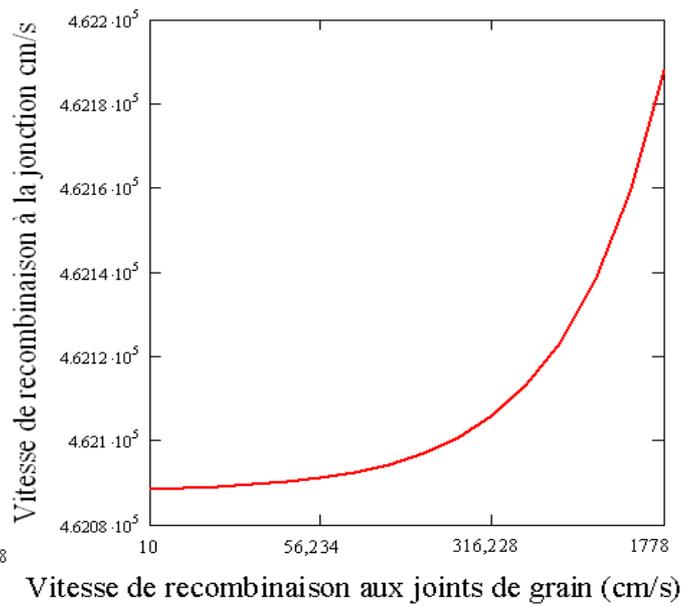
Les figures III-25 et III-26 ont les mêmes allures. Nous constatons aussi bien la vitesse de recombinaison à la face arrière que la vitesse de recombinaison à la jonction décroît lorsque la taille des grains augmente. On remarque cependant qu'à partir d'une certaine valeur de la taille des grains que les valeurs des paramètres de recombinaison obtenues deviennent pratiquement constantes.

### III-3-1-2-3. Influence de la vitesse de recombinaison aux joints de grain

Les figures III-27 et III-28 suivantes représentent la vitesse de recombinaison à la face arrière en fonction de la vitesse de recombinaison aux joints de grain respectivement la vitesse de recombinaison à la jonction en fonction de la vitesse de recombinaison aux joints de grain, les autres paramètres étant fixes.



**Figure III-27:** Vitesse de recombinaison à la face arrière en fonction de la vitesse de recombinaison aux joints de grain, avec  $g = 0,002 \text{ cm}$  ;  $B = 0 \text{ T}$



**Figure III-28:** Vitesse de recombinaison à la jonction en fonction de la vitesse de recombinaison aux joints de grain, avec  $g = 0,002 \text{ cm}$  ;  $B = 0 \text{ T}$

Les figures III-27 et III-28 présentent des allures identiques. Nous constatons que les valeurs des vitesses de recombinaison obtenues aux valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction inférieures à 56,234 cm/s sont pratiquement constantes. Et qu'au-delà de cette valeur, une faible augmentation des la vitesse de recombinaison aux joints de grain fait croître considérablement les vitesses de recombinaison à la face arrière et à la jonction.

## Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons déterminé les expressions de la densité de photocourant et de la phototension qui nous ont permis de tracer leur profil en fonction du champ magnétique, de la taille des grains, de la vitesse de recombinaison aux joints de grain, de la vitesse de recombinaison à la jonction et de la vitesse de recombinaison à la face arrière. Nous avons donc à partir de ces courbes mis en évidence l'effet de ces différents paramètres susmentionné sur la densité de photocourant et sur la phototension. Mais aussi à partir des courbes de la densité de photocourant en fonction des vitesses de recombinaison, nous avons déterminé les vitesses de recombinaison à la jonction et à la face arrière. Ces vitesses de recombinaison  $S_f$  et  $S_b$  ont aussi été étudié en fonction de ces différents paramètres.

## **Chapitre IV :**

**Etude de la caractéristique statique  
I-V et des paramètres électriques  
correspondant aux résistances  
shunt  $R_{sh}$  et série  $R_s$  par unité de  
surface de la photopile sous  
éclairage multispectral et sous  
champ magnétique  $B$**

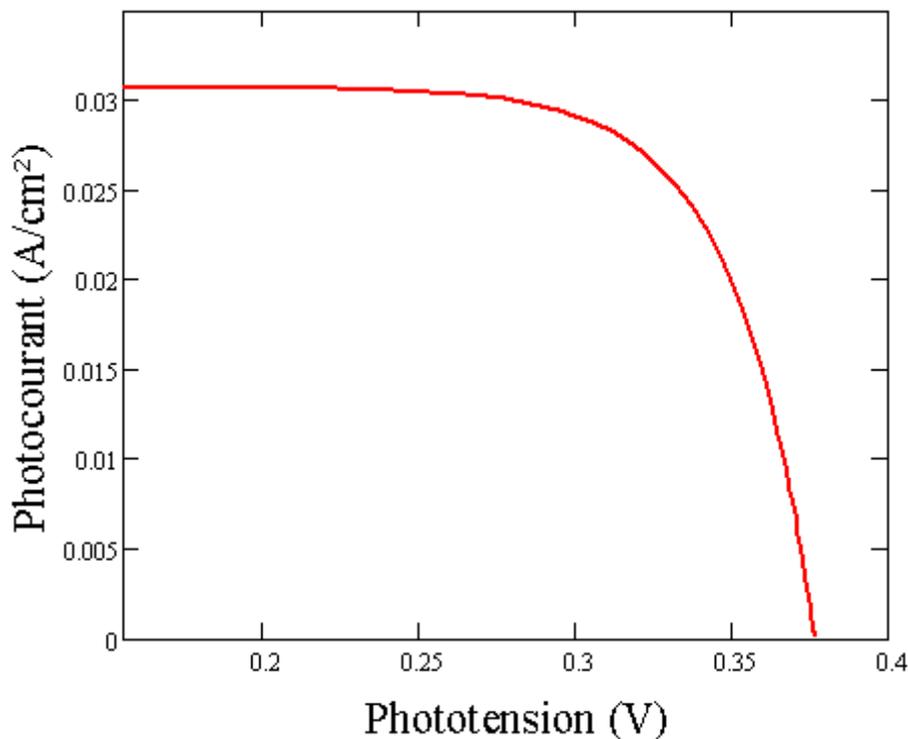
## Introduction

Dans ce chapitre, en nous basant sur les résultats obtenus pour la densité de photocourant et la phototension, nous allons étudier la caractéristique  $J_{ph}$ - $V_{ph}$  de la photopile pour pouvoir ensuite proposer un modèle de détermination de la résistance shunt  $R_{sh}$  et de la résistance série  $R_s$ .

### IV-1. Caractéristique densité de photocourant-phototension $J_{ph}$ - $V_{ph}$ de la photopile

Nous avons déterminé dans le chapitre précédent la densité de photocourant et la phototension, et avons mis en évidence l'influence du champ magnétique, de la taille des grains de la vitesse de recombinaison aux joints de grain sur ces derniers. A partir des résultats obtenus dans le chapitre précédent, nous allons étudier la caractéristique  $J_{ph}$ - $V_{ph}$ [14] qui représente la densité de photocourant  $J_{ph}(S_f)$  en fonction de la phototension  $V_{ph}(S_f)$

Nous représentons sur la figure IV-1 suivante la caractéristique  $J_{ph}$ - $V_{ph}$ , avec  $B$  ;  $S_g$  ;  $g$  et  $S_b$  fixes.

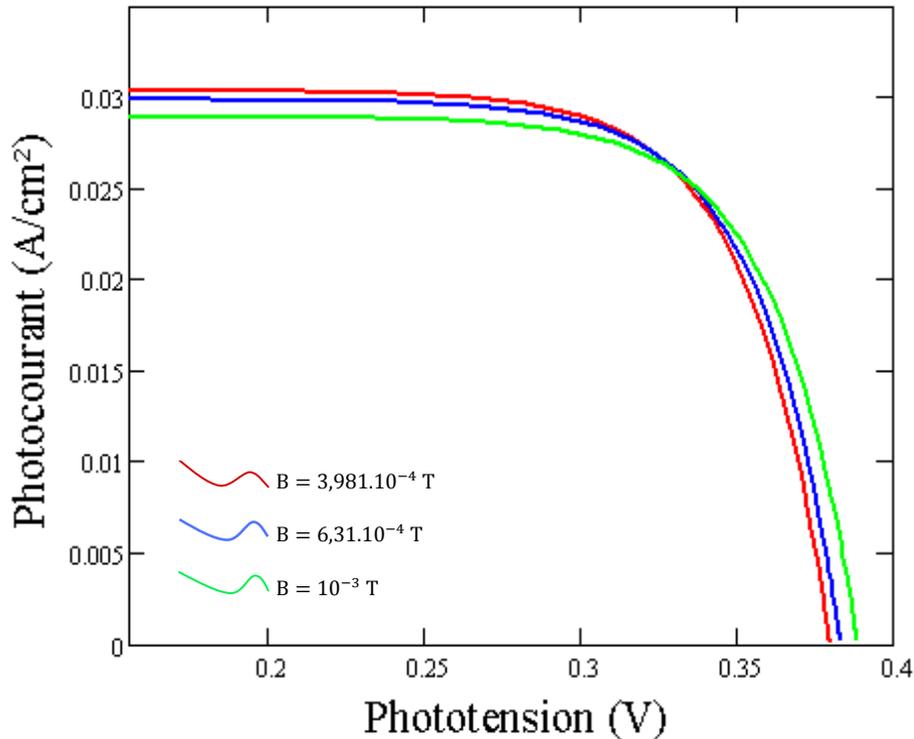


**Figure IV-1 :** Densité de photocourant  $J_{ph}$  en fonction de la phototension  $V_{ph}$ ,  
avec  $B = 10^{-5}$  T ;  $S_g = 56,234$  cm/s ;  $g = 0,02$  cm ;  $S_b = 10^4$  cm/s.

Sur la figure IV-1, nous constatons que la densité de photocourant est maximale et invariante aux faibles valeurs de la phototension elle correspond à la densité de photocourant de court circuit puis, elle diminue et s'annule lorsque la phototension augmente et atteint sa valeur maximale qui correspond à la phototension de circuit ouvert.

#### IV-1-1. Influence du champ magnétique sur la caractéristique Jph-Vph

Nous représentons sur la figure IV-2 suivante la caractéristique statique Jph-Vph pour différentes valeurs du champ magnétique, avec  $S_g$  ;  $g$  et  $S_b$  fixes.

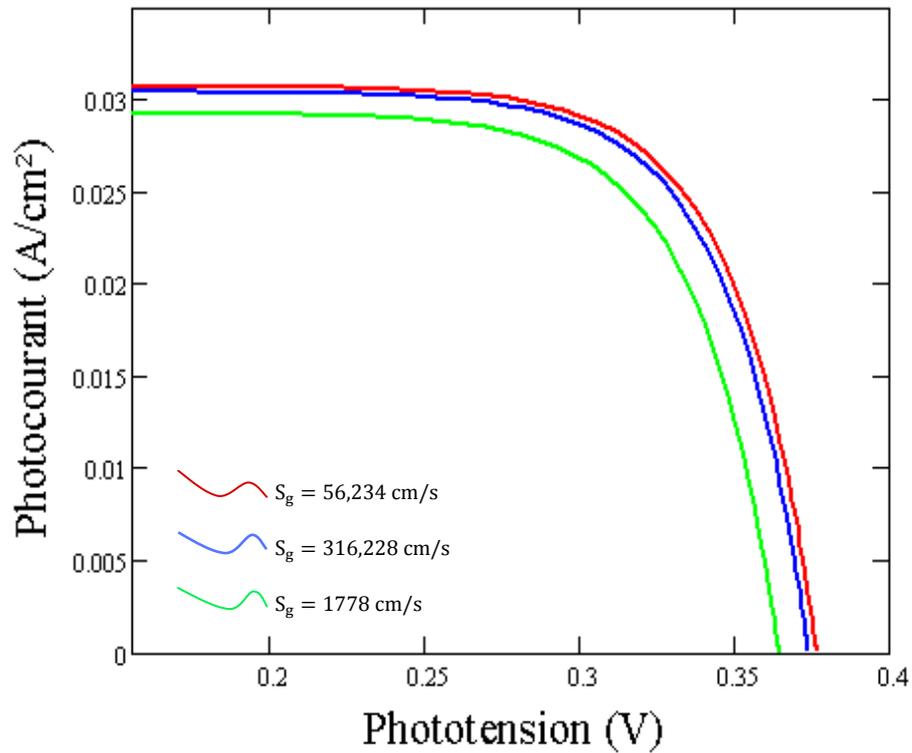


**Figure IV-2 :** Densité de photocourant  $J_{ph}$  en fonction de la phototension  $V_{ph}$  pour différentes valeurs du champ magnétique, avec  $S_g = 56,234$  cm/s ;  $g = 0,02$  cm ;  $S_b = 10^4$  cm/s.

Sur la figure IV-2, nous constatons que, lorsque le champ magnétique augmente, le photocourant de court circuit diminue alors que la phototension de circuit ouvert augmente. Ainsi donc on peut dire que la présence d'un champ magnétique dans le milieu où est placée la photopile augmente la production en phototension mais diminue la production en photocourant. Ceci est dû au blocage des porteurs de charge ayant été déviés par la force de Lorentz. C'est la déflexion des porteurs due à la présence du champ magnétique  $B$ .

#### IV-1-2. Influence de la vitesse de recombinaison aux joints de grain sur la caractéristique Jph-Vph

Nous représentons sur la figure IV-3 suivante la caractéristique statique Jph-Vph pour différentes valeurs de la vitesse de recombinaison aux joints de grain avec  $B$  ;  $g$  et  $S_b$  fixes.

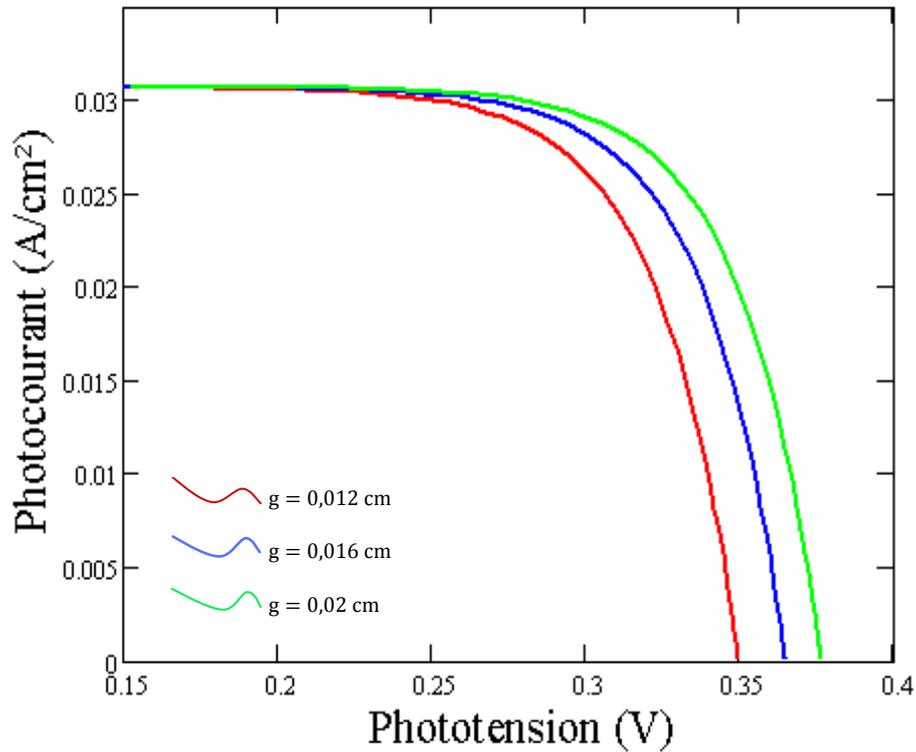


**Figure IV-3 :** Densité de photocourant  $J_{ph}$  en fonction de la phototension  $V_{ph}$  pour différentes valeurs de la vitesse de recombinaison aux joints de grain, avec  $B = 10^{-5} T$  ;  $g = 0,02 \text{ cm}$  ;  $S_b = 10^4 \text{ cm/s}$ .

Nous remarquons sur la figure IV-3, que lorsque la vitesse de recombinaison aux joints de grain augmente, aussi bien la densité de photocourant que la phototension diminuent. La recombinaison aux joints de grain symbolise une perte de porteurs de charge photocréés dans la base et c'est ce qui diminue la production de courant et de tension d'une photopile éclairée. Plus la recombinaison aux joints de grain est élevée, plus la photopile est de mauvaise qualité.

### IV-1-3. Influence de la taille des grains sur la caractéristique $J_{ph}$ - $V_{ph}$

Nous représentons sur la figure IV-4 suivante la caractéristique statique  $J_{ph}$ - $V_{ph}$  pour différentes valeurs de la taille des grains avec  $B$  ;  $S_g$  et  $S_b$  fixes. Ici, nous avons choisi  $S_g$  faible c'est-à-dire égale à  $56,234 \text{ cm/s}$  parce que nous avons choisi une plage de valeurs de la taille de grains qui sont relativement élevées. Ce choix se justifie par le fait que la vitesse de recombinaison aux joints de grain est élevée lorsque la taille des grains est petite et elle diminue lorsque cette dernière augmente.

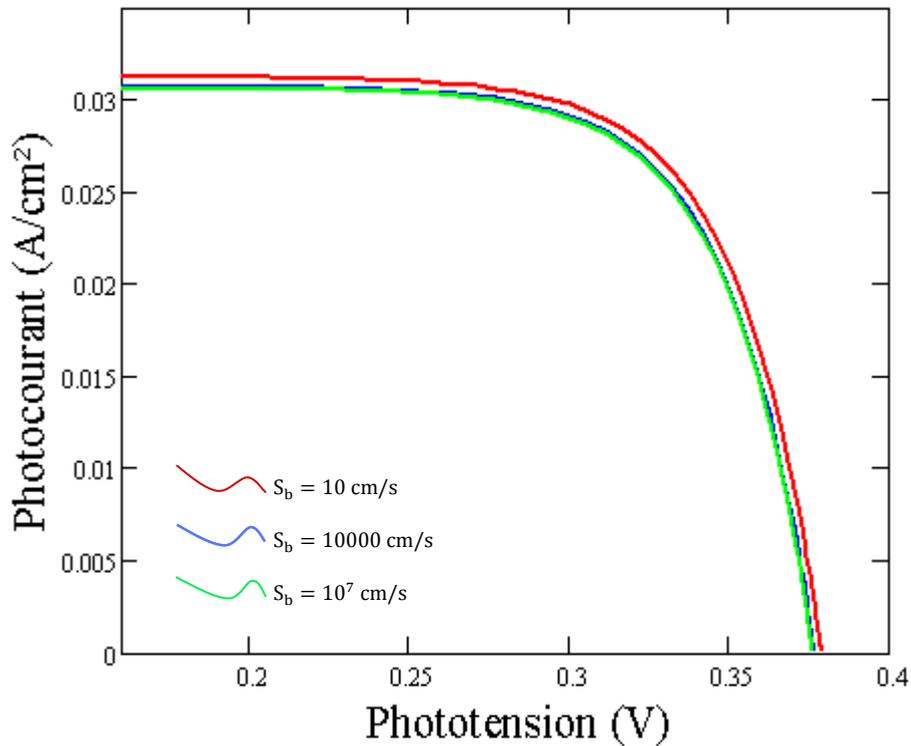


**Figure IV-4 :** Photocourant  $J_{ph}$  en fonction de la phototension  $V_{ph}$  pour différents valeurs de la taille des grains, avec  $B = 10^{-5} T$  ;  $S_g = 56,234 \text{ cm/s}$  ;  $S_b = 10^4 \text{ cm/s}$ .

Il apparait clairement sur la figure IV-4 que la taille des grains n'a qu'un très faible effet sur le photocourant de court circuit qui augmente avec elle. Alors que son effet sur la phototension est plus accentué. C'est du au fait que sur la plage de valeurs de la taille de grain où nous sommes, la vitesse de recombinaison aux joints de grain est petite ce qui entraine un stockage de charge dans la base qui augmente la phototension. Cette dernière augmente considérablement avec la taille des grains. Plus la taille des grains augmente plus la production en courant et en tension augmente et plus la photopile est de bonne qualité.

#### **IV-1-4. Influence de la vitesse de recombinaison à la face arrière sur la caractéristique $J_{ph}$ - $V_{ph}$**

Nous représentons sur la figure IV-5 suivante la caractéristique statique  $J_{ph}$ - $V_{ph}$  pour différentes valeurs de la vitesse de recombinaison à la face arrière avec  $B$  ;  $S_g$  et  $g$  fixes.



**Figure IV-5 :** Photocourant  $J_{ph}$  en fonction de la phototension  $V_{ph}$  pour différentes valeurs de la vitesse de recombinaison à la face arrière, avec  $B = 10^{-5}$  T ;  $S_g = 56,234$  cm/s ;  $g = 0,02$  cm.

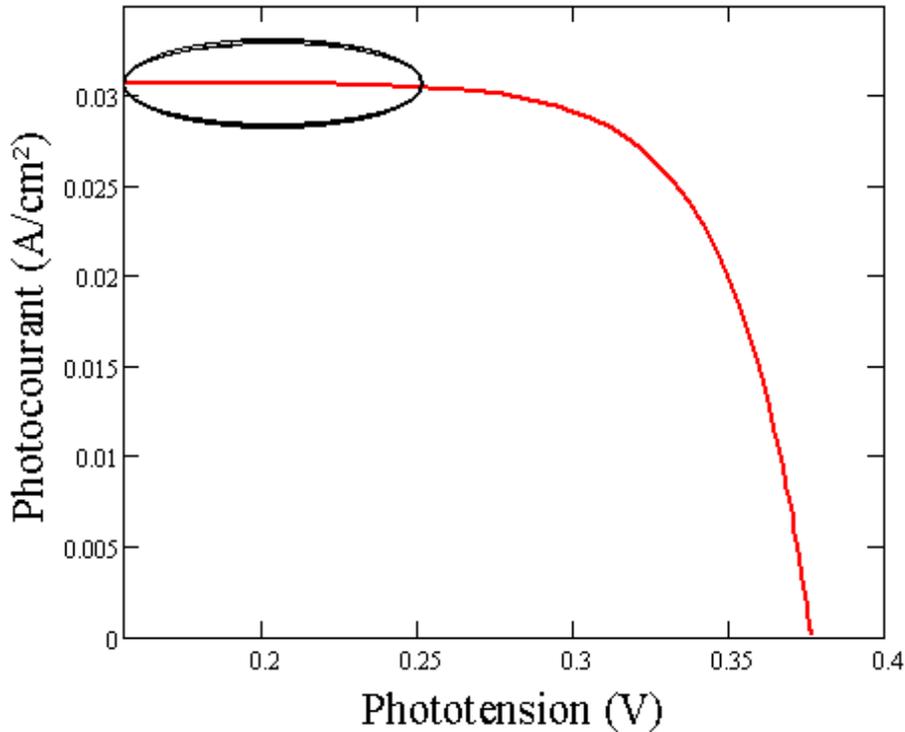
Sur la figure IV-5 nous remarquons que lorsque la vitesse de recombinaison à la face arrière augmente, aussi bien la densité de photocourant que la phototension diminuent. La recombinaison à la face arrière diminue donc la production de courant et de tension d'une photopile éclairée. Plus la recombinaison à la face arrière est élevée, plus la photopile est de mauvaise qualité.

## IV-2. Etude des paramètres électriques $R_{sh}$ et $R_s$ d'une photopile

### IV-2-1. Résistance shunt $R_{sh}$

Ce paramètre, résistance shunt présente un grand intérêt. Certains auteurs [15-16-17] l'ont étudié.

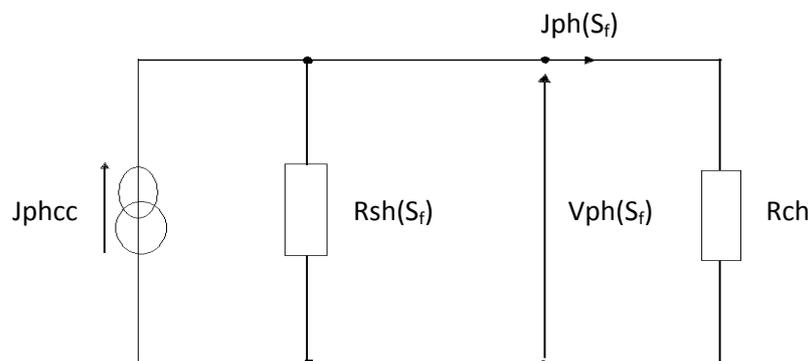
Nous reprenons la courbe de la figure IV-1 sur la figure IV-6 suivante.



**Figure IV-6 :** Densité de photocourant  $J_{ph}$  en fonction de la phototension  $V_{ph}$ , avec  $B = 10^{-5}$  T ;  $S_g = 56,234$  cm/s ;  $g = 0,02$  cm ;  $S_b = 10^4$  cm/s.

La zone encadrée de la figure IV-6, qui représente la densité de photocourant en fonction de la phototension, correspond à la partie de la caractéristique qui est horizontale et donc indépendante de la phototension. Les caractéristiques que la photopile présente dans ces circonstances sont assimilables à celles d'une source de courant, qui débite une intensité électrique constante quelle que soit la valeur de la tension. Et comme une photopile n'est pas idéale, elle présentera donc des fuites de courant. Ce courant de fuite généralement faible pour les photopiles de bonne qualité se caractérise par la présence d'une charge interne dans la photopile qu'on appelle résistance de fuite ou résistance shunt.

Nous proposons par la figure IV-7 suivante un schéma de circuit équivalent électrique d'une photopile qui fonctionne en court circuit.



**Figure IV-7 :** Circuit équivalent électrique d'une photopile lorsqu'elle fonctionne en court circuit

$J_{phcc}$  : densité de photocourant de court circuit

$R_{sh}$  : Résistance shunt par unité de surface

$J_{ph}(S_f)$  : densité de photocourant

$V_{ph}(S_f)$  : Phototension

$R_{ch}$  : Résistance de charge faible

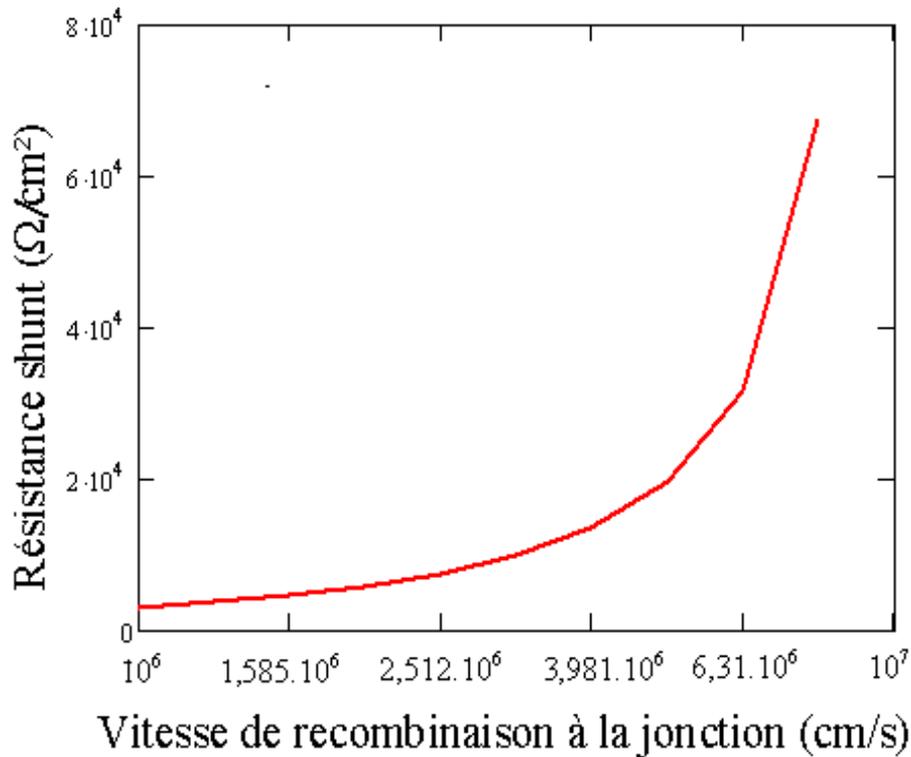
La loi à la maille appliquée au circuit de la figure IV-7 nous donne :

$$V(S_f) = R_{sh}(S_f)(I_{cc} - I_{ph}(S_f)) \quad (IV-1)$$

De cette expression, on en tire la résistance shunt, qui s'écrit donc :

$$R_{sh}(S_f) = \frac{V(S_f)}{I_{cc} - I_{ph}(S_f)} \quad (IV-2)$$

Nous représentons sur la figure IV-8 suivante la résistance shunt  $R_{sh}$  en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction, avec  $B$  ;  $S_g$  ;  $g$  et  $S_b$  fixes.

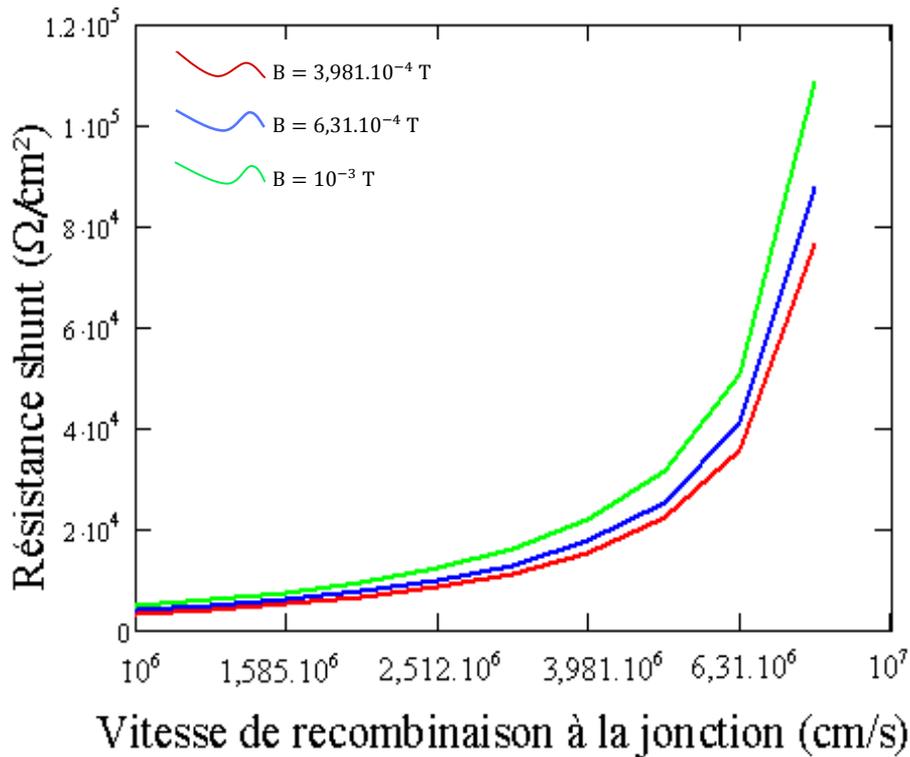


**Figure IV-8 :** Résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction, avec  $B = 10^{-5}$  T ;  $S_g = 158,489$  cm/s ;  $g = 0,007$  cm ;  $S_b = 10^5$  cm/s.

Sur la figure IV-8, nous constatons que lorsque la vitesse de recombinaison augmente, la résistance shunt aussi augmente considérablement. Ici l'augmentation de la vitesse de recombinaison à la jonction se symbolise sur le circuit électrique équivalent par la résistance de charge qui est petite.

#### IV-2-1-1. Influence du champ magnétique sur la résistance shunt

Nous représentons sur la figure IV-8 suivante la résistance shunt  $R_{sh}$  en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs du champ magnétique avec  $S_g$  ;  $g$  et  $S_b$  fixes.

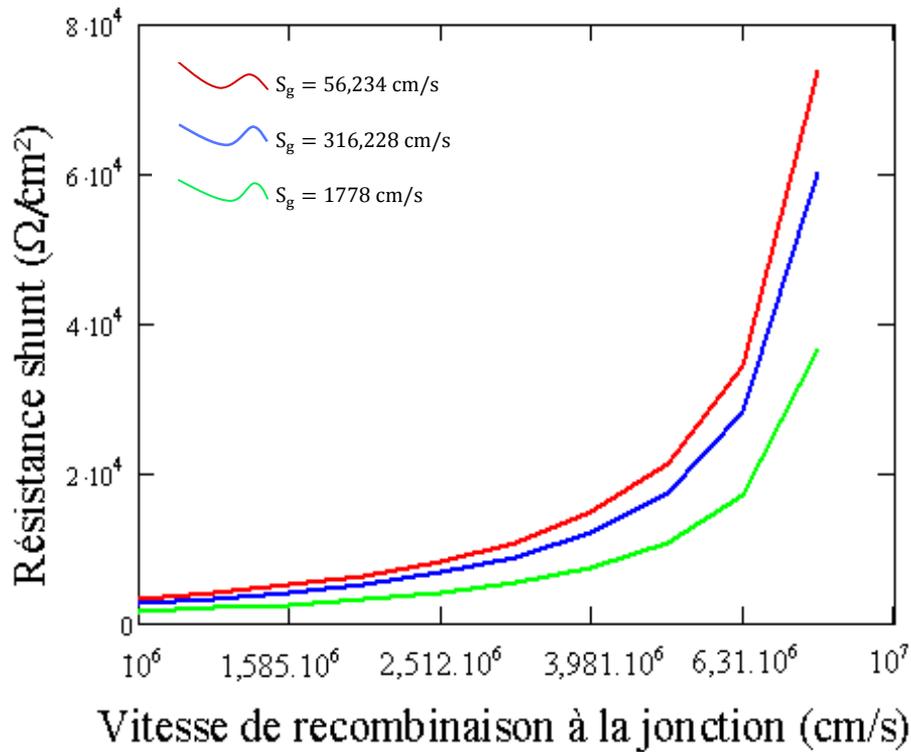


**Figure IV-9 :** Résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs du champ magnétique, avec  $S_g = 158,489 \text{ cm/s}$  ;  $g = 0,007 \text{ cm}$  ;  $S_b = 10^5 \text{ cm/s}$ .

Nous voyons clairement sur la figure IV-9, que quelle que soit la valeur de la vitesse de recombinaison à la jonction, lorsque le champ magnétique augmente, la résistance shunt aussi augmente. Ceci s'explique par le fait que lorsque le champ magnétique augmente, le nombre de porteurs de charge défectés et bloqués augmente.

#### IV-2-1-2. Influence de la vitesse de recombinaison aux joints de grain sur la résistance shunt

Nous représentons sur la figure IV-10 suivante la résistance shunt  $R_{sh}$  en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la vitesse de recombinaison aux joints de grain, avec  $B$  ;  $g$  et  $S_b$  fixes.

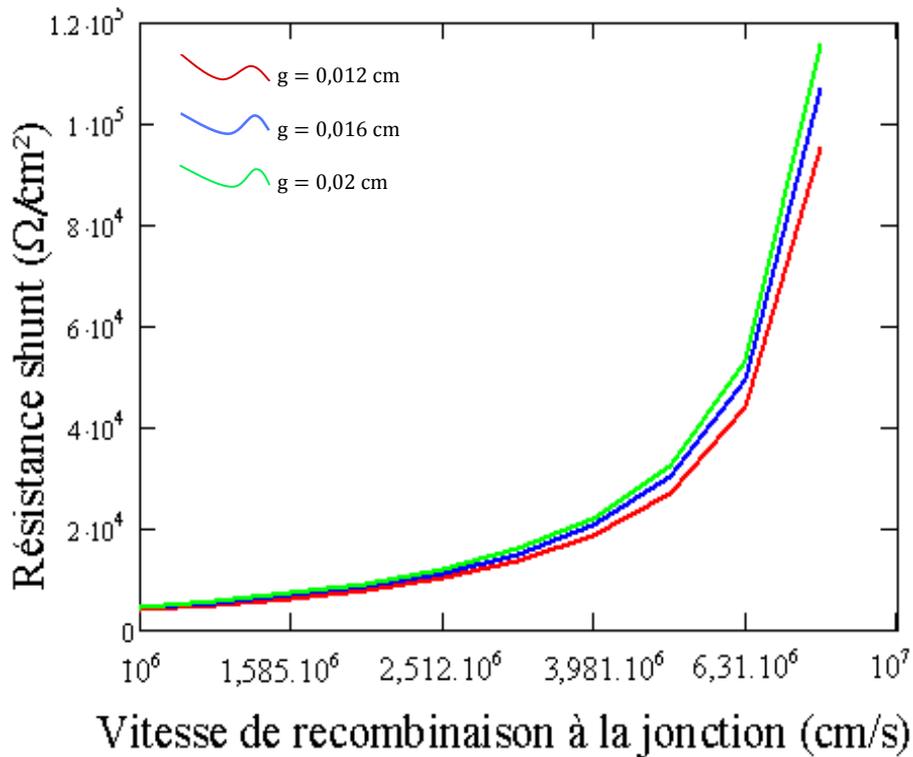


**Figure IV-10 :** Résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la vitesse de recombinaison aux joints de grain, avec  $B = 10^{-5} \text{ T}$  ;  $g = 0,007 \text{ cm}$  ;  $S_b = 10^5 \text{ cm/s}$ .

Sur la figure IV-10 qui représente la résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la vitesse de recombinaison aux joints de grain quelle que soit la valeur de la vitesse de recombinaison à la jonction, lorsque la vitesse de recombinaison aux joints de grain augmente, la résistance shunt diminue.

### IV-2-1-3. Influence de la taille des grains sur la résistance shunt

Nous représentons sur la figure IV-8 suivante la résistance shunt  $R_{sh}$  en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la taille des grains et pour les trois modes d'éclairage, les autres paramètres étant fixes.

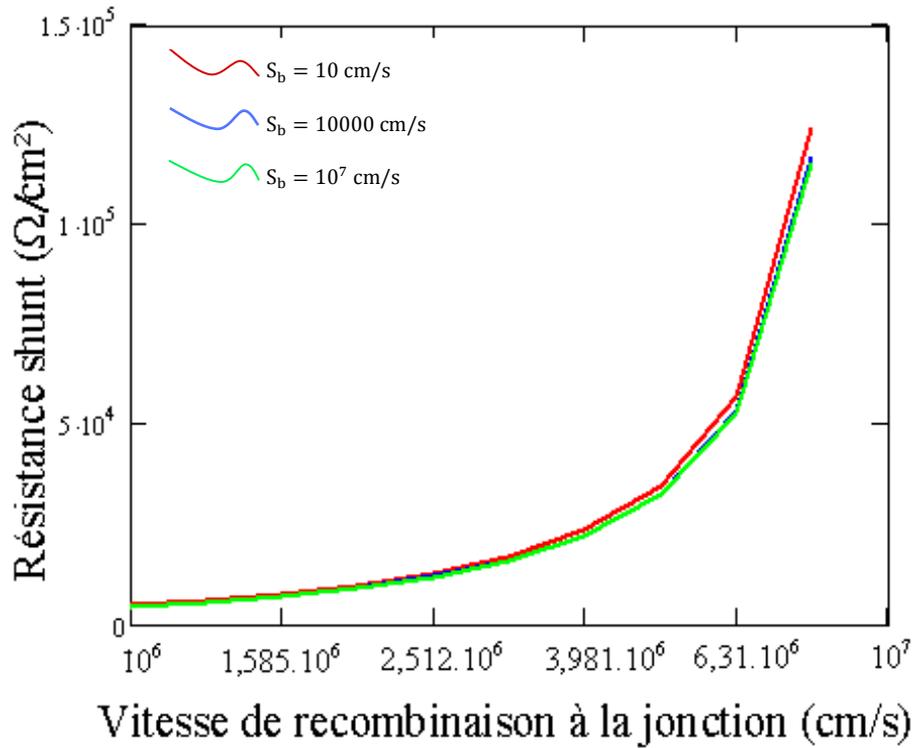


**Figure IV-11** : Résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la taille des grains, avec  $B = 10^{-5} \text{ T}$  ;  $S_g = 56,234 \text{ cm/s}$  ;  $S_b = 10^5 \text{ cm/s}$ .

Sur la figure IV-11, pour toutes les valeurs possibles de la vitesse de recombinaison à la jonction, la résistance shunt augmente lorsque la taille des grains augmente.

#### IV-2-1-4. Influence de la vitesse de recombinaison à la face arrière sur la résistance shunt

Nous représentons sur la figure IV-8 suivante la résistance shunt  $R_{sh}$  en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la vitesse de recombinaison à la face arrière, avec  $B$  ;  $S_g$  et  $g$  fixes.

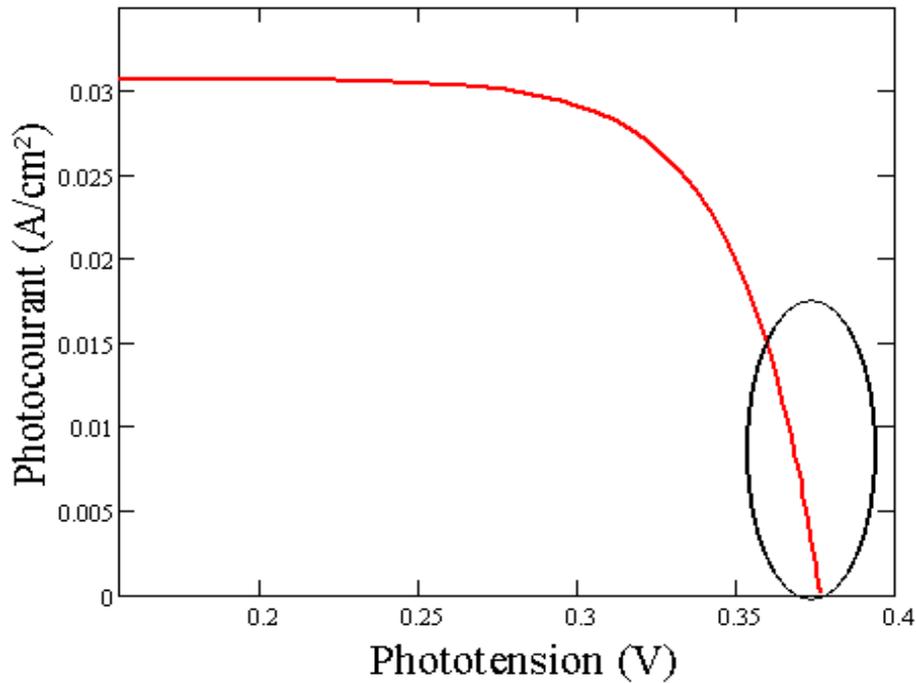


**Figure IV-12** : Résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la vitesse de recombinaison à la face arrière, avec  $B = 10^{-5} \text{ T}$  ;  $S_g = 56,234 \text{ cm/s}$  ;  $g = 0,02 \text{ cm}$ .

Nous remarquons la figure IV-12, une très faible influence de la vitesse de recombinaison à la face arrière sur la résistance shunt. Lorsque la vitesse de recombinaison à la face arrière augmente, la résistance shunt diminue.

#### IV-2-2. Résistance série

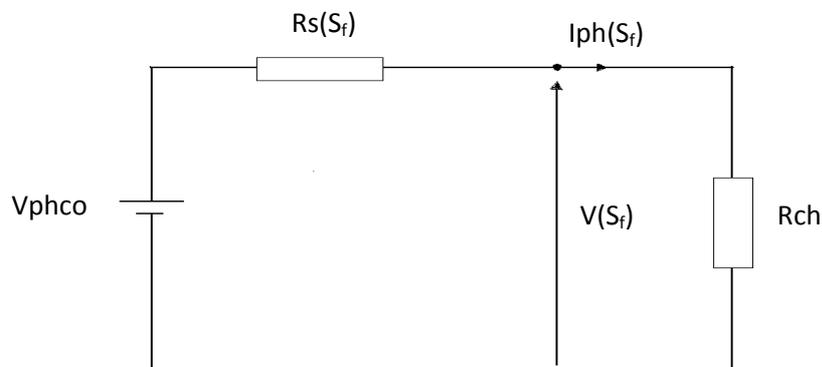
Nous reprenons sur la figure IV-13 suivante la courbe de la figure IV-6 qui représente la densité de photocourant en fonction de la phototension en vue de proposer un modèle de détermination de la résistance série qui a eu à être traitée par certains auteurs [18-19-20].



**Figure IV-13 :** Photocourant  $J_{ph}$  en fonction de la phototension  $V_{ph}$  pour un éclairage par la face avant, avec  $B = 10^{-5}$  T ;  
 $S_g = 56,234$  cm/s ;  $g = 0,02$  cm ;  $S_b = 10^5$  cm/s.

La zone encerclée de la figure IV-13 correspond à la partie de la caractéristique qui est presque verticale et donc peu dépendante de la densité de photocourant. Les caractéristiques que la photopile présente dans ces circonstances sont assimilables à celles d'une source de tension. Et comme une photopile n'est pas idéale, elle présentera donc des fuites ohmiques. Cette fuite se caractérise par la présence dans le circuit équivalent électrique d'une résistance montée en série avec la source de tension de force électromotrice égale à la phototension de circuit ouvert de la photopile et qu'on appelle résistance série.

Nous proposons par la figure IV-13 suivante un schéma de circuit équivalent électrique d'une photopile qui fonctionne dans les conditions de circuit ouvert.



**Figure IV-14 :** Circuit équivalent électrique de la photopile lorsqu'elle fonctionne en circuit ouvert

$V_{phco}$  : phototension de circuit ouvert

$R_s(S_f)$  : Résistance série par unité de surface

$I_{ph}(S_f)$  : Densité de photocourant

$V(S_f)$  : Phototension

$R_{ch}$  : Résistance de charge grande

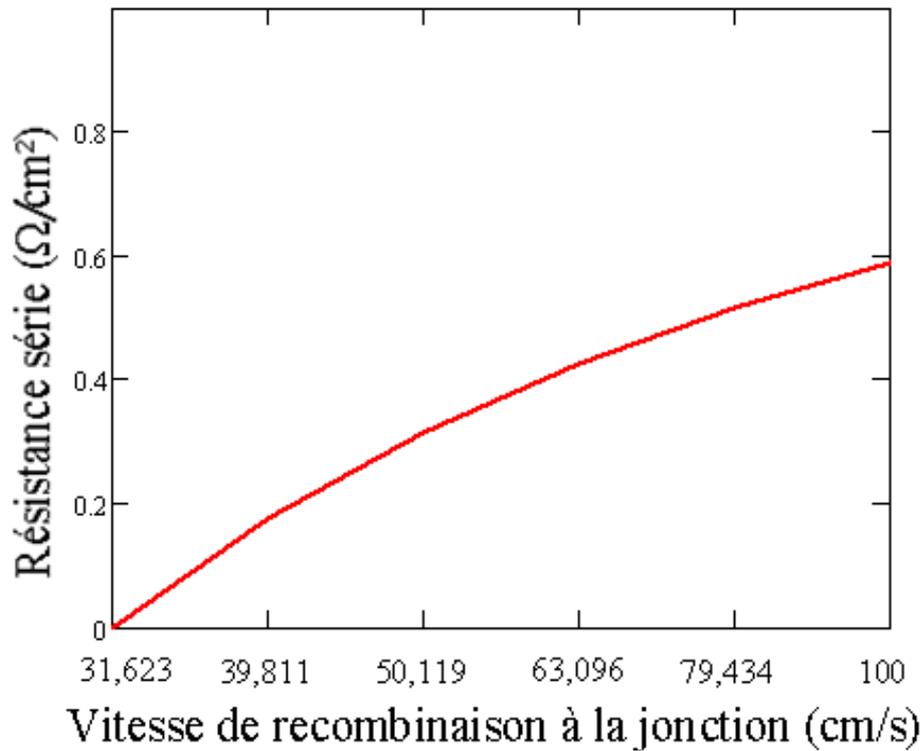
En appliquant la loi des mailles au circuit de la figure IV-14, nous obtenons :

$$V(S_f) = V_{co} - R_s(S_f) \cdot I_{ph}(S_f) \quad (IV-3)$$

Qui nous conduit à la relation suivant :

$$R_s(S_f) = \frac{V_{co} - V(S_f)}{I_{ph}(S_f)} \quad (IV-4)$$

Nous représentons sur la figure IV-15 suivante la résistance série  $R_s$  en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction, avec  $B$  ;  $S_g$  ;  $g$  et  $S_b$  fixes. Nous avons fait un choix de valeur de  $S_g$  et de  $g$  qui ont un sens physique. C'est-à-dire que nous devons avoir de faibles recombinaisons aux joints de grains lorsque la taille des grains est grande. Cependant, le choix de la valeur de  $S_b$  ne change en aucun cas l'allure de la courbe que nous représenterons.

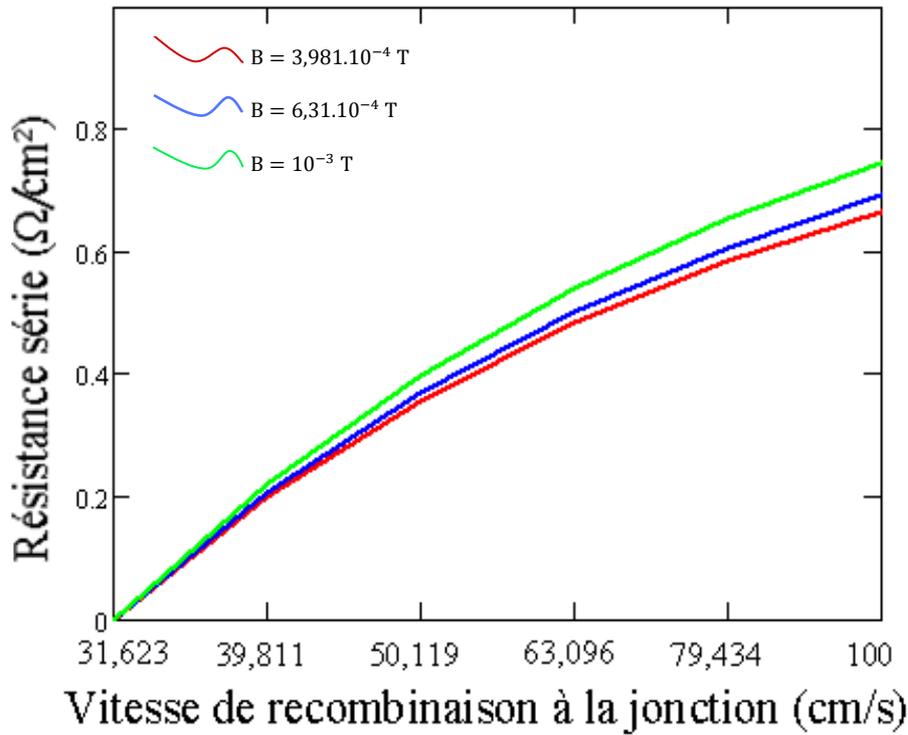


**Figure IV-15 :** Résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction, avec  $B = 10^{-5}$  T ;  $S_g = 56,234$  cm/s ;  $g = 0,02$  cm ;  $S_b = 10^5$  cm/s.

Nous remarquons sur la figure IV-15 qui représente la résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction qu'une légère augmentation de la vitesse de recombinaison à la jonction augmente considérablement la résistance série. Ceci s'explique par le fait la vitesse de recombinaison à la jonction traduit le flux de porteurs à travers la jonction. Lorsqu'elle augmente, le matériau enregistre plus d'activité, de collision entre les porteurs elles mêmes et entre les porteurs et les molécules qui composent le matériau. C'est ce qui explique l'augmentation de la résistance série lorsque la vitesse de recombinaison à la jonction augmente.

#### **IV-2-2-1. Influence du champ magnétique sur la résistance série**

Nous représentons sur la figure IV-16 suivante la résistance série  $R_s$  en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs du champ magnétique avec  $S_g$  ;  $g$  et  $S_b$  fixes.

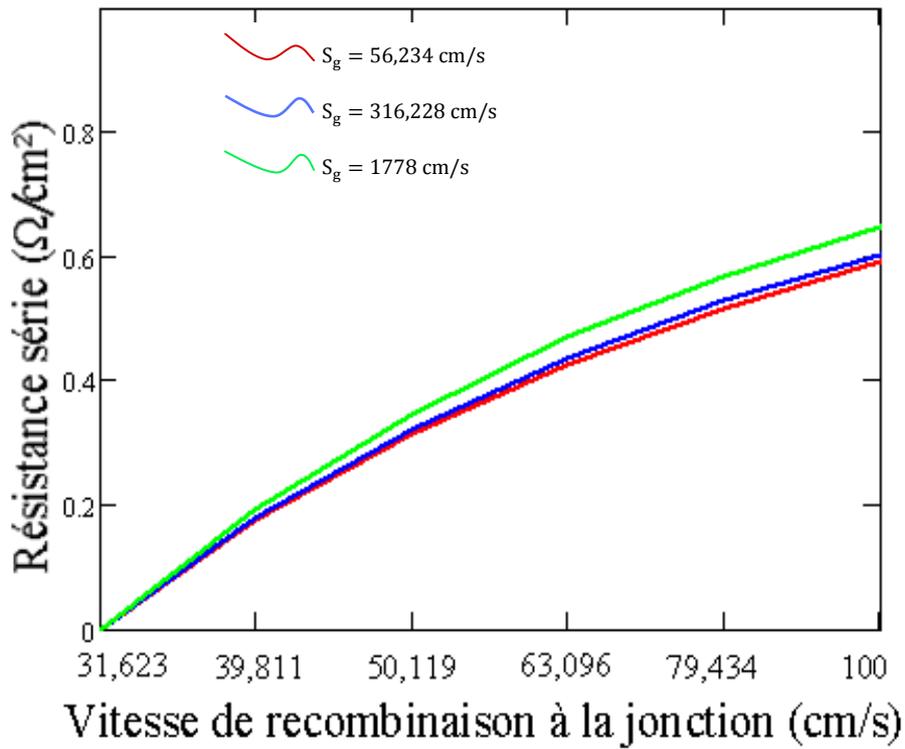


**Figure IV-16** : Résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs du champ magnétique, avec  $S_g = 1778\text{cm/s}$  ;  $g = 0,007\text{ cm}$  ;  $S_b = 10^5\text{ cm/s}$ .

Nous voyons clairement sur la figure IV-16 que quelle que soit la valeur de la vitesse de recombinaison à la jonction, lorsque le champ magnétique augmente, la résistance série aussi augmente très légèrement.

#### **IV-2-2-2. Influence de la vitesse de recombinaison aux joints de grain sur la résistance série**

Nous représentons sur la figure IV-17 suivante la résistance série  $R_s$  en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la vitesse de recombinaison aux joints de grain et pour les trois modes d'éclairage, les autres paramètres étant fixes.

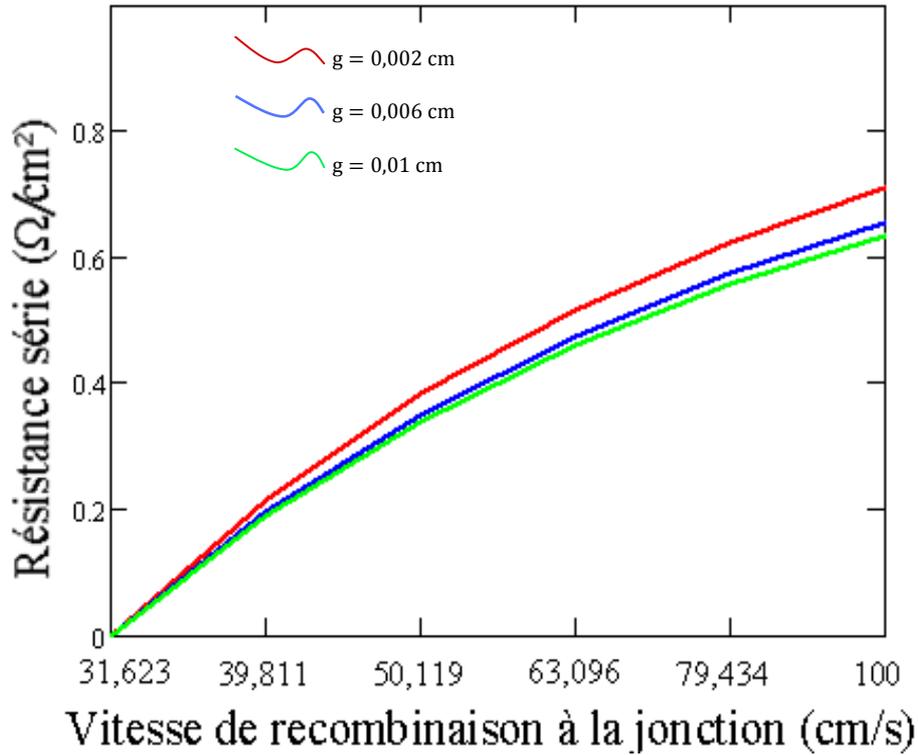


**Figure IV-17** : Résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la vitesse de recombinaison aux joints de grain, avec  $B = 10^{-5}$  T ;  $g = 0,007$  cm ;  $S_b = 10^5$  cm/s.

Sur la figure IV-17, quelle que soit la valeur de la vitesse de recombinaison à la jonction, la résistance série augmente légèrement lorsque la vitesse de recombinaison aux joints de grain augmente.

### IV-2-2-3. Influence de la taille des grains sur la résistance série

Nous représentons sur la figure IV-18 suivante la résistance série  $R_s$  en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la taille des grains.

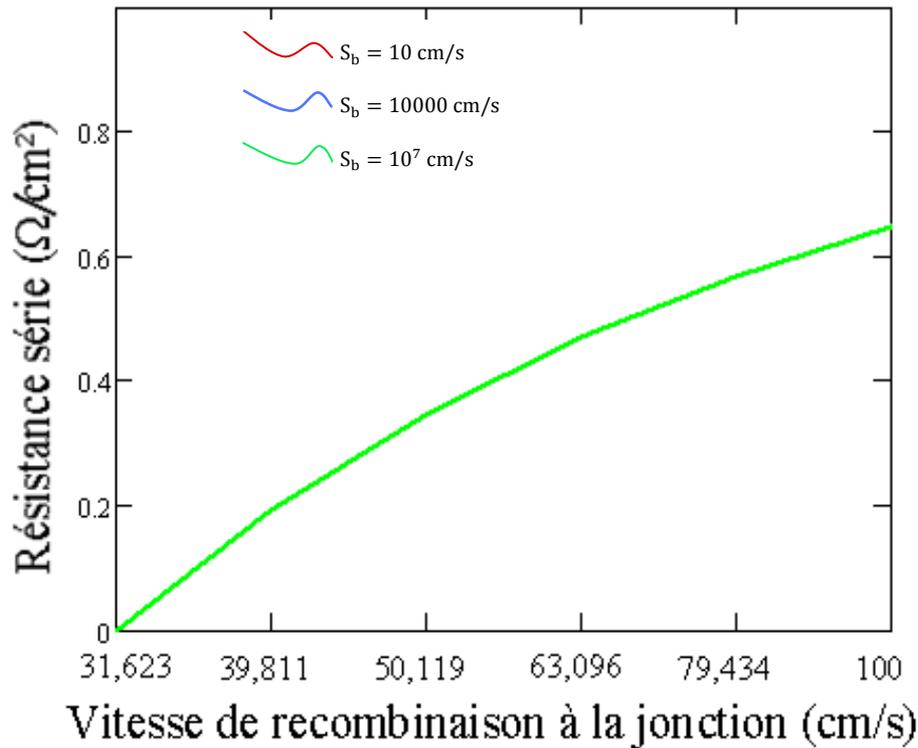


**Figure IV-18 :** Résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la taille des grains, avec  $B = 10^{-5} \text{ T}$  ;  $S_g = 1778 \text{ cm/s}$  ;  $S_b = 10^5 \text{ cm/s}$ .

Nous constatons sur la figure IV-18, que quelle que soit la valeur de la vitesse de recombinaison à la jonction, lorsque la taille des grains augmente, la résistance série diminue légèrement.

#### **IV-2-2-4. Influence de la vitesse de recombinaison à la face arrière sur la résistance série**

Nous représentons sur la figure IV-19 suivante la résistance série  $R_s$  en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la vitesse de recombinaison à la face arrière.



**Figure IV-19 :** Résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la vitesse de recombinaison à la face arrière, avec  $B = 10^{-5}$  T ;  $S_g = 1778$   $\text{cm/s}$  ;  $g = 0,007$   $\text{cm}$ .

Sur la figure IV-19 représentant la résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la vitesse de recombinaison à la face arrière, nous remarquons que les courbes sont confondues. Donc la vitesse de recombinaison à la face arrière n'a pas d'influence sur la résistance série.

## Conclusion

Ce chapitre a fait l'objet d'une étude de la caractéristique statique  $J_{ph}$ - $V_{ph}$  à partir de laquelle, nous avons proposé un modèle de détermination des paramètres électriques  $R_{sh}$  et  $R_s$ . L'influence des paramètres tels que le champ magnétique, la vitesse de recombinaison aux joints de grain, la taille des grains et la vitesse de recombinaison à la face arrière sur la caractéristique  $J_{ph}$ - $V_{ph}$  et sur les paramètres électriques a été mise en évidence. Nous avons aussi montré que la présence du champ  $B$  dans l'environnement où est placée la photopile diminue la production de courant et augmente la phototension. Nous avons eu aussi à montrer que plus la taille des grains est grande et moins la vitesse de recombinaison aux joints de grain est grande plus la photopile produit du courant et de la tension.

## Conclusion générale

Nous sommes ainsi arrivés de proche en proche à la fin de notre travail dans lequel nous avons, en régime statique et sous éclairage multispectral, déterminé les paramètres électriques  $R_{sh}$  et  $R_s$  d'une photopile bifaciale au silicium modélisée à trois dimensions et placée dans un champ magnétique. Pour y aboutir, nous avons d'abord résolu l'équation de diffusion et trouvé l'expression de la densité des porteurs de charge minoritaire en excès dans la base de la photopile à partir de laquelle nous avons tracé leur profil en fonction des différents paramètres et pour les différents modes d'éclairage. Nous avons ensuite à partir de ces résultats, déterminé les expressions de la densité de photocourant et de la phototension et nous les avons aussi représentées graphiquement en fonction des différents paramètres. Et c'est à partir du profil de la densité de photocourant en fonction des paramètres de recombinaison que nous avons déterminé et tracé le profil de ces derniers. Nous avons fini par tracer la caractéristique  $J_{ph}$ - $V_{ph}$  que nous avons étudiée, pour chaque mode d'éclairage, en vue de proposer un modèle de détermination des paramètres électriques  $R_{sh}$  et  $R_s$  que nous avons aussi représentés graphiquement en fonction des autres paramètres.

Il se dégage de notre travail d'importants aspects, notamment l'influence des paramètres tels que le champ magnétique, la vitesse de recombinaison aux joints de grain et la taille des grains. Nous avons retenu que la présence du champ magnétique dans le milieu réduit la capacité de la photopile à produire du courant et augmente celle de la production en tension et que plus les grains sont grandes et moins les recombinaisons aux joints de grains sont élevées plus la photopile est de bonne qualité.

Cependant il serait utile de faire d'autres études en vue de compléter et d'approfondir celles qui sont déjà faites. C'est ainsi que nous proposons :

- ✓ De faire l'étude de la capacité de la photopile à trois dimensions.
- ✓ De faire une étude de la photopile en régime transitoire par variation du champ sous éclairage constant et selon les trois modes d'éclairage.
- ✓ De reprendre cette étude en modélisation de la photopile en trois dimensions selon les trois modes d'éclairage.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] – **I. F. BARRO, I. ZERBO, O. H. LEMRABOTT, F. ZOUGMORE, G. SISSOKO**

“bulk and surface recombination parameters measurement in silicon”

17<sup>th</sup> European photovoltaic solar energy conference and exhibition Munich (2001) pp. 368-371

[2] – **K. Misiakos, C. H. Wang, A. Neugroschel, and F. A. Lindholm,**

J.Appl. Phys. 67 (1), (1990) 321-333

[3] – **M.ABADA-SIMON:** Arpèges/ observatoire de Paris

<http://www.bdl.fr/Granpub/Promenade/pages5/524.html>

[4] – **M.CRASSON:**

“Environmental health criteria 6, Magnetic fields” UNEP/WHO/IPRA Geneva: 1987

[5] – **J. Dugas**

Solar Energy Materials and Solar Cells, 32 (1994), pp. 71-88, North-Holland.

[6] – **J. E. Mahan and D. L. Barnes**

Solid-State Electronics, Vol. 24, N° 10, pp. 989-994, 1981, Printed in Great Britain.

[7] **R. Anil Kumar, M. S. Suresh and J. Nagaraju**

IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 48, No.9, September 2001

[8] – **R. R. Vardanyan, U. Kerst, P. Wawer, M. E. Nell, H. G. Wagemann**

2<sup>nd</sup> World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion, 6-10 July 1998, Vienna, Austria pp. 191-193.

[9] “ Etude en modélisation à 3 dimensions d’une photopile bifaciale au silicium polycristallin sous éclairage polychromatique en régime statique : influence des joints de grain sur les paramètres macroscopique et microscopique ” **A.K. KA**, Mémoire de DEA, UCAD, Dakar, 2004.

[10] – **JET PROPULSION LABORATORY:** California Institute of Technology

<http://www.jpl.nasa.gov/calendar> and <http://www.nigral.net/explora suite.html>

[11] – **Ecole National Supérieure des Mines de Saint-Etienne**

[http://www.emse.fr/~bouchardon/enseignement/axe\\_pn/up1/web/la\\_terre\\_est\\_ronde/tr\\_0303.htm](http://www.emse.fr/~bouchardon/enseignement/axe_pn/up1/web/la_terre_est_ronde/tr_0303.htm)

[12] – **Jose Furland and Slavko Amon**

Solid State Electronics, Vol. 28 (12) (1985) 1241-1243

[13] – **M. K. EL-ADAWI, I. A. AL-NUAIM**

Vaccum 64 (2002) 33-36

[14] – **S. MADOUGOU, B. DIENG, A. DIAO, I. F. BARRO, G. SISSOKO**

“Electrical parameters for bifacial silicon cell study in modeling: capacitance and space charge region width determination” journal des sciences pour l'ingénieur, (2005) 34-39

[15] – **S. MADOUGOU, F. MADE, M. S. BOUKARY and G. SISSOKO**

Advanced Materials Research Vols. 18-19 (2007) pp. 303-312

online at: <http://www.scientific.net>

[16] – **S. MBODJI, I. Ly, A. DIOUM, H. Ly DIALLO, I. F. BARRO, G. SISSOKO**

21<sup>st</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference, 4-8 Sept. (2006), Dresden, Germany, P.447-450.

[17] – **H. L. DIALLO, A Seïdou MAIGA, A WEREME and G. SISSOKO**

Eur. Phys J App Phys. 42, 203-211 (2008)

[18] – **F.I. BARRO, S. GAYE, M. DEME, H.L. DIALLO, M.L. SAMB, A.M. SAMOURA, S. MBODJI, G. SISSOKO**

Influence of grain size and grain boundary recombination velocity on the series and shunt resistances of a polycrystalline silicon solar cell

Proceedings of the 23rd European photovoltaic solar conference and exhibition, valencia, spain (sept 2008), p.612-615

[19] - **B. ZOUMA, A. S. MAIGA, M. DIENG, F. ZOUGMORE, G. SISSOKO**

3D Approach of spectral response for a bifacial silicon solar cell under a constant magnetic field  
Global Journal of Pure and Applied Sciences, Vol.15,N°1, 2009, pp.117-124

[20] – **K. BOUZIDI, M. CHEGAAR, A. BOUHEMADOU**

Solar Energy Materials & Solar Cell 91 (2007) 1647-1651

## ANNEXES MATHÉMATIQUES

Densité des porteurs de charge minoritaires

1- Equation de continuité :

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \delta(x, y, z) + [1 + (\mu B)^2] \frac{\partial^2}{\partial y^2} \delta(x, y, z) + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \delta(x, y, z) - \frac{\delta(x)}{L^{*2}} = - \frac{G(z)}{D^*} \quad (1)$$

2- Taux de génération

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

Avec n : nombre de soleil

3- Conditions aux limites

$$D^* \frac{\partial}{\partial x} \delta(z) = S_f \delta(z) \quad \text{à la jonction c'est à dire pour } x = 0 \quad (3)$$

$$D^* \frac{\partial}{\partial x} \delta(z) = -S_b \delta(z) \quad \text{à la face arrière c'est à dire pour } x = H \quad (4)$$

La solution générale de cette équation est :

$$\delta(x, y, z) = \sum_j \sum_k Z_{j,k}(z) \cos C_j x \cos C_k(B) y \quad \text{ou} \quad C_k(B) = \frac{C_k}{C(B)} \quad (5)$$

Les conditions aux limites aux joints de grain sont :

$$\left. \frac{\partial}{\partial x} \delta(x, y, z) \right|_{x=\pm \frac{g_x}{2}} = \mp \frac{S_{gb}}{2D^*} \delta\left(\pm \frac{g_x}{2}, y, z\right) \quad \text{et} \quad \left. \frac{\partial}{\partial y} \delta(x, y, z) \right|_{y=\pm \frac{g_y}{2}} = \mp \frac{S_{gb}}{2D^*} \delta\left(x, \pm \frac{g_y}{2}, z\right) \quad (6)$$

A partir de ces conditions aux limites aux joints de grain, on obtient les équations transcendentes suivantes :

$$\tan C_j \frac{g_x}{2} = \frac{1}{C_j} \times \frac{S_{gb}}{2D^*} \quad \text{et} \quad \tan C_k(B) \frac{g_y}{2} = \frac{1}{C_k(B)} \times \frac{S_{gb}}{2D^*} \quad (7)$$

Qui nous ont permis de trouver les  $c_k$  et les  $c_j$ .

En intégrant la solution générale dans l'équation de continuité, on a :

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \delta(x, y, z) = - \sum_j \sum_k Z_{j,k}(z) C_j^2 \sin(C_j x) \cos(C_k(B)y) \quad (8)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial y^2} \delta(x, y, z) = - \sum_j \sum_k Z_{j,k}(z) C_k^2(B) \cos(C_j x) \sin(C_k(B)y) \quad (9)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} \delta(x, y, z) = \sum_j \sum_k \cos(C_j x) \cos(C_k(B)y) \frac{\partial^2}{\partial z^2} Z_{j,k}(z) \quad (10)$$

$$\sum_j \sum_k [-Z_{j,k}(z) C_j^2 \cos(C_j x) \cos(C_k(B)y) - C^2(B) Z_{j,k}(z) C_k^2(B) \cos(C_j x) \cos(C_k(B)y) + \cos(C_j x) \cos(C_k(B)y) \partial^2 \partial z^2 Z_{j,k} - Z_{j,k} L^{*2} \cos(C_j x) \cos(C_k(B)y)] = -G(z) D^* \quad (11)$$

$$\sum_j \sum_k [\cos(C_j x) \cos(C_k(B)y)] \left[ \frac{\partial^2}{\partial z^2} Z_{j,k}(z) - (C_j^2 + C_k^2 + \frac{1}{L^{*2}}) Z_{j,k}(z) \right] = \frac{-G(z)}{D^*} \quad (12)$$

On pose :

$$\frac{1}{L_{j,k}^{*2}} = C_j^2 + C_k^2 + \frac{1}{L^{*2}} \quad (13)$$

Et donc on a :

$$\sum_j \sum_k [\cos(C_j x) \cos(C_k(B)y)] \left[ \frac{\partial^2}{\partial z^2} Z_{j,k}(z) - \frac{Z_{j,k}(z)}{L_{j,k}^{*2}} \right] = \frac{-G(z)}{D^*} \quad (14)$$

En multipliant par  $\cos(C_m x) \cos(C_n(B)y)$  et sommant sur x et y tous les membres de l'équation précédentes, on a :

$$\int_{-\frac{g_x}{2}}^{\frac{g_x}{2}} \int_{-\frac{g_y}{2}}^{\frac{g_y}{2}} [\cos(C_j x) \cos(C_k(B)y) \cos(C_m x) \cos(C_n(B)y)] \left[ \frac{\partial^2}{\partial z^2} Z_{j,k}(z) - \frac{Z_{j,k}(z)}{L_{j,k}^{*2}} \right] dx dy = -g_x^2 g_y^2 [\cos(C_m x) \cos(C_n(B)y)] - G(z) D^* dx dy \quad (15)$$

$$\text{si } m \neq j, \int_{-\frac{g_x}{2}}^{\frac{g_x}{2}} \int_{-\frac{g_y}{2}}^{\frac{g_y}{2}} [\cos(C_m x) \cos(C_j x)] = 0 \quad \text{et si } n \neq k, \int_{-\frac{g_x}{2}}^{\frac{g_x}{2}} \int_{-\frac{g_y}{2}}^{\frac{g_y}{2}} [\cos(C_k y) \cos(C_n(B)y)] = 0 \quad (16)$$

Donc l'équation précédente devient :

$$\int_{-\frac{g_x}{2}}^{\frac{g_x}{2}} \int_{-\frac{g_y}{2}}^{\frac{g_y}{2}} [\cos^2(C_j x) \cos^2(C_k(B)y)] \left[ \frac{\partial^2}{\partial z^2} Z_{j,k}(z) - \frac{Z_{j,k}(z)}{L_{j,k}^{*2}} \right] dx dy = \int_{-\frac{g_x}{2}}^{\frac{g_x}{2}} \int_{-\frac{g_y}{2}}^{\frac{g_y}{2}} [\cos(C_j x) \cos(C_k(B)y)] \frac{-G(z)}{D^*} dx dy \quad (17)$$

or

$$\cos^2 a = \frac{1 + \cos 2a}{2} \quad (18)$$

Donc on a :

$$\left[ \frac{\partial^2}{\partial z^2} Z_{j,k}(z) - \frac{Z_{j,k}(z)}{L_{j,k}^{*2}} \right] \int_{-\frac{g_x}{2}}^{\frac{g_x}{2}} \frac{1+\cos 2(C_j x)}{2} dx \int_{-\frac{g_y}{2}}^{\frac{g_y}{2}} \frac{1+\cos 2(C_k(B)y)}{2} dy = \frac{-G(z)}{D^*} \int_{-\frac{g_x}{2}}^{\frac{g_x}{2}} \cos(C_j x) dx \int_{-\frac{g_y}{2}}^{\frac{g_y}{2}} \cos(C_k(B)y) dy \quad (19)$$

$$\frac{1}{4} \left[ x + \frac{\sin 2(C_j x)}{2C_j} \right]_{-\frac{g_x}{2}}^{\frac{g_x}{2}} \left[ y + \frac{\sin 2(C_k(B)y)}{2C_k(B)} \right]_{-\frac{g_y}{2}}^{\frac{g_y}{2}} \left[ \frac{\partial^2}{\partial z^2} Z_{j,k}(z) - \frac{Z_{j,k}(z)}{L_{j,k}^{*2}} \right] = \frac{-G(z)}{D^*} \left[ \frac{\sin(C_j x)}{C_j} \right]_{-\frac{g_x}{2}}^{\frac{g_x}{2}} \left[ \frac{\sin(C_k(B)y)}{C_k(B)} \right]_{-\frac{g_y}{2}}^{\frac{g_y}{2}} \quad (20)$$

$$\frac{1}{4} \left[ g_x + \frac{\sin(C_j g_x)}{C_j} \right] \left[ g_y + \frac{\sin(C_k(B)g_y)}{C_k(B)} \right] \left[ \frac{\partial^2}{\partial z^2} Z_{j,k}(z) - \frac{Z_{j,k}(z)}{L_{j,k}^{*2}} \right] = \frac{-G(z)}{D^*} \times \frac{2\sin(C_j \frac{g_x}{2})}{C_j} \times \frac{2\sin(C_k(B) \frac{g_y}{2})}{C_k(B)} \quad (21)$$

En réduisant au même dénominateur et en multipliant par  $C_j C_k(B)$ , on obtient :

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} Z_{j,k}(z) - \frac{Z_{j,k}(z)}{L_{j,k}^{*2}} = \frac{-G(z)}{D^*} \times \frac{16 \sin(C_j \frac{g_x}{2}) \sin(C_k(B) \frac{g_y}{2})}{[C_j g_x + \sin(C_j g_x)][C_k(B)g_y + \sin(C_k(B)g_y)]} \quad (22)$$

Et donc en posant :

$$\frac{1}{D_{j,k}^*} = \frac{16 \sin(C_j \frac{g_x}{2}) \sin(C_k(B) \frac{g_y}{2})}{D^* [C_j g_x + \sin(C_j g_x)][C_k(B)g_y + \sin(C_k(B)g_y)]} \quad (23)$$

On a :

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} Z_{j,k}(z) - \frac{Z_{j,k}(z)}{L_{j,k}^{*2}} = \frac{-G_m(z)}{D_{j,k}^*} \quad (24)$$

Cette équation précédente est une équation différentielle du second ordre avec second membre.

Pour un éclairage par la face avant, elle devient :

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} Z_{j,k}(z) - \frac{Z_{j,k}(z)}{L_{j,k}^{*2}} = \frac{-n \sum_{i=1}^3 a_i e^{-b_i z}}{D_{j,k}^*} \quad \text{car } G(z) = n \sum_{i=1}^3 a_i e^{-b_i z} \quad (25)$$

D'équation caractéristique :

$$r^2 - \frac{1}{L_{j,k}^{*2}} = 0 \quad \rightarrow \quad r = \pm \frac{1}{L_{j,k}^*} \quad (26)$$

$$Z_{1j,k}(z) = A_{j,k} \sinh \frac{z}{L_{j,k}^*} + B_{j,k} \cosh \frac{z}{L_{j,k}^*} \quad (27)$$

$$Z_{2j,k}(z) = \sum_{i=1}^3 k_i e^{-b_i z} \quad \rightarrow \quad \frac{\partial}{\partial z} Z_{2j,k}(z) = \sum_{i=1}^3 -k_i b_i e^{-b_i z} \quad (28)$$

$$\rightarrow \frac{\partial^2}{\partial z^2} Z_{2j,k}(z) = \sum_{i=1}^3 k_i b_i^2 e^{-b_i z} \quad (29)$$

$$\text{D'où} \quad \sum_{i=1}^3 (k_i b_i^2 e^{-b_i z} - \frac{k_i}{L_{j,k}^{*2}} e^{-b_i z} + \frac{n}{D_{j,k}^*} a_i e^{-b_i z}) = 0 \quad \rightarrow \quad k_i = -\frac{n}{D_{j,k}^*} \frac{a_i L_{j,k}^{*2}}{b_i^2 L_{j,k}^{*2} - 1} \quad (30)$$

$$Z_{j,k}(z) = A_{j,k} \sinh \frac{z}{L_{j,k}^*} + B_{j,k} \cosh \frac{z}{L_{j,k}^*} + \sum_{i=1}^3 k_i e^{-b_i z} \quad (31)$$

Les coefficients  $A_{j,k}$   $B_{j,k}$  sont déterminés à partir des conditions aux limites à la jonction et à la face arrière.

### Densité de photocourant

Son expression est donnée par :

$$J_{ph} = \frac{qD^*}{g_x g_y} \int_{-\frac{g_x}{2}}^{\frac{g_x}{2}} \int_{-\frac{g_y}{2}}^{\frac{g_y}{2}} \left[ \frac{\partial}{\partial z} \delta(x, y, z) \right]_{z=0} dx dy \quad (32)$$

on obtient après les calculs :

$$J_{ph} = qD^* \sum_j \sum_k \frac{4 \sin(C_j \frac{g_x}{2}) \sin(C_k(B) \frac{g_y}{2})}{g_x g_y C_j C_k(B)} \left[ \frac{A_{j,k}}{L_{j,k}^*} - \sum_{i=1}^3 k_i b_i \right] \quad (33)$$

### Phototension

Son expression est donnée par la relation de BOLTZMANN en trois dimensions par:

$$V_{ph} = V_T \ln \left( 1 + \frac{1}{n_0} \int_{-\frac{g_x}{2}}^{\frac{g_x}{2}} \int_{-\frac{g_y}{2}}^{\frac{g_y}{2}} \delta(x, y, 0) dx dy \right) \quad \text{avec} \quad V_T = \frac{KT}{q} \quad \text{et} \quad n_0 = \frac{n_i^2}{N_b} \quad (34)$$

on trouve :

$$\Rightarrow V_{ph} = V_T \ln \left( 1 + \frac{1}{n_0} \sum_j \sum_k (B_{j,k} + \sum_{i=1}^3 k_i) \times \frac{4 \sin(C_j \frac{g_x}{2}) \sin(C_k(B) \frac{g_y}{2})}{C_j C_k(B)} \right) \quad (35)$$

Expressions des vitesses de recombinaison sont obtenues à partir de ces équations

$$\frac{\partial}{\partial S_f} J_{ph} = 0 \quad \text{pour } S_f \text{ grand} \Rightarrow S_b \quad (36)$$

$$\frac{\partial}{\partial S_b} J_{ph} = 0 \quad \text{pour } S_b \text{ grand } \Rightarrow S_f \quad (37)$$

Et donc en dérivant et en annulant ces expressions ci-dessus, on obtient les expressions des vitesses de recombinaison à la jonction et à la face arrière.

#### vitesse de recombinaison à la face arrière $S_b$

$$S_b = D^* \frac{\sum_j \sum_k \left\{ \frac{R_{j,k}}{L_{j,k}^* g v^2} \times \sum_i^3 \left[ k_{j,k}^i \times \left( L_{j,k}^* b_i (e^{-b_i H} - \cosh \frac{H}{L_{j,k}^*}) + \sinh \frac{H}{L_{j,k}^*} \right) \right] \right\}}{\sum_j \sum_k \left\{ \frac{R(p,u,v,j,k)}{L(p,u,v,j,k) g v^2} \times \sum_i^3 \left[ k_{j,k}^i \times \left( e^{-b_i H} - \cosh \frac{H}{L_{j,k}^*} + L_{j,k}^* b_i \sinh \frac{H}{L_{j,k}^*} \right) \right] \right\}} \quad (38)$$

#### vitesse de recombinaison à la jonction $S_f$

$$S_f = D^* \frac{\sum_j \sum_k \left\{ \frac{R_{j,k}}{L_{j,k}^* g v^2} \times \sum_i^3 \left[ k_{j,k}^i \times \left( \sinh \frac{H}{L_{j,k}^*} e^{-b_i H} - b_i L_{j,k}^* + b_i L_{j,k}^* \cosh \frac{H}{L_{j,k}^*} e^{-b_i H} \right) \right] \right\}}{\sum_j \sum_k \left\{ \frac{R(p,u,v,j,k)}{L(p,u,v,j,k) g v^2} \times \sum_i^3 \left[ k_{j,k}^i \times \left( 1 - \cosh \frac{H}{L_{j,k}^*} e^{-b_i H} - b_i L_{j,k}^* \sinh \frac{H}{L_{j,k}^*} e^{-b_i H} \right) \right] \right\}} \quad (39)$$